

Université du Québec
INRS-Géoressources

**Modélisation tridimensionnelle régionale et locale
de l'écoulement de l'eau souterraine
sur l'île de Montréal et au
Centre de Tri et d'Élimination des Déchets
de la Ville de Montréal.**

Par

Nicolas Lepage

Mémoire
présenté
pour l'obtention
du grade de Maître ès sciences (M. Sc.)
en sciences de la Terre

12 juillet 1996

© droits réservés de Nicolas Lepage 1996

RÉSUMÉ

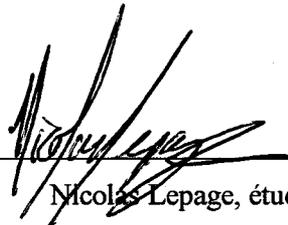
La modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine a été utilisée comme outil de prédiction pour la gestion du lixiviat au Centre de Tri et d'Élimination des Déchets (CTED) de la Ville de Montréal. Le CTED représente le plus grand site d'enfouissement sanitaire au Québec et le troisième en importance en Amérique du Nord. Présentement, au CTED, la majorité des eaux de lixiviation est acheminée vers une station de pompage située dans les déchets dans la zone la plus basse du site. Le pompage à cette station provoque l'acheminement, à travers les déchets, d'eau non contaminée provenant de l'extérieur du site. Cet apport d'eau propre a pour effet de diluer le lixiviat et d'augmenter les quantités d'eau à traiter. Cependant, étant donné certaines caractéristiques du site, plusieurs anomalies piézométriques ont été détectées depuis quelques années autour du site. Une bonne connaissance des caractéristiques hydrogéologiques du site et, plus particulièrement, de l'écoulement est nécessaire afin de mettre en oeuvre des mesures complémentaires de contrôle. L'utilisation d'un modèle numérique d'écoulement comme outil d'interprétation et d'intégration permet de parvenir à cet objectif.

Afin de mieux comprendre le contexte de l'écoulement local au CTED, un modèle régional d'écoulement est développé pour l'île de Montréal à l'aide du logiciel de simulation hydrogéologique MODFLOW. Ce modèle sert tout d'abord à caractériser les paramètres hydrologiques et hydrogéologiques moyens présents sur l'île. Il permet également de décrire et de définir l'écoulement régional. Une bonne compréhension de l'écoulement régional permet ensuite de définir les conditions limites du modèle local au CTED. À l'aide de MODPATH, les lignes d'écoulement de l'eau souterraine sur l'île de Montréal ont été tracées. Les résultats de la modélisation sont utilisés pour déterminer les conditions limites du modèle local au CTED ainsi que les dimensions du maillage local.

Le but de la modélisation locale est de déterminer les propriétés hydrogéologiques présentes au site du CTED et d'intégrer toutes les données de caractérisation actuellement disponibles afin de comprendre la dynamique de l'écoulement. Un premier modèle, développé avec le programme TOUGH2, a été réalisé afin de déterminer les conditions limites d'écoulement aux parois de la carrière Francon. Ce modèle en coupe permet de déterminer les hauteurs de suintement à la paroi de Francon. À

l'aide de ces résultats et de ceux obtenus précédemment par le modèle régional, un modèle tridimensionnelle local a été développé à l'aide des programmes TOUGH2 et FRAC3DVS. Ces deux modèles numériques sont utilisés afin de tenir compte des contraintes informatiques et de la complexité du problème.

Ultérieurement, l'un de ces modèles servira de base à un modèle plus complexe qui sera utilisé comme outil de gestion et de prédiction pour l'amélioration des infrastructures de contrôle du lixiviat au CTED. De plus, certaines hypothèses concernant l'étanchéité du site pourront alors êtres vérifiées.



Nicolas Lepage, étudiant



René Lefebvre
Directeur de recherche



René Therrien
Co-directeur de recherche

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mon directeur de recherche René Lefebvre, professeur à l'INRS-Géoressources, pour sa patience et les nombreuses heures passées à m'expliquer les notions d'hydrogéologie et de modélisation nécessaires à la compréhension et à l'avancement de ma maîtrise et du projet CTED. Je désire également remercier mon co-directeur René Therrien, professeur au département de géologie et génie géologique de l'université Laval, pour ces nombreux conseils face aux problèmes complexes de modélisation et son soutien dans mon apprentissage de FRAC3DVS. L'avancement de ce projet est également dû aux nombreuses conversations avec Miroslav Nastev, étudiant au doctorat au département de géologie et génie géologique de l'université Laval, qui m'a permis d'agrandir ma vision de la modélisation et de mieux comprendre TOUGH2. Je profite également de l'occasion pour remercier Pierre Therrien, également du département de géologie et de génie géologique de l'université Laval, pour ses conseils en modélisation, son humour et le support en informatique qu'il m'a fourni tout au long du projet. Cette étude est rattachée à d'autres projets reliés au CTED, dont font partie Chantal Blais (étudiante à la maîtrise à l'INRS-Géoressources) et Pascal Hamel (étudiant à la maîtrise à l'INRS-Géoressources), avec qui il a été possible d'échanger des connaissances afin de faire avancer le projet. Je désire souligner la contribution et la collaboration au projet CTED de: Olivier Tavchanjian (anciennement à l'INRS-Géoressources, présentement à INCO, Sudbury), Denis Isabel (ADS Groupe-Conseil), Pierre Gélinas (professeur au département de géologie et génie géologique de l'université Laval), Daniel Drouin (CTED) et Martin Héroux (CTED). Finalement, je tiens à remercier Alain Rouleau, professeur au département des sciences appliquées de l'université du Québec à Chicoutimi, qui a bien voulu réviser le manuscrit. Le financement de mes travaux a été supporté par le département de géologie et de génie géologique de l'université Laval les deux premières sessions et par l'Institut National de la Recherche Scientifique les sessions suivantes. Je tiens à remercier Aïcha Achab, directrice du Centre Géoscientifique de Québec, pour la confiance et les opportunités qu'elle m'a offertes au cours de mon séjour à l'INRS.

Je dédie mon mémoire de maîtrise à Guylaine qui a su me supporter et m'encourager tout au long de mon projet. Merci sincèrement.

TABLE DES MATIÈRES

Résumé	v
Remerciements	vii
Table des matières	ix
Liste des tableaux	xv
Liste des figures	xix
CHAPITRE 1: <u>INTRODUCTION</u>	1
1.1 PROBLÉMATIQUE	2
1.2 OBJECTIFS	3
1.3 TRAVAUX ANTÉRIEURS	4
1.3.1 CTED	4
1.3.2 Île de Montréal	6
1.3.3 Modélisation régionale	7
1.3.4 Modélisation appliquée à des sites d'enfouissement	8
1.4 MÉTHODOLOGIE	9
PARTIE I: MODÈLE D'ÉCOULEMENT RÉGIONAL – ILE DE MONTRÉAL	11
CHAPITRE 2: <u>CONTEXTE RÉGIONAL</u>	13
2.1 LOCALISATION	13
2.2 GÉOLOGIE DE LA ROCHE EN PLACE	15
2.2.1 Histoire géologique	15
2.2.2 Groupe du Beekmantown	17
2.2.3 Groupe du Chazy	18
2.2.4 Groupe du Black River	19
2.2.5 Groupe du Trenton	19
2.2.6 Groupe de l'Utica	19
2.3 GÉOLOGIE DES DÉPÔTS MEUBLES	20
2.3.1 Histoire géologique	20
2.3.2 Till de Malone	22
2.3.3 Complexe de Till Intermédiaire	23
2.3.4 Till de Fort Covington	23
2.3.5 Autres dépôts	24
2.3.5 Propriétés géotechniques des dépôts meubles	25

CHAPITRE 3: <u>MODÈLE CONCEPTUEL – modèle régional</u>	29
3.1 MODÈLE CONCEPTUEL.....	29
3.2 PIÉZOMÉTRIE DE L'ÎLE DE MONTRÉAL	32
3.3 NIVEAUX DU FLEUVE ST-LAURENT ET DE LA RIVIÈRE DES PRAIRIES	34
3.4 DONNÉES CLIMATIQUES	36
3.4.1 Précipitations	36
3.4.2 Évapotranspiration potentielle.....	40
3.5 ESTIMATION DU RUISSELLEMENT	45
3.5.1 Détermination du coefficient de ruissellement.....	45
3.5.2 Ruissellement	50
3.5.3 Évapotranspiration potentielle corrigée	51
3.6 ÉVALUATION DU TAUX DE POMPAGE SUR L'ÎLE DE MONTRÉAL	53
3.6.1 Pompage dans les carrières	53
3.6.2 Pompage dans le métro	54
3.6.3 Pompage dans les puits de l'île de Montréal	57
3.6.3.1 Puits industriels et commerciaux	58
3.6.3.2 Puits résidentiels.....	59
3.6.3.3 Piézométrie.....	62
3.7 BILAN HYDROLOGIQUE GLOBAL DE L'ÎLE DE MONTRÉAL	63
3.8 ESTIMATION INITIALE DES CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES	67
3.8.1 Conductivité hydraulique des dépôts meubles	67
3.8.2 Conductivité hydraulique du roc fracturé	73
3.8.3 Conductivité hydraulique du roc sain	73
CHAPITRE 4: <u>MODÈLE NUMÉRIQUE – modèle régional</u>	77
4.1 MODÈLE D'ÉCOULEMENT <i>MODFLOW</i>	78
4.1.1 Modèle mathématique.....	78
4.1.2 Méthode numérique	83
4.1.2.1 Méthode SIP	84
4.1.2.2 Méthode PCG2.....	86
4.2 DISCRÉTISATION SPATIALE	88
4.2.1 Couche 1	89
4.2.2 Couche 2.....	91
4.2.3 Couche 3.....	93
4.2.4 Coupes hydro-stratigraphiques du modèle conceptuel	93
4.3 ASSIGNATION DES PROPRIÉTÉS NODALES	94
4.3.1 Utilisation de la géostatistique.....	94
4.3.2 Piézométrie numérique.....	95

CHAPITRE 5: <u>RÉSULTATS ET DISCUSSION - modélisation régionale</u>	99
5.1 PARAMÈTRES CALIBRÉS	100
5.2 PIÉZOMÉTRIE SIMULÉE	102
5.3 DISTRIBUTION DE L'ERREUR	105
5.4 BILAN VOLUMÉTRIQUE	109
5.5 CELLULES SÈCHES	112
5.6 CONVERGENCE DE LA SOLUTION NUMÉRIQUE	112
5.7 MODÈLE LOCAL: CTED	116
5.7.1 Calibration locale	116
5.7.2 Lignes d'écoulement	118
5.7.3 Limites du maillage pour le modèle local	119
5.8 DISCUSSION	122
PARTIE II: MODÈLE D'ÉCOULEMENT LOCAL – CENTRE DE TRI ET D'ÉLIMINATION DES DÉCHETS DE LA VILLE DE MONTRÉAL (CTED)	125
CHAPITRE 6: <u>CONTEXTE LOCAL</u>	127
6.1 LOCALISATION	128
6.2 HISTORIQUE	129
6.3 DESCRIPTION DU SITE	130
6.3.1 Le CTED	130
6.3.2 L'enfouissement sanitaire	130
6.3.3 Le zonage du site	132
6.4 GESTION DES EAUX DE LIXIVATION	133
6.4.1 Lixiviat	133
6.4.2 Réseau de puits de surveillance	134
6.5 CONTEXTE GÉOLOGIQUE	135
CHAPITRE 7: <u>MODÈLE CONCEPTUEL - modèle local</u>	137
7.1 MODÈLE CONCEPTUEL	137
7.2 CONTEXTE HYDROLOGIQUE	138
7.2.1 Zone périphérique	139
7.2.2 Bilan pour le CTED	140
7.2.3 Pompage au CTED	142
7.3 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE	143
7.3.1 Piézométrie locale	144
7.3.2 Conductivité hydraulique	147

7.3.2.1 Déchets	147
7.3.2.2 Roc	148
7.3.2.3 Dépôts meubles	151
7.3.2.4 Littérature	151
7.3.3 Propriétés capillaires	153
7.3.3.1 Dépôts meubles	154
7.3.3.2 Déchets	155
7.3.3.3 Roc	155
7.4 MODÈLES NUMÉRIQUES	157
7.4.1 TOUGH2	159
7.4.1.1 Modèle mathématique	159
7.4.1.2 Équation d'état	160
7.4.1.3 Méthode numérique	162
7.4.2 FRAC3DVS	165
7.4.2.1 Modèle mathématique	165
7.4.2.2 Méthode numérique	166
CHAPITRE 8: <u>RÉSULTATS ET DISCUSSION - modélisation locale</u>	171
8.1 RÉSULTATS AVEC TOUGH2	172
8.1.1 Détermination des conditions limites à la paroi de Francon	172
8.1.2 Discrétisation spatiale pour le modèle local	185
8.1.2.1 Maillage raffiné	186
8.1.2.2 Maillage grossier	190
8.1.2.3 Résultats	192
8.2 RÉSULTATS AVEC FRAC3DVS	196
8.2.1 Discrétisation spatiale	197
8.2.2 Résultats de la calibration	201
8.2.3 Lignes de courant	210
8.2.4 Autres simulations	211
8.2.5 Simulation des zones fracturées	212
8.3 DISCUSSION	218
CHAPITRE 9: <u>CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS</u>	221
CHAPITRE 10: <u>BIBLIOGRAPHIE</u>	231
ANNEXE A: ÉTUDE PIÉZOMÉTRIQUE	245
A.1 Piézométrie	247
A.2 Topographie	253
ANNEXE B: DONNÉES CLIMATIQUES – ILE DE MONTRÉAL: PÉRIODE 1974-1993	255

ANNEXE C COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT ET SUPERFICIE IMPERMÉABLE ...	273
ANNEXE D: BANQUE DE DONNÉES DU MINISTÈRE DES TRANSPORTS.....	289
ANNEXE E: COUPES HYDRO-STRATIGRAPHIQUES DU MODÈLE CONCEPTUEL	293
ANNEXE F: DIFFÉRENCE ENTRE LA CHARGE SIMULÉE ET CELLE OBSERVÉE	305
ANNEXE G: CONVERGENCE DE LA SOLUTION NUMÉRIQUE.....	313
ANNEXE H: ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES DANS LA RÉGION DU CTED.....	321
ANNEXE I: COURBES DE PRESSION CAPILLAIRE ET DE PERMÉABILITÉ RELATIVE POUR LES DÉPÔTS MEUBLES, LES DÉCHETS ET LE ROC.....	325
ANNEXE J: EXEMPLES DE FICHIERS D'ENTRÉES DE MODFLOW, TOUGH2 ET FRAC3DVS.....	331
ANNEXE K: RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DES ZONES FRACTURÉES	349

LISTE DES TABLEAUX

1.1: Exemples d'application de la modélisation à des sites d'enfouissement.....	9
2.1: Formations géologiques de l'île de Montréal.....	18
2.2: Correspondance entre la classification USDA et le symbole utilisé.....	26
2.3: Caractéristiques géotechniques des dépôts meubles de l'île de Montréal.....	27
3.1: Moyenne annuelle du niveau du fleuve St-Laurent et de la rivière des Prairies.....	35
3.2: Stations météorologiques sur l'île de Montréal.....	36
3.3: Moyennes climatiques (précipitations et températures) pour chaque station.....	39
3.4: Évaluation de l'évapotranspiration potentielle pour l'île de Montréal à l'aide de la méthode de Thornthwaite.....	41
3.5: Valeurs mensuelles moyennes du rayonnement solaire global.....	42
3.6: Évaluation de l'évapotranspiration potentielle pour l'île de Montréal à l'aide de la méthode de Turc.....	43
3.7: Comparaison entre différentes valeurs d'évapotranspiration.....	44
3.8: Coefficient de ruissellement moyen.....	46
3.9: Coefficient de ruissellement attribué selon le type de surface.....	47
3.10: Pourcentage de la superficie totale selon chaque type d'occupation du sol et coefficient de ruissellement (C_R) calculé.....	48
3.11: Taux de pompage dans les carrières de l'île de Montréal.....	54
3.12: Débits d'infiltration dans le métro de la STCUM.....	57
3.13: Liste des puits industriels ou commerciaux exploités sur l'île de Montréal.....	60
3.14: Puits résidentiels sur l'île Montréal.....	61
3.15: Bilan hydrologique annuel moyen pour l'île de Montréal.....	65
3.16: Conductivité hydraulique des dépôts meubles selon la texture (classification USDA).....	68
3.17: Conductivités hydrauliques de dépôts meubles similaires à ceux de l'île de Montréal.....	70

3.18: Conductivité hydraulique moyenne des dépôts meubles de l'île de Montréal	71
3.19: Caractéristiques hydrauliques des unités lithologiques de l'île de Montréal	74
3.20: Valeurs typiques de conductivité hydraulique	74
3.21: Caractéristiques hydrauliques moyennes des unités lithologiques	75
5.1: Conductivité hydraulique des unités lithologiques de l'île de Montréal	100
5.2: Facteur d'anisotropie introduit lors de la calibration	101
5.3: Bilan volumétrique des sources et pertes selon chaque couche.....	110
5.4: Bilan volumétrique global des sources et des pertes	111
5.5: Résumé des différents paramètres numériques et critères de convergence utilisés.....	115
7.1: Niveaux piézométriques mesurés (1993 et 1994)	146
7.2: Conductivité hydraulique dans les déchets	148
7.3: Conductivité hydraulique moyenne du roc	150
7.4: Paramètres hydrauliques moyens pour un site d'enfouissement	152
7.5: Propriétés capillaires des dépôts meubles	154
7.6: Propriétés capillaires des déchets	155
7.7: Propriétés capillaires du roc.....	156
8.1: Calcul du flux théorique vers Francon pour une section unitaire	177
8.2: Paramètres hydrogéologiques	178
8.3: Paramètres par défaut utilisés par TOUGH2	178
8.4: Perméabilités (conductivités) calibrées pour le modèle en coupe.....	180
8.5: Résultats des simulations pour le modèle en coupe selon différents cas; les changements sont indiqués en gras [C.L.: conditions limites; Sat.: profil de pression et de saturation; Propriétés capillaires: paramètres de van Genuchten].....	181
8.6: Temps de calcul pour les différents cas simulés.....	181
8.7: Paramètres hydrogéologiques initiaux utilisés pour le modèles local avec TOUGH2.....	189
8.8: Conductivités hydrauliques calibrées pour le modèle local avec TOUGH2	194

8.9: Paramètres calibrés pour le modèle local avec FRAC3DVS	204
8.10: Paramètres numériques avec FRAC3DVS	204
8.11: Différence entre les niveaux simulés et observés pour les puits de surveillance au roc	207
8.12: Différence entre les niveaux simulés et observés pour les puits dans les déchets	208
8.13: Temps de calcul et nombre d'itération pour les trois cas de fracturation	214
8.14: Différence entre les niveaux observés et simulés pour les trois cas de fracturation comparativement au cas de base	215
8.15: Calcul des vitesses moyennes et flux moyen pour chaque section	217
A.1: Moyenne des écarts pour les points de mesures multiples (> 1 mois de différence)	248
B.1: Données climatiques: Station International	257
B.2: Données climatiques: Station Jardin Botanique	259
B.3: Données climatiques: Station Brébeuf	261
B.4: Données climatiques: Station Lafontaine	263
B.5: Données climatiques: Station McGill	265
B.6: Données climatiques: Station Rivière des Prairies	267
B.7: Données climatiques: Station Ste-Anne-de-Bellevue	269
B.8: Données climatiques: Station Ste-Geneviève	271
C.1: Secteur de recensement, population, superficie, superficie imperméable et coefficient de ruissellement	277
D.1: Banque de données des forages géotechniques du ministère des Transports (1994)	291
H.1: Épaisseur des dépôts meubles dans la région du CTED	323

LISTE DES FIGURES

1.1: Étapes de la modélisation.....	9
2.1: Carte de localisation – Ile de Montréal	14
2.2: Topographie de l’île de Montréal.....	15
2.3: Géologie de la roche en place sur l’île de Montréal	17
2.4: Géologie des dépôts meubles de l’île de Montréal	21
2.5: Épaisseur des dépôts meubles de l’île de Montréal	22
2.6: Classification USDA des tills de l’île Montréal.....	25
3.1: Carte piézométrique de référence.....	33
3.2: Carte du niveau du fleuve St-Laurent et de la rivière des Prairies	34
3.3: Moyennes climatiques (précipitations et températures) pour l’île de Montréal	38
3.4: Carte isocontour des précipitations moyennes sur l’île de Montréal	38
3.5: Moyenne mensuelle du rayonnement solaire global selon différentes périodes pour les stations Jean-Brébeuf et International.....	43
3.6: Différence entre la méthode de Thornthwaite et de Turc.....	44
3.7: Carte isocontour de l’évapotranspiration potentielle pour l’île de Montréal selon la méthode de Thornthwaite (1948) – <i>moyenne pour une année typique</i>	44
3.8: Distribution de la densité de population selon les secteurs de recensement (1991).....	47
3.9: Relation entre la densité de population et le coefficient de ruissellement	49
3.10: Carte isocontour du coefficient de ruissellement estimé	50
3.11: Carte isocontour du ruissellement annuel sur l’île de Montréal	51
3.12: Carte isocontour du facteur de correction pour l’évapotranspiration.....	52
3.13: Carte isocontour de l’évapotranspiration corrigée	52
3.14: Carte des carrières, du métro et des principaux puits de l’île de Montréal.....	55

3.15: Exemple d'un poste d'épuisement situé entre deux stations	56
3.16: Évolution de l'usage de l'eau souterraine sur l'île de Montréal.....	59
3.17: Carte isopièze calculée à partir du niveau dans les différents puits	63
3.18: Carte isocontour de l'infiltration annuelle (moyenne) sur l'île de Montréal	64
3.19: Bilan hydrologique mensuel typique	66
3.20: Triangle des textures USDA avec les courbes de conductivité hydraulique	68
3.21: Conductivité hydraulique équivalente selon une coupe type basée sur les dépôts meubles en surface	72
3.22: Carte isocontour de la conductivité hydraulique initiale de la couche 1	72
3.23: Carte de la conductivité hydraulique initiale de la couche 2.....	75
4.1: Exemple de discrétisation d'un aquifère	79
4.2: Notation pour la cellule i,j,k et les six cellules adjacentes (A) et notation pour le flux de la cellule $i,j-1,k$ vers la cellule i,j,k (B).....	81
4.3: Domaine simulé et conditions limites (couche 1 - 2 -3)	90
4.4: Distribution des cellules sèches pour la couche 1	91
4.5: Élévation de la base couche 1 (A) - couche 2 (B) et couche 3 (C).....	92
4.6: Emplacement des coupes du modèle conceptuel présentés à l'annexe E	94
4.7: Points de discrétisation utilisés pour le krigeage des propriétés nodales	96
4.8: Carte isopièze numérique de l'île de Montréal	97
5.1: Carte de la conductivité hydraulique calibrée pour la couche 2	101
5.2: Cartes piézométriques simulées.....	103
5.3: Emplacement des coupes montrant la différence entre la piézométrie simulée par le modèle et celle observée	104
5.4: Comparaison entre la piézométrie observée et celle simulée	106
5.5: Carte de la distribution de l'erreur absolue	106
5.6: Pourcentage cumulatif de l'erreur absolue pour l'intervalle 0-5 mètre	107
5.7: Distribution du signe de l'erreur.....	107

5.8: Graphique des charges observées versus les charges simulées	108
5.9: Coupe schématique montrant l'écoulement radial	111
5.10: Distribution des cellules sèches pour la couche 1 en fonction de l'itération	113
5.11: Différence entre la charge simulée par le modèle régional et la charge observée dans la région du CTED.....	117
5.12: Charges simulées versus charges observées pour les piézomètres de la région du CTED... 117	
5.13: Simulation des lignes de courant pour le modèle régional de l'île de Montréal.....	118
5.14: Rabattement simulé pour déterminer le rayon d'influence des puits de pompage du CTED et de la carrière Francon	120
5.15: Limite du maillage pour la modélisation locale	121
5.16: Piézométrie simulée par le modèle régional pour les secteurs du CTED et de la carrière Francon.....	121
6.1: Carte de localisation de la zone modélisée et topographie autour du CTED	128
6.2: Évolution de l'enfouissement des déchets au CTED.....	131
6.3: Composition des déchets de la Ville de Montréal	131
6.4: Zones d'enfouissement au CTED et élévation du fond de l'ancienne carrière Miron.....	133
6.5: Réseau des puits de surveillance et des piézomètres sur le site.....	134
6.6: Coupe géologique typique au CTED	135
6.7: Distribution des dépôts de surface autour du CTED	136
7.1: Coefficient de ruissellement autour du CTED.....	139
7.2: Variation du débit pompé à la station de pompage #1 du CTED	143
7.3: Piézométrie régionale autour du CTED	144
7.4: Piézomètres échantillonnés en juin 1994.....	145
7.5: Piézométrie mesurée et interprétée au CTED en juin 1994	145
7.6: Emplacement des essais dans les déchets interprétés par Blais (1995)	148
7.7: Emplacement des essais dans le roc interprétés par Blais (1995).....	149

7.8: Distribution de la conductivité hydraulique mesurée par les essais d'injection d'eau	150
7.9: Discrétisation spatiale et géométrie pour la méthode des différences finies intégrales	162
8.1: Localisation du modèle en coupe	173
8.2: Coupe schématique entre le CTED et la carrière Francon	174
8.3: Modèle conceptuel (coupe vers Francon); les paramètres hydrogéologiques indiqués représentent les valeurs initiales avant calibration.....	174
8.4: Maillages utilisés pour le modèle en coupe	179
8.5: Résultats de la modélisation en coupe pour le maillage raffiné. (A) condition limite: puits; (B) condition limite: gradient de pression et de saturation	183
8.6: Résultats de la modélisation en coupe pour le maillage grossier. (A) condition limite: puits; (B) condition limite: gradient de pression et de saturation	184
8.7: Zone non saturée et saturée pour le cas 2 [maillage A et conditions limites imposées par un gradient de pression et de saturation].....	185
8.8: Discrétisation tridimensionnelle souhaitable pour le modèle local avec TOUGH2.....	187
8.9: Discrétisation de la topographie du fond du CTED et de la géométrie du CTED et de la carrière Francon	188
8.10: Discrétisation tridimensionnelle utilisée pour le modèle local avec TOUGH2.....	191
8.11: Résultats de la modélisation locale avec TOUGH2	193
8.12: Lignes d'écoulement dérivées des charges hydrauliques obtenues avec TOUGH2 pour la modélisation locale au CTED.....	195
8.13: Discrétisation utilisée pour le modèle local avec FRAC3DVS	198
8.14: Topographie du terrain et pente du maillage	199
8.15: Discrétisation de la topographie du fond du CTED	200
8.16: Coupe schématique montrant la discrétisation verticale au CTED	201
8.17: Coupe montrant les niveaux piézométriques de surface et profond mesurés dans les puits de surveillance en périphérie du CTED.....	202
8.18: Piézométrie calibrée avec FRAC3DVS	205
8.19: Comparaison entre le niveau piézométrique simulé et observé pour certains puits en périphérie du site (même coupe que la figure 8.17)	206

8.20: Calibration pour l'ensemble des puits de surveillance au roc	207
8.21: Modèle en coupe montrant l'effet transitoire du pompage dans les déchets sur les niveaux d'eau mesurés dans les puits de biogaz	209
8.22: Lignes d'écoulement pour le modèle local (résultats de FRAC3DVS).....	210
8.23: Piézométrie obtenue en négligeant la topographie variable du fond du CTED	212
8.24: Vues en plan et en coupe montrant l'emplacement des zones plus perméables entre le CTED et la carrière Francon utilisées pour la simulation de l'effet potentiel de la fracturation	213
8.25: Lignes d'écoulement pour le cas des tubes de plus grande perméabilité (représentation en plan de l'écoulement – cas C de la figure 8.25)	215
8.26: Emplacement des coupes.....	216
A.1: Distribution de la différence entre deux mesures en fonction de intervalle de temps entre ces mesures	248
A.2: Localisation des forages où plusieurs mesures ont été prises et dont la différence des niveaux est supérieure à un mètre.....	249
A.3: Localisation des forages pour la période avant 1970	249
A.4: Localisation des forages pour la période 1970-1980	250
A.5: Localisation des forages pour la période 1980-1989	250
A.6: Localisation de tous les forages [<i>période 1933-1989</i>]	251
A.7: Piézométrie krigée pour la période 1970-1980	252
A.8: Piézométrie krigée pour la période 1980-1989	252
A.9: Piézométrie krigée pour toutes les données.....	253
A.10: Comparaison entre la piézométrie krigée pour la période 1970-1980 et celle pour le période 1980-1989.....	253
A.11: Topographie krigée à partir de toutes les données	254
C.1: Secteur choisit pour déterminer le coefficient de ruissellement.....	275
E.1: Coupes hydro-stratigraphiques du modèle conceptuel [coupe AA' et BB'].....	295
E.2: Coupes hydro-stratigraphiques du modèle conceptuel [coupe CC'].....	296
E.3: Coupes hydro-stratigraphiques du modèle conceptuel [coupe DD']	297

E.4: Coupes hydro-stratigraphiques du modèle conceptuel [coupe EE']	298
E.5: Coupes hydro-stratigraphiques du modèle conceptuel [coupe FF' et GG']	299
E.6: Coupes hydro-stratigraphiques du modèle conceptuel [coupe HH' et II']	300
E.7: Coupes hydro-stratigraphiques du modèle conceptuel [coupe JJ']	301
E.8: Coupes hydro-stratigraphiques du modèle conceptuel [coupe KK']	302
E.9: Coupes hydro-stratigraphiques du modèle conceptuel [coupe LL']	303
F.1: Différence entre la charge hydraulique simulée et celle observée	307
G.1: Progression de la convergence – méthode SIP	315
G.2: Progression de la convergence – méthode PCG2 (itérations internes et externes)	316
G.3: Progression de la convergence – méthode PCG2 (itérations externes seulement)	317
G.4: Distribution du résidu pour chaque couche en utilisant la méthode SIP	318
G.5: Distribution du résidu pour chaque couche en utilisant la méthode PCG2	319
G.6: Distribution du résidu en fonction des méthodes de solution numérique (SIP et PCG2) et de la couche du modèle conceptuel	320
I.1: Courbes de pression capillaire (A) et de perméabilité relative (B) en fonction de la saturation pour les dépôts meubles	327
I.2: Courbes de pression capillaire (A) et de perméabilité relative (B) en fonction de la saturation pour les déchets	328
I.3: Courbes type de pression capillaire en fonction de la teneur en eau pour le calcul des paramètres de van Genuchten pour le roc	329
I.4: Courbes de pression capillaire (A) et de perméabilité relative (B) en fonction de la saturation pour le roc	330
K.1: Piézométrie pour le cas de référence (cas de base simulé avec FRAC3DVS)	351
K.2: Piézométrie obtenue en considérant un plan fracturé (cas A)	351
K.3: Piézométrie obtenue en considérant deux plans fracturés (cas B)	352
K.4: Piézométrie obtenue en considérant plusieurs zones fracturées (cas C)	352
K.5: Carte isocontour des vitesses passant à travers les sections A-B et C pour le cas de référence (cas de base simulé avec FRAC3DVS)	353

K.6: Carte isocontour des vitesses passant à travers les sections A-B-C pour le cas d'un plan fracturé (cas A)	353
K.7: Carte isocontour des vitesses passant à travers les sections A-B-C pour le cas de deux plans fracturés (cas B)	354
K.8: Carte isocontour des vitesses passant à travers les sections A-B-C pour le cas de plusieurs zones fracturées (cas C)	354

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Au cours des dernières années, la modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine a connu un essor considérable. Le nombre de publications sur ce sujet (articles, livres, logiciels) n'a cessé de croître. La maturité de l'application de la modélisation numérique en hydrogéologie se reflète par la publication récente de plusieurs normes et guides de l'American Society for Testing and Materials (ASTM) (*ASTM, 1993; ASTM, 1994a; ASTM, 1994b; ASTM, 1994c; ASTM, 1995a et ASTM, 1995b*). Aux États-Unis, la modélisation est devenue une pratique courante dans la majorité des projets liés à la gestion, à la protection ou à la restauration d'aquifères.

La complexité des problèmes considérés par la modélisation numérique n'a pas non plus cessé d'évoluer. Autrefois, un simple problème d'écoulement dans un milieu poreux saturé à une dimension pouvait représenter un effort informatique important. Aujourd'hui, l'efficacité des méthodes numériques jumelée à la performance accrue des ordinateurs, permet par exemple, de simuler le transport et les réactions en trois dimensions d'un contaminant dans un milieu à saturation variable où l'on représente les fractures de façon discrète (*Therrien, 1992*). Tous ces facteurs, reliés à la sensibilité grandissante pour les problèmes environnementaux, contribuent présentement à faire de la modélisation numérique une discipline en expansion. La modélisation numérique peut servir d'outil d'intégration des données de terrain, de validation des processus

hydrogéologiques présents à un site ou de prédiction et de gestion (*Anderson et Woessner, 1992*). Les applications de la modélisation numérique sont donc nombreuses et très variées (*Anderson et Woessner, 1992*).

1.1 PROBLÉMATIQUE

Dans le cadre d'un projet conjoint entre la Ville de Montréal, l'Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-Géoressources) et l'Université Laval (*Lefebvre et al., 1994; 1995*), il a été proposé d'utiliser la modélisation comme outil de prédiction et de gestion pour un site d'enfouissement. Le site choisi pour cette étude est le Centre de Tri et d'Élimination des Déchets (CTED) de la ville de Montréal, situé sur les terrains de l'ancienne carrière Miron.

Ce site représente le plus gros lieu d'enfouissement sanitaire au Québec et le troisième en importance en Amérique du Nord (*Fortin et Thibault, 1994*). Le site d'enfouissement couvre une superficie totale de plus de 190 ha, dont 80 ha sont utilisés pour l'enfouissement des déchets (42%). La zone excavée a une largeur d'environ 900 mètres et une longueur de plus de 2 200 mètres. Le plancher des zones d'enfouissement se situe entre les élévations -25 et -40 mètres (par rapport au niveau moyen de la mer [*p/r au N.M.M.*]) et l'épaisseur des déchets varie entre 65 et 80 mètres. La région autour du CTED se situe à une élévation topographique naturelle variant entre +30 et +50 mètres. Le CTED est situé à environ 1,8 km de la rivière des Prairies et à 800 mètres de la carrière Francon. Cette dernière couvre une superficie d'environ 110 ha, soit 500 m de largeur par 2 300 m de longueur. Le fond de l'excavation, à la carrière Francon, se situe à l'élévation -40 m. La profondeur de l'excavation est de plus de 80 mètres. Actuellement, le CTED reçoit annuellement 600 000 tonnes de déchets, dont 250 000 tonnes représentent la quantité de déchets domestiques de la Ville de Montréal. Le reste provient des industries, des commerces et, à l'occasion, des villes avoisinantes (*Lefebvre et al., 1994*). Le CTED évalue à environ 31 millions de tonnes la quantité de déchets enfouis à ce jour dans l'ancienne carrière Miron (*Rouillard et Bodineau, 1995*). De plus, il est le seul au Québec à être situé dans une ancienne carrière, milieu caractérisé par un roc hautement fracturé (*Hamel, 1995*). Finalement, une autre particularité qui rend ce site unique, est le fait qu'il soit situé en milieu urbain (*Fortin et Thibault, 1994*).

Un tel site d'enfouissement représente une source potentielle de contamination environnementale. Lorsqu'il y a infiltration et circulation d'eau dans la masse de déchets, il peut y avoir solubilisation des différentes composantes chimiques de ces déchets. Nous observons alors la formation d'eau contaminée (lixiviat) qui peut migrer vers l'extérieur du site. La saine gestion d'un site d'enfouissement de déchets requiert un contrôle de ce phénomène afin d'éliminer les risques pour l'environnement et la santé humaine.

Présentement, au CTED, la majorité des eaux de lixivation est acheminée vers une station de pompage située dans les déchets, dans la zone la plus basse du site. Le pompage à cette station provoque l'acheminement à travers les déchets, d'eau non contaminée provenant de l'extérieur du site. Cet apport d'eau propre a pour effet de diluer le lixiviat et d'augmenter les quantités d'eau à traiter. Les eaux de lixivation, une fois traitées, sont rejetées à l'égout municipal. Un système de puits de surveillance du lixiviat et des biogaz a été installé autour du site (*Rouillard et Bodineau, 1995*). Ce programme de surveillance des eaux de lixivation permet de faire quotidiennement plus de 1 000 analyses et de mesurer plus de 300 paramètres. Plusieurs anomalies ont été détectées depuis quelques années autour du site (*Rouillard et Bodineau, 1995*). Des mesures de correction sont présentement en préparation.

Une bonne connaissance des caractéristiques hydrogéologiques du site et, plus particulièrement, de l'écoulement est nécessaire afin d'améliorer l'efficacité des mesures de contrôle du lixiviat par la mise en place prévue de nouvelles infrastructures (*Bodineau, 1994*). L'utilisation d'un modèle numérique d'écoulement comme outil d'interprétation et d'intégration a pour but d'aider à parvenir à cet objectif. De plus, il est possible, par la suite, de se servir d'un tel modèle pour aider à la gestion du site.

1.2 OBJECTIFS

Le présent projet porte sur la modélisation de l'écoulement de l'eau souterraine sur l'île de Montréal et au CTED de la ville de Montréal. Afin de mieux comprendre et situer l'écoulement local au CTED, un modèle régional d'écoulement est développé pour l'île de Montréal. Ce modèle sert tout d'abord à caractériser les paramètres hydrologiques et hydrogéologiques moyens présents sur l'île. Il permet également de décrire et de définir l'écoulement régional.

Une bonne compréhension de l'écoulement régional permet ensuite de définir les conditions limites du modèle local au CTED. Le but de la modélisation locale est de déterminer les propriétés hydrogéologiques présentes au site du CTED et d'intégrer toutes les données actuellement disponibles afin de comprendre la dynamique de l'écoulement. Ce modèle servira de base au développement d'un outil de gestion et de prédiction soutenant les opérations futures de contrôle du lixiviat au CTED. Plus précisément, le modèle local servira à vérifier certaines hypothèses concernant l'étanchéité du site (*Rouillard et Bodineau, 1995*) et à déterminer les données devant être acquises afin de mieux comprendre et représenter numériquement la dynamique de l'écoulement au CTED.

1.3 TRAVAUX ANTÉRIEURS

Une revue des différentes études reliées aux objectifs du projet est présentée. Afin de couvrir tous les objectifs, nous traiterons de quatre sujets: (1) rapports portant sur l'hydrogéologie au CTED; (2) hydrologie, hydrogéologie et géologie de l'île de Montréal; (3) exemples de modélisation régionale utilisant une approche télescopique afin de déterminer les conditions limites autour d'un site et (4) exemples de modélisation pour l'étude de sites d'enfouissement.

1.3.1 CTED

Plusieurs études hydrogéologiques ont été conduites au CTED, mais aucune n'a tenté d'intégrer toutes les données générées par les diverses études dans un modèle global utilisable pour le suivi et la gestion du site. Nous présentons ici une brève description des différentes études réalisées depuis 1979 au CTED.

La première étude hydrogéologique du site a été effectuée par Poulin (1979). Il a décrit et caractérisé les propriétés hydrauliques du roc et l'écoulement autour du site. La conductivité hydraulique du roc a été déterminée à l'aide d'essais de pompage et d'injection d'eau dans six forages. La composition chimique de l'eau pompée lors des essais a également été caractérisée. Les études de Wright et Sarrailh (1983), de Tremblay (1983) et de Verge (1987) rapportent

plusieurs mesures de la conductivité hydraulique obtenues par des essais d'injection d'eau, des essais de pompage ou des essais de type Lefranc, mais n'ajoutent pas beaucoup à la compréhension de l'hydrogéologie du site.

Plus récemment, une importante étude de caractérisation du milieu fracturé a été réalisée par Géophysique GPR International inc. (1990). Cette étude comprenait des relevés géologiques et géophysiques ainsi que des essais d'injection d'eau dans 34 nouveaux forages carottés et 37 forages à percussion. Les données abondantes fournies par cette étude permettent une meilleure compréhension du contexte géologique et donnent une bonne description du milieu fracturé. Suite à cette étude, un programme de surveillance du lixiviat et du biogaz a été implanté. Une série de 21 puits de surveillance ont été mis en place autour du site ainsi que dans les parcs avoisinants (Rouillard et Bodineau, 1995). Benhouhou et Simundic (1993) rapportent les résultats de 34 séries d'essais d'injection d'eau pour déterminer la conductivité hydraulique dans les nouveaux puits de surveillance, tandis que Les Constructions R.R.N. inc. (1993) présentent les dessins des nouveaux puits tels que construits avec la description des lithologies rencontrées et les résultats des essais d'injection d'eau.

Rouillard et Bodineau (1995) présentent les résultats d'une étude en cours qui vise à mettre en place un système complémentaire pour le contrôle et le traitement du lixiviat au CTED. Cette étude a permis de préciser les propriétés du roc et des déchets par des essais de pompage et d'injection. Elle a aussi fourni des données sur les niveaux piézométriques dans les puits de surveillance qui permettent de mieux comprendre l'écoulement autour du site. De plus, 10 puits de captage des biogaz permettent la mesure du niveau d'eau dans les déchets. Blais (1995) fait actuellement l'interprétation détaillée des essais de pompage qui ont été réalisés au CTED depuis 1979. Cette étude fera la synthèse des propriétés hydrogéologiques représentatives du roc fracturé et des déchets au CTED.

Ces études sont indispensables au choix et à la mise en oeuvre des nouvelles options complémentaires de contrôle du lixiviat qui sont présentées par Bodineau (1994). Ces options visent à assurer l'étanchéité du site du côté de la carrière Francon. Les quatre alternatives retenues sont: (1) l'interception du lixiviat au moyen d'une rangée de puits forés dans la roche encaissante; (2) la constitution d'une barrière hydraulique au moyen d'une série de puits d'injection d'eau dans le roc de façon à inverser le sens d'écoulement dans les fissures; (3) l'augmentation du pompage du

lixiviât dans les déchets en constituant une batterie de nouveaux puits et (4) la réalisation d'un rideau étanche au sein de la roche encaissante en injectant toutes les fissures avec un coulis de ciment. Bodineau (1994) priorise l'injection d'eau dans le roc afin de confiner le lixiviât à l'intérieur du site du CTED. Cependant, il reste de nombreuses incertitudes sur les conditions d'écoulement ainsi que sur les propriétés hydrauliques du roc et des déchets. L'intégration de toutes ces données permettra, à l'aide de la modélisation, une analyse plus poussée des conditions d'écoulement.

1.3.2 Île de Montréal

Peu d'études régionales ont été réalisées sur l'hydrogéologie de l'île de Montréal. Outre l'étude de Bériault et Simard (1978), très peu d'informations récentes sont disponibles à ce sujet. Ces auteurs ont réalisé en fait la seule étude détaillée de la piézométrie de l'île de Montréal. La carte piézométrique résultant de leurs travaux est une des principales sources de données pour notre étude. Freeze (1964) a effectué une étude sur les ressources en eau souterraine pour la partie sud du fleuve St-Laurent (région de Lachine/St-Jean). Tremblay (1962) a réalisé la cartographie hydrogéologique pour la région de Vaudreuil. La Ville de Montréal a effectué trois études géotechniques d'envergure. Ces études sont appliquées aux secteurs du Centre-Ville (*Ville de Montréal, 1984*), de Rivière des Prairies (*Ville de Montréal, 1979*) et de Pointe-aux-Trembles (*Ville de Montréal, 1985*). Même si ces rapports présentent des cartes isopièzes détaillées, ces dernières ne peuvent cependant être utilisées étant donné leur nature trop locale.

La Ville de Montréal possède une énorme banque de données constituée de tous les forages effectués sur l'île au cours des ans (*Robillard, 1995*). L'information disponible est composée, entre autres, d'une description lithologique des forages ainsi que des niveaux de la nappe. Malgré la disponibilité récente de toute cette information, aucune étude régionale n'a été réalisée à l'aide de ces données. L'intégration de ces données pourrait fournir une nouvelle estimation des niveaux piézométriques moyens sur l'île de Montréal.

Grice et Eggboro (1978) ont travaillé sur la qualité des eaux souterraines de l'île de Montréal. Ils ont fait une étude géochimique des eaux de l'île. Konan (1984) a discuté de la géochimie des infiltrations d'eau observées dans les tunnels à Montréal. Plus récemment, Tousignant (1989) a présenté une étude sur les relations entre la nappe phréatique et les ouvrages

souterrains en milieu urbain et a analysé les venues d'eau observées en tunnel sur l'île de Montréal. Cependant, aucune nouvelle donnée sur la piézométrie de l'île de Montréal n'y est présentée.

La géologie de l'île de Montréal est principalement décrite dans Hode-Keyser (1965), Clark (1972) et Hofmann (1972). Prest et Hode-Keyser (1982) ont fait la description géologique et géotechnique des dépôts meubles de l'île de Montréal. Boyer et al. (1985) présentent un résumé de la géologie, de la géotechnique et de l'hydrogéologie de l'île de Montréal.

1.3.3 Modélisation régionale

À ce jour, il n'existe aucune étude de modélisation régionale de l'eau souterraine pour l'île de Montréal ou les environs. Cependant, plusieurs études de ce type ont été réalisées pour d'autres aquifères régionaux. À cause de l'échelle du système hydrogéologique impliqué, qui est de l'ordre du kilomètre, ce type de modélisation requiert une approche particulière. Nous présentons ici une liste de quelques exemples de modèle régionaux d'écoulement qui illustrent l'approche régionale et qui ont servi à déterminer les conditions limites pour une modélisation locale plus détaillée.

Ward et al. (1987) ont utilisé la technique du maillage télescopique afin d'étudier l'écoulement pour un site industriel fortement contaminé. Cette technique consiste à utiliser les résultats d'un modèle régional afin d'assigner les conditions limites à un modèle local. Pour ce faire, ils ont d'abord modélisé l'écoulement dans l'aquifère régional en deux dimensions. Par la suite, un modèle en trois dimensions à cinq couches a été développé pour représenter l'écoulement local sur une partie du maillage régional. Finalement, un modèle en trois dimensions à six couches, représentant l'écoulement et le transport dans la zone supérieure de l'aquifère, a été construit afin de représenter l'écoulement immédiatement autour du site. Cette approche sera utilisée dans le cadre du présent projet.

Teutch et Hofmann (1990) ont utilisé la même approche afin de prédire la zone de protection autour de puits de pompage. Un modèle régional en deux dimensions utilisant la méthode des éléments finis a d'abord été calibré. Par la suite, deux modèles, un local et un à l'échelle du site, ont été développés en se basant sur une méthode de différences finies. Les résultats des modèles régionaux et locaux servent à définir les conditions limites. Broyd et al.

(1989) se servent également d'un modèle régional en deux dimensions afin de déterminer les conditions limites d'un modèle local.

Il est clair que le système régional d'écoulement doit être connu afin de mieux simuler les conditions aux limites de la zone modélisée localement. L'importance de la modélisation du système régional est discutée par Nawalany (1990). Généralement, lorsqu'un système régional est modélisé, seulement deux dimensions sont considérées. Pour ce faire, l'épaisseur de l'aquifère est supposée négligeable par rapport à son extension horizontale et le système est ainsi réduit à deux dimensions (*Kovacs, 1986*).

Sur la base de ces études, l'approche choisie consiste à modéliser l'écoulement sur l'île de Montréal non pas en deux dimensions mais plutôt en trois dimensions afin de mieux représenter chaque unité et de déterminer ses propriétés moyennes. L'aquifère principal de l'île de Montréal est situé en partie dans le roc fracturé. Étant donné le nombre important de fractures à l'échelle régionale, le domaine modélisé peut être approximé par un milieu poreux équivalent (*Kramer et Haitjema, 1989*). Cet aquifère est recouvert de matériaux meubles dont la composition et les propriétés varient grandement à l'échelle de l'île.

1.3.4 Modélisation appliquée à des sites d'enfouissement

Rouillard et Bodineau (1995) ont tenté de modéliser l'écoulement au CTED. Malgré l'intérêt de leur approche, leur modèle n'avait pas les capacités requises et ne tenait pas compte de tous les facteurs nécessaires pour bien représenter la complexité de l'écoulement au CTED. Ainsi, les conditions limites étaient imposées sans tenir compte des conditions régionales. De plus, seulement deux dimensions et une seule couche étaient considérées. Cet effort de modélisation ne sera donc pas utilisé pour soutenir la présente étude.

Plusieurs études ont été publiées sur la modélisation de l'écoulement (et du transport de contaminants) pour un site d'enfouissement. Le tableau 1.1 présente un résumé de quelques exemples d'application de la modélisation à des sites d'enfouissement. La majorité de ces études considèrent l'écoulement seulement en deux dimensions. Molson (1988) démontre l'importance de tenir compte des trois dimensions afin de représenter les hétérogénéités présentes dans le milieu

poreux simulé. Dans notre cas, nous considérons l'écoulement en trois dimensions afin de prendre en considération toute la complexité et l'hétérogénéité du site.

TABLEAU 1.1: Exemples d'application de la modélisation à des sites d'enfouissement (XD: *X dimensions*; M: *Méthode numérique* (EF: *éléments finis*; DF: *différences finies*; EA: *éléments analytiques*; CF: *couches finies*); Mo: *Modèle* (É: *Écoulement*; T: *Transport*).

<i>Référence</i>	<i>Site</i>	<i>XD</i>	<i>M</i>	<i>Mo</i>	<i>But</i>
Andersen et al., 1984	Lipari, New Jersey	2D	DF	É	simulation du recouvrement
Molson, 1988	Borden, Ontario	3D	EF	É+T	importance de la modélisation en 3D
de Smedt et Bronders, 1989	Hooge Maey, Belgique	2D	EF	É+T	déterminer l'évolution de la contamination
Rowe et Booker, 1991		2D	CF	É+T	démonstration de la méthode (milieu fracturé)
Maslia et al., 1992	High Acres, New York	3D	EF	É	effet du recouvrement, conditions critiques
Franz et Rowe, 1993	Innisfil, Ontario	2D	DF	É+T	modèle régional et local: étendue de la contamination
Haitjema, 1993	Fulton, Indiana	2D	EA	É	vitesse d'écoulement

1.4 MÉTHODOLOGIE

Le présent mémoire de maîtrise se divise en deux parties. La première partie est consacrée au développement du modèle régional d'écoulement de l'île de Montréal. La deuxième partie porte sur le modèle d'écoulement local au CTED. L'approche méthodologique employée dans les deux cas est similaire. Elle est basée sur une approche globale de la modélisation telle que décrite dans Anderson et Woessner (1992) et ASTM (1993). La figure 1.1 illustre schématiquement les étapes du processus de la modélisation.

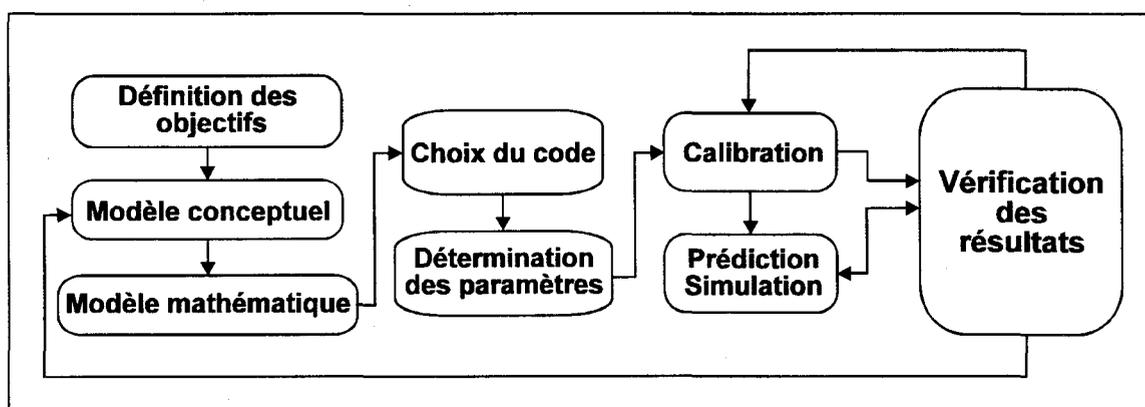


FIGURE 1.1: Étapes de la modélisation (adapté de Anderson et Woessner, 1992).

Tout d'abord, un modèle conceptuel est défini pour chaque cas. Le modèle conceptuel est défini comme étant la représentation schématique et simplifiée du système aquifère réel (*Anderson et Woessner, 1992; Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (CCME), 1994*). Suite à la compilation des données géologiques et hydrogéologiques, un modèle représentant le système aquifère est construit. Par la suite, diverses composantes sont ajoutées au modèle conceptuel de base. Par exemple, dans le cas de l'île de Montréal, un bilan détaillé est calculé afin de quantifier la recharge nette de l'aquifère. Les différents paramètres de ce bilan, comme le ruissellement et l'évapotranspiration, sont évalués de façon précise selon le type de surface et l'utilisation du sol. Dans ce bilan, nous tenons également compte des divers types de pompage présents sur l'île. Pour ce qui est du modèle local au CTED, un bilan hydrologique local est calculé en tenant compte de la nature et de la géométrie du site.

Étant donné que, dans les deux cas, une méthode numérique est utilisée afin de résoudre l'équation d'écoulement, les logiciels utilisés à cette fin sont décrits. Le maillage utilisé afin de discrétiser l'espace ainsi que les différentes conditions limites imposées sont aussi présentés pour chaque cas. Les propriétés hydrogéologiques sont assignées selon les résultats d'essais de pompage ou déduites à partir des compositions granulométriques des dépôts meubles pour le modèle local. Étant donné le peu d'informations disponibles pour le modèle régional, ces propriétés sont estimées à partir de valeurs théoriques disponibles qui sont calibrées par la suite.

La calibration du modèle régional de l'île de Montréal est guidée par la piézométrie de l'île telle que décrite par Bériault et Simard (1978). Les mesures du niveau d'eau effectuées en juin 1994 dans les différents piézomètres (*Rouillard et Bodineau, 1995*) servent d'étalon de calibration pour le modèle local au CTED. Suite à la calibration, une étude de la précision numérique de la solution et de la qualité de la calibration est effectuée. Une fois la calibration validée, il est possible d'effectuer des prédictions et des simulations. Dans le cas du modèle régional, les lignes d'écoulement de l'eau souterraine seront tracées afin de déterminer les conditions limites pour le modèle local au CTED. Le modèle local est utilisé pour intégrer l'ensemble des données actuellement disponibles au CTED et afin de vérifier certaines hypothèses concernant l'étanchéité du site.

PARTIE I

MODÈLE D'ÉCOULEMENT RÉGIONAL

ÎLE DE MONTRÉAL

CHAPITRE 2

CONTEXTE RÉGIONAL

2.1 LOCALISATION

L'île de Montréal, d'une superficie de 465 km², est la plus importante agglomération urbaine du Québec. Comprise entre les longitudes 45°20' et 45°45' et les latitudes 73°25' et 74°00', l'île de Montréal a une longueur de près de 50 kilomètres. La figure 2.1 présente les principaux points de repères ainsi que les routes importantes de la région métropolitaine de Montréal. Les principales carrières en opération (exploitation ou autre utilisation) sur l'île sont également présentées. Le site de l'ancienne carrière Miron (maintenant le Centre de Tri et d'Élimination des Déchets de la Ville de Montréal – CTED) est mis en évidence afin de localiser la région de la modélisation locale qui sera présentée dans la deuxième partie du présent mémoire.

La topographie de l'île de Montréal (figure 2.2) est peu accentuée avec une élévation générale variant entre 10 et 50 mètres au-dessus du niveau moyen de la mer (*N.M.M.*), sauf pour la région du Mont-Royal dont le sommet culmine à 229 mètres au-dessus du N.M.M. (*Boyer et al., 1985*). La topographie de l'île de Montréal a été déterminée à l'aide des cartes topographiques à l'échelle 1:20 000 de la région. Les courbes topographiques ont d'abord été numérisées puis interpolées pour avoir une valeur discrète de la topographie.

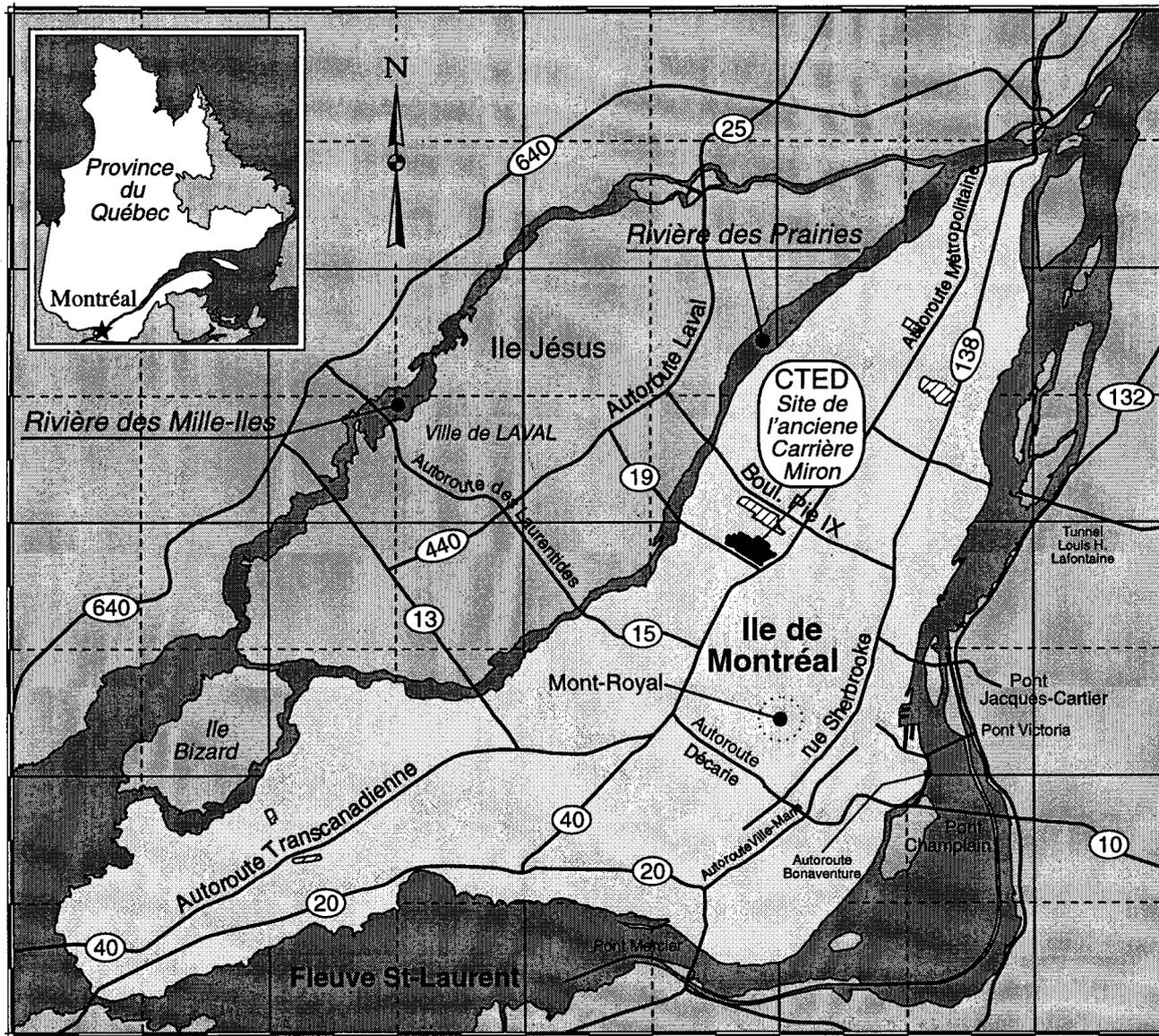


FIGURE 2.1

Carte de localisation

Ile de Montréal

LÉGENDE

 modélisation régionale

 modélisation locale

 Carrières

 Routes

Modélisation numérique de l'écoulement de l'eau souterraine sur l'île de Montréal (Québec)

Échelle en Km


L'archipel de Montréal est situé dans les Basses Terres du St-Laurent. Cette unité physiographique majeure est limitée au nord-est par le Bouclier Précambrien et par les Appalaches à l'est. L'île de Montréal est comprise entre le Fleuve St-Laurent au sud et la Rivière des Prairies au nord. Mis à part le canal Lachine, qui est une construction humaine, aucune rivière ou ruisseau n'est observé sur l'île.

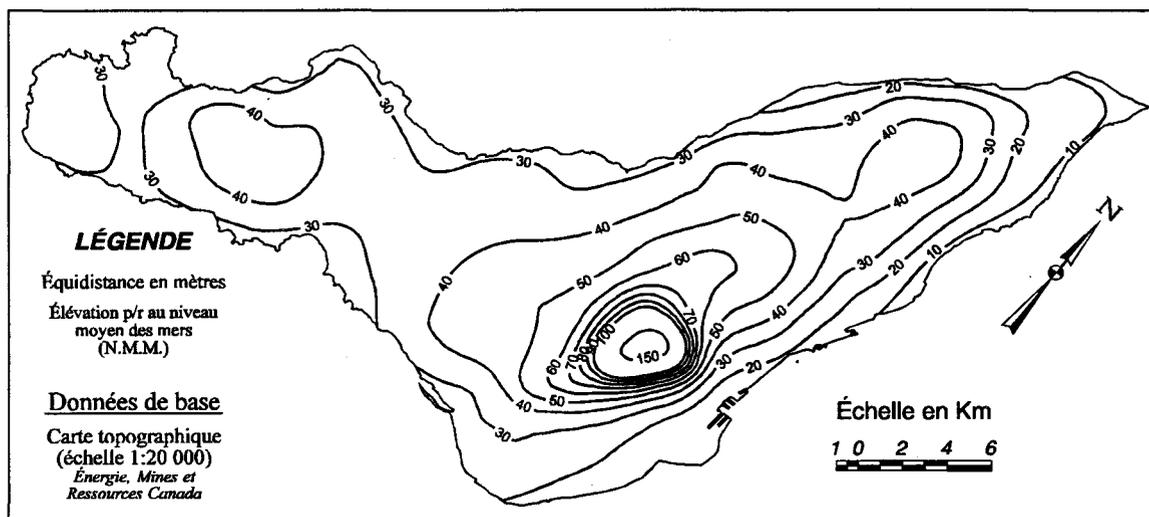


FIGURE 2.2: Topographie de l'île de Montréal.

2.2 GÉOLOGIE DE LA ROCHE EN PLACE

2.2.1 Histoire géologique

L'histoire géologique de la région de l'île de Montréal peut se résumer en cinq étapes. Premièrement, au Précambrien, il y a mise en place du socle rocheux igné. Par la suite, la transgression de la Mer Cambrienne permet la formation d'une série de roches sédimentaires détritiques — les grès de Postdam (*Hode-Keyser, 1965*). À l'Ordovicien, la sédimentation marine continue et produit les calcaires, dolomies et shales des formations du Beekmantown, du Chazy, du Black River, du Trenton, de l'Utica et du Lorraine (*Hode-Keyser, 1965*). Les roches sédimentaires alors formées sont considérées comme des dépôts de plateau continental. Les plus anciennes proviennent du Bouclier Précambrien au nord-ouest et les plus jeunes (shales et siltstones), du géosynclinal Appalachien (*Clark, 1972*). Vers la fin de l'Ordovicien, le plissement engendré par

l'orogénèse Taconienne a transformé ces strates horizontales en plis ouverts de faible amplitude. Il a également incliné légèrement la région vers le sud-ouest de quelques degrés; généralement, un pendage inférieur à 10 degrés est observé(Clark, 1972).

Plus tard, au Crétacé, il y a mise en place de masses ignées alcalines qui se refroidissent et cristallisent sous la surface. Suite à l'érosion, ces intrusions sont mises à découvert. Elles font partie d'une série d'intrusions nommées collines Montérégiennes dont le Mont-Royal est la seule évidence sur l'île de Montréal mis à part les nombreux dykes et filons-couches qui ont envahi la roche environnante (Clark, 1972).

Finalement, à partir du Pléistocène, il y a formation des dépôts meubles provenant de glaciations continentales. Suite à l'affaissement de la surface, une transgression marine (Mer de Champlain) s'effectue après le retrait de ces glaciers (Prest et Hode-Keyser, 1982). Les dépôts meubles laissés par ces événements sont décrits à la section 2.3.

La carte géologique de l'île de Montréal est présentée à la figure 2.3. Cette carte est une adaptation de celle publiée par Boyer et al. (1985). Elle présente, de façon simplifiée, les principales unités géologiques de l'île regroupées selon le groupe ou la lithologie majeure rencontrée. L'unité lithologique dominante est constituée par les calcaires du Trenton que l'on retrouve sur près des trois quarts de sa superficie. Les principales failles sont également représentées sur cette carte. Elles sont majoritairement orientées est-ouest et correspondent souvent aux contacts entre deux unités. On note également les axes des structures anticlinales et synclinales orientés presque nord-sud. Le tableau 2.1 résume les formations que l'on retrouve sur l'île de Montréal avec leur puissance (épaisseur) maximale. Les valeurs entre parenthèse sont des approximations car nous retrouvons peu ou pas de séquences stratigraphiques complètes de ces unités sur l'île.

Les principaux groupes présents sur l'île sont ceux du Beekmantown, du Chazy, du Black River, du Trenton et de l'Utica. Ces groupes constituent la majeure partie du roc situé sous les dépôts Quaternaires de l'île. Une brève description des principaux groupes est présentée; cette stratigraphie est le résumé des études réalisées par Clark (1972) et Hofmann (1972).

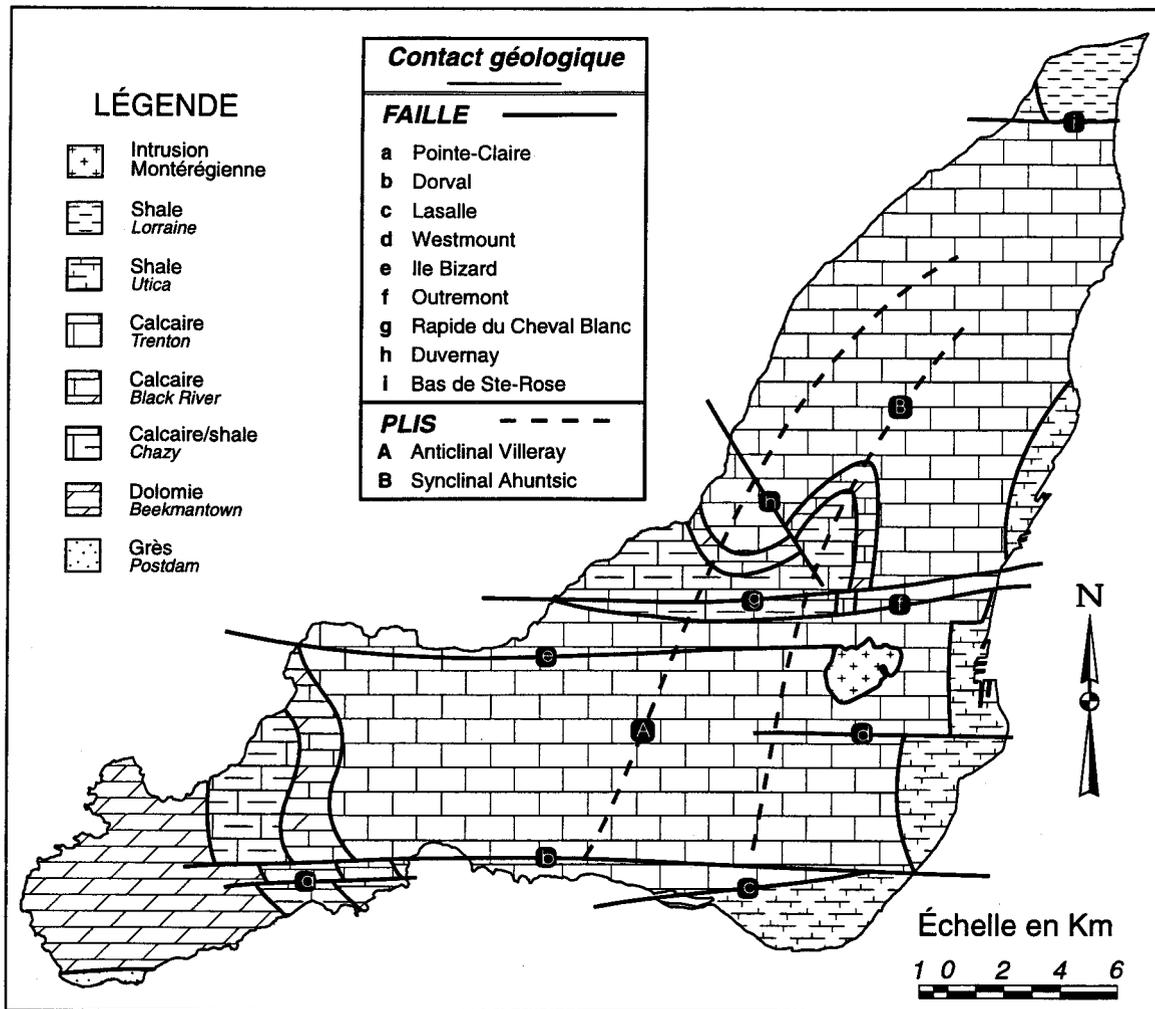


FIGURE 2.3: Géologie de la roche en place sur l'île de Montréal (adapté de Clark, 1972).

2.2.2 Groupe du Beekmantown

Le Groupe du Beekmantown est composé des formations de Thérèse et de Beauharnois. Seule cette dernière est présente sur l'île de Montréal. La formation de Beauharnois est principalement composée de dolomie cristalline en couches massives et homogènes dont l'épaisseur varie de 30 à 95 centimètres. Elle est parfois interstratifiée avec de la dolomie siliceuse ou des grès dolomitiques, surtout à la base. L'interstratification de calcaire et de shale s'accroît vers le sommet où les lits de shale sont plus importants. Cette formation affleure seulement dans la partie ouest de l'île.

TABLEAU 2.1: Formations géologiques de l'île de Montréal (adapté de Clark, 1972).

ÂGE	GROUPE <i>Formation</i>	LITHOLOGIE	ÉPAISSEUR <i>(en mètre)</i>		
CRÉTACÉ	Monterégienne	Plutons et dykes Gabbro, Syénite	-		
	<i>Roches ignées</i>				
ORDOVICIEN	Richmond	Grès et shale	(600)		
	Lorraine	Shale et siltstone	(900)		
	Utica	Shale noir	120		
	<i>Lachine</i>				
	Trenton	Calcaire et shale	120		
	<i>Tétreauville</i>				
	<i>Montréal</i>			Calcaire	115
	<i>Deschambault</i>			Calcaire	5
	<i>Mile End-Rockland</i>	Calcaire	7		
	Black River	Calcaire	7		
	<i>Leray</i>				
	<i>Lowville</i>			Calcaire	4
	<i>Pamélia</i>			Dolomie	3
Chazy	Calcaire	85			
<i>Laval</i>					
Beekmantown	Dolomie	250			
<i>Beauharnois</i>					
CAMBRIEN	Postdam	Grès	100 à		
	<i>Châteauguay</i>				
	<i>Covey Hill</i>			Grès	600
PRÉCAMBRIEN	Grenville Roches plutoniques et/ou métamorphiques				

2.2.3 Groupe du Chazy

La formation de Laval du groupe du Chazy est formée d'un calcaire à grains grossiers parfois argileux en couches ou bancs d'épaisseur très variable — 1 à 10 mètres. Le calcaire est interstratifié par endroits avec des lits de dolomie massive, de shale et des bancs de grès. Le grès et le shale dominant à la base tandis que les bancs de calcaire se retrouvent surtout à partir du milieu et jusqu'au sommet de la formation.

2.2.4 Groupe du Black River

À la base du groupe du Black River, on retrouve la formation de Pamélie. Elle est composée de dolomie et de dolomie schisteuse à litage épais (60 à 90 centimètres) avec de petits lits de shale dolomitique. Au milieu, la formation de Lowville est constituée de couches de calcaires variant de 20 à 30 centimètres d'épaisseur, interlitées par endroits de shale. Finalement, au sommet, la formation de Leray se compose principalement d'un calcaire cristallin se présentant en lits d'environ un mètre d'épaisseur.

2.2.5 Groupe du Trenton

Le groupe du Trenton se subdivise en cinq formations majoritairement constituées d'un calcaire noir à gris bleu, bien stratifié, très fossilifère avec des interlits argileux de quelques millimètres à 30 centimètres. Les formations de Rockland, de Mile-End et de Deschambault sont trois unités de faibles épaisseurs (10 mètres au total), composées de calcarénite massive se présentant en couches d'environ 20 centimètres et de calcaire argileux finement cristallin à litage irrégulier.

La formation de Montréal est principalement constituée de calcaire cristallin régulièrement lité parfois argileux et dont l'épaisseur varie de 10 à 15 centimètres. Le calcaire est interstratifié de minces lits (environ 2 centimètres) de shale calcaireux. La caractéristique principale de la formation de Tétreauville est un litage très régulier. Les lits de calcaire argileux ont une épaisseur moyenne de 15 centimètres alternant avec de minces lits de shale calcaireux.

2.2.6 Groupe de l'Utica

On retrouve le groupe de l'Utica seulement dans les parties sud et sud-est de l'île de Montréal, en bordure du fleuve St-Laurent. Cette formation est constituée de shale noir parfois légèrement calcaireux.

2.3 GÉOLOGIE DES DÉPÔTS MEUBLES

2.3.1 Histoire géologique

La mise en place de deux couches de till, à l'époque du Pléistocène, est due à deux glaciations d'âge Wisconsinien appelées épisodes de Malone et de Fort Covington. Ces tills sont généralement séparés par un assortiment variable de dépôts non glaciaires, glacio-lacustres, fluvio-glaciaires et glaciaires qui, ensemble, constituent le complexe de till intermédiaire. Ces dépôts se sont formés au cours de la fonte du glacier de Malone et sont considérés comme des dépôts du Wisconsin intermédiaire.

Par la suite, il y a environ 12 000 ans, une transgression marine a eu lieu et la mer a alors submergé le Mont-Royal jusqu'à une hauteur maximale d'environ 170 mètres. Le relèvement isostatique postglaciaire qui a suivi a engendré le retrait de la mer vers le nord-est, le long de la vallée du St-Laurent.

Sur l'île de Montréal, il y a environ 10 000 ans, la transition a commencé à se faire d'un milieu marin à un milieu d'estuaire et enfin à un milieu fluvial. À cette époque, la partie inférieure du versant ouest du Mont-Royal, dont l'altitude actuelle est de 50 mètres, a émergé. Ainsi, l'érosion qu'a subi le Mont-Royal entre les hauteurs de 170 et 50 mètres est de nature marine et littorale, tandis qu'à des niveaux inférieurs, l'île a été entièrement soumise à une érosion estuarienne et fluviale. Au moment où l'estuaire s'était retiré de l'extrémité nord-est de l'île de Montréal, les eaux du fleuve St-Laurent avaient déjà entaillé les endroits les plus élevés du centre et de l'ouest de l'île jusqu'à environ 30 mètres de profondeur (*Prest et Hode-Keyser, 1982*).

Outre les dépôts de tills nous retrouvons sur l'île, une série de dépôts marins associés à la Mer de Champlain. Ces dépôts sont composés de sables et graviers généralement coquilliers, combinés à des argiles et limons calcaires d'eau profonde. Superposés à ceux-ci, se trouvent des dépôts d'origine fluvio-lacustres: des sables et graviers, des argiles non-calcaires et finalement des marnes, tourbes et boues organiques.

La figure 2.4 présente la répartition des dépôts meubles à la surface de l'île de Montréal. Cette carte est une adaptation simplifiée de celle publiée par Prest et Hode-Keyser (1982). Les différents dépôts de surface sont regroupés selon l'époque (épisode) de déposition. Nous remarquons dans la partie centre-est de l'île une grande superficie où la roche en place affleure; il ne reste plus de dépôts meubles à ces endroits. La majorité de l'île est recouverte, en surface, par un till non-différencié (soit le till de Malone, intermédiaire ou de Fort Covington). Le till basal est surtout présent dans la partie est de l'île le long des affleurements en surface. La périphérie de l'île est généralement recouverte par une couche d'argile de la Mer de Champlain qui représente le deuxième dépôt en importance sur l'île. Le contour ouest du Mont-Royal est surtout constitué d'une faible couche de sable et gravier de la Mer de Champlain.

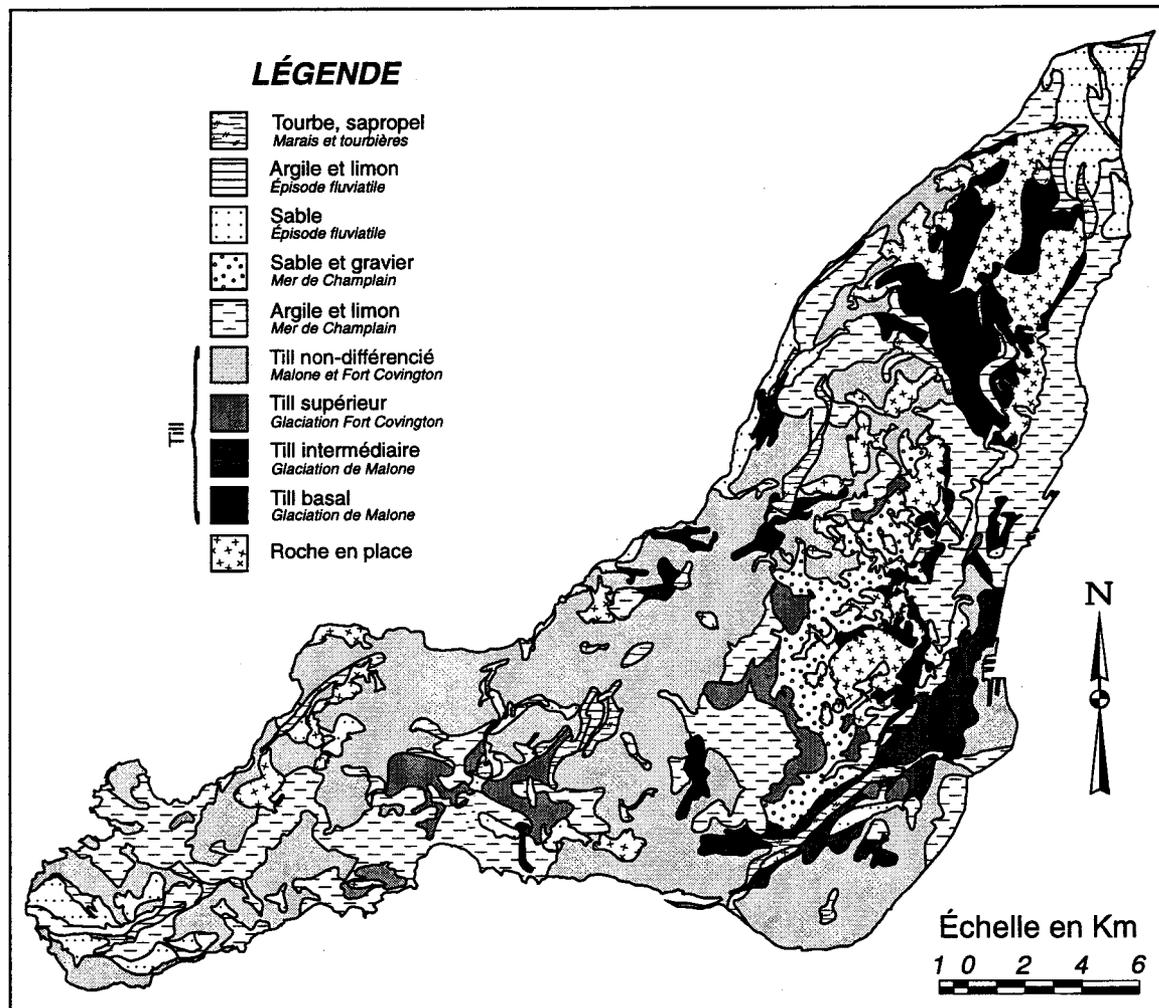


FIGURE 2.4: Géologie des dépôts meubles de l'île de Montréal
(adapté de Prest et Hode-Keyser, 1982).

La figure 2.5, adaptée de Prest et Hode-Keyser (1982), représente l'épaisseur des dépôts meubles. L'épaisseur des dépôts varie de quelques mètres à un peu moins de 30 mètres. L'épaisseur moyenne de cette couche est de 6 mètres. L'épaisseur des dépôts de surface est assez uniforme sauf pour certaines régions. Les dépôts les plus épais se retrouvent à l'extrémité est de l'île et le long du fleuve St-Laurent, dans la partie est de l'île. En examinant les figures 2.4 et 2.5, nous remarquons qu'il existe une corrélation entre les régions où la roche en place affleure (partie centre-est et région du Mont-Royal) et celles où une faible épaisseur des dépôts meubles est présente.

Il est évident que, localement, nous puissions observer une plus grande variabilité dans l'épaisseur des dépôts meubles. Toutefois, étant donné la nature régionale de cette étude, il est acceptable de ne conserver que la tendance générale de cette variation spatiale de l'épaisseur des dépôts meubles. Nous allons discuter, dans les sections qui suivent, des propriétés des principales unités de dépôts meubles.

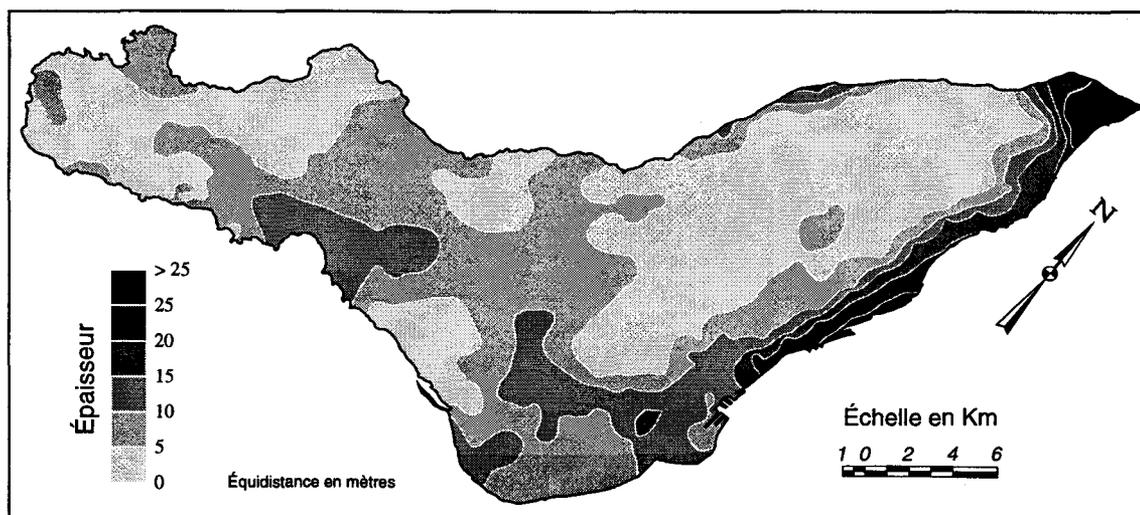


FIGURE 2.5: Épaisseur des dépôts meubles de l'île de Montréal
(adapté de Prest et Hode-Keyser, 1982).

2.3.2 Till de Malone

Le till de Malone est généralement dense et constitué de matériaux pierreux et d'une matrice sableuse ou silteuse. La grosseur des pierres varie de petits cailloux à d'énormes blocs.

Généralement, les gros blocs sont constitués de calcaire ou de dolomie provenant des formations paléozoïques qui n'ont pas été transportées bien loin de leur source. Sur l'île de Montréal, le till de Malone repose habituellement sur le socle rocheux et est considéré comme le till basal (*Prest et Hode-Keyser, 1982*).

D'après des études en laboratoire (*Prest et Hode-Keyser, 1982; Boyer et al. 1985*), le till basal de Malone est généralement bien trié et composé de pierres dont jusqu'à 40% ont plus de 19 mm (¾ pouces). La portion de particules en dessous de 19 mm comprend de 10 à 50% de gravier et de 15 à 40% de sable moyen et grossier. Les matériaux plus fins n'excèdent généralement pas 70%. Bien que le pourcentage de particules fines varie de 30 à 60%, l'analyse de 136 échantillons a montré que le pourcentage d'argile (< 2 µm) varie de 1 à 12% avec une moyenne de 6% (*Prest et Hode-Keyser, 1982*).

2.3.3 Complexe de Till Intermédiaire

Ce terme s'applique à un mélange variable de tills rocheux, silteux, sableux et d'intercalage de sédiments graveleux et silteux bien stratifiés et de lentilles non structurées de silt et de sable fin. Ce complexe a été vraisemblablement déposé durant une période courte et tardive de l'Interstade Wisconsin Intermédiaire, près de la marge variable de la calotte glaciaire de Malone. L'épaisseur de la formation varie de quelques centimètres à environ 3 mètres (*Prest et Hode-Keyser, 1982*).

2.3.4 Till de Fort Covington

Le till de Fort Covington, till supérieur de l'île de Montréal, est composé de silt plus ou moins argileux et est rarement rocheux. Il contient des dépôts meubles non stratifiés qui proviennent de l'avance du dernier glacier qui recouvrait la région. En général, la dimension des roches du till supérieur varie de petits galets à des gros cailloux. Localement, là où le glacier de Fort Covington a creusé le till de Malone ou le socle rocheux, le till est grossier plutôt que fin (*Prest et Hode-Keyser, 1982*).

L'analyse granulométrique d'un grand nombre d'échantillons de till supérieur indique qu'en général le till est fin. Il comprend très peu de roches ou de particules dont les dimensions excèdent 19 mm; pas plus de 20% des particules n'excèdent 2 mm. Par contre, il est composé de plus de 60% de particules fines de moins de 0.074 mm. L'analyse hydrométrique de 12 échantillons donne un pourcentage d'argile qui se situe entre 4 et 14%, avec une moyenne de 7% (*Prest et Hode-Keyser, 1982*).

2.3.5 Autres dépôts

Outre les différents tills présent sur l'île de Montréal, des dépôts provenant des épisodes de la Mer de Champlain et de l'épisode fluvial du St.-Laurent sont observés. Ces dépôts sont principalement des argiles et silts ainsi que des sables et graviers. Les dépôts postglaciaires recouvrent généralement les dépôts glaciaires et occasionnellement le roc (*Boyer et al., 1985*).

On désigne généralement les sables et graviers marins par: *sable de Saxicava*, les silts et argiles marines par: *argile de Leda* (*Prest et Hode-Keyser, 1982*). Les dépôts de sables et graviers sont uniformément triés et ont une teneur en eau élevée. Nous retrouvons localement des lits d'argiles dans ces dépôts (*Prest et Hode-Keyser, 1982*).

L'argile de la Mer de Champlain possède une structure ouverte et est fortement sensible. L'indice de sensibilité est rarement sous 15 (*Boyer et al., 1985*). La teneur en eau naturelle varie de 30 à 80% avec un indice des vides naturels se situant entre 80 et 300% (*Boyer et al., 1985; Leroueil et al., 1983*). L'argile marine non altérée est généralement gris foncé bleu selon le pourcentage relatif d'argile et de silt (*Prest et Hode-Keyser, 1982*). La fraction argileuse ($< 2 \mu\text{m}$) est majoritairement composée de farine de roche dérivée des particules fines du drift glaciaire (*Leroueil et al., 1983*). On observe également une augmentation de la proportion de phyllosilicates pour un pourcentage d'argile croissant. Le mica constitue plus de 80% de ces phyllosilicates (*Leroueil et al., 1983*).

Des mesures de la conductivité hydraulique horizontale saturée démontrent que la conductivité hydraulique horizontale est généralement supérieure à la conductivité verticale. En moyenne, un facteur d'anisotropie de l'ordre de 1,1 (K_h/K_v) est observé (*Leroueil et al., 1983*). Cependant, ces caractéristiques de K_h et K_v ont été mesurées sur des échantillons homogènes

d'argiles non fissurées. Elles ne reflètent pas nécessairement la conductivité de masse des dépôts argileux dans lesquels la présence de strates, fissures ou autres discontinuités peuvent avoir une influence considérable.

2.3.5 Propriétés géotechniques des dépôts meubles

Nous avons repris les résultats des essais granulométriques effectués sur 320 échantillons de tills de la région de Montréal (*Prest et Hode-Keyser, 1982*) afin de les classer selon le triangle des textures de l'*United States Department of Agriculture (United States Department of Agriculture (USDA), 1972)*. La figure 2.6 présente le résultat de ces essais et le tableau 2.2 donne la correspondance entre les symboles utilisés à la figure 2.6 et la classification de l'USDA.

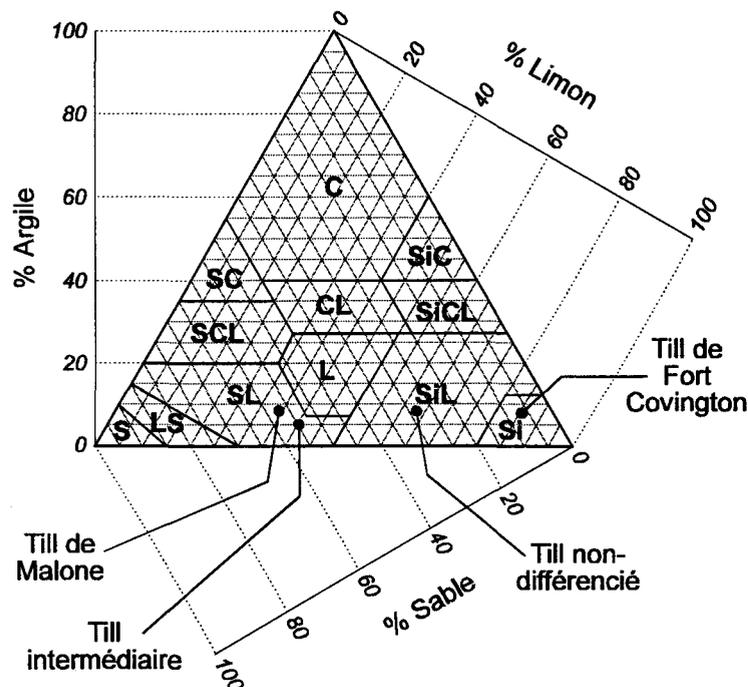


FIGURE 2.6: Classification USDA des tills de l'île Montréal.

TABLEAU 2.2: Correspondance entre la classification USDA et le symbole utilisé.

<i>Classification</i>	<i>Symbole</i>	<i>Classification</i>	<i>Symbole</i>
Argile	C	Argile sablonneuse	SC
Limon argileux	CL	Limon argileux-sableux	SCL
Limon	L	Silt	Si
Sable limoneux	LS	Argile silteuse	SiC
Sable	S	Limon-silteux	SiL
Limon sablonneux	SL	Limon silteux-argileux	SiCL

Le till de Malone et le till intermédiaire sont classifiés comme des limons sablonneux (SL) tandis que le till de Fort Covington, plus fin, est considéré comme un silt (Si). Étant donné que le till non-différencié est comparable à une moyenne des autres tills présents sur l'île, il est normal que sa classification se situe entre les tills de Malone et intermédiaire et le till de Fort Covington. Il est donc considéré comme limon silteux (SiL). Cette classification est importante car elle permet de caractériser et catégoriser les types de tills présents sur l'île. Cette classification sera utile, par exemple, lors de l'attribution des propriétés hydrauliques des différents dépôts meubles (*voir chapitre 3, section 3.8.1*).

Le tableau 2.3 présente un résumé des diverses propriétés géotechniques des dépôts meubles de l'île de Montréal. Selon l'épisode de déposition et le type de dépôts, une série de paramètres géotechniques comme le poids unitaire, la teneur en eau et la conductivité hydraulique est présentée. La caractéristique la plus importante est, sans contredit, la distribution granulométrique (des tills) qui sert à déterminer la classification USDA de ces dépôts.

TABLEAU 2.3: Caractéristiques géotechniques des dépôts meubles de l'île de Montréal. [Prest et Hode-Keyser (1982), Boyer et al. (1985) et Leroueil et Tavenas (1983)]

(X): Moyenne

[X]: Écart-type

{X}: Estimation (à partir de ρ_{sat} et ω_{sat})

	Densité	Teneur en eau	Porosité	Composition granulométrique (%)				Conductivité	USDA
	ρ_{sat} (g/cm ³)	ω_{sat} (M/M) (%)	n (%)	gravier > 2mm	sable > 0.075 et < 2 mm	Fines < 0.075 mm	Argile < 2 mm	Hydraulique m/s	
Épisode fluviatile du Fleuve St-Laurent									
Argile, limon (non-calcaire)		élevée							SiC
Sable, un peu de gravier		élevée							S
Épisode de la Mer de Champlain									
<u>Sédiments littoraux</u>									
Sable, gravier		élevée							S
<u>Sédiments d'eau profonde</u>									
Argile marine, limon (calcaire)	1.52 à 1.92	30 à 80				45 à 85		3E-10 - 5E-10	C
Épisode glaciaire de Fort Covington									
Till argileux et limoneux	1.92 à 2.48	(14.4)	{32.5}	< 20	5 à 10	> 60	4 à 14	1E-08 - 1E-06	Si
<i>Till de Fort Covington</i>	(2.26)	[6.9]		(15)	(5)	(80)	(7)		
Épisode glaciaire de Malone									
Complexe de till intermédiaire	2.0 à 2.26	(19.2)	{40.9}	50	30	20		peu perméable	SL
		[6.5]							
Till sablonneux et limoneux dense	2.2 à 2.5	(9.6)	{23.0}	10 à 50	15 à 40	30 à 60	1 à 12	1E-08 - 1E-06	SL-L
<i>Till de Malone</i>	(2.4)	[4.2]		(30)	(40)	(30)	(6)		
Dépôts de till non-différenciés									
Till de Fort Covington et de Malone	2.33			- mélange des tills de Fort Covington et de Malone-					SiL
<i>Moyenne granulométrique</i>				(23)	(23)	(54)	(7)		

CHAPITRE 3

MODÈLE CONCEPTUEL – modèle régional

La première étape de tout processus de modélisation est la détermination des objectifs et attentes de cette modélisation (*ASTM, 1993*). Au chapitre 1, nous avons défini en détail les buts et objectifs du modèle d'écoulement de l'eau souterraine de l'île de Montréal. Les principaux buts de ce modèle sont de définir la piézométrie régionale de l'île de Montréal, de valider les propriétés hydrogéologiques, de définir les paramètres hydrologiques et de décrire les directions d'écoulement de l'eau souterraine sur l'île de Montréal. La piézométrie et les directions d'écoulement serviront à définir les conditions limites d'un modèle d'écoulement local. Pour ce faire, nous utilisons la technique du maillage télescopique (*Ward et al., 1987*). Le modèle régional se veut donc une représentation simplifiée des processus d'écoulement sur l'île de Montréal.

3.1 MODÈLE CONCEPTUEL

Le modèle conceptuel, qui constitue la deuxième étape de la modélisation (*e.g. figure 1.1*), est défini comme étant la représentation schématique et simplifiée du système aquifère réel (*Anderson et Woessner, 1992; CCME, 1994*). Afin de représenter le plus fidèlement possible le système aquifère de l'île de Montréal, le modèle conceptuel suivant est défini: le domaine modélisé

est discrétisé en trois couches représentant respectivement les dépôts meubles, le roc fracturé et le roc sain. L'épaisseur de la couche 1 est variable et celle des autres couches fixes. Des conditions de charge constante sont assignées en périphérie de l'île pour les couches 2 et 3. Ces conditions limites représentent le niveau constant du fleuve St-Laurent et de la rivière des Prairies. La piézométrie initiale utilisée est celle décrite par Bériault et Simard (1978). Le chapitre suivant traitera de la discrétisation spatiale et du modèle numérique employé.

Les éléments urbains dont nous tiendrons compte dans le modèle sont la recharge, le pompage dans les carrières, dans les puits résidentiels, industriels et le pompage dans les postes d'épuisement du métro de la Société de Transport de la Communauté Urbaine de Montréal (STCUM). Une recharge annuelle variable sur l'île de Montréal sera déterminée. Cette recharge tiendra compte, sous forme de bilan, des précipitations, de l'évapotranspiration ainsi que du ruissellement en milieu urbain. Les pompages dans la nappe d'eau souterraine seront inclus sous forme de volume d'eau soustrait dans le bilan annuel des sources et des pertes d'eau pour l'île de Montréal. Les prochaines sections traiteront de la distribution et de l'estimation des différentes propriétés contenues dans le modèle conceptuel.

Étant donné le manque d'informations, certaines composantes du système hydrologique et hydrogéologique de l'île de Montréal n'ont pu être considérées. Par exemple, il n'a pas été possible de tenir compte des pertes d'eau associées au drainage urbain. Il est facilement concevable de supposer que le réseau d'égout pluvial et d'aqueduc de la ville ne soit pas totalement étanche et qu'il y ait des fuites. Ces fuites se rendent à la nappe et servent alors à la recharge de celle-ci. Les plus vieilles conduites sont normalement plus susceptibles aux fuites que les plus récentes. La Ville de Montréal ne rend pas public ce genre d'information. Il n'est donc pas possible de tenir compte, de quelque façon que ce soit, de cette recharge artificielle de la nappe. Cependant, nous pouvons supposer que ce débit de fuite, par rapport au volume des précipitations (recharge principale), est faible. Par conséquent, l'erreur dans l'évaluation de la recharge sera minime: ne pas tenir compte de cette forme de recharge n'introduit pas une erreur d'une grande importance dans l'estimation de la recharge nette de l'aquifère.

Les autres composantes dont nous n'avons pu tenir compte dans l'élaboration du modèle conceptuel sont les pompages effectués pour rabattre la nappe sous les différents édifices à étages du centre-ville et les pompages pour assécher différents endroits critiques comme l'autoroute

Décarie, l'autoroute Ville-Marie, le Parc du Stade Olympique, etc. Ces pertes n'ont pas été comptabilisées dans le bilan des pompages pour les mêmes raisons, soit le manque d'information. Cependant, en appliquant le même raisonnement qu'avec les fuites dans les égouts pluviaux, l'erreur introduite dans le bilan est sûrement très faible par rapport à la recharge des précipitations.

Pour compléter, nous présentons une liste exhaustive des éléments urbains qui affectent le niveau de la nappe mais qui n'ont pas été comptabilisés dans le bilan (*tiré de Tousignant, 1989*). En raison du manque d'informations, ces facteurs n'ont pu être intégrés au modèle conceptuel. Ainsi, les variations locales du niveau piézométrique peuvent être causées par:

- Le drainage des eaux superficielles de ruissellement vers les collecteurs pluviaux.
- Les vieilles sections du système de canalisation qui ne sont pas parfaitement étanches (principalement les égouts). On traite parfois jusqu'à 25% de plus d'eaux usées que les quantités estimées.
- Le drainage autour des bâtiments à étages souterrains multiples. Surtout au centre-ville, ce type de pompage occasionnel, voire même permanent, permet d'éviter l'inondation des paliers les plus profonds.
- Les arbres à croissance rapide qui, localement, prélèvent parfois des quantités d'eau importantes. Durant la période estivale, certaines espèces d'arbres à croissance rapide tels le peuplier, l'aulne ou le tremble, peuvent adsorber jusqu'à 450 litres par jour.
- L'assèchement des excavations à ciel ouvert. Ce type d'assèchement peut être temporaire ou permanent. Citons comme exemple le cas du rabattement permanent de la nappe sur le site du tunnel de l'autoroute Ville-Marie. Cette autoroute souterraine crée un barrage artificiel empêchant la nappe de s'écouler. Afin d'éviter d'inonder l'ouvrage, on doit mettre en place un système de pompes.
- Les venues d'eau dans les tunnels situés dans le socle rocheux. Contexte similaire aux excavations à ciel ouvert.

3.2 PIÉZOMÉTRIE DE L'ÎLE DE MONTRÉAL

Considérant l'absence de données piézométriques satisfaisantes et accessibles, nous devons accepter d'utiliser la carte hydrogéologique présentée par Bériault et Simard (1978). À la section 3.6.3.3, une carte piézométrique obtenue à partir des niveaux des différents puits de l'île de Montréal est également présentée. À l'annexe A, une série de cartes piézométriques (*figures A.1 à A.10*) construites à partir de la banque de données de la Ville de Montréal (*Robillard, 1995*) est également présentée à titre de référence. Nous avons tenté de tirer des renseignements utiles sur la piézométrie à partir de cette banque de données, mais sans succès.

La figure 3.1 illustre la carte piézométrique de Bériault et Simard (1978) telle que publiée dans leur étude. Les lignes isopièzes ainsi que les lignes d'écoulement sont présentées. Nous observons sur la carte piézométrique deux zones principales de recharge. Le premier secteur correspond au parc du Mont-Royal. Les grands espaces verts constituent un important bassin de réalimentation de la nappe. La deuxième région de recharge naturelle se trouve dans la partie ouest de l'île. Cette zone de l'île est caractérisée par un plus faible taux d'urbanisation et coïncide avec les grands espaces vacants réservés à l'aéroport International de Montréal (Dorval). Ces deux régions correspondent également à des hauts topographiques (voir figure 2.2). L'écoulement régional est directement contrôlé par la topographie et par le socle rocheux. Les lignes d'écoulement sont orientées radialement, du centre de l'île vers sa périphérie. La ligne de partage des eaux est également présentée à la figure 3.1.

La surface libre est généralement peu profonde. Elle se retrouve le plus souvent à moins de 5 mètres de profondeur (*voir section 3.6.3.3*). Selon Boyer et al. (1985), moins de 1% de la superficie totale de l'île présente des conditions artésiennes. L'écoulement de l'eau se fait dans les premiers mètres du socle rocheux fracturé. Les systèmes de joints et de diaclases permettent cette circulation de l'eau souterraine (*Bériault, 1977*). Étant donné la faible perméabilité des formations sédimentaires, l'écoulement en profondeur ne constitue qu'une très faible partie de l'écoulement total (*Boyer et al., 1985*). Dans le modèle conceptuel, nous négligeons cet écoulement. Le système piézométrique est représenté uniquement par une nappe libre qui se situe dans les dépôts meubles et dans les premiers mètres du roc.

Afin de simuler adéquatement la situation piézométrique actuelle, nous devrions actualiser le niveau piézométrique tel que présenté par Bériault et Simard (1978). Considérant le manque de données, nous devons supposer que le niveau piézométrique de l'île n'a pas évolué depuis 17 ans. Cette hypothèse est justifiable par plusieurs arguments. En considérant que le taux d'exploitation de la nappe souterraine a diminué durant les dernières années (Bériault et Simard, 1978), nous pouvons supposer que la nappe est restée plutôt stable ou, du moins, qu'elle n'a pas baissé suite à des pompages excessifs. De plus, les précipitations sur l'île sont, en moyenne, constantes au cours des ans. Cependant, l'urbanisation de l'île n'a pas cessé, coupant certains points de recharge naturelle de la nappe. Si nous supposons que tous ces facteurs se compensent, la quantité d'eau disponible à la recharge de l'aquifère demeure généralement stable au fil des années. On peut donc ainsi maintenir un niveau piézométrique constant.

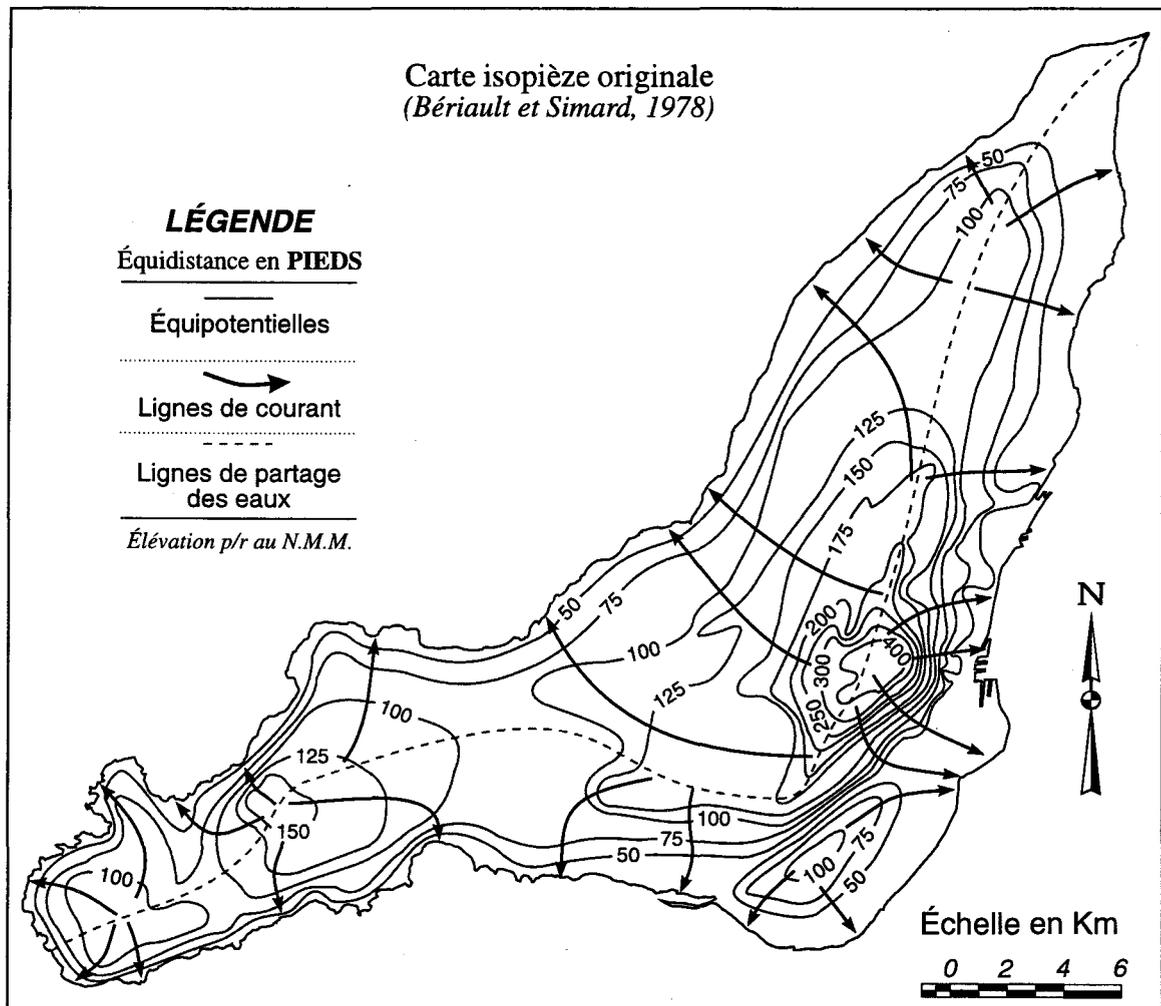


FIGURE 3.1: Carte piézométrique de référence (Bériault et Simard, 1978).

3.3 NIVEAUX DU FLEUVE ST-LAURENT ET DE LA RIVIÈRE DES PRAIRIES

On dénombre 19 stations de mesure du niveau des cours d'eau dans la région de l'île de Montréal. Le tableau 3.1 présente un résumé des moyennes mensuelles du niveau d'eau mesuré à chaque station. Ces moyennes sont établies sur une période variant de 8 à 75 ans selon la station. La période d'observation moyenne est de 37 ans. Le niveau moyen mensuel fluctue seulement de quelques décimètres durant l'année. L'écart moyen entre les mesures mensuelles pour l'ensemble des stations est de 26 cm. L'écart minimum pour une année est de 1,1 cm (station au Pont Mercier) et le maximum, de 0,80 cm (écluse de St-Lambert). Les maxima sont généralement atteints au printemps (mars à mai) et les minima, au début de l'automne. Le niveau moyen du fleuve St-Laurent est de 8,38 m et celui de la rivière des Prairies est d'environ 18,86 m.

La figure 3.2 illustre la distribution du niveau du fleuve St-Laurent et de la rivière des Prairies. L'emplacement des stations utilisées est également illustré. Le gradient est relativement faible entre les deux extrémités de l'île et est de l'ordre de 0,4 m/km (0,04%). La plus grande perte de niveau est associée aux rapides présents à la hauteur de Lachine (fleuve St-Laurent) et, au nord, à ceux du Cheval Blanc (Municipalité de Pierrefonds – rivière des Prairies) et de Pont-Viau.

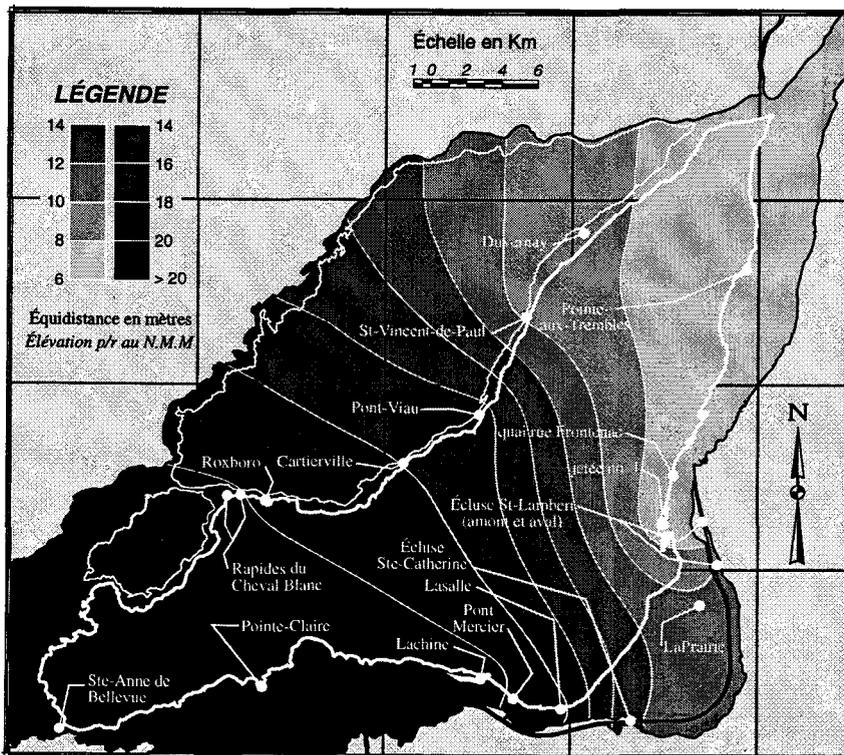


FIGURE 3.2: Carte du niveau du fleuve St-Laurent et de la rivière des Prairies.

TABLEAU 3.1: Moyenne annuelle du niveau du fleuve St-Laurent et de la rivière des Prairies.
 [altitude par rapport au N.M.M.] (Référence: Gouvernement du Canada, 1992)

<i>Emplacement</i>	<i>Nb. d'années d'opération</i>	<i>Niveaux mensuels moyens (en mètre)</i>												<i>NIVEAUX</i>
		<i>Jan.</i>	<i>Fév.</i>	<i>Mars</i>	<i>Avr.</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juil.</i>	<i>Août</i>	<i>Sept.</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Déc.</i>	<i>MOYENS</i>
Fleuve St-Laurent														<i>(en mètres)</i>
à La Prairie	23	10.18	10.17	10.17	10.48	10.43	10.23	10.12	10.11	10.08	10.08	10.11	10.12	10.15
à Lachine	71	20.73	20.69	20.73	21.20	21.18	20.93	20.72	20.60	20.55	20.53	20.58	20.63	20.68
à Lasalle	45	18.71	18.65	18.73	19.15	19.12	18.93	18.79	18.68	18.62	18.61	18.62	18.62	18.67
à Montréal (jetée no 1)	20	6.82	6.94	7.08	7.62	7.45	6.86	6.58	6.48	6.43	6.50	6.58	6.64	6.73
à Pointe-aux-Trembles	56	6.43	6.47	6.46	6.79	6.54	5.98	5.71	5.61	5.50	5.60	5.81	5.91	6.17
au Pont Mercier	35	19.51	19.52	19.60	19.96	19.88	19.71	19.61	19.54	19.51	19.51	19.54	19.53	19.52
au quai de la rue Frontenac	35	7.20	7.09	6.86	7.05	6.83	6.37	6.09	5.92	5.84	5.86	6.07	6.31	6.76
Écluse Ste-Catherine (AMONT)	30	21.22	21.21	21.16	21.55	21.50	21.31	21.17	21.14	21.09	21.09	21.13	21.11	21.17
Écluse de St-Lambert (AMONT)	30	10.05	9.78	10.70	11.42	11.47	11.45	11.44	11.45	11.45	11.46	11.45	11.18	10.62
Écluse de St-Lambert (AVAL)	30	6.89	6.97	6.77	7.09	6.84	6.33	6.11	6.03	6.00	6.06	6.15	6.31	6.60
Lac St-Louis														
à Pointe-Claire	75	21.09	21.06	21.08	21.50	21.50	21.24	21.08	20.93	20.86	20.85	20.87	20.95	21.02
Rivière des Outaouais														
à Ste-Anne-de-Bellevue	70	21.85	21.85	21.95	22.57	22.58	22.11	21.82	21.65	21.59	21.67	21.81	21.82	21.84
Rivière des Prairies														
à Cartierville	74	18.08	18.12	18.11	18.15	18.53	18.03	17.66	17.43	17.37	17.49	17.63	17.79	17.94
à Duvernay est	25	8.92	8.96	8.53	9.25	9.14	8.74	8.51	8.39	8.33	8.16	8.33	8.47	8.69
à Pont Viau	18	16.76	16.96	17.01	17.02	17.04	17.05	17.00	17.00	17.00	17.03	17.30	16.65	16.71
à Roxboro	25	19.74	19.87	19.70	19.78	19.54	18.88	18.46	18.27	18.25	18.45	18.74	18.99	19.37
à St-Vincent-de-Paul	17	9.24	9.29	9.18	9.50	9.42	8.95	8.81	8.70	8.59	8.72	8.89	8.98	9.11
aux Rapides du Cheval Blanc	8	20.43	20.37	20.18	20.60	20.39	19.96	19.55	19.45	19.42	19.56	19.92	20.11	20.27
aux Rapides du Cheval Blanc	25	20.06	20.17	19.92	20.07	19.89	19.37	19.09	18.95	18.91	19.08	19.27	19.50	19.78

3.4 DONNÉES CLIMATIQUES

3.4.1 Précipitations

Afin de caractériser les précipitations et la température sur l'île de Montréal, des statistiques ont été calculées pour la période de 1974 à 1993, soit les 20 dernières années. Pour établir des moyennes valables, 8 stations de mesure situées sur l'île ont été utilisées. Ces stations sont réparties presque uniformément sur l'île. Elles sont présentées au tableau 3.2. La plupart des stations sont en opération depuis près de 20 ans. Ces stations sont situées généralement entre 25 et 60 mètres d'altitude. Deux seules stations mesurent la radiation solaire. Elles seront utilisées dans la détermination de l'évapotranspiration (section 3.4.2).

TABLEAU 3.2: Stations météorologiques sur l'île de Montréal
(Référence: ministère de l'Environnement, 1984a)

Station	Opération		Nb. Années	Localisation		Altitude	Paramètres		
	Début	Fin		UTMX	UTMY		mètre	Précipitation	Température
International -A	1941		20	597719	5035339	36	X	X	X
Jardin Botanique	1939	1989	17	613153	5046712	46	X	X	
Jean Brébeuf	1956	1985	12	608076	5039210	133	X	X	X
Lafontaine	1970		19	611949	5041133	41	X	X	
McGill	1871		20	610685	5039255	57	X	X	
Rivière des Prairies	1972		20	615478	5061568	9	X	X	
Ste-Anne-de-Bellevue	1969		19	583439	5031422	40	X	X	
Ste-Geneviève	1973		20	589848	5038922	23	X	X	

On retrouve à l'annexe B, pour chaque station, les données mensuelles de précipitation (pluie, neige et précipitation totale) et de température pour les périodes considérées. Il est à remarquer que certaines valeurs sont manquantes. Ceci est principalement causé par un trop grand nombre de mauvais relevés quotidiens des paramètres climatiques pour un mois donné, ce qui entraîne le rejet de la valeur mensuelle.

Le tableau 3.3 présente un résumé des moyennes mensuelles pour chaque paramètre obtenues à chaque station. L'écart-type est relativement important (4,5%) pour l'estimation des précipitations totales annuelles entre les stations. Cette variabilité pourrait s'expliquer par le fait que chaque station n'est pas nécessairement équipée des mêmes instruments de mesure (précision, techniciens, entretien, etc.). Cependant, en moyenne, ces erreurs devraient s'annuler. L'écart inter-station est simplement causé par la variabilité climatique normale entre les différentes régions de l'île. Certaines stations sont espacées de près de 50 km. Il est donc normal que les précipitations diffèrent étant donné la nature complexe et parfois très locale des perturbations atmosphériques causant ces précipitations. L'écart entre les mesures pour les stations regroupées (Jean Brébeuf, Lafontaine, McGill et Jardin Botanique) est généralement très faible (10-20 mm), comparativement à 45 mm pour l'ensemble des stations.

La figure 3.3 illustre les variations annuelles des précipitations et de la température. Ce graphique intègre les données moyennes des 8 stations. La température moyenne durant l'année est de 6,6°C. Les maxima sont généralement enregistrés durant le mois de juillet (en moyenne 21,6°C) et les minima, durant janvier (en moyenne -10°C). Montréal bénéficie annuellement de 2 000 heures d'ensoleillement (*Powe, 1969*). La gelée au sol est généralement observée du début octobre jusqu'à la mi-avril. Montréal reçoit en moyenne 1 000 mm d'eau annuellement (pluie et neige confondus). Environ 20% des précipitations totales tombent sous forme de neige. La neige est observable habituellement de la mi-novembre jusqu'à la fin mars. Le mois le plus pluvieux est généralement septembre (99,13 mm) tandis que février est le moins pluvieux (57,64 mm).

Une carte isohyète est présentée à la figure 3.4. Cette carte illustre la distribution des précipitations totales moyennes pour une année typique. Elle a été réalisée à partir des statistiques présentées précédemment. L'emplacement des différentes stations est également précisé. La partie ouest de l'île reçoit le moins de précipitations, tandis que la partie centre-est en reçoit le plus.

Les valeurs moyennes obtenues dans la présente étude sont facilement corrélées avec les différentes valeurs disponibles dans la littérature. La plupart des études évaluent les précipitations sur l'île entre 950 et 1 050 mm. Cependant, la majorité de ces études se base seulement sur la station de l'aéroport International de Dorval. Les études consultées sont: *Powe (1969)*, *Bériault et Simard (1978)*, *Boyer et al. (1985)* et *Llamas (1993)*.

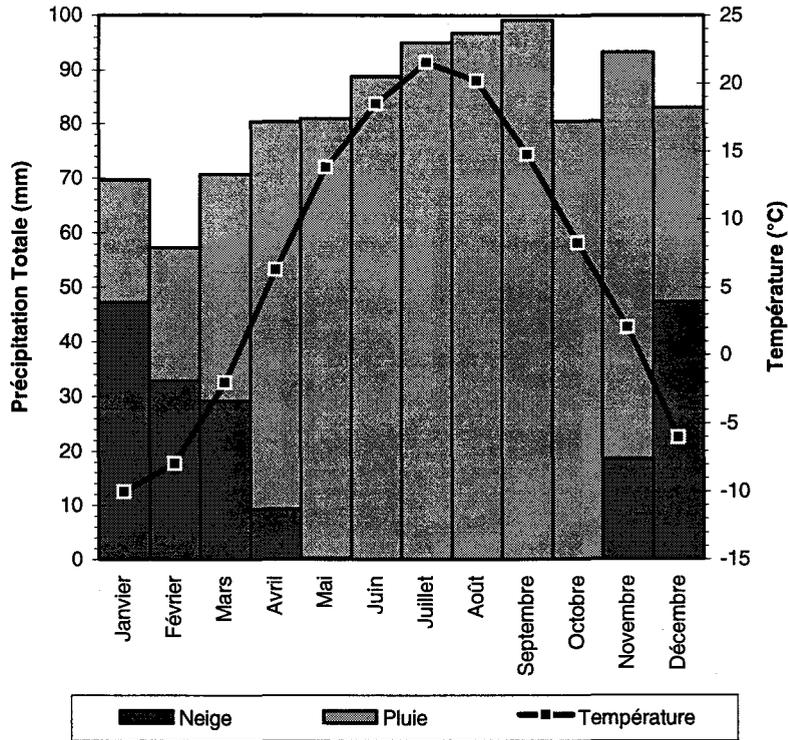


FIGURE 3.3: Moyennes climatiques (précipitations et température) pour l'île de Montréal.

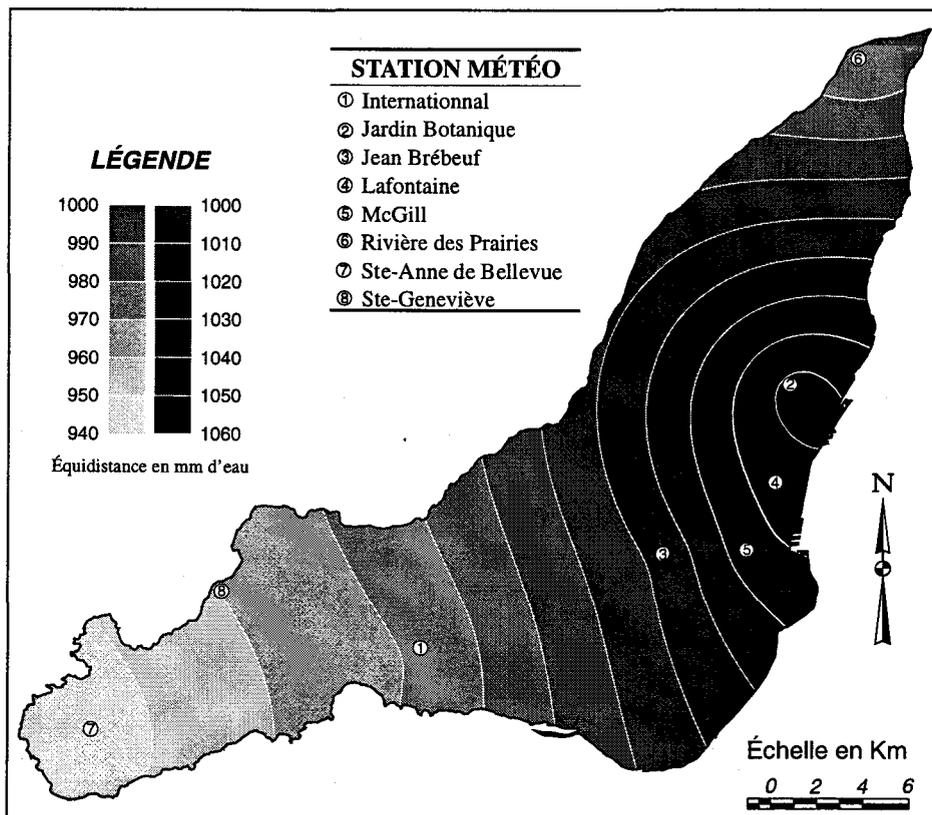


FIGURE 3.4: Carte isocontour des précipitations moyennes sur l'île de Montréal.

TABLEAU 3.3: Moyennes climatiques (précipitation [pluie, neige, totale] et température) pour chaque station. (*M.A.* = *Moyenne Annuelle*; *M.M.* = *Moyenne Mensuelle*; *Écart-type* = *écart-type entre les stations*)

PARAMÈTRE: Précipitation-PLUIE (mm)													
STATION	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	M. A.
International -A	22.66	22.89	36.26	66.43	73.66	80.43	91.23	92.98	95.45	81.28	72.02	31.65	766.90
Jardin Botanique	25.05	41.37	50.11	73.73	90.09	95.61	96.32	98.91	104.24	78.94	79.15	35.44	868.94
Jean Brébeuf	18.59	28.05	43.73	74.43	85.65	93.73	96.31	93.37	102.61	72.91	74.36	36.12	819.87
Lafontaine	21.70	18.99	49.39	69.22	88.77	89.35	96.42	102.23	102.52	83.72	72.43	43.92	838.65
McGill	27.25	19.97	39.87	66.02	86.00	87.12	106.17	94.39	103.04	82.35	71.86	40.87	824.91
Rivière des Prairies	18.73	13.57	33.60	75.04	77.08	92.38	94.80	93.16	94.54	86.12	86.99	34.49	800.49
Ste-Anne-de-Bellevue	18.92	19.55	41.24	64.83	72.59	86.23	90.92	104.89	95.63	76.77	65.27	31.03	767.86
Ste-Genève	26.38	31.47	38.20	78.60	72.21	85.09	87.72	94.77	95.03	82.51	75.85	32.31	800.14
M. M.	22.41	24.48	41.55	71.04	80.76	88.74	94.98	96.83	99.13	80.57	74.74	35.73	810.97
Écart-Type	3.53	8.81	5.91	5.07	7.62	5.03	5.53	4.61	4.29	4.21	6.34	4.56	34.70

PARAMÈTRE: Précipitation-NEIGE (mm)													
STATION	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	M. A.
International -A	48.50	38.42	32.05	12.97	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	2.07	23.51	45.01	202.83
Jardin Botanique	49.52	27.63	26.49	8.21	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	1.14	18.09	52.03	183.25
Jean Brébeuf	44.18	29.31	32.73	12.47	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	19.73	52.26	191.17
Lafontaine	56.29	35.07	26.95	7.75	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	17.72	53.80	198.41
McGill	44.74	39.43	36.27	11.08	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	2.53	19.53	49.30	203.38
Rivière des Prairies	48.77	30.99	24.16	5.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48	14.63	45.89	170.43
Ste-Anne-de-Bellevue	45.00	31.47	26.95	9.35	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.97	20.39	40.70	175.01
Ste-Genève	41.02	29.86	28.15	7.58	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	1.35	14.36	38.96	161.44
M. M.	47.25	32.77	29.22	9.36	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	1.21	18.49	47.24	185.74
Écart-Type	4.63	4.36	4.05	2.60	0.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.75	3.03	5.52	15.76

PARAMÈTRE: Précipitation-TOTALE (mm)													
STATION	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	M. A.
International -A	71.16	63.47	68.31	79.40	73.98	80.43	91.23	92.98	95.45	83.35	95.52	76.65	971.90
Jardin Botanique	74.56	69.91	78.36	81.94	90.24	95.61	96.32	98.91	104.24	80.07	97.24	87.46	1054.87
Jean Brébeuf	65.50	57.36	76.47	86.90	85.76	93.73	96.31	93.37	102.61	73.32	94.09	88.38	1013.80
Lafontaine	81.21	55.57	79.22	76.97	88.81	89.35	96.42	102.23	102.52	84.51	90.15	97.72	1044.66
McGill	74.01	59.41	76.14	79.34	86.47	87.12	106.17	94.39	103.04	84.88	91.85	93.25	1036.07
Rivière des Prairies	68.77	43.04	59.79	80.56	77.08	92.38	94.80	93.16	94.54	86.60	101.62	78.68	971.00
Ste-Anne-de-Bellevue	63.92	51.02	68.19	74.17	72.77	86.23	90.92	104.89	95.63	77.79	85.67	74.27	945.47
Ste-Genève	67.40	61.33	66.35	85.11	72.39	85.09	87.72	94.77	95.03	83.93	90.21	71.27	960.58
M. M.	70.82	57.64	71.60	80.55	80.94	88.74	94.98	96.83	99.13	81.81	93.29	83.46	999.79
Écart-Type	5.66	8.13	6.95	4.13	7.61	5.03	5.53	4.61	4.29	4.44	4.93	9.57	42.52

PARAMÈTRE: Température (°C)													
STATION	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	M. A.
International -A	-10.27	-8.49	-2.77	6.00	13.39	17.78	20.87	19.50	14.39	7.62	1.64	-6.74	6.08
Jardin Botanique	-9.86	-8.05	-0.76	6.31	13.94	18.79	21.89	20.29	14.92	8.30	1.94	-5.88	6.82
Jean Brébeuf	-10.46	-7.08	-1.63	5.96	13.58	18.78	21.78	20.45	14.61	8.21	2.27	-5.65	6.74
Lafontaine	-8.81	-6.57	-1.49	6.93	14.48	19.26	22.37	21.03	15.37	9.04	2.56	-5.35	7.40
McGill	-8.95	-7.03	-1.44	7.20	14.63	19.30	22.30	20.83	15.43	8.97	2.80	-4.99	7.42
Rivière des Prairies	-10.66	-9.12	-3.01	5.82	13.27	18.06	21.01	19.73	14.34	7.75	1.58	-6.99	5.98
Ste-Anne-de-Bellevue	-10.41	-8.36	-2.47	6.20	13.51	18.02	21.02	19.85	14.44	8.03	1.77	-5.86	6.31
Ste-Genève	-10.42	-8.73	-2.60	5.82	13.55	17.93	21.18	19.97	14.63	8.12	1.87	-6.62	6.22
M. M.	-9.98	-7.93	-2.02	6.28	13.79	18.49	21.55	20.21	14.76	8.25	2.05	-6.01	6.62
Écart-Type	0.72	0.92	0.80	0.52	0.51	0.62	0.61	0.54	0.43	0.52	0.45	0.71	0.57

3.4.2 Évapotranspiration potentielle

L'évapotranspiration doit être déterminée afin de tenir compte, dans le bilan hydrologique de l'île de Montréal, de la quantité d'eau perdue par l'action solaire combinée à celle des plantes. Elle est déterminée empiriquement à l'aide de deux méthodes différentes. Pour l'ensemble des stations météorologiques de l'île de Montréal, la méthode de Thornthwaite (1948) a été utilisée. Cette méthode peut être utilisée pour toutes les stations car les seuls paramètres requis sont les données climatiques (température) et la latitude de la station d'intérêt. Ce type de données est facilement accessible. Pour les stations Jean-Brébeuf et International (Dorval), la méthode de Turc (1961) a été employée. Pour l'utilisation de cette méthode, nous devons posséder les données de radiation solaire globale et de température. Ce genre de paramètre est plus rarement mesuré et, par conséquent, plus difficilement accessible.

La relation empirique de Thornthwaite est basée sur la corrélation entre la température moyenne de l'air et le taux de transpiration des plantes. Pour déterminer le taux mensuel d'évapotranspiration à l'aide de cette méthode, nous utilisons la relation suivante:

$$ET_p = 1,6 LA \left(\frac{10t}{I} \right)^a \quad (3.1)$$

où:

ET_p = évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm/mois);
 LA = facteur de correction pour la longueur du jour, le nombre de jours du mois et la latitude, il donne la durée moyenne possible de l'ensoleillement (unités de 30 jours égaux de 12 heures chacun) [Tableau 3.4];
 t = température moyenne mensuelle de l'air (°C) [Tableau 3.3];
 I = total des 12 valeurs mensuelles de l'indice de chaleur [Tableau 3.4]:

$$I = \left(\frac{t}{5} \right)^{1,514} \quad (3.2)$$

et

$$a = 6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,79 \times 10^{-2} I + 0,49 \quad (3.3)$$

Le tableau 3.4 présente le résultat du calcul de l'évapotranspiration par la méthode de Thornthwaite pour chaque station météorologique de l'île de Montréal. Nous observons une légère variation du taux d'évapotranspiration calculé entre les différentes stations. La moyenne annuelle d'évapotranspiration potentielle pour l'ensemble de l'île est de l'ordre de 610 mm.

TABLEAU 3.4: Évaluation de l'évapotranspiration potentielle [mm/an] pour l'île de Montréal à l'aide de la méthode de Thornthwaite (*M. M.* = *Moyenne Mensuelle*).

<i>STATION</i>	<i>Paramètre</i>	
	<i>I</i>	<i>a</i>
1 Montréal - International -A	36.167	1.070
2 Montréal - Jardin Botanique	38.886	1.111
3 Montréal - Jean Brébeuf	38.468	1.105
4 Montréal - Lafontaine	41.106	1.144
5 Montréal - McGill	41.177	1.145
6 Rivière des Prairies	36.448	1.075
7 Ste-Anne-de-Bellevue	36.945	1.082
8 Ste-Geneviève	37.114	1.085

<i>LA</i>												
<i>Jan.</i>	<i>Fév.</i>	<i>Mars</i>	<i>Avril</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juil.</i>	<i>Août</i>	<i>Sept.</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Déc.</i>	
0.8	0.8	1.0	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75	

<i>STATION</i>	<i>Jan.</i>	<i>Fév.</i>	<i>Mars</i>	<i>Avril</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juil.</i>	<i>Août</i>	<i>Sept.</i>	<i>Oct.</i>	<i>Nov.</i>	<i>Déc.</i>	<i>TOTAL</i>
1	0.0	0.0	0.0	31.1	83.1	113.5	136.9	117.5	73.0	33.4	5.4	0.0	593.9
2	0.0	0.0	0.0	31.0	84.6	118.9	143.0	121.4	74.1	34.9	5.8	0.0	613.7
3	0.0	0.0	0.0	29.3	82.5	119.0	142.4	122.6	72.7	34.8	7.1	0.0	610.3
4	0.0	0.0	0.0	32.9	86.5	120.9	145.7	125.4	75.3	37.1	7.4	0.0	631.1
5	0.0	0.0	0.0	34.3	87.5	121.1	145.1	124.0	75.5	36.7	8.1	0.0	632.3
6	0.0	0.0	0.0	29.9	82.1	115.3	137.7	118.9	72.5	33.8	5.1	0.0	595.3
7	0.0	0.0	0.0	31.7	83.3	114.6	137.6	119.4	72.8	34.8	5.7	0.0	599.8
8	0.0	0.0	0.0	29.4	83.4	113.9	138.6	120.1	73.6	35.1	6.0	0.0	600.3
<i>M. M.</i>	0.0	0.0	0.0	31.2	84.1	117.1	140.9	121.2	73.7	35.1	6.3	0.0	610

La méthode de Turc évalue le taux d'évapotranspiration en fonction de la température et de l'intensité du rayonnement. Le modèle empirique utilisé est le suivant:

$$ET_p = 0,096 t \left(\frac{I_g + 209,3}{t + 15} \right) \quad (3.4)$$

où:

ET_p = évapotranspiration potentielle (mm/mois);

t = température de l'air ($^{\circ}C$) [Tableau 3.3];

I_g = radiation solaire globale, directe et diffuse ($J/d\ cm^2$) [Tableau 3.5];

Le tableau 3.5 présente les valeurs mensuelles moyennes du rayonnement solaire global pour les stations Jean-Brébeuf et International. Les données disponibles couvrent plusieurs périodes, la plus récente allant jusqu'à 1980. Nous pouvons supposer que la radiation solaire n'a pas énormément changé depuis cette période. Par conséquent, nous prenons ces moyennes comme représentatives du rayonnement solaire actuel sur l'île de Montréal.

TABLEAU 3.5: Valeurs mensuelles moyennes du rayonnement solaire global [MJ/m^2]

M. A. = Moyenne Annuelle; *ET* = Écart-Type

Référence: McRay et Morris (1985); Phillips et Aston (1980); Gouvernement du Canada (1982).

STATION		Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct	Nov.	Déc.	M. A.
Jean-Brébeuf	<i>M</i>	5.30	8.80	12.51	15.87	19.07	20.25	20.96	17.23	13.45	8.04	4.61	3.92	12.50
1964-1980	<i>ET</i>	0.62	0.97	1.37	1.47	2.50	1.78	1.24	0.94	1.18	0.77	0.66	0.50	
Jean-Brébeuf	<i>M</i>	5.34	8.54	12.44	16.08	18.82	20.10	20.95	17.13	13.17	8.24	4.47	3.82	12.43
1965-1977	<i>ET</i>	0.59	0.85	1.45	1.29	2.62	1.94	1.14	0.94	1.20	0.63	0.55	0.43	
Jean-Brébeuf	<i>M</i>	5.27	8.67	12.52	16.38	19.11	20.80	20.79	17.80	13.18	8.41	4.37	3.89	12.60
1967-1976														
International	<i>M</i>	6.07	9.49	13.78	17.42	19.88	21.75	21.71	18.73	13.80	9.28	5.09	4.57	13.46
1967-1976														
MOYENNE														
Jean-Brébeuf		5.30	8.67	12.49	16.11	19.00	20.39	20.90	17.39	13.27	8.23	4.48	3.88	
International		6.07	9.49	13.78	17.42	19.88	21.75	21.71	18.73	13.80	9.28	5.09	4.57	

La figure 3.5 illustre la différence entre les diverses données disponibles. Nous remarquons un faible écart entre les moyennes pour les différentes périodes considérées. Le tableau 3.6 présente le calcul de l'évapotranspiration potentielle par la méthode de Turc. La valeur annuelle ainsi calculée est un peu plus faible que celle calculée à l'aide de la méthode de Thornthwaite. La différence entre les deux moyennes annuelles est d'environ 8%. Il est courant d'avoir des écarts de 10 à 15% entre les différentes méthodes d'estimation du taux d'évapotranspiration potentielle (Llamas, 1993).

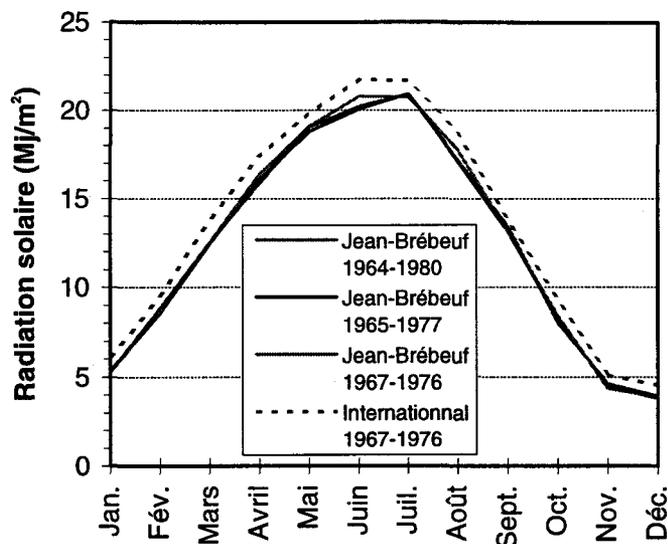


FIGURE 3.5: Moyenne mensuelle du rayonnement solaire global selon différentes périodes pour les stations Jean-Brébeuf et International.

TABLEAU 3.6: Évaluation de l'évapotranspiration potentielle $[mm/an]$ pour l'île de Montréal à l'aide de la méthode de Turc ($M. M. = Moyenne Mensuelle$).

STATION	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	TOTAL
International	0.0	0.0	0.0	44.2	86.0	106.1	116.7	94.3	62.4	26.6	4.2	0.0	540.6
Jean Brébeuf	0.0	0.0	0.0	47.5	90.7	116.1	123.4	103.7	65.4	31.5	6.4	0.0	584.7
<i>M. M.</i>	0.0	0.0	0.0	45.9	88.3	111.1	120.1	99.0	63.9	29.1	5.3	0.0	563

La différence entre les deux méthodes est présentée à la figure 3.6. Le plus grand écart est observé durant la période estivale. Pour le reste de l'année, la différence est minime. Le tableau 3.7 présente une comparaison entre diverses valeurs citées dans la littérature sur l'évapotranspiration calculée pour l'île de Montréal. D'autres méthodes d'estimation que celles utilisées ici sont également comparées.

Afin de représenter la variation de l'évapotranspiration sur l'île de Montréal, la méthode de Thornthwaite a été adoptée. Malgré le fait que le modèle de Turc est plus représentatif des phénomènes affectant l'évapotranspiration, le modèle de Thornthwaite est plus facilement applicable. Étant donné que l'on possède des mesures pour chaque station, nous pouvons déterminer une carte isocontour représentant la distribution de l'évapotranspiration potentielle annuelle sur l'île de Montréal. La figure 3.7 présente cette distribution typique. La région sud-est de l'île possède le plus fort taux d'évapotranspiration. La distribution régionale de l'évapotranspiration est généralement assez uniforme.

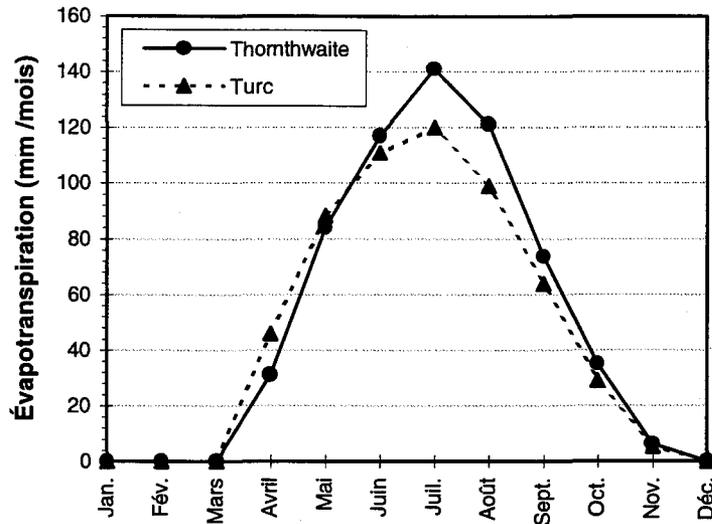


FIGURE 3.6: Différence entre la méthode de Thornthwaite et de Turc.

TABLEAU 3.7: Comparaison entre différentes valeurs d'évapotranspiration [en mm/an].
Références: Penman (1948); Thornthwaite (1948); Turc (1961); Blaney et Criddle (1950).

Méthode		Selon Ferland (1969)				Cette étude	
		Penman	Thornthwaite	Turc	B. & C.	Thornthwaite	Turc
S t a t i o n	Jardin Botanique	574	612	623	741	614	
	McGill	592	610	623	750	632	
	Jean-Brébeuf					610	585
	International					594	540

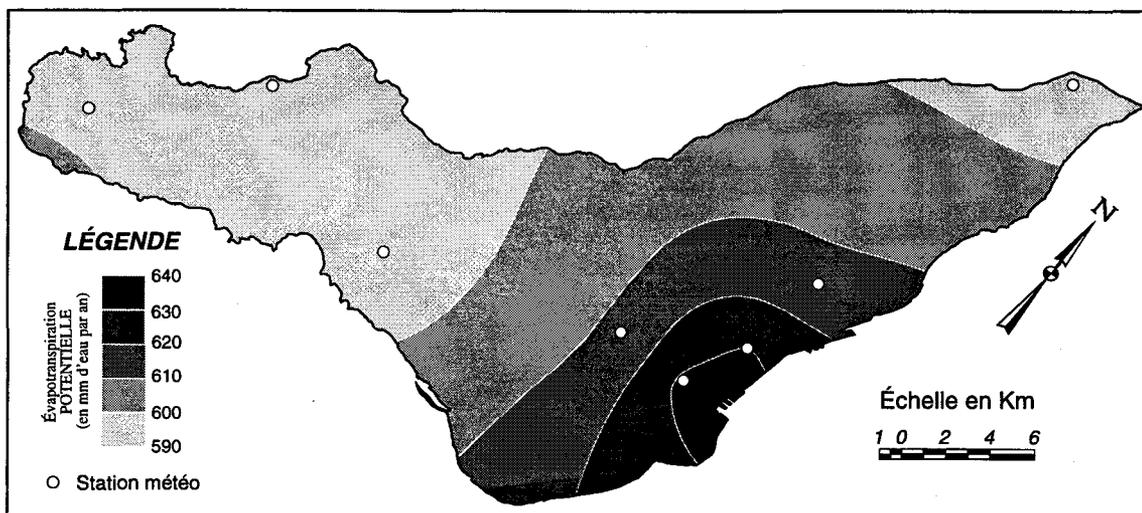


FIGURE 3.7: Carte isocontour de l'évapotranspiration POTENTIELLE pour l'île de Montréal selon la méthode de Thornthwaite (1948) – moyenne pour une année typique.

3.5 ESTIMATION DU RUISSELLEMENT

À la section précédente, nous avons déterminé la distribution des précipitations sur l'île. Une partie de ces précipitations s'écoule à la surface du sol sous forme de ruissellement. La détermination de la quantité d'eau qui ruisselle est une étape importante dans l'estimation d'un bilan hydrologique. Ce volume d'eau est fonction du type de surface et de l'intensité des précipitations. Même si la proportion des précipitations qui ruissellent varie selon l'intensité des précipitations, le coefficient de ruissellement (C_R) demeure à peu près constant pour un bassin hydrologique donné (*Llamas, 1993*). Le coefficient de ruissellement représente donc le rapport entre le ruissellement (R) et les précipitations (P) (*Gélinas et Lefebvre, 1992*): $R = C_R P$.

3.5.1 Détermination du coefficient de ruissellement

Plusieurs méthodes empiriques existent pour déterminer le coefficient de ruissellement (*Llamas, 1993*). Par exemple, selon le type de surface présent, on peut attribuer un C_R moyen. Le tableau 3.8 présente un résumé des différentes valeurs possibles du C_R selon le type d'occupation du sol. Des équations empiriques basées sur la densité de population peuvent également être employées pour déterminer le coefficient de ruissellement (*Gluck et McCuen, 1975; Stankowski, 1972*). La majorité des équations relie la densité de population au pourcentage relatif de superficie imperméable d'une région. De façon générale, ce pourcentage est similaire au C_R mais peut différer sensiblement dans certains cas. Par exemple, nous considérons qu'un parc a une superficie imperméable relative de 0%. Cependant, le coefficient de ruissellement moyen du même parc est d'environ 20 à 30%.

Étant donné que la superficie de l'île de Montréal est constituée de plusieurs types de surfaces, un seul coefficient de ruissellement ne peut être assigné pour l'ensemble de l'île. Nous devons déterminer une distribution du C_R selon les différents types de surface. L'approche employée ici pour déterminer le C_R est similaire à celle de Stankowski (1972). En se basant sur le pourcentage relatif de chaque type de surface pour un secteur donné, nous avons déterminé une relation empirique reliant le C_R et la densité de population.

TABLEAU 3.8: Coefficient de ruissellement moyen (Référence 1: Merritt, 1983; Maidment, 1992; Hall, 1984; Lazaro, 1990. Référence 2: Stankowski, 1972).

Type de surface	Coefficient de Ruissellement ¹		Superficie imperméable ²			
		Moyenne (%)	Inf.	Int.	Sup.	Moyenne (%)
Commercial						
<i>Centre-Ville</i>	0.70 - 0.95	82.5	0.80	0.90	1.00	90.0
<i>Banlieue</i>	0.50 - 0.70	60.0				
Résidentiel						
<i>uni-familial</i>	0.30 - 0.50	40.0	0.12	0.25	0.70	35.7
<i>multi-familial</i>						
<i>attaché</i>	0.40 - 0.60	50.0	0.60	0.70	0.80	70.0
<i>détaché</i>	0.60 - 0.75	67.5				
<i>banlieue</i>	0.25 - 0.40	32.5				
<i>bloc appartement</i>	0.50 - 0.70	60.0				
Industriel						
<i>léger</i>	0.50 - 0.80	65.0	0.40	0.70	0.90	66.7
<i>lourd</i>	0.60 - 0.90	75.0				
Public et parapublic			0.50	0.60	0.75	61.7
Emprises publiques	0.20 - 0.35	27.5				
Parc, cimetière	0.10 - 0.25	17.5				
Terrain non aménagé			0	0	0	0.0

Pour obtenir une distribution de la densité de population, nous avons utilisé les données du recensement de 1991 (*Statistique Canada, 1992*). L'île de Montréal est divisée en plus de 500 circonscriptions dont la superficie et la population sont connues. Nous pouvons donc facilement déterminer la densité de population (personnes/km²). La figure 3.8 illustre la distribution de la densité de population. On note la très forte densité de population dans la partie centrale de l'île. Les deux extrémités de l'île sont plus faiblement peuplées. Les zones des principaux parcs (Maisonneuve, Angrignon, Lafontaine) ainsi que du Mont-Royal ressortent aussi très bien sur cette carte. On retrouve, à l'annexe C, la liste de tous les secteurs de recensement avec la densité de population calculée.

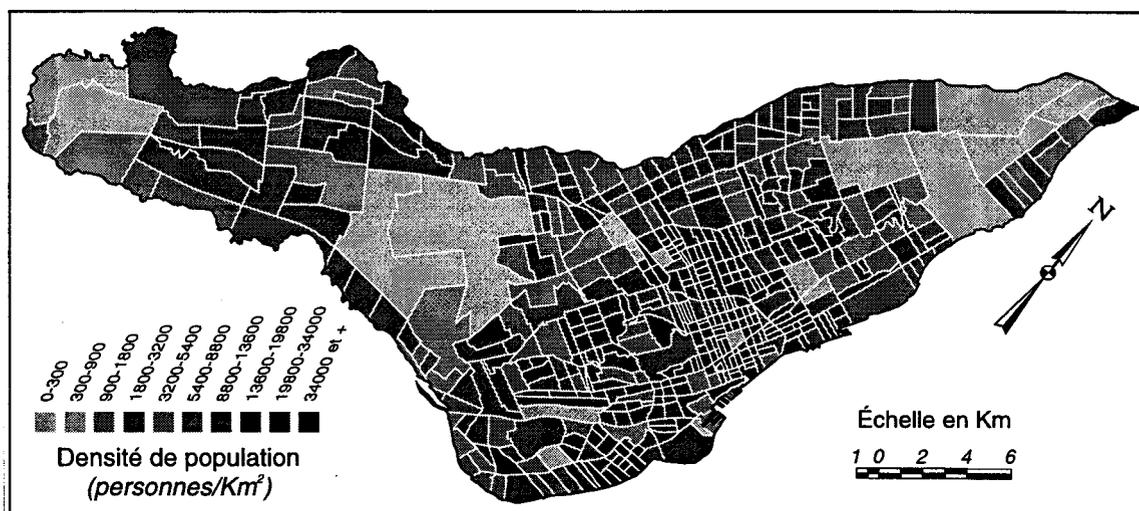


FIGURE 3.8: Distribution de la densité de population selon les secteurs de recensement (1991).

Pour établir une relation entre la densité de population et le coefficient de ruissellement, une vingtaine de secteurs de recensement ont été choisis au hasard (voir figure C.1, à l'annexe C). Pour chaque secteur, nous avons déterminé, à l'aide des cartes d'urbanisme de la ville (*Ville de Montréal, 1990 a, b, c, d, e, f, g, h, i; Ville de Montréal, 1992 a, b, c, d, e, f, g, h*) le pourcentage relatif d'occupation du sol pour les catégories suivantes:

1. HABITATION (*MUF*): résidence uni-familiale;
2. HABITATION (*MMF*): résidence multi-familiale;
3. COMMERCE (*COM*): restauration, hébergement, divertissement, vente au détail;
4. INDUSTRIE (*IND*): lourde et légère;
5. INSTITUTION (*INS*): équipements socio-culturels et sportifs (éducation, santé, culture);
6. EMPRISES PUBLIQUES (*GEP*): immeubles occupant des superficies importantes destinées à des fins d'utilités publiques (gares de triage, port, aéroport, routes);
7. PARC (*Parc*): régionaux, réserves naturelles, locaux, municipaux, golf, cimetières.

Pour déterminer le coefficient de ruissellement moyen pour chaque secteur, une moyenne pondérée selon le pourcentage d'occupation et le C_R moyen donné au tableau 3.9 pour chaque catégorie a été calculée. Le tableau 3.10 présente les résultats pour les secteurs choisis.

TABEAU 3.9: Coefficient de ruissellement attribué selon le type de surface.

Type de surface:	MUF	MMF	COM	IND	INS	GEP	Parc
C_R (%)	0.40	0.60	0.70	0.70	0.60	0.80	0.25

À l'aide du C_R et de la densité de population des secteurs choisis, nous avons établi une relation empirique pour tous les autres secteurs dont la densité de population est connue. La figure 3.9 présente les points utilisés ainsi que la courbe de la relation entre le C_R et la densité de population. Nous présentons également la relation développée par Stankowski (1972) reliant la densité de population et la superficie imperméable.

TABLEAU 3.10: Pourcentage de la superficie totale selon chaque type d'occupation du sol et coefficient de ruissellement (C_R) calculé.

Secteur	Superficie km^2	Densité de Population (pers./ km^2)	Pourcentage de la superficie totale (%)							C_R (%)
			MUF	MMF	COM	IND	INS	GEP	Parc	
036	0.18	9167	0.00	45.59	3.45	10.34	16.09	16.48	8.05	60.2
171	0.49	7347	0.28	27.52	9.89	27.51	11.60	18.05	5.16	64.4
100	0.48	9160	20.61	41.85	7.51	0.00	6.84	19.43	3.75	57.8
118	0.21	18190	12.38	60.43	11.52	0.00	0.00	15.67	0.00	61.4
190.01	0.55	6118	2.86	54.37	5.42	0.00	4.97	19.43	12.95	57.3
003	0.73	9000	22.65	40.27	5.97	0.00	2.76	18.98	9.36	54.8
024	0.25	10700	7.36	33.55	8.08	19.65	3.90	24.36	3.10	63.3
066.02	0.13	14654	2.02	38.43	8.76	0.00	24.94	17.08	8.76	59.6
280	0.60	7133	17.47	37.12	13.79	0.00	1.97	26.15	3.50	60.5
264.01	0.95	6284	6.77	24.00	0.00	0.00	19.05	26.32	23.87	51.7
256	1.84	2158	2.89	9.14	3.01	32.56	0.25	5.40	46.76	45.1
228	0.13	12923	36.55	29.91	17.09	0.00	4.43	12.03	0.00	57.3
079	0.52	7731	2.23	29.69	13.50	13.38	2.00	24.18	15.02	60.0
093	0.65	5192	1.58	20.97	4.10	32.53	2.14	17.83	20.86	57.2
201	0.91	6736	0.85	41.44	2.16	0.00	20.85	16.86	17.84	54.8
582.02	1.29	5109	49.83	10.21	1.94	0.00	6.89	19.58	11.57	47.8
290.06	0.92	6891	18.38	9.05	3.21	1.26	23.53	4.96	39.60	41.8

L'équation décrivant la relation entre le C_R et la densité de population est la suivante:

$$C_R = 14,5 \ln(D) - 72 \quad (3.5)$$

où C_R est le coefficient de ruissellement (en %) et
D la densité de population (personnes/ km^2)

La relation de Stankowski est:

$$I = 0,0565D^{1,1647-0,100 \log D} \quad (3.6)$$

où I représente la superficie imperméable (en %) et
D la densité de population (personnes/ km^2)

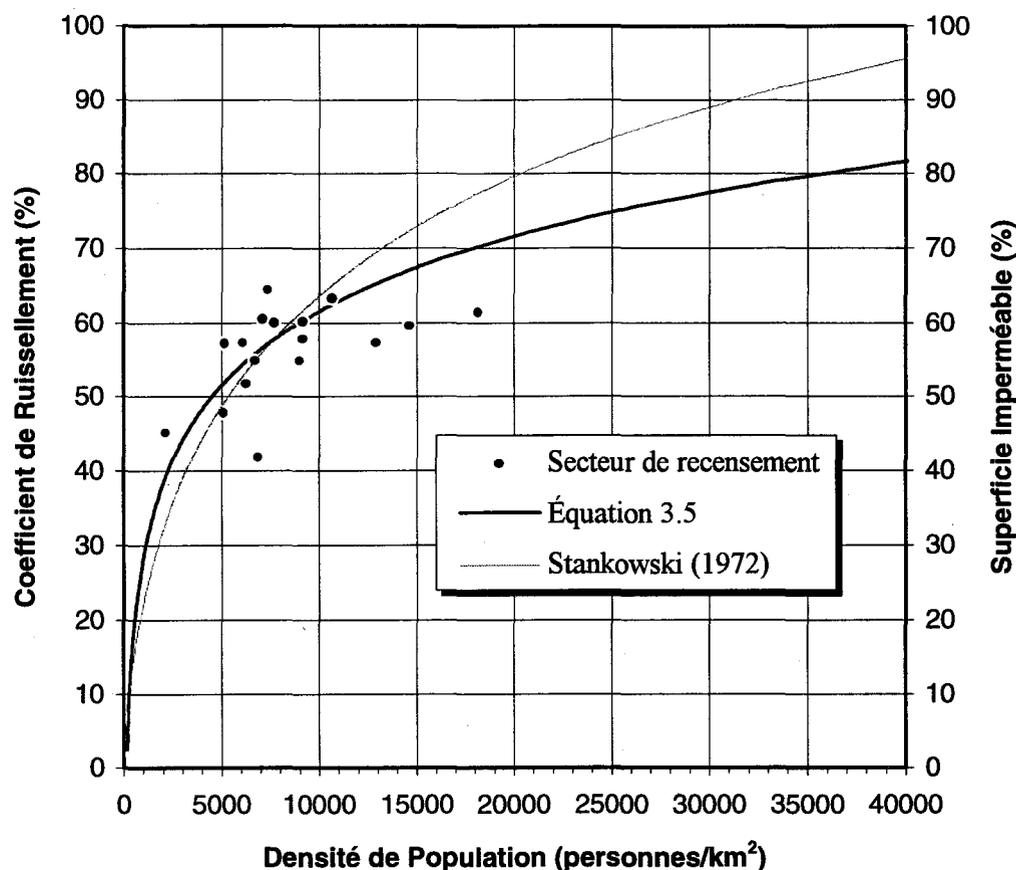


FIGURE 3.9: Relation entre la densité de population et le coefficient de ruissellement.

En se basant sur la relation 3.5, nous avons calculé, pour tous les secteurs du recensement, le coefficient de ruissellement moyen. On retrouve à l'annexe C le résultat pour tous les secteurs. Le calcul de la superficie imperméable selon la méthode de Stankowski est également présenté. Une différence d'environ 5 à 10 % est observée entre les deux méthodes. Cette différence est surtout visible pour les zones à fortes densités de population.

La relation empirique développée dans la présente étude (équation 3.5) n'est pas basée sur un modèle de régression logarithmique. Elle est dérivée d'un ajustement visuel d'une courbe comprise entre la relation de Stankowski et la courbe de régression réelle. La courbe de régression limitait le C_R maximum à une valeur d'environ 60% et le C_R moyen pour certains secteurs de l'île doit être supérieur à cette valeur. La seule limite à l'utilisation de la relation 3.5 est que la densité de population doit être supérieure à 150 personnes/km² pour obtenir un C_R représentatif.

À partir des valeurs du C_R pour les différents secteurs, une carte de distribution du coefficient de ruissellement pour l'île de Montréal a été calculée. La figure 3.10 présente cette carte. Les régions du Mont-Royal ainsi que les grands parcs ressortent bien sur la carte. La zone de l'aéroport de Montréal et le secteur des grandes raffineries de l'est de l'île sont également mis en évidence par leur faible C_R . La partie centrale de l'île est caractérisée par un fort coefficient de ruissellement. Le C_R moyen pour l'ensemble de l'île de Montréal est d'environ 55%.

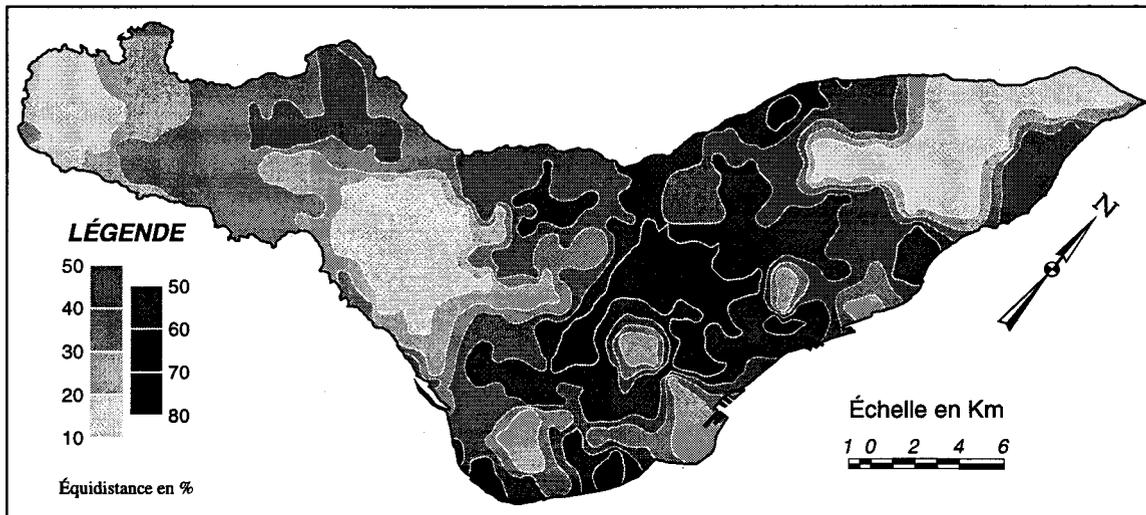


FIGURE 3.10: Carte isocontour du coefficient de ruissellement estimé.

3.5.2 Ruissellement

À l'aide des cartes de distribution des précipitations et du coefficient de ruissellement, nous avons calculé une carte du ruissellement ($R = C_R \cdot P$). La figure 3.11 illustre la répartition du ruissellement sur l'île de Montréal. Le plus fort volume d'eau ruisselée est observé dans la partie centrale de l'île. À partir de cette carte, il est possible de déterminer les quantités d'eau disponibles pour l'infiltration ($I = P - R$).

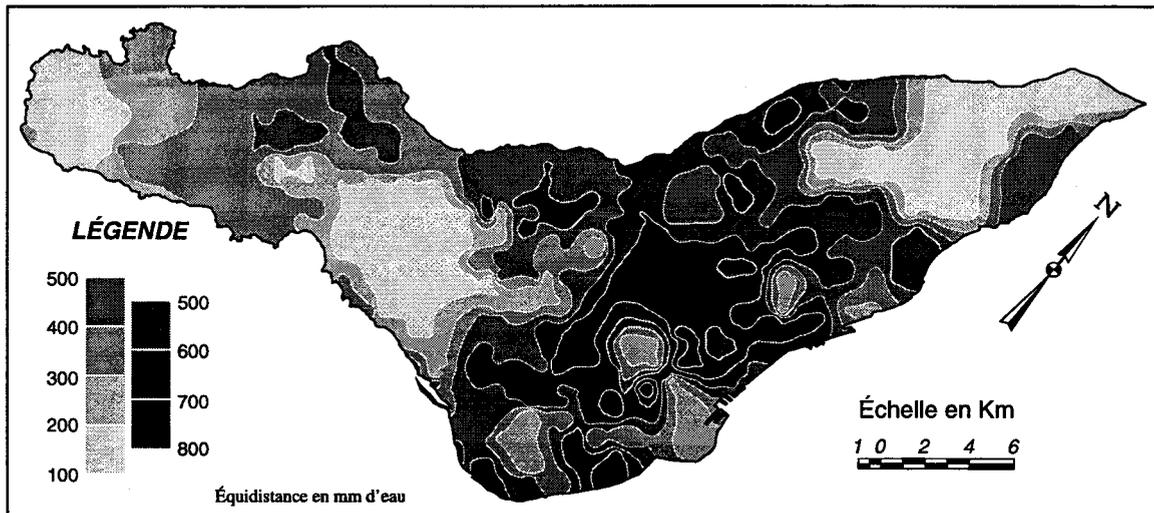


FIGURE 3.11: Carte isocontour du ruissellement annuel sur l'île de Montréal.

3.5.3 Évapotranspiration potentielle corrigée

Étant donné la nature fortement urbaine de l'île de Montréal, l'évapotranspiration calculée à la section précédente ne peut pas être directement considéré dans le calcul d'un bilan hydrologique. Une surface correspondant à une aire de stationnement n'a pas le même potentiel d'évapotranspiration qu'un parc gazonné. Pour tenir compte de cette relation entre l'évapotranspiration et le type de surface, nous avons utilisé les données de densité de population et la relation de Stankowski (1972). Cette relation prédit le pourcentage relatif de superficie imperméable (SI). Si nous prenons le complément ($1 - SI$) comme étant la fraction de la superficie totale soumise à l'évapotranspiration, nous pouvons corriger l'évapotranspiration potentielle préalablement calculée (section 3.4.2).

On retrouve, à l'annexe C, les pourcentages de superficie imperméable pour les différents secteurs de recensement. À partir de ces données, une carte de distribution du facteur de correction pour l'évapotranspiration potentielle a été construite. La figure 3.12 présente cette carte. Les zones ayant le plus fort potentiel d'évapotranspiration sont situées dans les extrémités de l'île.

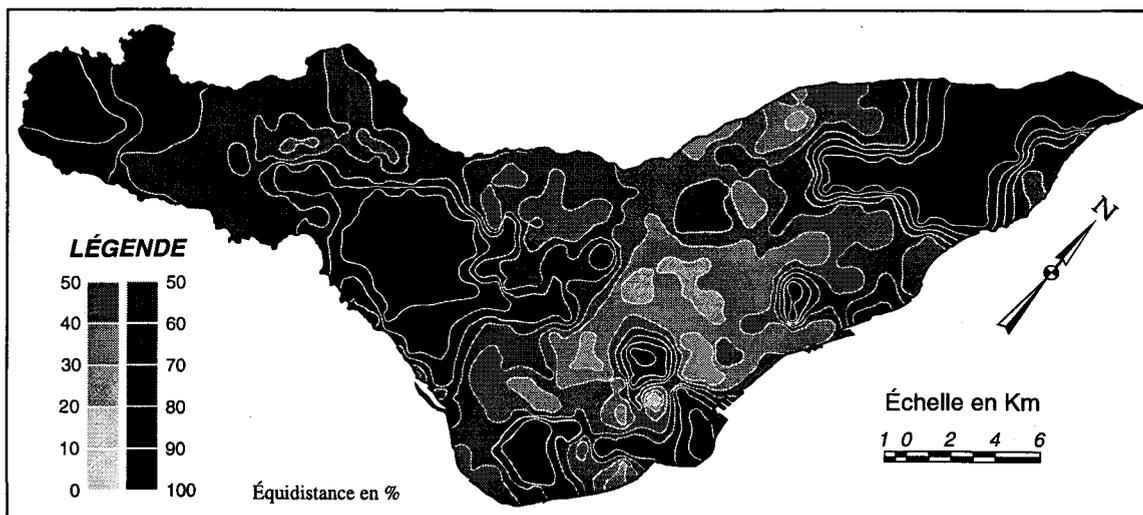


FIGURE 3.12: Carte isocontour du facteur de correction pour l'évapotranspiration.

En combinant la carte de l'évapotranspiration potentielle (figure 3.7) et celle du facteur de correction, nous pouvons représenter la distribution de l'évapotranspiration potentielle corrigée. La figure 3.13 illustre cette distribution. Pour le secteur du centre-ville, étant donné la forte densité de surface imperméable, on note un taux d'évapotranspiration très faible. À l'opposé, les extrémités de l'île montrent un fort taux d'évapotranspiration.

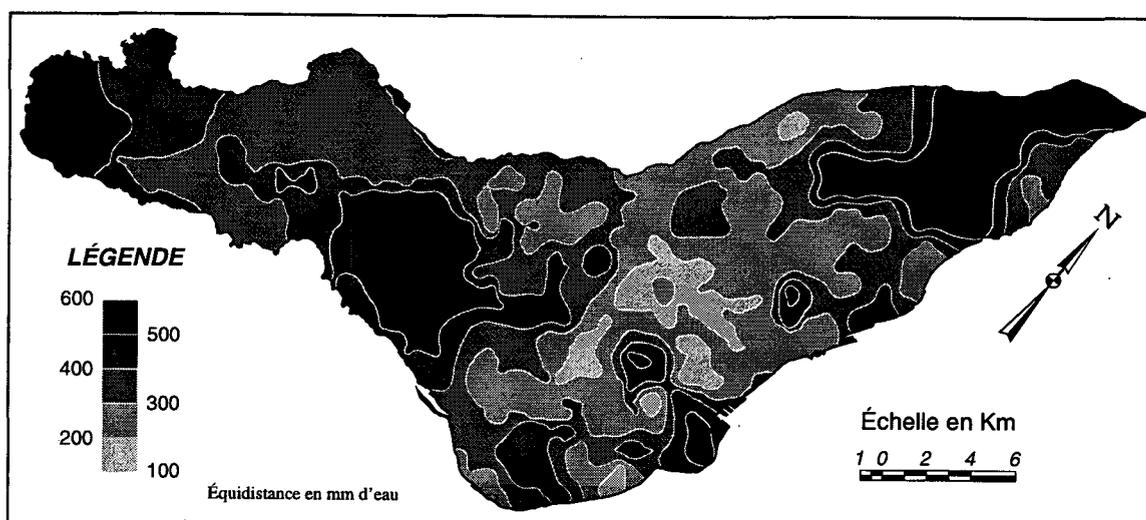


FIGURE 3.13: Carte isocontour de l'évapotranspiration CORRIGÉE.

En conclusion, grâce à la relation établie entre la densité de population et le coefficient de ruissellement, nous avons pu déterminer la distribution de ce paramètre. Les données de densité de population étant généralement compilées pour des secteurs couvrant une petite superficie, une bonne résolution dans la variation spatiale du C_R peut ainsi être obtenue. Cette distribution sert à déterminer la quantité de ruissellement qui sera intégrée dans le bilan hydrologique de l'île de Montréal. L'utilisation d'une telle approche permet de répartir, selon le type d'occupation du sol, un C_R moyen. Sans cette technique, le C_R aurait été uniforme et non représentatif des différentes surfaces de l'île de Montréal. De plus, en utilisant la relation de Stankowski (1972) reliant la densité de population et la superficie imperméable, nous pouvons corriger l'évapotranspiration. Un facteur de correction est appliqué afin de tenir compte, pour chaque secteur, du potentiel de la surface à évapotranspirer.

3.6 ÉVALUATION DU TAUX DE POMPAGE SUR L'ÎLE DE MONTRÉAL

Lors de l'élaboration du modèle conceptuel, nous avons décidé de tenir compte d'un certain nombre de facteurs affectant la recharge de la nappe. Ces facteurs correspondent aux divers types de pompage observés sur l'île. Nous les regroupons selon trois principaux groupes, soit: les pompages dans les carrières actives de l'île, dans le métro de Montréal et, finalement, dans les puits industriels et résidentiels. Les facteurs retenus sont jugés comme ayant une influence non négligeable sur le niveau de la nappe phréatique.

3.6.1 Pompage dans les carrières

Sur l'île de Montréal, six carrières (figure 3.14) sont actuellement en exploitation (Bériault, 1977). Un certain volume d'eau doit être pompé dans ces carrières afin de maintenir les excavations à sec. Le tableau 3.11 présente le débit annuel pompé dans ces carrières. Ce débit est généralement approximatif et est basé sur le type de pompe utilisé et la durée du pompage. Pour les carrières Miron, Francon et Lafarge, le débit annuel est estimé à partir d'études d'ingénierie portant sur ce sujet (Rouillard et Bodineau, 1994; Groupe Conseil ENTRACO, 1994).

TABLEAU 3.11: Taux de pompage dans les carrières de l'île de Montréal.

<i>Nom de la carrière</i>	<i>Élévation du fond[*] (m)</i>	<i>Débit (m³/an)</i>	
Miron (Montréal)	-35	971 265	¹
Francon (Montréal)	-40	1 999 350	¹
Lafarge (Montréal Est)	-35	952 560	²
Demix (Montréal Est)	-55	900 930	³
Meloche (Pierrefonds)	-50	1 226 140	⁴
Pointe-Claire (Kirkland)	-50	564 070	⁴
DÉBIT TOTAL POMPÉ (m³/an): 6 614 315			

* par rapport au N.M.M.

¹ Rouillard et Bodineau (1994)

² Groupe Conseil Entraco Inc. (1994)

³ approximation basée sur la durée moyenne du pompage et sur la capacité de la pompe

⁴ approximation basée sur le type de pompe utilisé

Environ un million de mètres cubes par an est pompé à chaque carrière, pour un total combiné de plus de 6 millions de mètres cubes. On pompe le plus grand volume d'eau, soit un peu moins de 2 millions de mètres cubes par an, à la carrière Francon. Nous avons corrigé les débits pour tenir compte de l'apport des précipitations dans le débit total pompé. La précipitation est le seul facteur dont nous avons tenu compte dans cette correction. La proportion provenant du ruissellement n'a pas été estimée.

3.6.2 Pompage dans le métro

Les tunnels du métro de la Société de transport de la communauté urbaine de Montréal (STCUM) ne sont pas entièrement étanches. Le radier des tunnels repose sur un lit de pierre concassée relié à un système de drainage. Ce dernier a pour but d'intercepter les eaux d'infiltration, soulageant ainsi la structure des pressions hydrostatiques (*Tousignant, 1989*). La majorité des tunnels du métro (80%) sont construits dans le roc. Pour le creusage de ces tunnels, on utilise habituellement une méthode traditionnelle de dynamitage. Cette méthode provoque une fracturation relativement importante du roc sur une épaisseur de quelques mètres autour du tunnel (*Tousignant, 1989*). Généralement, c'est dans cette zone que l'eau circule et rejoint le drain à la base du radier.

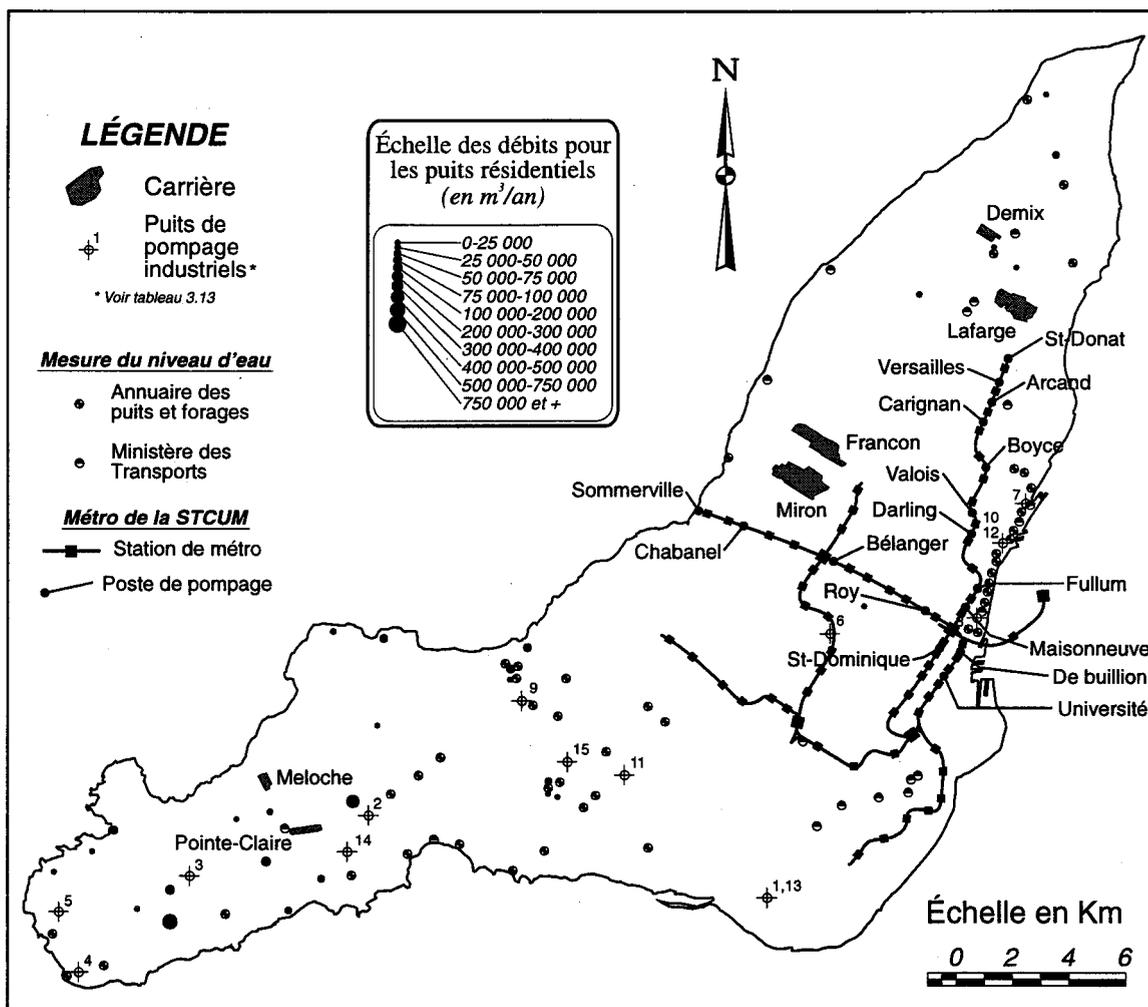


FIGURE 3.14: Carte des carrières, du méto et des principaux puits de l'île de Montréal.

Un autre phénomène facilite l'infiltration d'eau dans le méto. Étant donné les propriétés hydrogéochimiques des eaux d'infiltration (Konan, 1984), après un certain temps, de minces filets d'eau sont observés sur les parois des tunnels. Même si le béton est considéré comme imperméable, l'eau réussit quand même à s'écouler à travers la matrice. Ces infiltrations vont alors tranquillement détériorer le béton et agrandir les fissures. Les problèmes sont principalement liés aux fortes concentrations de chlorures et de sulfates qui attaquent le béton et ses agrégats (Konan, 1984; Tousignant, 1989). D'autres phénomènes, tel que la diminution du volume au cours du durcissement du béton peuvent provoquer la fissuration. Cependant, ce comportement du ciment Portland est normal dans de telles constructions. La présence de failles géologiques peut également influencer les quantités d'eau infiltrées (Durand, 1979; Tousignant, 1989). La majorité des eaux d'infiltrations sont acheminées par les drains aux postes d'épuisement. Il existe un tel poste pour

chaque segment du réseau situé entre deux stations consécutives du métro. Les postes pompent l'eau accumulée pour ensuite la rejeter dans le système d'égout. Cette opération équivaut à un prélèvement dans la nappe phréatique. La figure 3.15 illustre un poste d'épuisement situé entre deux stations.

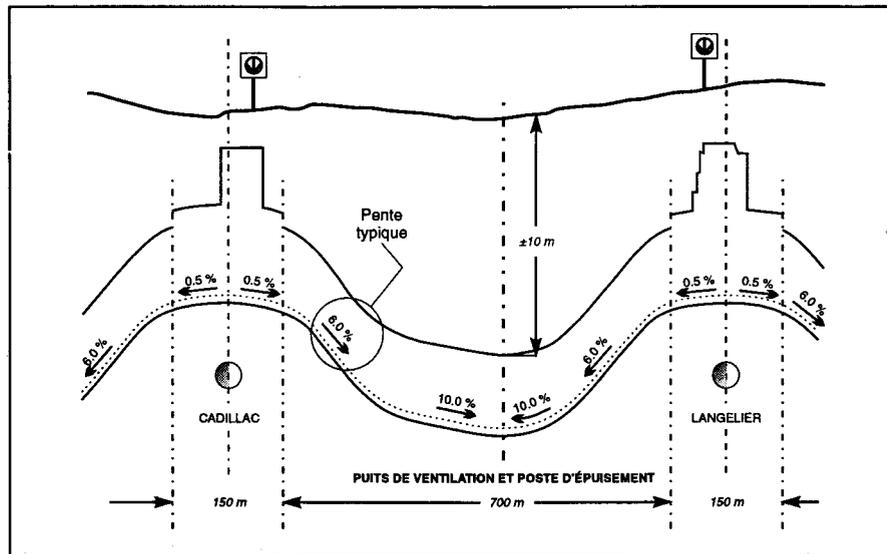


FIGURE 3.15: Exemple d'un poste d'épuisement situé entre deux stations (tiré de Nadeau, 1977).

La figure 3.14 présente une carte du réseau des tunnels pour le métro de la STCUM et l'emplacement des postes d'épuisement pour lesquels nous possédons des données. Peu d'information relative aux débits pompés aux divers postes d'épuisement est disponible. Cette situation découle, selon le Bureau de Transport Métropolitain, du peu d'information utile tirée de ces valeurs (Tousignant, 1989). Aucun relevé n'a été fait depuis 1980. Le tableau 3.12 présente les valeurs mesurées du débit d'infiltration dans le métro de la STCUM. Seulement 15 postes d'épuisement sur 70 ont été recensés. Pour avoir une approximation de la quantité annuelle d'eau prélevée par l'ensemble des stations de pompage, une extrapolation basée sur la moyenne des postes connus a été réalisée. On calcule ainsi une moyenne d'eau pompée par poste égale à 30 000 mètres cubes par an. Le débit total pompé annuellement est d'environ 2 millions de mètres cubes. Cette quantité est appréciable et sûrement non négligeable dans l'établissement d'un bilan hydrologique.

TABLEAU 3.12: Débits d'infiltration dans le métro de la STCUM (*tiré de Tousignant, 1989*) [(1) C: Chazy; T: Trenton; D.M.: Dépôts meubles (2) Couverture de roc à la voûte (3) Longueur de tunnel drainé par le poste d'épuisement (en mètres) (4) Débit par mètre linéaire de tunnel].

<i>POSTE</i>	<i>FORMATION¹</i>	<i>FAILLE</i>	<i>COUVERTURE²</i> (mètre)	<i>TUNNEL³</i> (mètre)	<i>DÉBIT⁴</i> (m ³ /an/m)	<i>DÉBIT</i> (m ³ /an)
St-Donat	T		3	900	16	14 134
Versailles	T	X	2 à 16	775	27	20 714
Arcand	T		6 à 16	750	8	5 655
Carignan	T		6 à 16	675	47	31 801
Boyce	T	X	3 à 15	800	58	46 218
Valois	T	X	6 à 15	625	13	8 288
Darling	T		4 à 12	650	20	12 776
Fullum	T	X	5 à 10	1 200	69	83 242
Maisonneuve	D. M.		-	550	19	10 353
St-Dominique	D. M.		-	350	54	19 019
Sommerville	C		6 à 15	825	100	82 883
Chabanel	C	X	2 à 12	1 375	33	45 546
Bélangier	C		3 à 8	750	29	21 918
Roy	T	X	3 à 12	1 125	22	24 219
University	D. M.		-	500	45	22 568
DÉBIT TOTAL POMPÉ (m³/an):						449 332
<i>Moyenne pour chaque poste (m³/an):</i>						<i>29 955</i>
<i>Nombre de postes sans mesure:</i>						<i>55</i>
DÉBIT TOTAL POMPÉ POUR CES POSTES (m³/an):						1 647 525
DÉBIT TOTAL POMPÉ POUR L'ENSEMBLE DU MÉTRO (m³/an):						2 096 857

Le volume d'eau soustrait par les postes d'épuisement du métro de la STCUM sera comptabilisé dans le bilan hydrologique de l'île de Montréal (*section 3.7*). Il était trop difficile de représenter à l'aide du modèle numérique l'effet des stations de pompage. Même si ces stations sont ponctuelles, elles pompent un volume d'eau provenant d'un certain rayon d'influence. Il n'est pas possible de quantifier ce rayon. Le choix d'en tenir compte dans le bilan est l'option la plus pratique.

3.6.3 Pompage dans les puits de l'île de Montréal

Le dernier type de pompage dont nous tenons compte dans le modèle conceptuel est celui dans les puits de l'île de Montréal. On divise les puits selon le type d'utilisateurs: les puits

industriels et ceux résidentiels. L'ensemble de ces puits pompe un volume appréciable d'eau provenant de la nappe. Étant donné les caractéristiques du modèle utilisé, il est difficile de représenter adéquatement un puits de pompage. La sollicitation exercée par le puits est trop ponctuelle par rapport à une cellule (diamètre du puits de quelques centimètres par rapport à une cellule de 0,1225 km²). Dans un modèle régional, cette influence est trop petite pour être représentée. Cependant, afin de tenir compte de ces pompages dans le modèle, nous avons décidé de soustraire le volume d'eau prélevé dans le bilan hydrologique. Ce volume d'eau sera réparti uniformément sur toute la superficie de l'île.

3.6.3.1 Puits industriels et commerciaux

En 1978, selon Bériault et Simard (1978), 58 puits étaient en opération sur l'île de Montréal. De ce nombre, 92% étaient utilisés par des industries ou des commerces et seulement 8% par des particuliers. Selon une estimation de Bériault et Simard (1978), en 1975, ces puits prélevaient annuellement près 8 millions de mètres cubes d'eau.

Selon Boyer et al. (1985), environ 1% des 2,3 millions mètres cubes d'eau utilisés chaque jour sur le territoire de la Communauté Urbaine de Montréal provient des aquifères. Cette quantité représente environ 8,4 millions de mètres cubes d'eau annuellement. Ce volume d'eau est principalement exploité par les puits industriels. Cette approximation est en accordance avec celle de Bériault et Simard (1978).

La figure 3.16 montre l'évolution du nombre de puits sur l'île ainsi que le débit total pompé pour la période 1900 à 1976 (Bériault et Simard, 1978). Le nombre maximum de puits présents sur l'île est observé vers les années 1935-1945. Cette période correspond à la deuxième guerre mondiale, période marquée par une forte industrialisation.

Pour déterminer l'évolution du nombre de puits et du débit pompé après 1976, les courbes ont été extrapolées en supposant que la tendance observée se maintienne. On obtient ainsi, pour 1995, un total d'environ 20 puits avec un volume pompé de près de 2,2 millions de mètres cubes annuellement. Si l'on compare ces résultats aux estimations faites par Boyer et al. (1985) ainsi que par Bériault et Simard (1978), nous devons conclure à une diminution de près de 30% de la consommation d'eau provenant de la nappe souterraine durant les 10 dernières années.

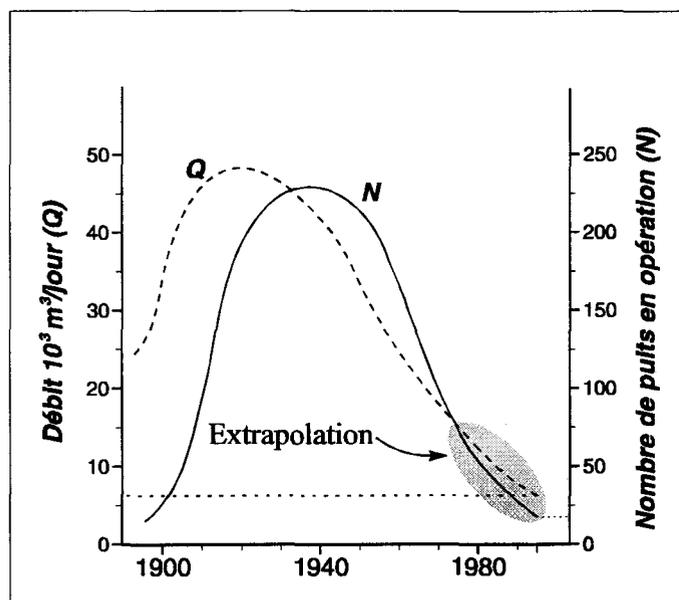


FIGURE 3.16: Évolution de l'usage de l'eau souterraine sur l'île de Montréal (tiré de Bériault et Simard, 1978).

Afin de vérifier cette extrapolation, nous avons estimé les débits pompés par une autre méthode. En se basant sur la liste des puits industriels et commerciaux exploités sur l'île de Montréal (Bériault et Simard, 1978), nous avons fait une extrapolation des débits pompés. Le tableau 3.13 présente, d'un côté, la liste originale des principaux puits exploités selon l'étude de Bériault et Simard. De l'autre côté, nous avons éliminé les puits des compagnies qui n'existent plus ainsi que les puits à très faible débit. On retrouve donc une liste de 15 puits industriels ou commerciaux probablement encore en exploitation sur l'île. Ce nombre de puits correspond approximativement à celui prédit en extrapolant les courbes de la figure 3.16. Le débit est de l'ordre de 6 millions de mètres cubes par an, ce qui est nettement supérieur aux estimations faites. Cependant, cette dernière valeur est jugée plus réaliste car elle tient compte plus précisément des différents puits en exploitation sur l'île de Montréal.

3.6.3.2 Puits résidentiels

L'autre catégorie de puits exploités sur l'île de Montréal est celle des puits résidentiels. Selon l'Annuaire des Puits et Forages du Québec (ministère de l'Environnement, 1984b), près de 100 puits sur l'île de Montréal appartiennent à des particuliers (figure 3.14). Certains de ces puits servent encore à l'alimentation en eau des résidents.

TABLEAU 3.14: Puits résidentiels sur l'île Montréal.

<i>UTMX</i>	<i>UTMY</i>	<i>Profondeur</i> (mètre)	<i>Débit</i> (m ³ /an)	<i>UTMX</i>	<i>UTMY</i>	<i>Profondeur</i> (mètre)	<i>Débit</i> (m ³ /an)
Montréal-Est				St-Laurent			
611000	5053000	4.57	47 304	597050	5039100	1.43	-
613600	5054450	1.25	-	597250	5039250	1.46	-
613600	5054700	6.10	1 051	597250	5039650	6.10	79 366
614400	5054000	3.05	9 461	598700	5037950	2.74	-
616350	5054180	2.07	-	598950	5039270	2.10	-
Montréal				Senneville			
604450	5047100	2.53	-	600400	5036700	3.47	-
609300	5042000	4.57	13 666	601850	5038300	2.74	-
613350	5041900	4.57	-	602450	5037780	3.05	-
613550	5042190	4.63	-	Ste-Anne-de-Bellevue			
613650	5042540	6.04	-	581200	5032150	3.66	14 191
613720	5042810	4.88	-	582500	5032850	5.49	15 768
613800	5043150	10.79	-	Ste-Anne-de-Bellevue			
613870	5043850	6.10	-	581600	5028500	6.10	27 331
613980	5043620	5.24	-	583000	5028920	2.13	-
614100	5043850	9.14	-	584100	5030900	7.32	24 178
614200	5044300	13.72	19 447	585350	5031600	4.57	190 793
614300	5044250	10.06	13 666	Kirkland			
614380	5044460	6.89	-	585300	5030500	1.49	783
614480	5044720	5.79	-	585900	5032000	3.05	1 603
614480	5046920	3.72	-	588600	5032600	3.96	2 081
614640	5059880	2.44	-	588700	5034400	5.18	39 788
614750	5045400	5.64	-	Pointe-Claire			
614800	5046750	3.96	-	591600	5032200	3.38	-
614900	5045720	4.57	-	591900	5034600	8.23	4 326
615050	5046220	4.45	-	592900	5035080	2.93	-
615100	5046220	7.25	-	593460	5033000	1.25	-
615300	5060100	6.10	9 461	593600	5033000	0.70	-
615700	5057950	9.14	59 393	593850	5035770	3.05	-
616000	5056940	3.05	-	594600	5036400	3.66	71 482
597500	5040300	6.10	99 470	Dorval			
Lachine				595350	5033350	1.92	-
598350	5035650	3.84	59 393	597200	5032450	3.20	-
598400	5035200	5.30	23 652	598300	5033200	1.22	-
598400	5035400	0.00	14 191	599650	5034720	4.69	-
598500	5035500	5.64	9 461	584000	5038400	3.66	19 894
598700	5035100	6.10	21 024	Pierrefonds			
600050	5035160	3.14	-	583160	5033630	2.74	79 366
601900	5033360	3.23	-	590900	5040800	1.52	47 304
Beaconsfield				592420	5040700	6.10	79 366
587200	5030800	2.13	-	596800	5039750	3.11	-
590600	5032100	3.05	47 304	596900	5039620	0.98	-
589600	5030700	3.05	39 788	596980	5039550	1.31	-
				Dollard des Ormeaux			
				592400	5037500	0.91	7 884

Profondeur moyenne de la nappe (m) : 4.23

DÉBIT TOTAL POMPÉ - (m³/an) : 1 193 233

ESTIMATION du DÉBIT TOTAL POMPÉ:

50% du débit de production (m³/an) : 596 617

3.6.3.3 Piézométrie

L'ensemble des puits industriels, commerciaux, résidentiels et ceux du ministère des Transports sont représentés à la figure 3.14. On remarque la grande concentration de puits dans l'ouest de l'île, surtout des puits de particuliers. L'autre grande concentration de puits se situe le long du fleuve St-Laurent, au nord du Port de Montréal où l'on retrouve surtout des puits industriels ainsi que des puits du ministère des Transports. Les plus grands débits pompés sont situés dans l'extrémité ouest de l'île de Montréal.

À l'aide de ces données et de la carte topographique (figure 2.2), il est possible de calculer une carte piézométrique. La figure 3.17 illustre l'élévation de la nappe phréatique calculée selon ces données. La différence avec la carte piézométrique de Bériault et Simard (figure 3.1) est peu significative. En l'absence de données piézométriques fiables, nous pouvons utiliser les données de l'Annuaire des Puits et Forages même si, généralement, les mesures ne sont pas prises à la même période de l'année et dans les mêmes conditions. Étant donné le régime permanent de la nappe, les fluctuations annuelles influencent peu les données.

À partir des données de l'Annuaire des Puits et Forages (tableau 3.14), nous avons estimé la profondeur de la nappe par rapport au sol à 4,2 mètres. Selon une autre source, la banque de données du ministère des Transports (*ministère des Transports, 1994 – voir annexe D*), la profondeur moyenne de la nappe se situe à environ 3,4 mètres. Cependant, la plupart des mesures sont effectuées dans des forages situés près du fleuve (Port de Montréal), ce qui peut influencer partiellement les résultats. Nous indiquons également à la figure 3.14 l'emplacement des puits du ministère des Transports sur l'île de Montréal. Selon la banque de données de la Ville de Montréal (*annexe A*), la profondeur moyenne de la nappe est de 4,1 mètres. Cette moyenne est établie à partir de 8 840 mesures de la profondeur de l'eau. Mise à part la moyenne obtenue à partir des données du ministère des Transports, les profondeurs moyennes estimées correspondent à la valeur avancée par Boyer et al. (1985). Nous considérons que la nappe est, en moyenne, à une profondeur de 5 mètres ou moins par rapport à la topographie naturelle du sol.

En résumé, les puits industriels et commerciaux prélèvent 5,7 millions de mètres cubes d'eau par année, tandis que les puits des particuliers pompent environ 600 000 mètres cubes annuellement. Le volume total d'eau soutiré de la nappe par les différents puits s'élève à environ

6,3 millions de mètres cubes, soit plus de 17 000 m³/jour. Le métro de la STCUM pompe annuellement plus de 2 000 000 m³ d'eau. De leurs cotés, les carrières encore actives doivent pomper près de 6 500 00 m³/an afin de maintenir les excavations à sec.

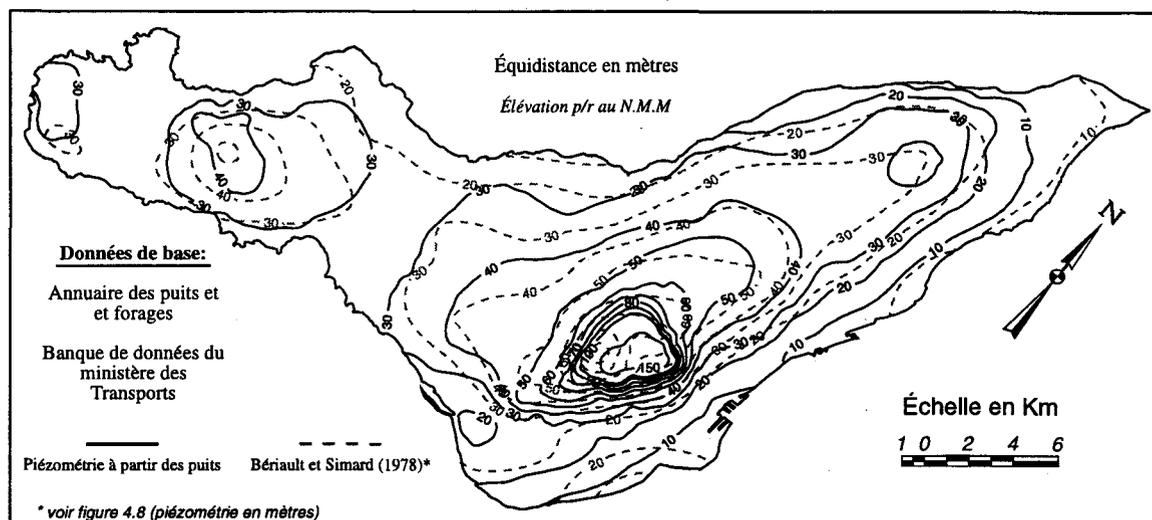


FIGURE 3.17: Carte isopièze calculée à partir du niveau dans les différents puits.

3.7 BILAN HYDROLOGIQUE GLOBAL DE L'ÎLE DE MONTRÉAL

L'établissement d'un bilan hydrologique annuel permet de quantifier la recharge de l'aquifère. À l'aide de la distribution spatiale des précipitations, de l'évapotranspiration, du ruissellement ainsi que les quantités pompées, on peut construire le bilan hydrologique global de l'île de Montréal. L'expression mathématique de ce bilan est simple et est la suivante:

$$PTE - R - ETP_C - P = Rch \quad (3.7)$$

où: PTE = Précipitation (mm/an)
 R = Ruissellement (mm/an)
 ETP_C = Évapotranspiration potentielle corrigée (mm/an)
 P = Volume total d'eau pompé (m³/an): carrières, métro et puits
 et Rch = Recharge annuelle nette (mm/an)

Toutes ces composantes sont transformées en volume équivalent d'eau. Pour ce faire, nous multiplions ces valeurs par la superficie de l'île (465 km²).

Étant donné que le bilan est établi sur une base annuelle, nous considérons qu'à long terme, il n'y a pas de variations de l'emmagasinement. Cette composante est généralement incluse dans les bilans hydrologiques pour tenir compte des variations de la quantité d'eau dans le sol nécessaire par les plantes.

À l'aide des différentes cartes de précipitation, ETP_C et ruissellement, nous avons calculé une carte de recharge annuelle de l'aquifère. Les pompages des puits industriels, commerciaux et résidentiels, des carrières encore actives ainsi que ceux dans les postes d'épuisement du métro ont été considérés comme un volume d'eau uniformément soustrait de la recharge.

La figure 3.18 présente la distribution de la recharge nette qui se rend à l'aquifère. Les zones de plus forte recharge sont situées dans la partie ouest de l'île (aéroport de Dorval) et dans la partie est de l'île (raffineries, grands espaces verts, etc.). On remarque également que la région du Mont-Royal correspond à un secteur de réalimentation important pour la nappe souterraine. Les secteurs du Port de Montréal et du Jardin Botanique correspondent également à des zones de recharge. Cependant ces zones sont de plus faible importance.

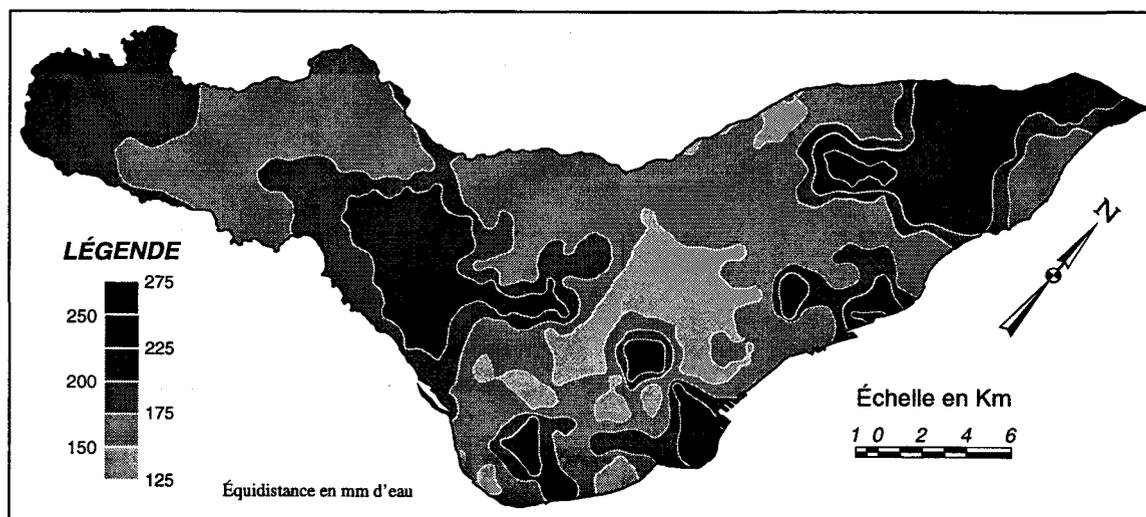


FIGURE 3.18: Carte isocontour de l'infiltration annuelle (moyenne) sur l'île de Montréal.

Afin d'avoir une estimation de la recharge moyenne de l'aquifère de l'île de Montréal, un bilan moyen a également été calculé. Au lieu de considérer les distributions des paramètres du bilan, nous avons utilisé les valeurs moyennes de ces paramètres. De plus, toutes les formes de pompage: puits, métro et carrières, ont été considérées. Le tableau 3.15 présente le bilan hydrologique moyen pour l'île de Montréal.

TABLEAU 3.15: Bilan hydrologique annuel moyen pour l'île de Montréal.

SUPERFICIE de l'île: 465 X 10⁶ m²

	Volume d'eau	
	<i>mm d'eau/an</i>	<i>m³/an</i>
Précipitation	1000	4.65E+08
<i>Coefficient de Ruissellement moyen</i>	<i>0.55</i>	
Ruissellement	550	2.56E+08
Évapotranspiration Potentielle	610	2.84E+08
<i>Correction pour l'ETP</i>	<i>0.45</i>	
Évapotranspiration potentielle corrigée	275	1.28E+08
POMPAGE		
<i>Carrière</i>		<i>6.46E+06</i>
<i>Métro</i>		<i>2.10E+06</i>
<i>Puits industriels</i>		<i>5.73E+06</i>
<i>Puits résidentiels</i>		<i>5.97E+05</i>
TOTAL		1.49E+07
RECHARGE		6.52E+07

La recharge annuelle moyenne est d'environ 65,2 millions de mètres cubes d'eau. Cette recharge correspond à une lame d'eau équivalente de 140 mm. La recharge représente donc 14% des précipitations. Le pourcentage d'eau pompé par rapport aux précipitations est de l'ordre de 3%. Si les pompages n'étaient pas considérés, la recharge serait d'environ 81 millions de mètres cubes annuellement, soit une lame d'eau de 174 mm. Cette recharge représenterait 17,4% des précipitations.

Selon Grice et Eggboro (1978), la recharge de l'aquifère sur l'île de Montréal est de l'ordre de 51,1 millions de mètres cubes annuellement (140 Ml/j). Boyer et al. (1985) estiment que 12% des précipitations s'infiltrent et rechargent la nappe souterraine. Ces valeurs correspondent

sensiblement aux valeurs trouvées précédemment. La présente méthode est, par conséquent, adéquate pour déterminer la recharge. De plus, elle procure une distribution spatiale de la recharge sur l'île.

La figure 3.19 présente un graphique de l'évolution des précipitations, du ruissellement, de l'évapotranspiration potentielle et réelle ainsi que de la recharge au cours d'une année typique. Les pompages ne sont pas comptabilisés dans ce graphique. Les périodes de forte recharge sont l'automne et le printemps. Pour être plus réaliste, la recharge calculée pour les mois d'hiver (décembre à mars) doit être transférée au printemps pour tenir compte des conditions climatiques de gel au sol qui limite l'infiltration. On note que durant l'été, la nappe ne reçoit presque pas de recharge.

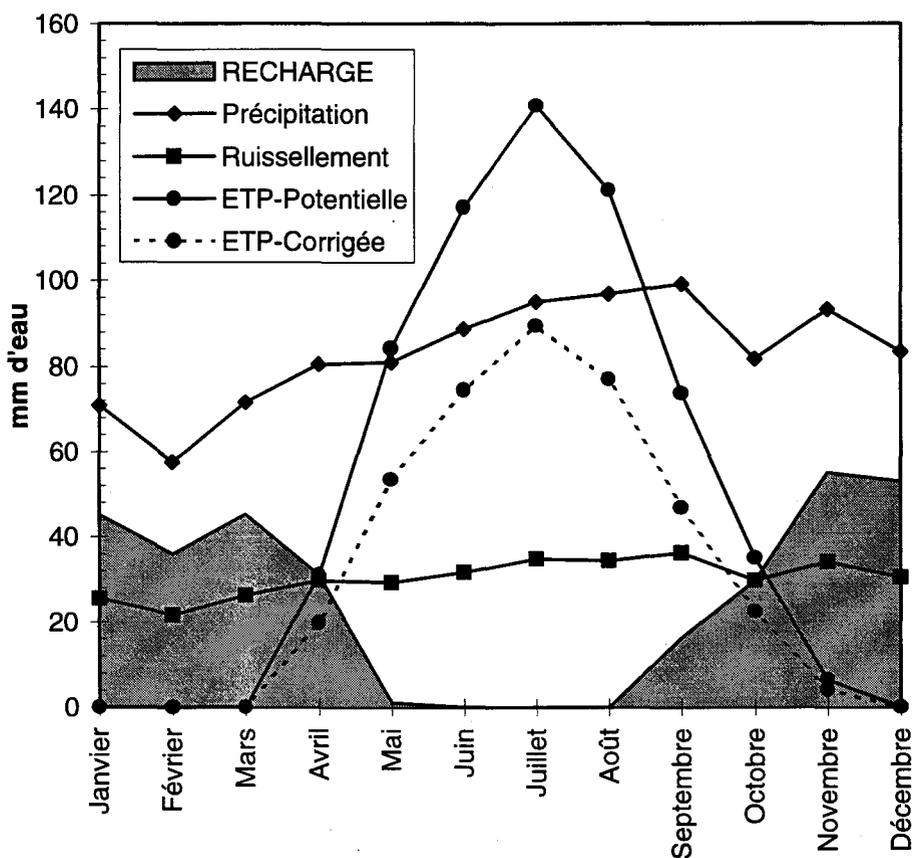


FIGURE 3.19: Bilan hydrologique mensuel typique (les pompages ne sont pas inclus).

3.8 ESTIMATION INITIALE DES CONDUCTIVITÉS HYDRAULIQUES

Un des paramètres hydrogéologiques les plus difficiles à déterminer régionalement est la distribution de la conductivité hydraulique. Même si un des objectifs du modèle régional d'écoulement est de calibrer la conductivité hydraulique des différentes couches, une valeur initiale représentative doit être assignée. Les couches 1 et 2 sont représentées par une distribution variable de la conductivité hydraulique. La couche 3 est représentée par une conductivité unique. La conductivité de la couche 1 est reliée au type de dépôts meubles présents. Celles de la couche 2 et 3 sont fonction du type de lithologie.

3.8.1 Conductivité hydraulique des dépôts meubles

La couche 1 représente les dépôts meubles de l'île de Montréal. Au chapitre 2, les caractéristiques géotechniques et granulométriques de ces dépôts ont été présentées. On peut alors assigner une texture à chaque dépôt meuble selon la classification USDA (*USDA, 1972*). Afin de déterminer la conductivité hydraulique, nous avons relevé, dans un premier temps, toutes les études portant sur la correspondance entre la conductivité et la classification USDA. Le tableau 3.16 présente le résumé des principales études portant sur ce sujet. La moyenne ainsi que l'écart-type entre les valeurs est montré. L'étendue des valeurs probables est également présentée. L'écart-type est généralement faible par rapport à la moyenne car les conductivités hydrauliques fournies par les différents auteurs sont toutes du même ordre de grandeur.

Une deuxième source d'informations a été utilisée. Maidment (1992) présente le triangle des textures USDA avec des courbes de conductivité hydraulique. À partir de ce triangle, la conductivité des divers tills de l'île de Montréal a pu être estimée. La figure 3.20 présente le triangle USDA avec les courbes de conductivité hydraulique.

Une autre approche a été utilisée afin d'obtenir d'autres valeurs typiques de conductivité. Nous avons relevé, dans la littérature, différentes études hydrogéologiques sur des tills et autres dépôts meubles similaires à ceux de l'île de Montréal. Le tableau 3.17 présente le résultat de cette recherche. On y retrouve, notamment, la classification USDA des dépôts ainsi que le type d'essai réalisé pour déterminer la conductivité hydraulique.

TABLEAU 3.16: Conductivité hydraulique des dépôts meubles selon la texture
(classification USDA) – *Moy.* = *Moyenne*; *É-T* = *Écart-type*.

Classification		Conductivité Hydraulique (m/s)			Moy. (m/s)	É-T (m/s)	Valeur Probable	
		Maidment (1992)	Rawls & al. (1982)	Rawls (1978)			-2 σ	+2 σ
		Sable	S	6.5E-05			5.8E-05	5.8E-05
Sable limoneux	LS	1.7E-05	1.7E-05	1.7E-05	1.7E-05	2.2E-07	1.6E-05	1.7E-05
Limon sablonneux	SL	6.1E-06	7.2E-06	7.2E-06	6.8E-06	6.6E-07	5.5E-06	8.1E-06
Limon	L	3.7E-06	3.7E-06	1.9E-06	3.1E-06	1.0E-06	1.0E-06	5.2E-06
Limon-silteux	SiL	1.9E-06	1.9E-06	6.4E-06	3.4E-06	2.6E-06	—	8.7E-06
Limon argileux-sableux	SCL	8.3E-07	1.2E-06	1.2E-06	1.1E-06	2.1E-07	6.6E-07	1.5E-06
Limon argileux	CL	5.6E-07	6.4E-07	6.4E-07	6.1E-07	4.8E-08	5.1E-07	7.1E-07
Limon silteux-argileux	SiCL	5.6E-07	4.2E-07	4.2E-07	4.6E-07	7.9E-08	3.1E-07	6.2E-07
Argile sablonneuse	SC	3.3E-07	3.3E-07	3.3E-07	3.3E-07	1.9E-09	3.3E-07	3.4E-07
Argile silteuse	SiC	2.8E-07	2.5E-07	2.5E-07	2.6E-07	1.6E-08	2.3E-07	2.9E-07
Argile	C	1.7E-07	1.7E-07	1.7E-07	1.7E-07	1.9E-09	1.6E-07	1.7E-07

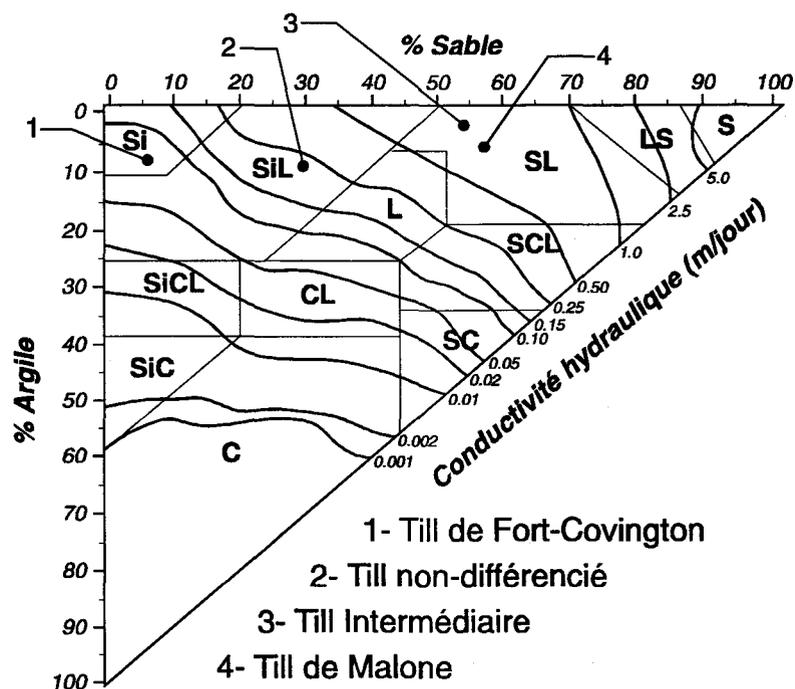


FIGURE 3.20: Triangle des textures USDA avec les courbes de conductivité hydraulique
(adapté de Maidment, 1992).

Étant donné que l'on ne possède pas directement de mesures de la conductivité des différents dépôts meubles de l'île de Montréal mais que l'on a certaines données sur les

caractéristiques géotechniques et granulométriques de ces dépôts, cette méthode peut être avantageuse. Elle sert alors à déterminer une série de valeurs typiques de conductivité à partir de dépôts similaires. Il faut cependant considérer que plusieurs autres facteurs, autres que la granulométrie, influencent la conductivité. Ces facteurs peuvent être liés, par exemple, au degré de compaction du till, sa porosité, ainsi que son degré de saturation.

La conductivité hydraulique est une propriété très variable et couvre souvent plusieurs ordres de grandeur pour le même type de dépôt. Cette propriété est difficilement caractérisable régionalement. Par conséquent, la distribution de la conductivité hydraulique devra être raffinée par la suite, à l'aide du modèle. Pour débiter, l'important est surtout de générer une série de valeurs initiales représentant le mieux possible la conductivité des dépôts de l'île. Le tableau 3.18 présente un résumé des valeurs obtenues selon les différentes méthodes utilisées afin d'estimer la conductivité hydraulique des dépôts meubles de l'île de Montréal. Afin d'avoir une valeur de conductivité unique pour chaque type de dépôt, une moyenne a été calculée. Les conductivités varient de $6,0 \times 10^{-8}$ m/s pour les argiles marines de la Mer de Champlain à $6,0 \times 10^{-5}$ m/s pour les sables et graviers. La conductivité des dépôts de tourbe est fixée à $6,7 \times 10^{-5}$ m/s.

Maintenant que l'on possède une valeur typique de conductivité pour chaque catégorie de dépôt, nous pouvons déterminer une carte représentant la distribution de la conductivité hydraulique initiale pour la couche 1 du modèle conceptuel. Étant donné que la couche considérée dans le modèle conceptuel représente l'ensemble des dépôts meubles, nous ne pouvons pas directement attribuer la valeur typique de conductivité hydraulique selon le type de dépôt en surface (figure 2.4). Nous utilisons donc une méthode de pondération pour distribuer la conductivité hydraulique. Afin de construire cette carte, on suppose que la séquence stratigraphique est fonction du type de dépôt en surface. Pour un dépôt de surface donné, une succession typique des dépôts meubles est établie. Pour cette séquence, nous calculons une conductivité hydraulique équivalente selon le type et l'épaisseur des dépôts présents. La conductivité équivalente calculée considère la séquence comme une série de couches dans lesquelles l'écoulement se fait en parallèle. Pour ce faire, la relation suivante est utilisée (*Freeze et Cherry, 1979*):

$$K_x = \frac{\sum K_i z_i}{\sum z_i} \quad (3.8)$$

où K_i représente la conductivité hydraulique (en m/an) de la couche i et, z_i l'épaisseur (en m) de la couche i ;

TABLEAU 3.17: Conductivités hydrauliques de dépôts meubles similaires à ceux de l'île de Montréal.

<i>Références</i>	<i>Localisation</i>	<i>Types de mesures</i>	<i>Textures (granulométrie)</i>	<i>USDA</i>	<i>Conductivité (m/s)</i>
D'Astous et al. (1989)	Sarnia (Ontario)	essais de niveau d'eau	argile	C	1.0E-10
Keller et al. (1986)	Saskatoon (Saskatchewan)	essais de consolidation	argile	C	3.5E-11
McKay et al. (1993)	Sarnia (Ontario)	test de récupération de puits	argile	C	3.7E-08
Yuretich et al. (1989)	Massachusetts (États-Unis)		limon sablonneux 5% argile 25% silt 70% sable	SL	4.9E-09
Jones et al. (1992)	Iowa (États-Unis)	test de pompage (n=2)	loam	L	4.0E-08
Jones (1993)	Iowa (États-Unis)	purge des piézomètres	loam 20% argile 30% silt 50% sable	L	7.8E-09
Hinton et al. (1993)	Ontario	purge des piézomètres (n=56)	sable limoneux limon argileux-sablonneux	SL-SCL	2.3E-07
Lind (1989)	Suède	essais au perméamètre (n=42)	silteux - sablonneux (<i>< 5% argile</i>)	Si	5.0E-07
Keller et al. (1988)	Saskatchewan	essais de terrain et laboratoire (n=67)	argile silteuse - silt argileux	SiC	5.0E-09

TABLEAU 3.18: Conductivité hydraulique moyenne des dépôts meubles de Montréal [*Ref. A:* Littérature - textures USDA (*tableau 3.16*); *Ref B:* triangle des textures USDA (*figure 3.20*); *Réf. C:* Propriétés géotechniques (*tableau 2.3*); *Réf. D:* Littérature - tills divers (*tableau 3.17*)].

<i>Dépôts Meubles</i>	<i>Conductivité Hydraulique (m/s)</i>				MOYENNE <i>m/s</i>
	<i>Réf. A</i>	<i>Réf. B</i>	<i>Réf. C</i>	<i>Réf. D</i>	
Argile, limon (non-calcaire)	2.6E-07				2.6E-07
Sable (et un peu gravier)	6.1E-05				6.1E-05
Argile marine, limon (calcaire)	1.7E-07		5.07E-09	1.24E-08	6.2E-08
Sable et gravier	6.1E-05				6.1E-05
Till de Fort Covington		9.3E-07	1.01E-06	5.0E-07	8.1E-07
Till intermédiaire	6.8E-06	8.7E-06		7.1E-08	5.2E-06
Till Malone	6.8E-06	8.7E-06	1.01E-06	7.1E-08	4.1E-06
Till non-différencié	3.4E-06	2.3E-06	1.01E-06		2.2E-06

La figure 3.21 illustre cette méthode. Selon le type de dépôt de surface, une séquence stratigraphique est déterminée. Pour chaque colonne, la conductivité hydraulique équivalente est calculée. Chaque séquence débute par une couche d'un mètre de remblais pour simuler le remplissage et la couche de sol. Cette couche est supposée être présente partout sur l'île de Montréal et sa conductivité est fixée à $4,8 \times 10^{-5}$ m/s.

L'épaisseur des différentes couches est déterminée principalement à partir des coupes stratigraphiques présentées dans les études géotechniques de la Ville de Montréal (*Ville de Montréal, 1979; Ville de Montréal, 1984; Ville de Montréal, 1985; Boyer et al., 1985*). Ces épaisseurs représentent des moyennes approximatives. Selon cette méthode de calcul, la conductivité hydraulique équivalente est surtout contrôlée par la couche d'argile marine et celle de sable et gravier. Il est évident que cette méthode d'estimation de la conductivité équivalente est approximative. Cependant, elle permet de définir adéquatement la distribution de la conductivité hydraulique.

La figure 3.22 présente la carte de la conductivité hydraulique initiale pour la couche 1 du modèle conceptuel. La partie est de l'île ainsi que la région du Mont-Royal sont les zones de plus forte conductivité hydraulique. Ces zones sont caractérisées par la présence de roche en surface. Une simple couche de remblais avec une forte conductivité est alors considéré. Étant donné la faible épaisseur de ces couches, la transmissivité est cependant faible par rapport aux autres types de dépôts.

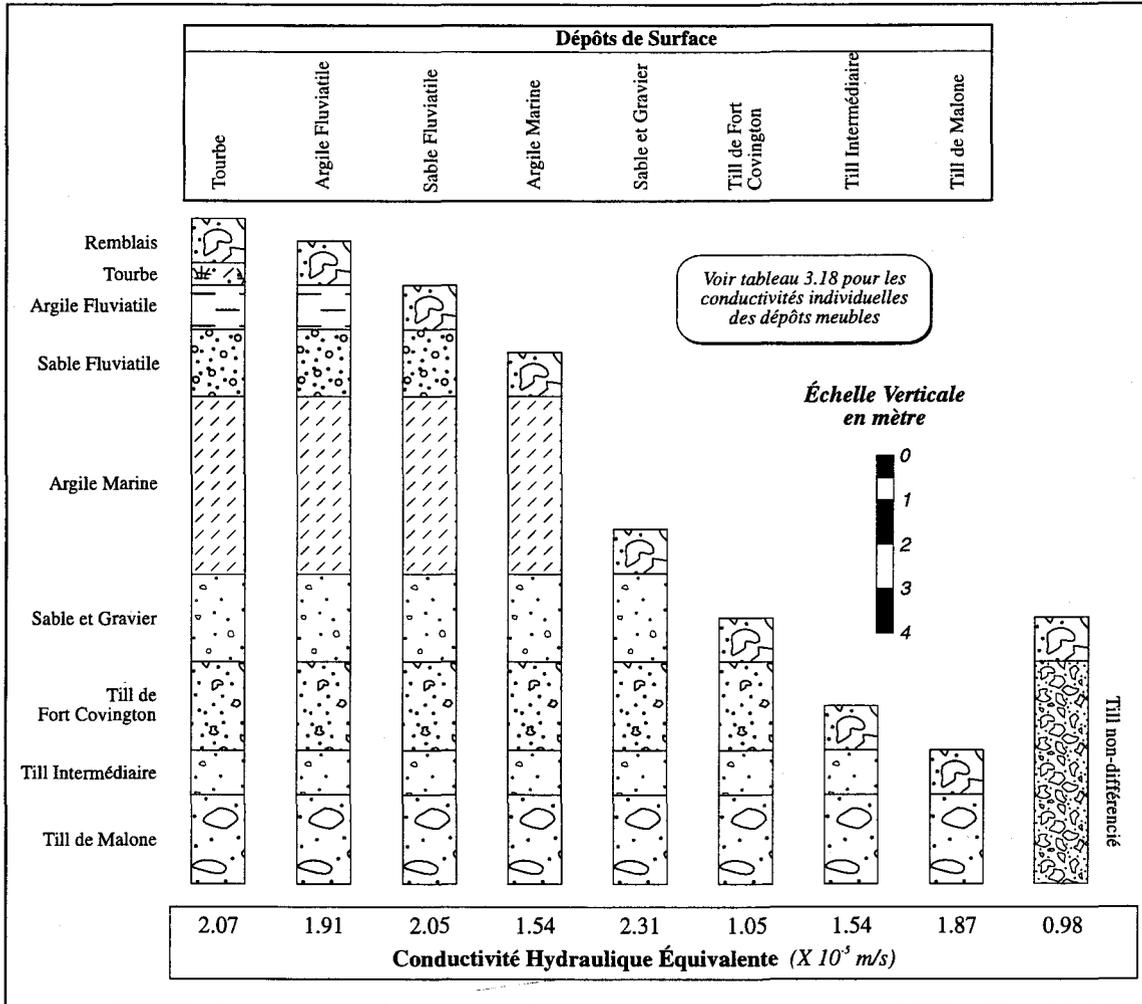


FIGURE 3.21: Conductivité hydraulique équivalente selon une coupe type basée sur les dépôts meubles en surface.

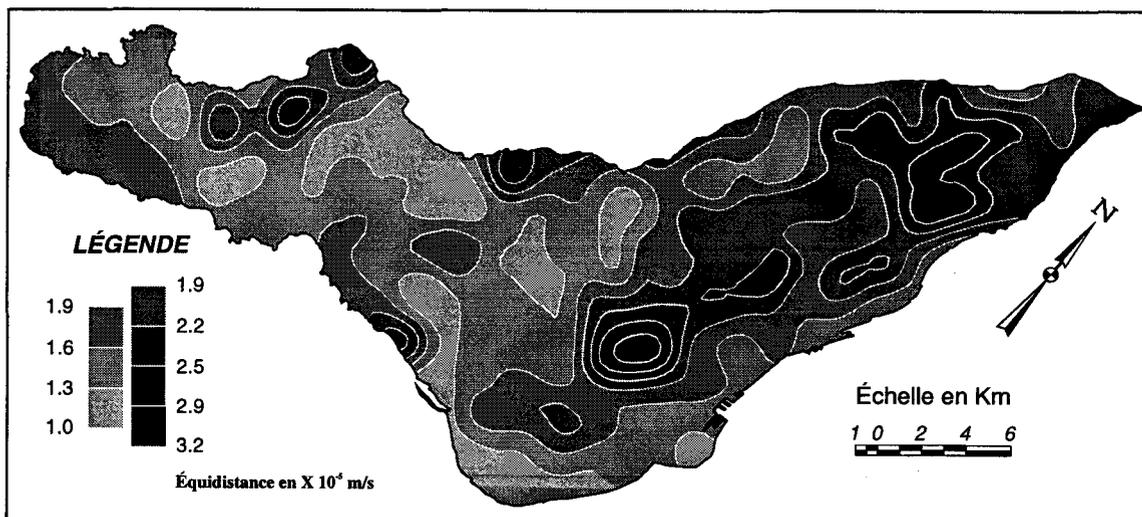


FIGURE 3.22: Carte isocontour de la conductivité hydraulique initiale de la couche 1.

3.8.2 Conductivité hydraulique du roc fracturé

La couche 2 représente le roc fracturé. Nous devons également déterminer une distribution de la conductivité hydraulique pour cette couche. Comme pour la couche 1, cette distribution sera par la suite calibrée à l'aide du modèle. Selon la carte représentant la géologie (figure 2.3), une conductivité hydraulique est assignée à chaque lithologie. Comparativement aux dépôts meubles, nous possédons des valeurs mesurées de la conductivité hydraulique pour les unités géologiques de l'île (*Bériault et Simard, 1978; Freeze, 1964; Tremblay, 1962*). Le tableau 3.19 présente les résultats des études hydrogéologiques faites dans la région de Montréal. Selon les différentes références, on note la transmissivité des lithologies composant le socle rocheux de l'île de Montréal.

Afin de valider ces valeurs, une brève revue de la littérature a été faite. Selon différents auteurs, une série de valeurs typiques de conductivité a été recensée pour les diverses lithologies de l'île. Le tableau 3.20 présente le résultat de cette recherche. Pour une lithologie donnée, les valeurs citées par les divers auteurs varient beaucoup. La grande variabilité de la conductivité hydraulique rend complexe la détermination et la distribution de ce paramètre.

Le tableau 3.21 présente la comparaison entre les conductivités moyennes des études hydrogéologiques et celles provenant de la littérature. La plupart des valeurs moyennes provenant des études hydrogéologiques sont un ordre de grandeur supérieures aux valeurs typiques tirées de la littérature. À partir des moyennes des études hydrogéologiques, nous avons déterminé la distribution de la conductivité hydraulique (figure 3.23). Ces valeurs sont utilisées comme données initiales pour la couche 2.

3.8.3 Conductivité hydraulique du roc sain

La couche 3, qui représente le roc sain, est caractérisée par une conductivité hydraulique uniforme. Cette conductivité initiale est fixée à $1,0 \times 10^{-7}$ m/s. Cette valeur est déduite à partir des valeurs typiques tirées de la littérature (tableau 3.20) et des valeurs considérées pour la couche 2. Au cours de la calibration, cette valeur pourra être changée légèrement afin de simuler adéquatement le système aquifère de l'île de Montréal.

TABLEAU 3.19: Caractéristiques hydrauliques des unités lithologiques de l'île de Montréal.

Unité lithologique	Puissance mètre	Transmissivité (m ² /s)		
		Bériault et Simard (1978)	Freeze (1964)	Tremblay (1962)
Shales du Lorraine	105	1.4E-06 - 1.4E-04	---	5.2E-05
Shales de l'Utica	120	1.4E-06 - 1.4E-04	---	5.2E-03
Calcaires du Trenton	250	1.4E-06 - 1.4E-02	---	8.6E-05 - 1.2E-02
Calcaires du Black River	15	1.4E-06 - 1.4E-03	---	8.6E-05 - 1.2E-02
Calcaires du Chazy	85	1.4E-06 - 1.4E-03	---	8.6E-05 - 1.2E-02
Dolomies du Beekmantown	250	1.4E-05 - 1.4E-03	5.2E-03	---
Grès du Postdam	600	1.4E-05 - 1.4E-02	1.6E-02	1.7E-04 - 1.7E-03

TABLEAU 3.20: Valeurs typiques de conductivité hydraulique (en m/s).

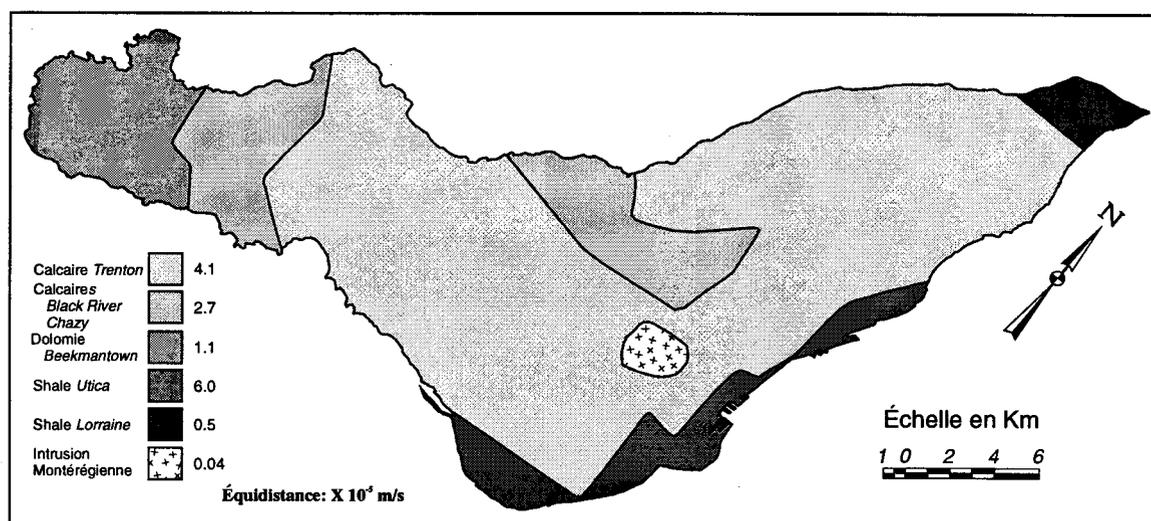
Réf. A: Maidment (1992); Réf. B: Domenico&Schwartz (1990); Réf. C: Todd (1980); Réf. D: Brace (1980); Réf. E: Freeze&Cherry (1979).

Groupe	Type de roche	Ref. A	Ref. B	Ref. C	Ref. D	Ref. E
Intrusion	gabbro, syénite	1.2E-10 - 1.2E-06	8.0E-09 - 3.0E-04	2.3E-06	9.7E-13 - 9.7E-10	1.0E-08 - 1.0E-04
Lorraine	shale et siltstone	1.2E-09 - 1.2E-05	1.0E-13 - 2.0E-09	2.3E-06	9.7E-13 - 9.7E-09	1.0E-13 - 1.0E-09
Utica	shale noir	1.2E-09 - 1.2E-05	1.0E-13 - 2.0E-09	2.3E-06	9.7E-13 - 9.7E-09	1.0E-13 - 1.0E-09
Trenton	calcaire	1.2E-09 - 1.2E-05	1.0E-09 - 6.0E-06	1.2E-08	9.7E-09 - 9.7E-05	1.0E-09 - 5.0E-05
Black River	calcaire	1.2E-09 - 1.2E-05	1.0E-09 - 6.0E-06	2.3E-06	9.7E-09 - 9.7E-05	1.0E-09 - 5.0E-05
Chazy	calcaire (50%)	1.2E-09 - 1.2E-05	1.0E-09 - 6.0E-06	1.2E-08	9.7E-09 - 9.7E-05	1.0E-09 - 5.0E-05
	shale (35%)	1.2E-09 - 1.2E-05	1.0E-13 - 2.0E-09	2.3E-06	9.7E-10 - 9.7E-05	1.0E-13 - 1.0E-09
	grès (15%)	1.2E-10 - 1.2E-05	3.0E-10 - 6.0E-06	3.6E-05	9.7E-10 - 3.1E-05	1.0E-10 - 5.0E-05
Conductivité moyenne:		1.0E-09 - 1.2E-05	5.5E-10 - 3.9E-06	6.2E-06	1.4E-10 - 4.6E-06	5.2E-10 - 3.3E-05
Beekmantown	dolomie	1.2E-09 - 1.2E-05	1.0E-09 - 6.0E-06	1.2E-08	9.7E-10 - 9.7E-08	1.0E-09 - 5.0E-05
Postdam	grès	1.2E-10 - 1.2E-05	3.0E-10 - 6.0E-06	3.6E-05	9.7E-10 - 3.1E-05	1.0E-10 - 5.0E-05
Socle	Grenville	1.2E-14 - 1.2E-10	3.0E-14 - 2.0E-10	1.6E-05	9.7E-15 - 3.1E-10	1.0E-13 - 1.0E-10

TABLEAU 3.21: Caractéristiques hydrauliques moyennes des unités lithologiques.

<i>Unité lithologique</i>	<u>Études hydrogéologiques</u>		<u>Littérature</u>
	<i>Transmissivité</i> (m^2/s)	<i>Conductivité*</i> (m/s)	<i>Conductivité</i> (m/s)
Intrusion montréalaise			4.0E-07
Shales du Lorraine	7.4E-05	5.1E-06	1.4E-06
Shales de l'Utica	9.2E-04	6.0E-05	1.4E-06
Calcaires du Trenton	6.2E-04	4.1E-05	7.2E-06
Calcaires du Black River	4.1E-04	2.7E-05	7.4E-06
Calcaires du Chazy	4.1E-04	2.7E-05	6.4E-06
Dolomies du Beekmantown	1.7E-04	1.1E-05	7.2E-06
Grès du Postdam	6.3E-04	4.1E-05	1.3E-05

* basé sur une épaisseur moyenne de 15 mètres

FIGURE 3.23: Carte de la conductivité hydraulique initiale de la couche 2.

CHAPITRE 4

MODÈLE NUMÉRIQUE – modèle régional

Au chapitre précédent, nous avons défini les bases du modèle conceptuel représentant le système aquifère de l'île de Montréal. Dans le présent chapitre, le modèle numérique est présenté. À l'aide de ce modèle, il sera possible de reproduire, pour un certain nombre de points, la piézométrie observée. Pour ce faire, nous avons besoin d'un modèle capable de simuler l'écoulement dans un milieu poreux hétérogène et anisotrope à trois dimensions et ce, en régime permanent. De plus, le modèle devra être capable de simuler divers flux imposés sur le domaine (pompage, recharge, etc.). Finalement, l'utilisation du modèle devra être simple et rapide (manipulation de données, fichiers d'entrées).

Il existe plusieurs modèles reconnus et acceptés par les hydrogéologues (*Anderson et al., 1992*). Cependant, peu d'entre eux répondent parfaitement aux critères énoncés plus haut. Une grande majorité de ces modèles simulent l'écoulement en deux dimensions, ou bien, simulent plus que l'écoulement (transport, écoulement multi-phases, chaleur, densité, milieu fracturé, réaction chimique, etc.).

Les modèles disponibles pouvant répondre le mieux à nos attentes sont: MODFLOW (*McDonald et Harbaugh, 1988*), AQUIFEM-N (*Townley, 1990*) et 3D-FEMWATER (*Yeh, 1987*). Les deux derniers logiciels sont des modèles basés sur une solution numérique par éléments finis

tandis que MODFLOW utilise une technique de différences finies. Les méthodes de solution par différences finies sont généralement plus faciles à manipuler et à comprendre que les techniques d'éléments finis (*Anderson et Woessner, 1992*). Cependant, les éléments finis sont plus souples pour définir les limites du domaine modélisé.

Dans notre cas, étant donné la simplicité relative du domaine modélisé et des conditions imposées, un modèle numérique basé sur les différences finies serait acceptable. Notre choix se porte donc sur le modèle MODFLOW. Le milieu poreux simulé par MODFLOW est représenté soit par un aquifère confiné ou un aquifère à nappe libre ou une combinaison des deux. Il est à noter que l'équation d'écoulement devient non linéaire pour des conditions de nappe libre. Le modèle permet également de considérer l'effet de puits de pompage ou d'injection, de drains, de rivières, de la recharge de l'aquifère et de l'évapotranspiration. Un des plus grands avantages du modèle est sa reconnaissance par la communauté scientifique ainsi que sa validation rigoureuse à partir de plusieurs problèmes types (*Environmental Protection Agency, 1993*).

L'utilisation d'un pré et post processeur facilite l'utilisation de MODFLOW. Processing MODFLOW [PM] (*Chiang et Kinzelbach, 1993*) a été utilisé pour l'ensemble des simulations réalisées dans la présente étude. Un gain très appréciable de temps a été réalisé dans la création et l'administration des divers fichiers de données requis par le programme en utilisant un tel logiciel. À l'annexe J, un exemple des fichiers d'entrées requis par MODFLOW est présenté.

4.1 MODÈLE D'ÉCOULEMENT MODFLOW

4.1.1 Modèle mathématique

L'équation fondamentale d'écoulement dans un milieu poreux, saturé, hétérogène et anisotrope en trois dimensions à la forme suivante (*Freeze et Cherry, 1979; Todd, 1980; Domenico et Schwartz, 1990*).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - W \quad (4.1)$$

où	K_i	= composante x, y et z du tenseur des conductivités hydrauliques	$[LT^{-1}]$
	h	= charge hydraulique	$[L]$
	W	= sollicitations extérieures (sources et pertes)	$[T^{-1}]$
	S_s	= coefficient d'emmagasinement spécifique	$[L^{-1}]$
et	t	= temps	$[T]$

L'équation aux dérivées partielles du second ordre, combinée aux conditions limites du domaine et aux charges initiales, constitue le modèle mathématique à résoudre. Dans MODFLOW, l'équation 4.1 est approximé par une méthode numérique de différences finies. Le système continu représenté par l'équation 4.1 est remplacé par un ensemble fini de points dans l'espace et dans le temps et les dérivées sont remplacées par les différences de la charge h en ces points. Pour ce faire, l'espace est discrétisé en blocs (cellules). L'ensemble de ces blocs est organisé en colonnes, rangées et couches (*figure 4.1*). Selon cette figure, la largeur d'une cellule, dans la direction d'une rangée est Δr_j , la largeur d'une cellule selon un colonne est Δc_i et l'épaisseur d'une cellule Δv_k . La cellule i,j,k a donc un volume égale à $\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k$. Au centre de chaque cellule se trouve un noeud pour lequel la charge hydraulique est calculée.

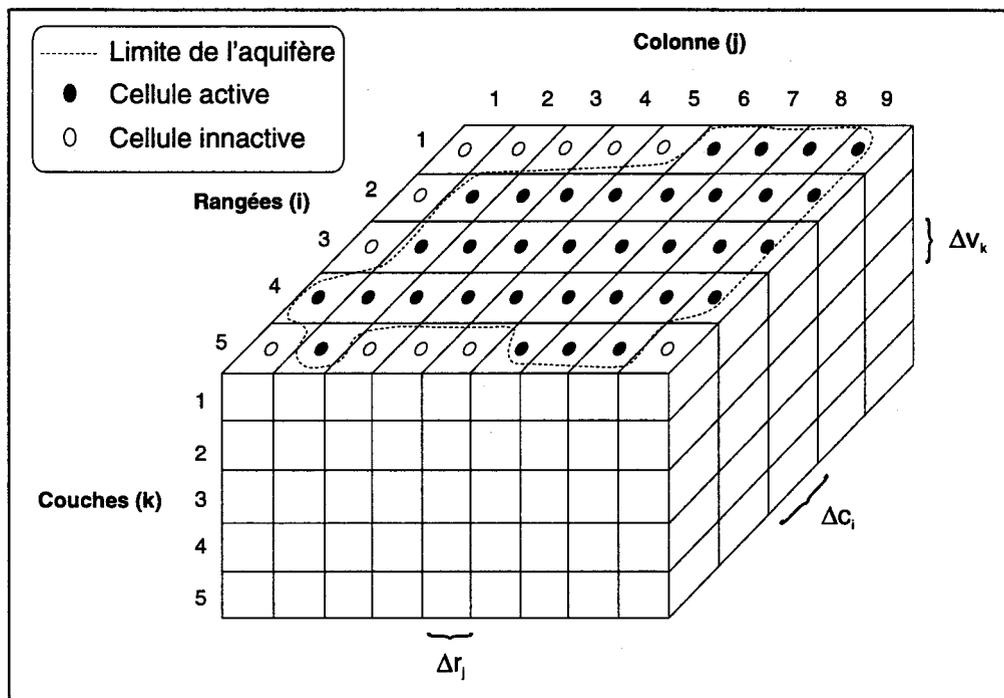


FIGURE 4.1: Exemple de discrétisation d'un aquifère (*adapté de McDonald et Harbaugh, 1988*).

La présentation du modèle mathématique est une adaptation de la discussion de McDonald et Harbaugh (1988). Le développement de la formulation par différences finies de l'équation d'écoulement se base sur le principe de conservation de la masse. La somme des flux qui entrent et qui sortent d'une cellule doit équaler le taux de changement de l'emmagasinement dans la cellule, c'est-à-dire:

$$\sum Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta V \quad (4.2)$$

où	Q_i représente les flux dans la cellule	$[L^3 T^{-1}]$
	S_s correspond au terme d'emmagasinement	$[L^{-1}]$
	ΔV est le volume de la cellule	$[L^3]$
	$\frac{\Delta h}{\Delta t}$ est le changement de la charge pour un intervalle de temps Δt	$[L T^{-1}]$

Si l'on considère une cellule i,j,k et ses six cellules voisines (*figure 4.2*), nous pouvons écrire, à partir de la loi de Darcy, la relation suivante pour le flux entrant dans la cellule i,j,k en provenance de la cellule voisine $i,j-1,k$:

$$q_{i,j-\frac{1}{2},k} = KR_{i,j-\frac{1}{2},k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-\frac{1}{2}}} \quad (4.3)$$

où	$h_{i,j,k}$ est la charge au noeud i,j,k et $h_{i,j-1,k}$ la charge au noeud $i,j-1,k$	$[L]$
	$q_{i,j-\frac{1}{2},k}$ représente le flux volumétrique entre les cellules i,j,k et $i,j-1,k$	$[L^3 T^{-1}]$
	$KR_{i,j-\frac{1}{2},k}$ est la conductivité hydraulique le long d'une rangée entre les noeuds i,j,k et $i,j-1,k$; elle est calculée à l'aide d'une moyenne harmonique entre les noeuds.	$[L T^{-1}]$
	$\Delta c_i \Delta v_k$ est l'aire de la face de la cellule normale à la direction des rangées	$[L^2]$
	$\Delta r_{j-\frac{1}{2}}$ est la distance entre les noeuds i,j,k et $i,j-1,k$	$[L]$

Des équations similaires peuvent être écrites pour les cinq autres faces de la cellule i,j,k . Ces équations représentent les flux au travers des faces de la cellule i,j,k en terme de charge, de dimension du maillage et de la conductivité hydraulique. Pour simplifier la notation, nous introduisons un terme appelé *conductance* défini comme étant le produit de la conductivité hydraulique et de l'aire de la face entre les cellules divisé par la distance entre les deux noeuds:

$$CR_{i,j-\frac{1}{2},k} = KR_{i,j-\frac{1}{2},k} \frac{\Delta c_i \Delta v_k}{\Delta r_{j-\frac{1}{2}}} \quad (4.4)$$

où $CR_{i,j-\frac{1}{2},k}$ est la conductance dans la rangée i et la couche k entre les noeuds $i,j-1,k$ et i,j,k [L^2T^{-1}].

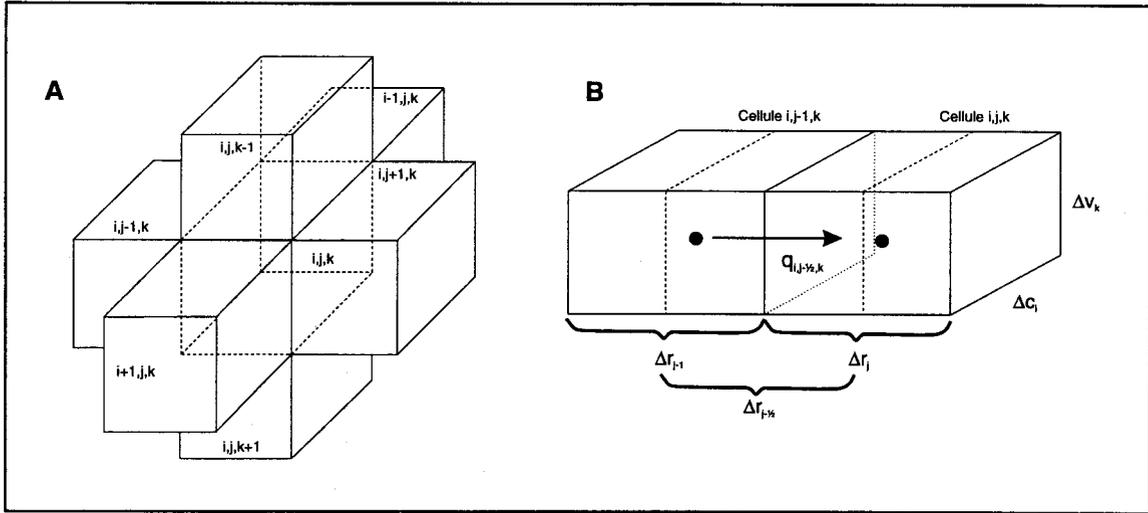


FIGURE 4.2: Notation pour la cellule i,j,k et les six cellules adjacentes (A) et notation pour le flux de la cellule $i,j-1,k$ vers la cellule i,j,k (B) (adapté de McDonald et Harbaugh, 1988).

En substituant les termes appropriés pour la conductance dans l'équation 4.3, nous obtenons:

$$q_{i,j-\frac{1}{2},k} = CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) \quad (4.5)$$

De façon similaire, nous pouvons écrire pour les autres faces:

$$q_{i,j+\frac{1}{2},k} = CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) \quad (4.6)$$

$$q_{i-\frac{1}{2},j,k} = CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (4.7)$$

$$q_{i+\frac{1}{2},j,k} = CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) \quad (4.8)$$

$$q_{i,j,k-\frac{1}{2}} = CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) \quad (4.9)$$

$$q_{i,j,k+\frac{1}{2}} = CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \quad (4.10)$$

Les équations 4.5 à 4.10 tiennent compte des flux dans la cellule i,j,k provenant des six faces adjacentes. Afin de tenir compte du flux provenant des sources extérieures à l'aquifère (recharge, puits, drains, évapotranspiration, rivière), un autre terme doit être défini. Ce terme doit

tenir compte du fait que certaines sollicitations extérieures dépendent de la charge et d'autres non. Les flux provenant de l'extérieur de l'aquifère QS sont définis par:

$$QS_{i,j,k} = P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} \quad (4.11)$$

où $P_{i,j,k}$ et $Q_{i,j,k}$ sont des constantes reliées au type de sollicitation (McDonald et Harbaugh, 1988).

En appliquant la loi de la continuité (équation 4.2), nous obtenons pour la cellule i,j,k :

$$q_{i,j-\frac{1}{2},k} + q_{i,j+\frac{1}{2},k} + q_{i-\frac{1}{2},j,k} + q_{i+\frac{1}{2},j,k} + q_{i,j,k-\frac{1}{2}} + q_{i,j,k+\frac{1}{2}} + QS_{i,j,k} = S_{S_{i,j,k}} \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k \quad (4.12)$$

En substituant les équations 4.5 à 4.10 dans 4.12, nous obtenons l'approximation par différences finies de l'écoulement pour la cellule i,j,k :

$$\begin{aligned} CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k}) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k} - h_{i,j,k}) + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k} - h_{i,j,k}) + \\ CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1} - h_{i,j,k}) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1} - h_{i,j,k}) \\ + P_{i,j,k} h_{i,j,k} + Q_{i,j,k} = S_{S_{i,j,k}} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (4.13)$$

La dérivée de la charge par rapport au temps $\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t}$, est obtenue à l'aide d'un schéma de différence arrière:

$$\left(\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} \right)_m = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad (4.14)$$

L'équation 4.13 peut être réécrite en y substituant la relation 4.14. Nous obtenons alors une équation de type différences finies arrières pour la cellule i,j,k au temps t_m . Cette équation est une approximation de l'équation aux dérivées partielles décrivant l'écoulement (équation 4.1).

$$\begin{aligned} CR_{i,j-\frac{1}{2},k} (h_{i,j-1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} (h_{i,j+1,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} (h_{i-1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ CC_{i+\frac{1}{2},j,k} (h_{i+1,j,k}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} (h_{i,j,k-1}^m - h_{i,j,k}^m) + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} (h_{i,j,k+1}^m - h_{i,j,k}^m) + \\ P_{i,j,k} h_{i,j,k}^m + Q_{i,j,k} = S_{S_{i,j,k}} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \left[\frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \right] \end{aligned} \quad (4.15)$$

Une telle équation est écrite pour les n cellules actives du maillage et l'on obtient ainsi un système de n équations à n inconnus. Ce système d'équations couplé aux conditions limites et initiales est solutionné simultanément à l'aide d'une méthode numérique itérative. Dans la prochaine section, nous présentons les deux principales méthodes de solution utilisées par MODFLOW, soit, SIP (*Strongly Implicit Procedure*) et PCG2 (*Preconditioned Conjugate Gradient*).

4.1.2 Méthode numérique

Le système d'équation sous forme matricielle produit par MODFLOW est solutionné par une méthode numérique itérative. Actuellement, trois solveurs sont disponibles: SIP (*Strongly Implicit Procedure*); SSOR (*Slice Successive Overrelaxation*) et PCG2 (*Preconditioned Conjugate Gradient*). Les deux méthodes les plus couramment utilisées sont SIP et PCG2. Dans cette section, nous présentons une brève description de ces deux méthodes.

Afin de simplifier la notation, on peut réarranger l'équation 4,15, sous la forme suivante:

$$\begin{aligned}
 & CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} h_{i,j,k-1}^m + CC_{i-\frac{1}{2},j,k} h_{i-1,j,k}^m + CR_{i,j-\frac{1}{2},k} h_{i,j-1,k}^m + (-CV_{i,j,k-\frac{1}{2}} - CC_{i-\frac{1}{2},j,k} - \\
 & CR_{i,j-\frac{1}{2},k} - CR_{i,j+\frac{1}{2},k} - CC_{i+\frac{1}{2},j,k} - CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} + HCOF_{i,j,k}) h_{i,j,k}^m + CR_{i,j+\frac{1}{2},k} h_{i,j+1,k}^m + \\
 & CC_{i+\frac{1}{2},j,k} h_{i+1,j,k}^m + CV_{i,j,k+\frac{1}{2}} h_{i,j,k+1}^m = RHS_{i,j,k}
 \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\text{où } HCOF_{i,j,k} = P_{i,j,k} - \frac{SC1_{i,j,k}}{t_m - t_{m-1}} \quad [L^2T^{-1}]$$

$$RHS_{i,j,k} = -Q_{i,j,k} - SC1_{i,j,k} \frac{h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad [L^3T^{-1}]$$

$$\text{et } SC1_{i,j,k} = S_{S_{i,j,k}} (\Delta r_j \Delta c_i \Delta v_k) \quad [L^2]$$

Le système complet d'équations peut alors être écrit sous la forme matricielle suivante:

$$[A]\{h\} = \{q\} \quad (4.17)$$

où $[A]$ représente la matrice des coefficients de la charge (partie de gauche de l'équation 4.16), $\{h\}$ est le vecteur des charges h au temps t_m pour toutes les cellules actives du maillage et $\{q\}$ est un vecteur contenant les termes constants de RHS pour tous les noeuds du maillage.

4.1.2.1 Méthode SIP

Comme il a été présenté à la section précédente, le système d'équations de la relation 4.17 doit être résolu à l'aide d'une méthode itérative afin de déterminer la charge pour chaque noeuds du maillage. Pour ce faire, nous pouvons utiliser une méthode de type *SIP* (Remson et al., 1971; McDonald et Harbaugh, 1988).

L'objectif de cette méthode est de trouver une matrice $[B]$ telle que $[A+B]$ puisse être facilement décomposée en deux matrices. La première matrice, $[U]$, est de type triangulaire supérieure et possède une diagonale principale égale à 1. La seconde, $[L]$, est de type triangulaire inférieure. De plus, $[A+B]$ doit être proche de $[A]$. Aussi, $[L]$ et $[U]$ doivent être éparées. Finalement, $[L]$ et $[U]$ possèdent seulement quatre diagonales non nulles.

À partir de la relation 4.17, le terme $[B] \{h\}$ est ajouté de chaque côté de l'équation, nous obtenons alors:

$$[A + B] \cdot \{h\} = \{q\} + [B] \cdot \{h\} \quad (4.18)$$

Comme le terme $\{h\}$ se retrouve de chaque côté de l'équation 4.18, nous devons utiliser une technique itérative afin de déterminer le vecteur $\{h\}$. L'équation 4.18 devient:

$$[A + B] \cdot \{h_m\} = \{q\} + [B] \cdot \{h_{m-1}\} \quad (4.19)$$

où m représente l'index de l'itération.

Le terme $[A + B] \{h_{m-1}\}$ peut ensuite être soustrait de chaque côté de 4.19:

$$[A + B] \cdot \{h_m\} - [A + B] \cdot \{h_{m-1}\} = \{q\} - [A] \cdot \{h_{m-1}\} \quad (4.20a)$$

$$[A + B] \cdot \{h_m - h_{m-1}\} = \{q\} - [A] \cdot \{h_{m-1}\} \quad (4.20b)$$

En utilisant une série de 20 équations (*McDonald et Harbaugh, 1988*), les coefficients de [L] et [U] peuvent être déterminés en fonction de [A] de façon à satisfaire les critères énoncés plus haut. Ces matrices peuvent alors remplacer [A+B]. Nous pouvons alors écrire:

$$[L][U] \cdot \{h_m - h_{m-1}\} = \{q\} - [A] \cdot \{h_{m-1}\} \quad (4.21)$$

Le vecteur des résidus $\{r_m\}$ est défini comme étant égal à:

$$\{r_m\} = \{q\} - [A] \cdot \{h_{m-1}\} \quad (4.22)$$

donc,

$$[L][U] \cdot \{h_m - h_{m-1}\} = \{r_m\} \quad (4.23)$$

Afin d'obtenir $\{h_m\}$, on procède d'abord par trouver la solution de 4.24 par substitution avant et par la suite, on trouve $\{h_m - h_{m-1}\}$ par substitution arrière à l'aide de 4.25.

$$[L] \cdot \{v\} = \{r_m\} \quad (4.24)$$

$$[U] \cdot \{h_m - h_{m-1}\} = \{v\} \quad (4.25)$$

Une fois $\{h_m - h_{m-1}\}$ calculé, ce vecteur est additionné au vecteur $\{h_{m-1}\}$ afin d'obtenir $\{h_m\}$, le vecteur des charges pour l'itération m .

La convergence est atteinte lorsque le changement maximum absolu de la charge entre deux itérations successives est plus petit qu'un seuil fixé par l'utilisateur (par exemple, 10^{-4} m). Il est à noter que la méthode SIP ne tient pas compte du résidu comme critère de convergence.

4.1.2.2 Méthode PCG2

La méthode du gradient conjugué peut être employée seulement pour des matrices symétriques et définies positivement (*vecteurs propres positifs*). Le type de matrice construit par MODFLOW répond à ces deux critères. La méthode (*Remson et al., 1971; Hill, 1990a*) consiste à solutionner le système d'équations linéaires de façon itérative en séparant la matrice [A] en la somme de deux matrices:

$$[A] = [M + N] \quad (4.26)$$

où [M] est appelée la forme préconditionnée de A.

L'objectif premier de cette méthode est de définir [M] de telle sorte qu'elle soit facile à inverser et qu'elle ressemble le plus possible à [A]. [M] est définie en utilisant la méthode de préconditionnement modifié de Cholesky [ICCG] (*Axelsson et Lindskog, 1986*) ou la méthode de pré-conditionnement polynomiale [POLCG] (*Saad, 1985*). Dans le présent cas, nous avons utilisé le préconditionnement de Cholesky car il est plus performant pour des ordinateurs de type scalaire (*Hill, 1990a*). La matrice [M] est donc définie selon:

$$[M] = [U]^T \cdot [D] \cdot [U] \quad (4.27)$$

où [U] est une matrice triangulaire supérieure provenant des coefficients de [A] et [D] est une matrice diagonale positive où $d_{ii} = 1/u_{ii}$. On définit u_{ii} de la façon suivante à partir des coefficients de la matrice [A]:

$$u_{ii} = a_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} \frac{u_{ki}^2}{u_{kk}} - \alpha \left(\sum_{j=1}^{i-1} f_{ji} + \sum_{j=i+1}^{i-1} f_{ij} \right) \quad (4.28)$$

$$\text{où } f_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^{i-1} \frac{u_{ki} u_{kj}}{u_{kk}} & \alpha_{ij} = 0 \\ = 0 & \alpha_{ij} \neq 0 \end{cases} \quad \text{et } u_{ij} = 0 \quad \text{pour } j < i.$$

On peut maintenant écrire les équations suivantes en notant que le résidu $\{r_m\}$ de l'équation originale 4.17 est:

$$\{r_m\} = \{q\} - [A]\{h_m\} \quad (4.29)$$

$$[M] \cdot \{h_{m+1}\} = [M] \cdot \{h_m\} + \{q\} - [A]\{h_m\} \quad (4.30)$$

En utilisant $s_m = h_{m+1} - h_m$, nous pouvons écrire:

$$[M] \cdot \{s_m\} = \{r_m\} \quad (4.31)$$

$$\{s_m\} = [M]^{-1} \cdot \{r_m\} \quad (4.32)$$

et finalement, en remplaçant [M] par 4.27:

$$[U]^T \cdot [D] \cdot [U] \cdot \{s_m\} = \{r_m\} \quad (4.33)$$

L'équation 4.33 est résolue en effectuant une substitution avant pour l'équation 4.34 et ensuite une substitution arrière pour 4.35.

$$[U]^T \cdot \{v_m\} = \{r_m\} \quad (4.34)$$

$$[D] \cdot [U] \cdot \{s_m\} = \{v_m\} \quad (4.35)$$

La méthode du gradient conjugué est une technique itérative du second ordre car le changement $\{p_m\}$ du vecteur des nouvelles charges $\{h\}$ pour chaque itération est évalué à partir du vecteur des changements précédent $\{p_{m-1}\}$ et du vecteur $\{s_m\}$. Pour $k = 0$, $\{p_m\} = \{s_m\}$, par la suite, $\{h_{m+1}\}$ est évalué de la façon suivante:

$$\beta_m = \frac{\{s_m\}^T \cdot \{r_m\}}{\{s_{m-1}\}^T \cdot \{r_{m-1}\}} \quad (4.34)$$

$$\{p_m\} = \{s_m\} + \beta_m \cdot \{p_{m-1}\} \quad (4.35)$$

$$\alpha_m = \frac{\{s_m\}^T \cdot \{r_m\}}{\{p_m\}^T \cdot [A] \cdot \{p_m\}} \quad (4.36)$$

$$\{h_{m+1}\} = \{h_m\} + \alpha_m \cdot \{p_m\} \quad (4.37)$$

$$\{r_{m+1}\} = \{r_m\} + \alpha_m \cdot [A] \cdot \{p_m\} \quad (4.38)$$

Les problèmes non linéaires sont solutionnés à l'aide d'itérations de Picard où la matrice [A] et le vecteur {q} sont périodiquement mis à jour entre les itérations en utilisant la nouvelle valeur de la charge. Ces itérations sont appelées internes comparativement aux itérations externes qui correspondent au nombre d'appel à la routine. La convergence est atteinte lorsque, pour les itérations internes, le nombre maximum d'itération est atteint ou le critère de convergence global est rencontré. Pour les itérations externes, la convergence a lieu pour les mêmes critères. Les critères de convergences sont un seuil fixé pour le résidu et un seuil fixé pour le changement maximum absolu de la charge entre deux itérations successives.

4.2 DISCRÉTISATION SPATIALE

La modélisation régionale pour l'île de Montréal est effectuée en régime permanent. Le régime permanent est valable si nous supposons que les conditions d'équilibre sont atteintes à long terme. Cette hypothèse est acceptable étant donné le faible taux d'exploitation de la nappe phréatique et une recharge annuelle moyenne relativement constante au cours des ans. Il est alors convenable de supposer que la nappe a atteint l'équilibre et, par conséquent, que le niveau piézométrique varie généralement peu au cours des ans.

Pour représenter l'île de Montréal, le domaine est discrétisé en trois couches afin de représenter respectivement, les dépôts meubles, le roc fracturé ainsi que le roc sain. Cette division en trois grandes unités hydrostratigraphiques est reliée à la nature régionale du modèle (*Anderson et Woessner, 1992*). Un plus grand nombre de couches n'était pas indiqué étant donné le manque d'information mais aussi la trop grande variabilité qu'on aurait alors dû traiter. Le modèle

conceptuel présentement développé est une simplification du système aquifère et se veut avant tout une approximation régionale de l'écoulement.

Le maillage de chaque couche est identique et est composé de 8400 cellules (140 par 60 cellules) de 350 mètres par 350 mètres (0.1225 Km²). Le maillage est orienté à 40° par rapport au nord géographique afin de minimiser le nombre de cellules inactives (*Anderson et Woessner, 1992*). Il est donc orienté selon l'axe le plus long de l'île (*figure 4.3*).

Le choix d'un tel maillage repose essentiellement sur un compromis entre une bonne résolution et un temps de calcul raisonnable (*Anderson et Woessner, 1992*). Selon l'information disponible et la nature régionale du modèle, le maillage pouvait être assez grossier – cellules de l'ordre du kilomètre. Cependant, comme nous désirons avoir une bonne résolution spatiale afin de représenter adéquatement les changements, par exemple les variations du type d'occupation du sol pour déterminer le ruissellement, des cellules plus petites sont souhaitables (cellules de 100 mètres de côté). Nous avons opté pour des cellules de 350 mètres de côté car elles permettent une bonne résolution et un temps de calcul acceptable. À cette échelle, il est possible de représenter les grandes variations régionales et, d'un autre côté, le nombre total de cellules étant raisonnable, le temps de calcul demeure négligeable et de plus, la manipulation des données reste facile. Les simulations ont été réalisées sur un ordinateur *AST ADVANTAGE™ 486-DX4*, 100 Mhz avec 8 Mo de mémoire vive et prennent en moyenne cinq minutes.

4.2.1 Couche 1

La couche 1 représente les dépôts meubles. Elle est bordée, en périphérie, par une limite imperméable (contact entre une cellule active et une cellule inactive). Une condition de charge constante n'a pas été assignée à ces cellules car le niveau piézométrique est généralement plus bas que la base de la couche 1 en périphérie de l'île. Cette couche se draine en périphérie par infiltration dans la couche inférieure. La figure 4.3 présente le maillage utilisé pour discrétiser la région modélisée avec les différentes conditions imposées pour chaque couches.

Étant donné que la nappe est généralement à une profondeur de moins de 10 mètres (*Boyer et al., 1985*), selon la profondeur des dépôts meubles, elle se retrouve soit dans la couche 1 ou bien dans la partie supérieure de la couche de roc fracturé (*couche 2*). La nappe libre est observée

seulement dans quelques secteurs de la couche 1. La figure 4.4 présente une approximation des secteurs de la couche 1 où l'on retrouve des cellules sèches. Cette carte a été déduite des différentes coupes (*section 4.2.4*) du modèle conceptuel. Nous constatons un grand nombre de cellules sèches dans cette couche. Ces cellules se retrouvent aux endroits où il y a une faible épaisseur de dépôt meuble. Ces secteurs sont situés surtout dans la partie centre-est de l'île; zone où la roche en place affleure, et dans la région du Mont-Royal. La figure 4.5a présente l'élévation de la base de la couche 1. Cette élévation est déterminée à partir de la topographie et de l'épaisseur des dépôts meubles (*référence: figure 2.2 et 2.5*).

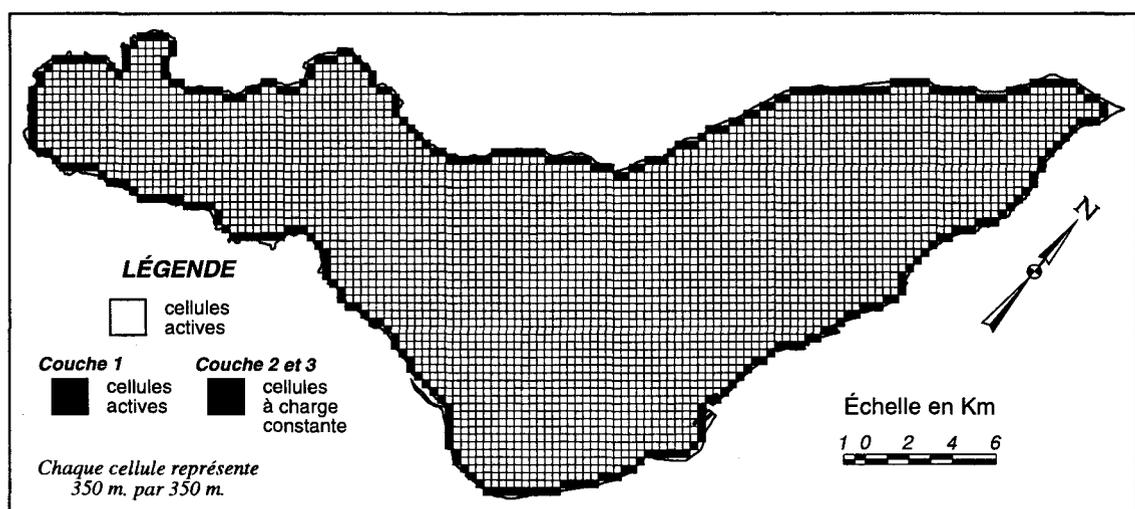


FIGURE 4.3: Domaine simulé et conditions limites (couche 1 - 2 -3).

Nous remarquons, à la figure 4.5a, que l'élévation de la zone autour du Mont-Royal est très similaire à celle de la topographie. Cela est évidemment normal car l'épaisseur de dépôts meubles dans cette zone est faible. On note également que l'extrémité de l'île (partie est), zone où l'on retrouve la plus grande épaisseur de dépôts, est représentée par les élévations les plus basses de la carte. Il est à signaler que toutes les cartes d'élévation ont comme niveau de référence le niveau moyen de la mer (*N.M.M.*). Par conséquent, une élévation négative signifie simplement que la base de la couche se situe sous le niveau moyen des mers (considéré comme 0).

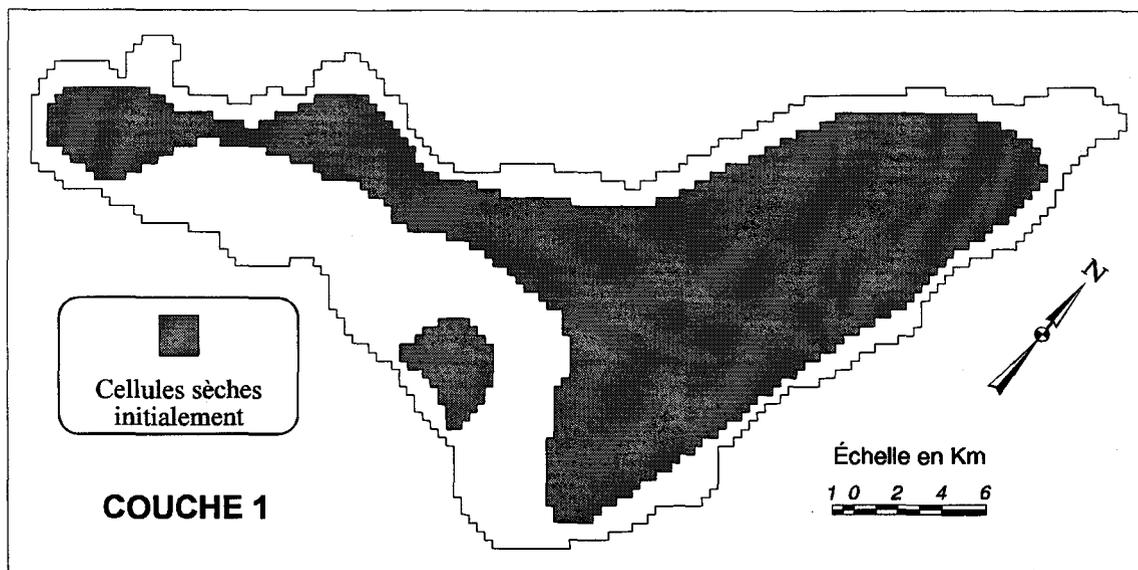


FIGURE 4.4: Distribution des cellules sèches pour la COUCHE 1.

4.2.2 Couche 2

La couche 2 représente le roc fracturé. La figure 4.3 montre le domaine simulé ainsi que les conditions limites pour cette couche. Une condition de charge imposée est assignée aux cellules limites de cette couche afin de représenter le niveau d'eau du fleuve St-Laurent et de la rivière des Prairies. Le niveau du fleuve et de la rivière sont localement constants sur une base annuelle mais variables au pourtour de l'île. Pour imposer une telle condition limite (*ASTM, 1994a*), nous devons faire l'hypothèse que le fleuve et la rivière sont hydrauliquement connectés avec la nappe d'eau souterraine en périphérie de l'île. Cette hypothèse semble valable lorsqu'on considère la géométrie et la nature du système aquifère de l'île de Montréal.

L'épaisseur de la couche de roc fracturé utilisée est estimée à 15 mètres pour la majorité de l'île (*Boyer et al, 1985*). Pour la zone du Mont-Royal, elle est supposée variable. Dans cette zone, elle est fixée de telle sorte que l'élévation de la base de la couche soit à environ 50 mètres d'altitude par rapport au *N.M.M.* Cette élévation est fixée arbitrairement. Cependant, elle tient compte de l'élévation de la base de la couche 2 aux environs du Mont-Royal. Cette contrainte doit être imposée afin de faciliter la représentation discrète du Mont-Royal avec une résolution unique du maillage (cellules de 350 mètres de côté). Cette approche évitera plusieurs problèmes numériques lors de la calibration du modèle.

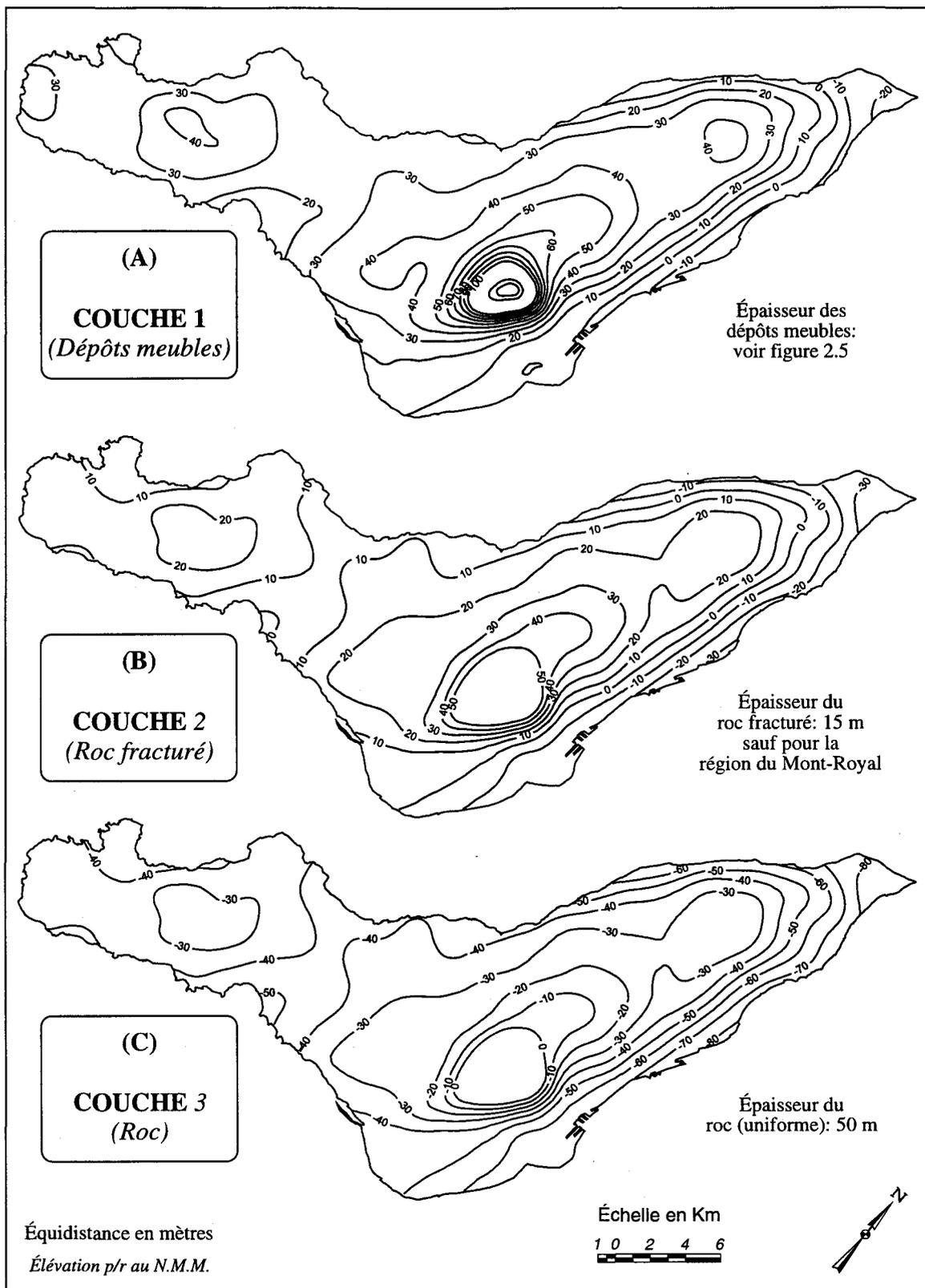


FIGURE 4.5: Élévation de la base de la couche 1 (A) - couche 2 (B) et couche 3 (C).

La figure 4.5b montre l'élévation de la base de la couche 2. On note le plateau dans la région du Mont-Royal et l'élévation plus basse dans la partie est (extrémité) de l'île. Généralement, la géométrie de l'élévation de la base de la couche 2 est similaire à la topographie et, évidemment, à l'élévation de la base de la couche 1.

4.2.3 Couche 3

La troisième couche utilisée pour simuler le socle rocheux est d'épaisseur uniforme égale à 50 mètres. Cette valeur représente seulement une partie de l'épaisseur réelle du roc sain. Différentes simulations faites durant cette étude ont montré qu'une telle épaisseur est suffisante pour simuler cette unité hydrostratigraphique. Les conditions limites (figure 4.3) de cette couche sont similaires à celle de la couche 2, soit une condition de charge imposée appliquée au contour de l'île. La base du modèle est considérée comme étant une limite imperméable et son élévation est présentée à la figure 4.5c. L'élévation de la base de cette couche est géométriquement similaire aux autres couches. La zone la plus basse est encore dans la partie est de l'île et en périphérie de celle-ci. Nous observons également le même plateau dans la région du Mont-Royal.

4.2.4 Coupes hydro-stratigraphiques du modèle conceptuel

À l'aide des différentes cartes d'élévation de la base des trois couches, il est possible de faire une série de coupes hydro-stratigraphiques afin de représenter adéquatement le modèle conceptuel. On retrouve, à l'annexe E, une série de 12 coupes dont 7 (figures E.1 à E.5) sont orientées selon les colonnes du maillage et 5 (figures E.6 à E.9), selon les rangées. Les coupes orientées selon les colonnes sont espacées de 20 cellules, soit 7 000 mètres, alors que celles selon les rangées sont espacées de 10 cellules, ce qui équivaut à 3 500 mètres. La carte-index montrant l'emplacement des différentes coupes est présentée à la figure 4.6.

On note sur ces coupes la topographie, les élévations des couches 1, 2 et 3 ainsi que le niveau de la surface libre (*adapté de Bériault et Simard, 1978*). Nous remarquons facilement que la position de la surface libre varie entre la couche 1 et 2. Ce niveau est contrôlé principalement par la topographie et le socle rocheux. La base du socle rocheux (couche 3) est relativement similaire à la topographie.

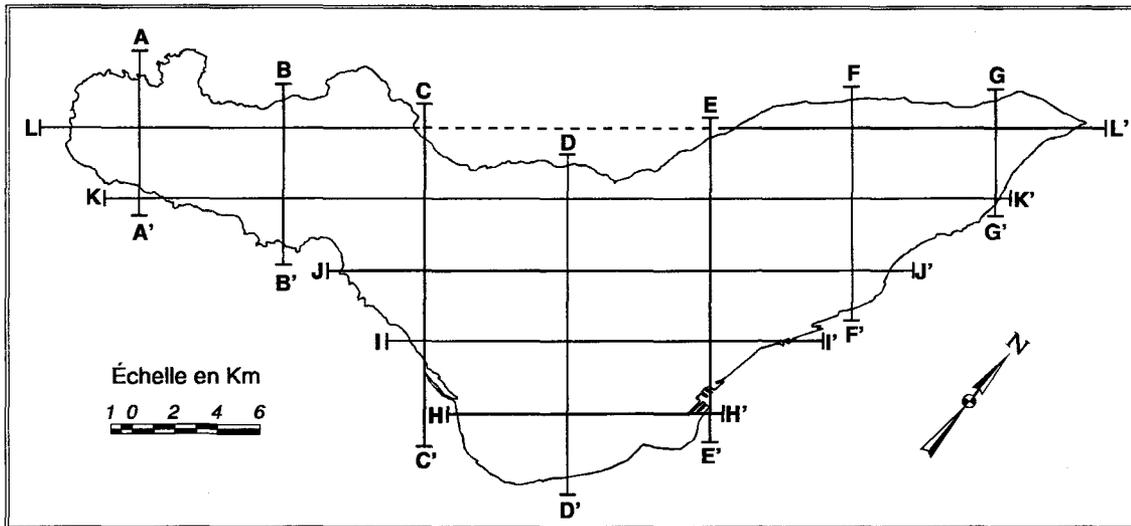


FIGURE 4.6: Emplacement des coupes du modèle conceptuel présentés à l'annexe E.

4.3 ASSIGNATION DES PROPRIÉTÉS NODALES

Afin de solutionner par différences finies le système d'équations représentant l'écoulement, le modèle MODFLOW requiert un certain nombre de paramètres physiques représentant le milieu à simuler. Ces valeurs, assignées à chaque cellule, permettent de simuler les conditions d'écoulement prévalant sur l'île de Montréal. Pour le modèle conceptuel considéré, les paramètres dont nous tenons compte sont: la topographie, les élévations des différentes couches, la distribution spatiale de la conductivité hydraulique de chaque couche et la répartition de la recharge. Les distributions de ces paramètres ont été présentées au chapitre précédent.

4.3.1 Utilisation de la géostatistique

Pour assigner les valeurs des divers paramètres aux différentes cellules, des techniques de géostatistiques ont été utilisées (*de Marsily, 1986; Journel et Huijbregts, 1991; Lauzon, 1992*). Pour déterminer la distribution des paramètres comme la topographie, la profondeur des dépôts meubles, la piézométrie, le coefficient de ruissellement (quantification de la recharge) et la conductivité hydraulique, nous avons discrétisé l'île de Montréal en un certain nombre de points. À chaque point, une valeur correspondant au paramètre mesuré a été assignée. Par exemple, pour un

point en particulier, selon le type de dépôt de surface et la géologie, nous avons assigné des conductivités hydrauliques typiques. Pour un autre point, nous assignons une autre propriété telle que l'élévation, la profondeur, le coefficient de ruissellement.

Par la suite, pour l'ensemble des points discrétisés pour un paramètre donné, nous procédons au krigeage (de Marsily, 1986; Journel et Huijbregts, 1991). Le krigeage sert à interpoler une valeur unique à chaque cellule du maillage. Le krigeage est un estimateur robuste sans biais qui permet d'estimer une valeur à un endroit non échantillonné. Le variogramme utilisé est de type linéaire. La relation géostatistique utilisée a la forme suivante:

$$\gamma(h) = a \cdot |h| \quad (4.39)$$

où h est la distance et a la pente à l'origine.

Une étude plus poussée des corrélations spatiales entre les valeurs d'un même paramètre serait souhaitable. L'utilisation d'un autre type, plus complexe, de variogramme serait une autre alternative à explorer. Une telle étude raffinerait la distribution des paramètres.

La figure 4.7 présente, pour les différents paramètres estimés, les points utilisés pour la discrétisation. Dans l'ensemble, on note une bonne densité de mesures. Cependant, nous observons pour les paramètres topographie et piézométrie un plus petit nombre de points dans la partie ouest de l'île. Nous considérons que ce petit nombre de points n'est pas significatif car il est relié directement à la forme des contours originaux de ces paramètres. En général, la discrétisation a été faite à l'aide d'un maillage avec des cellules mesurant environ un kilomètre carré.

4.3.2 Piézométrie numérique

Une des conditions essentielles à la résolution de l'écoulement par une méthode numérique est l'assignation d'une charge hydraulique initiale à chaque cellule du modèle (ASTM, 1995a). Nous utilisons comme charge de référence la piézométrie de l'île, telle que décrite par Bériault et Simard (1978). La figure 4.8 présente une carte piézométrique similaire à celle de Bériault et Simard (1978). Cette carte est la représentation numérique de la carte piézométrique originale. Elle a été discrétisée et interpolée afin d'obtenir une valeur numérique au centre de chaque cellule du modèle. De plus, les transformations nécessaires ont été faites afin de convertir les références

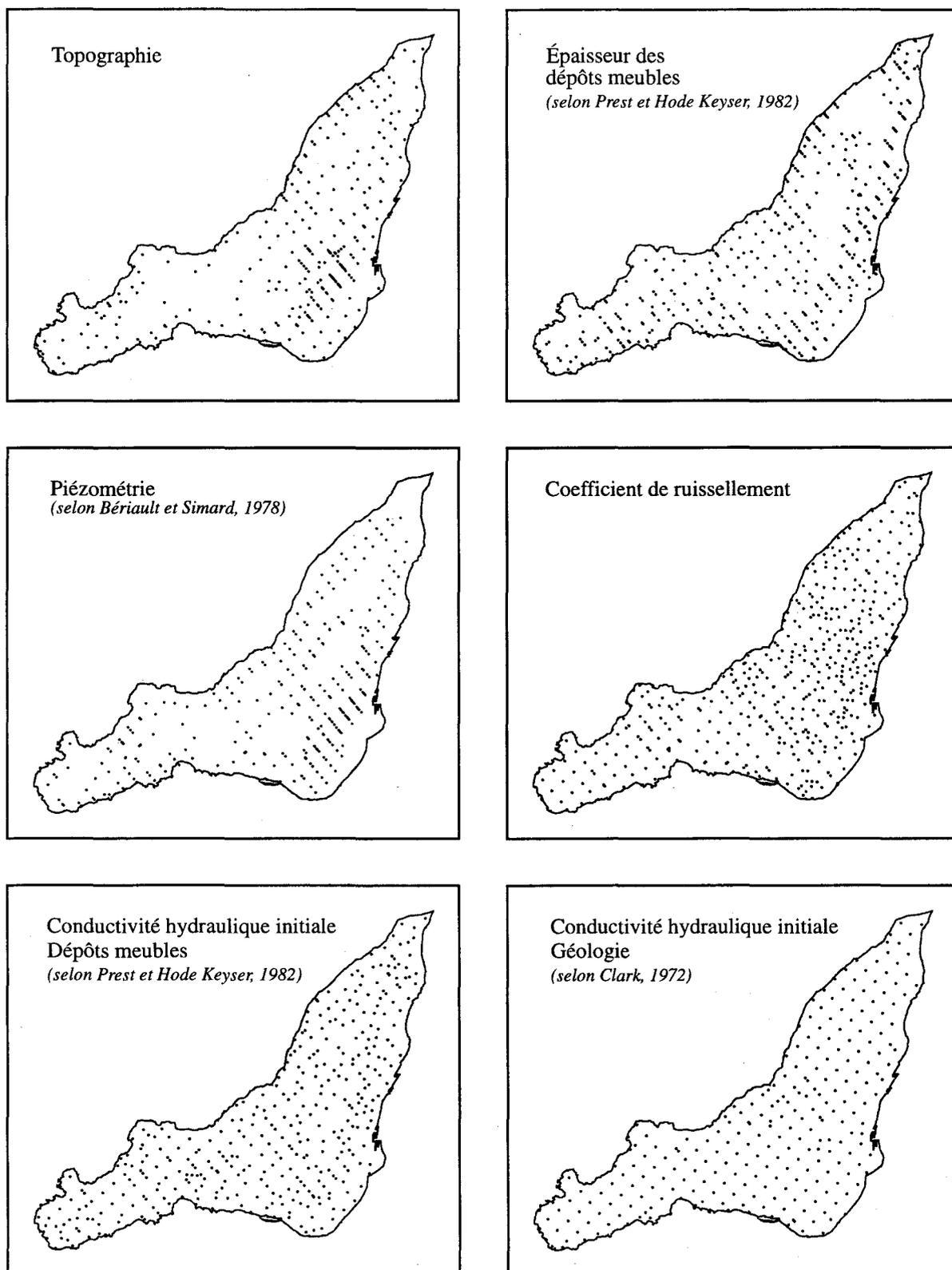


FIGURE 4.7: Points de discrétisation utilisés pour le krigeage des propriétés nodales.

altimétriques en mètres. Les différences entre les deux cartes se trouvent principalement dans la partie sud de l'île. Pour la précision requise par le modèle, l'approximation est jugée satisfaisante.

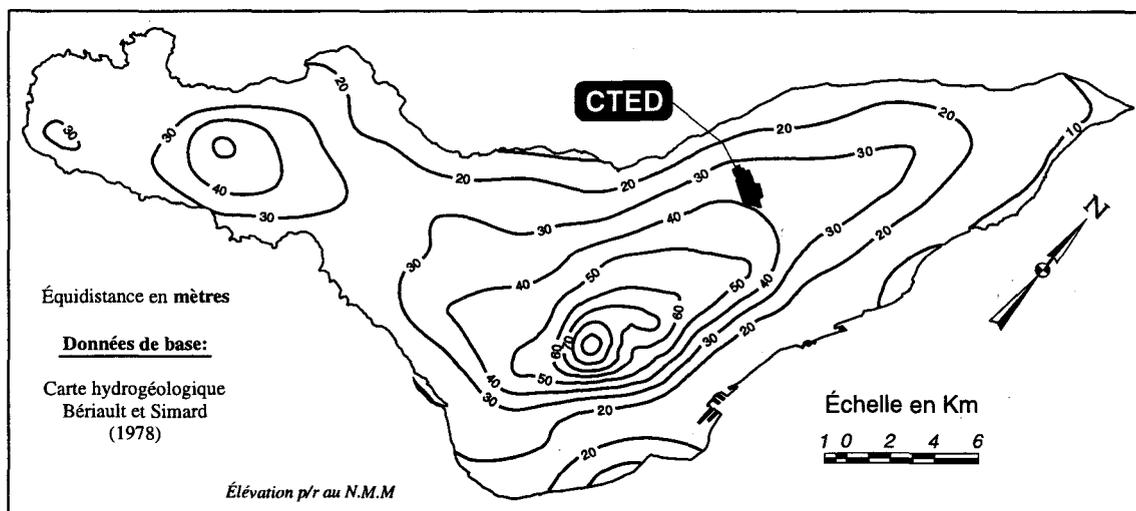


FIGURE 4.8: Carte isopièze numérique de l'île de Montréal.

CHAPITRE 5

RÉSULTATS ET DISCUSSION modélisation régionale

Ce chapitre présente les résultats de la modélisation de l'écoulement régional de l'eau souterraine sur l'île de Montréal. Nous présentons d'abord (*section 5.1*) les différents paramètres calibrés afin de bien caler le modèle. Ensuite, aux sections 5.2 et 5.3, nous traitons de la piézométrie régionale simulée ainsi que de la distribution de l'erreur entre les charges simulées et la piézométrie de référence. Le bilan volumétrique des sources et pertes d'eau tel que calculé par MODFLOW est exposé à la section 5.4. Une brève discussion sur la répartition des cellules sèches est présentée à la section 5.5. Ensuite, à la section 5.6, nous traitons de la convergence des différentes méthodes numériques employées, ainsi que de la distribution des résidus.

Le but premier du modèle étant de déterminer les conditions limites en périphérie du site du CTED (*section 5.7*), une attention particulière a été portée à ce secteur lors de la calibration de la piézométrie pour cette zone. Il est à noter que le modèle conceptuel développé ici correspond à une simplification du système aquifère de l'île de Montréal. Par conséquent, il est normal d'avoir une différence entre les niveaux simulés et ceux observés. Pour l'utilisation faite du modèle, la précision des résultats est jugée largement suffisante.

5.1 PARAMÈTRES CALIBRÉS

Mise à part la détermination de conditions limites pour la modélisation locale du CTED, un deuxième objectif du modèle est de déterminer la distribution des paramètres hydrologiques et hydrogéologiques sur l'île de Montréal. Le principal paramètre ajusté lors de la calibration est la conductivité hydraulique. Aucun changement n'a été effectué sur la distribution de la recharge sur l'île, qui avait été calculée à l'aide du bilan hydrologique présenté au chapitre 3.

Nous avons principalement modifié la conductivité hydraulique de la couche 2 (roc fracturé). Cette couche contrôle majoritairement l'écoulement. La conductivité uniforme de la couche 3 a également été modifiée. La conductivité hydraulique de la couche des dépôts meubles est demeurée inchangée. Étant donné sa faible épaisseur, son influence sur l'élévation de la nappe est négligeable.

Le tableau 5.1 présente les valeurs de conductivité hydraulique des diverses unités lithologiques de l'île avant et après calibration. Nous avons calculé un facteur représentant le rapport entre la conductivité calibrée et la conductivité initiale. Ce facteur est inférieur à 3 pour l'ensemble des unités sauf pour la région du Mont-Royal. La conductivité du socle rocheux (couche 3) a été ajustée par un facteur 3 afin de mieux représenter la situation observée.

TABLEAU 5.1: Conductivité hydraulique des unités lithologiques de l'île de Montréal (*valeurs initiales et calibrées*).

<i>Unité lithologique</i>	(I)nitiale	(M)odèle	<i>Facteur de différence</i> $F = M/I$
	<i>Conductivité</i> (m/s)	<i>Conductivité</i> (m/s)	
Intrusion montréalaise	4.0E-07	3.2E-06	0.127
Shales du Lorraine	5.1E-06	3.2E-06	1.600
Shales de l'Utica	6.0E-05	5.0E-05	1.204
Calcaires du Trenton	4.1E-05	1.7E-05	2.417
Calcaires du Black River	2.7E-05	9.5E-06	2.867
Calcaires du Chazy	2.7E-05	1.5E-05	1.870
Dolomies du Beekmantown	1.1E-05	8.2E-06	1.346
Grès du Postdam	4.1E-05	---	---
Socle Grenvillien	1.0E-07	3.2E-07	0.315

Le tableau 5.2 montre les rapports entre la conductivité hydraulique horizontale et verticale utilisées pour les couches 1, 2 et 3 du modèle calibré. Il est facilement concevable que, dans la couche des dépôts meubles, il existe une anisotropie causée par les nombreuses hétérogénéités (lentille d'argile, couche de till fin, etc.). L'anisotropie imposée à la couche de roc fracturé est plus faible, car on ne connaît pas vraiment la distribution des fractures et qu'il est difficile de supposer une orientation préférentielle. La troisième couche est considérée comme uniforme et homogène.

TABLEAU 5.2: Facteur d'anisotropie introduit lors de la calibration.

	K_H / K_V
Couche 1: <i>Dépôts meubles</i>	100
Couche 2: <i>Roc fracturé</i>	10
Couche 3: <i>Roc sain</i>	1

La figure 5.1 représente la distribution de la conductivité hydraulique calibrée de la couche 2. Nous pouvons comparer cette carte à la figure 3.23 qui montre la distribution de la conductivité hydraulique initiale. Afin de simuler le mieux possible la piézométrie, nous avons été obligé de dissocier les unités de calcaire du Black River et du Chazy, de l'ouest de l'île, de celles du centre de l'île. La différence entre les deux conductivités est d'un facteur 1,6.

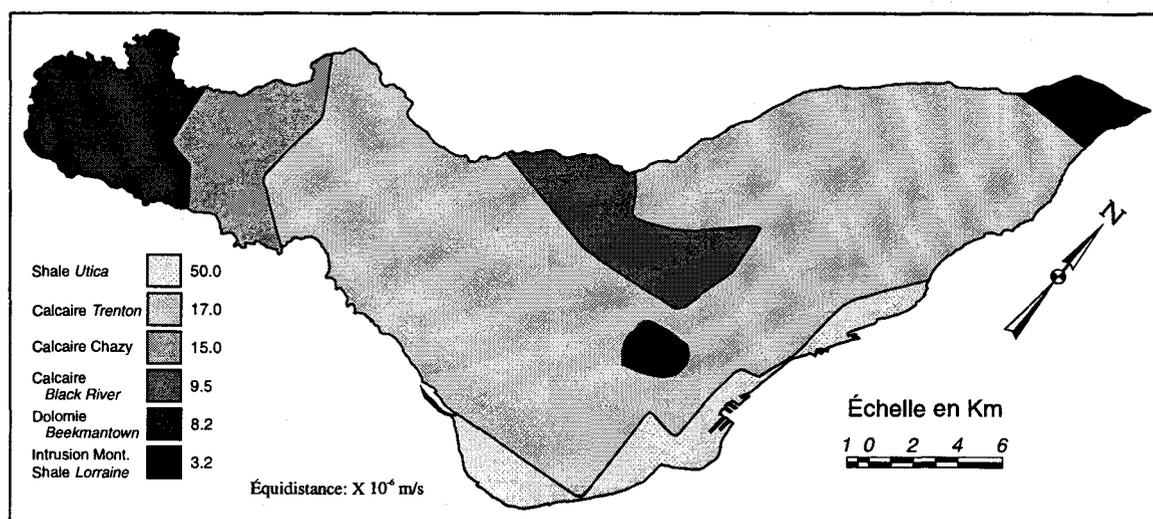


FIGURE 5.1: Carte de la conductivité hydraulique calibrée pour la couche 2.

Nous avons décidé de garder groupées toutes les unités lithologiques de la couche 2. On n'a pas assigné de valeur de conductivité hydraulique différente pour une zone en particulier, sauf si cette zone correspondait à une unité lithologique. De ce fait, la calibration du modèle demeure

générale. La calibration pourrait être raffinée en assignant une valeur de conductivité hydraulique pour chaque cellule du modèle. Cette approche mènerait à une meilleure calibration et serait possiblement plus réaliste quant à la distribution et à la représentativité des hétérogénéités de la conductivité hydraulique (variation spatiale). Cependant, une telle approche ne donnerait pas une solution unique. Selon les objectifs présentés au chapitre 1 pour le modèle régional, une telle calibration serait inappropriée et dépasserait le cadre de la présente étude.

5.2 PIÉZOMÉTRIE SIMULÉE

L'objectif principal d'un modèle d'écoulement est de reproduire la distribution des charges hydrauliques. Pour y parvenir, nous devons caler le modèle sur une cible de calibration prédéterminée (*Anderson et Woessner, 1992*). Dans notre cas, l'étalon de référence choisi est la piézométrie régionale pour l'île de Montréal de Bériault et Simard (1978). Il est à noter que cette référence n'est pas parfaite et elle comporte certaines sources d'erreur (*section 4.3.2*). Par exemple, la transformation de la référence de pieds en mètres, la discrétisation de la carte, la précision et la justesse des contours, etc. La calibration du modèle consiste à faire varier certains paramètres, comme la conductivité hydraulique horizontale ou verticale et la recharge (*section 5.1*), jusqu'à ce que l'écart entre la piézométrie simulée et observée soit minimisé le plus possible.

La figure 5.2 présente la charge hydraulique ajustée pour chaque couche du modèle. Nous observons peu de différence entre la surface piézométrique de la couche 1 et celle de la couche 2 (5.2a et 5.2b). Les différences sont négligeables et représentent un gradient hydraulique vertical faible. La piézométrie des couches 2 et 3 est identique (5.2b et 5.2c). À partir de maintenant, nous utilisons la piézométrie simulée pour la couche 3 comme niveau piézométrique de référence pour les comparaisons futures avec le niveau de base (*Bériault et Simard, 1978*).

La figure 5.3 montre l'emplacement des différentes coupes présentées à l'annexe F (*figures F.1*). Cette série de coupes représente la surface piézométrique simulée (trait en pointillé) et celle observée (trait plein). On note sur les coupes que chaque cellule est représentée et est espacée de 350 mètres. Nous observons sur ces différentes coupes que, même si dans certains cas la différence est grande, la forme des surfaces piézométriques simulées et observées est très similaire et que les points hauts de la nappe sont bien calculés. Nous observons, sur les coupes DD' et KK', l'effet du

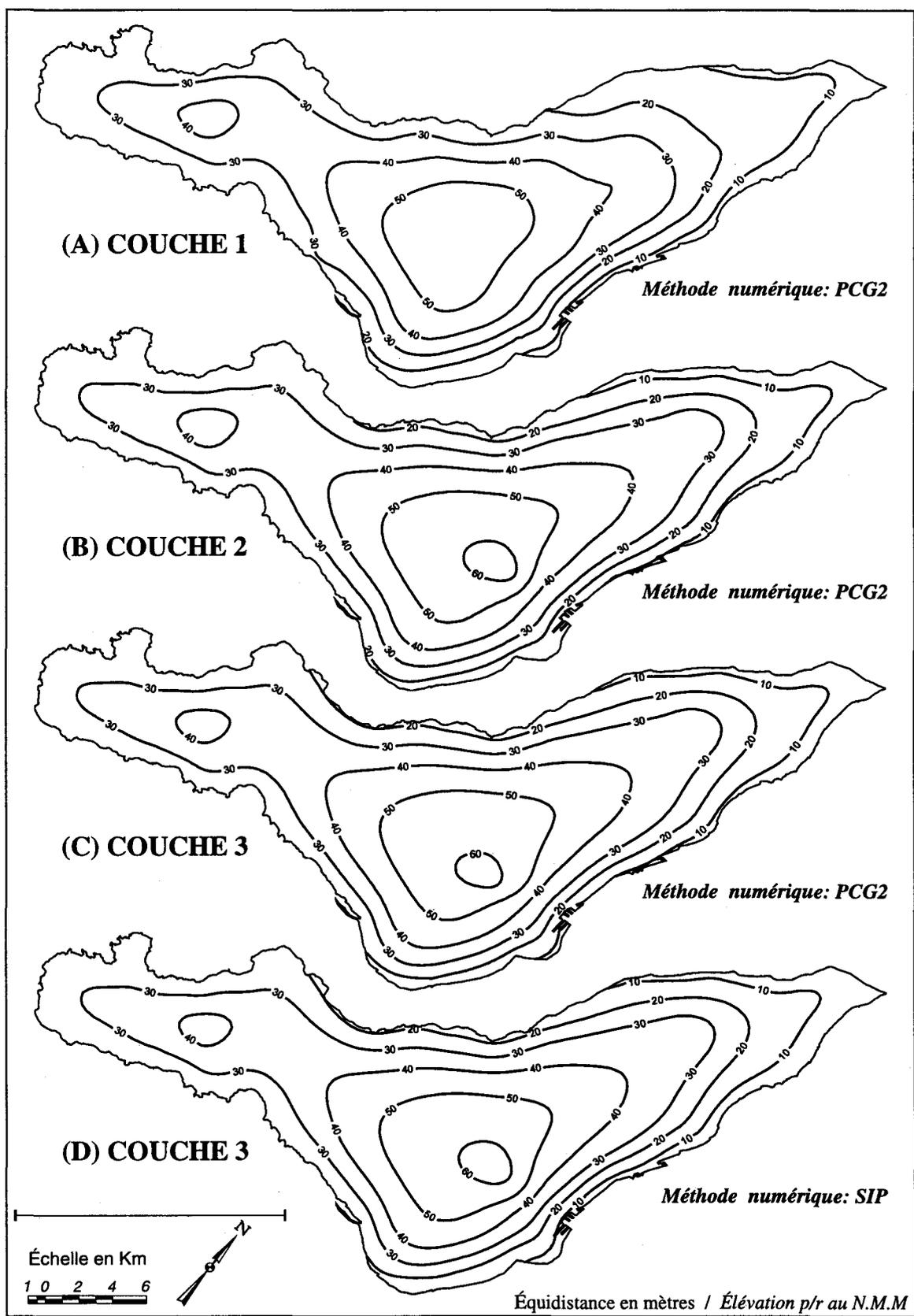


FIGURE 5.2: Cartes piézométriques simulées.

Mont-Royal. Le modèle numérique, avec la résolution employée à l'échelle régionale, ne peut reproduire le pic observé dans la piézométrie du Mont-Royal. Les différentes simulations effectuées ont cependant démontré qu'un meilleur ajustement des charges pour le Mont-Royal avait peu d'influence sur la majorité des charges calculées sur l'île.

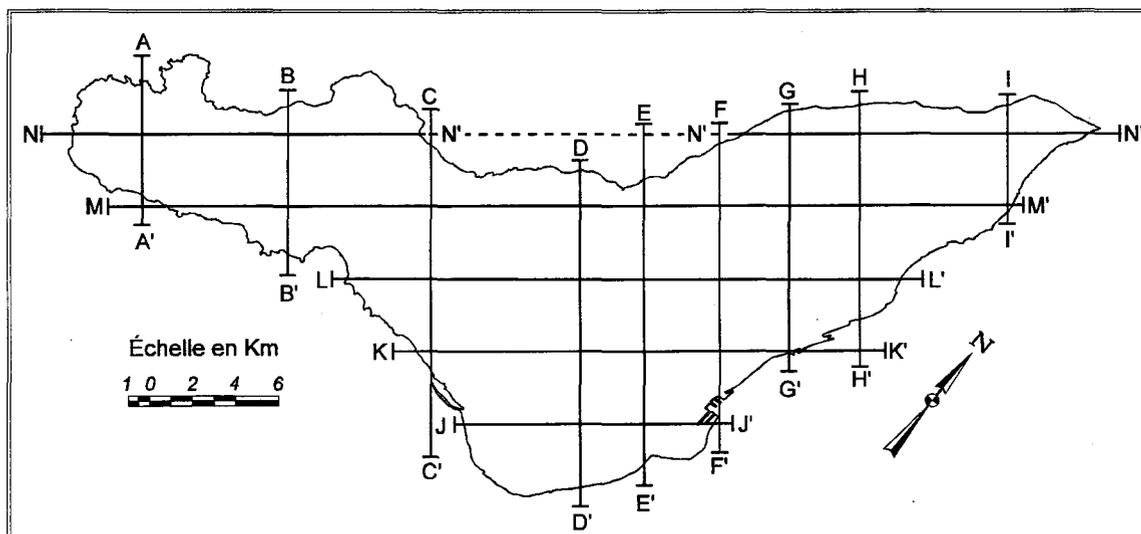


FIGURE 5.3: Emplacement des coupes montrant la différence entre la piézométrie simulée par le modèle et celle observée.

Nous observons sur plusieurs coupes [CC'; DD'; GG'; HH'; JJ'; KK'], une grande différence entre le niveau simulé et celui observé pour la périphérie de l'île. Cette erreur provient du fait que les niveaux de la rivière et du fleuve sont généralement plus élevés comparativement aux niveaux piézométriques de référence. On serait porté à croire que la limite à charge constante que l'on impose est trop élevée. Cependant, il faut se rappeler que ce niveau a été déterminé à l'aide des moyennes du niveau moyen annuel de la rivière et du fleuve. Ce niveau est considéré comme exact. Par conséquent, lors de l'élaboration du modèle conceptuel, nous avons fait la supposition que la nappe d'eau souterraine et le fleuve (ou la rivière) étaient connectés hydrauliquement. Cette dernière hypothèse n'est peut-être pas entièrement valide. Néanmoins, pour la précision du modèle, cette simplification était nécessaire. Le niveau de référence utilisé est la piézométrie de Bériault et Simard (1978), reproduite pour obtenir une valeur de la charge à chaque cellule. Lors de la construction de la carte de Bériault et Simard, il est possible que les auteurs n'aient pas tenu directement compte des niveaux d'eau dans le fleuve et la rivière. Les différences observées peuvent donc provenir de ces transformations.

Afin de résoudre le système d'équations (modèle mathématique), nous utilisons une solution numérique itérative (voir chapitre 4, section 4.1). Nous avons utilisé la méthode de solution numérique du gradient conjugué: *PCG2*, (Hill, 1990a). À titre de comparaison, nous avons utilisé une autre méthode de solution, celle-ci basée sur le principe de surrelaxation: *SIP* (Weinstein et al., 1969). La figure 5.2d présente, pour la couche 3, la piézométrie obtenue par cette méthode. La surface libre ainsi simulée se compare presque parfaitement à celle obtenue à l'aide de la méthode du *PCG2* pour la même couche. Les deux méthodes convergent vers la même solution. À la section 5.6, il sera discuté plus en détail de la performance des différentes méthodes de solutions itératives.

5.3 DISTRIBUTION DE L'ERREUR

La figure 5.4 présente une comparaison de la piézométrie simulée et observée (Bériault et Simard, 1978) pour la couche 3 (simulée). Nous remarquons que, pour la région du CTED, les courbes piézométrique se superposent très bien. La partie ouest de l'île est également bien simulée. La majorité des différences se retrouvent dans la partie sud de l'île et dans la région du Mont-Royal. Étant donné les limites de résolution du modèle conceptuel que l'on a fixées, il est difficile de représenter adéquatement le Mont-Royal. On n'a donc pas pu y reproduire parfaitement la piézométrie observée. Cependant, la piézométrie de base semble un peu élevée dans cette région et n'est pas nécessairement représentative de l'écoulement en milieu fracturé pour cette région. Pour cette raison, les grandes différences entre la piézométrie observée et celle simulée ne sont pas jugées inquiétantes. Les hauts piézométriques (zone de recharge) correspondent bien à ceux observés par Bériault et Simard (1978). Il faut toujours garder en tête que la piézométrie de base n'est pas nécessairement exacte et que la zone d'intérêt est la région du CTED. Dans cette zone, la différence entre les courbes piézométriques est faible.

La figure 5.5 présente la distribution de l'erreur absolue (Anderson et Woessner, 1992; ASTM, 1994b). Cette différence est déterminée en effectuant la différence entre la piézométrie de référence et celle simulée. L'erreur maximale est de 35 mètres et elle est observée au centre du Mont-Royal. L'erreur moyenne est de -4,23 mètres, avec un écart-type de 8,54 mètres. Nous avons indiqué, à la figure 5.5, le pourcentage relatif de cellules dont l'erreur absolue est contenue dans chaque intervalle.

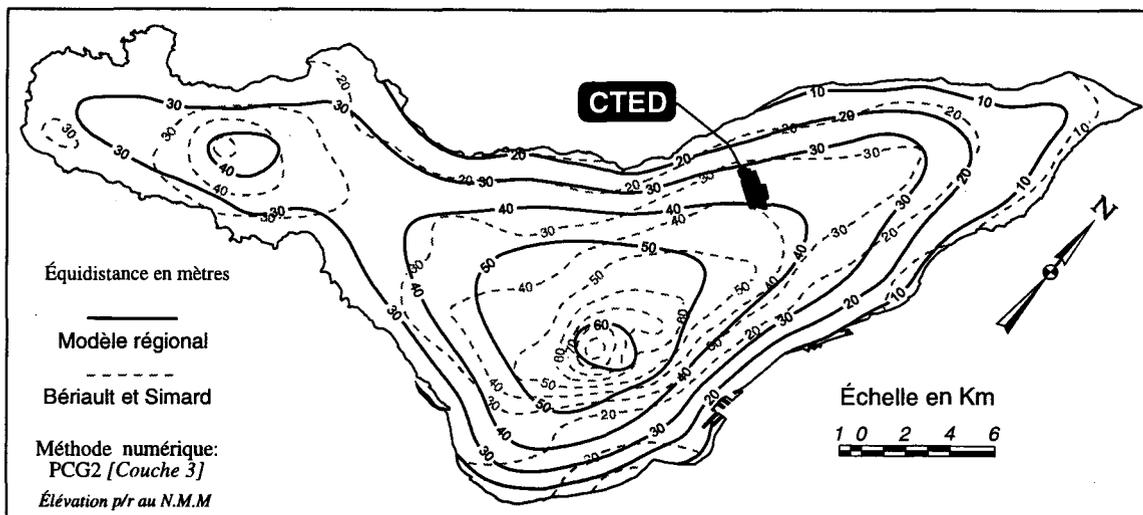


FIGURE 5.4: Comparaison entre la piézométrie observée (Bériault et Simard, 1978) et celle simulée (modèle régional).

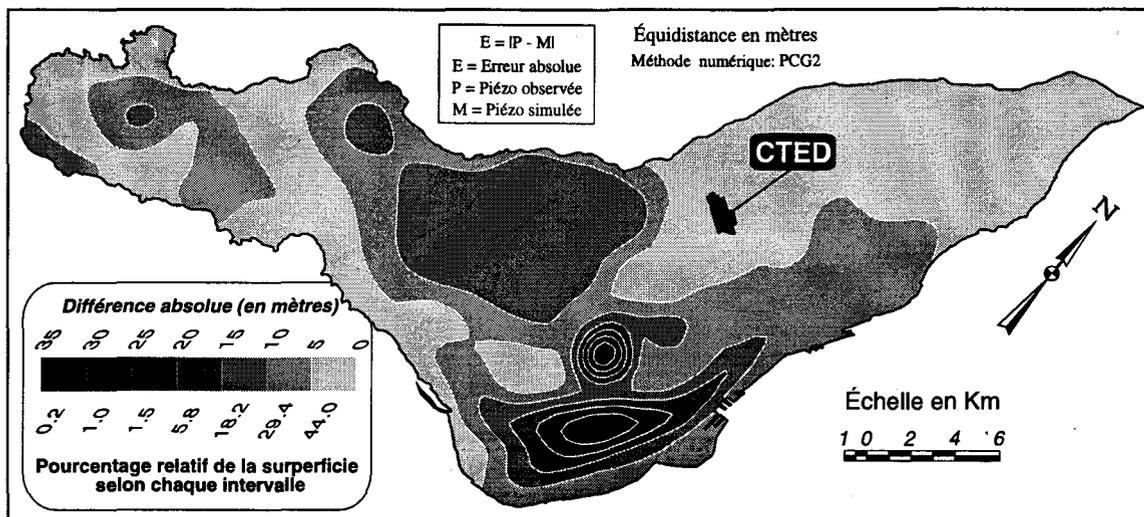


FIGURE 5.5: Carte de la distribution de l'erreur absolue [couche 3].

On s'aperçoit que près de 75% des cellules, donc 75% de la superficie de l'île, possèdent une erreur de moins de 10 mètres. Une erreur de plus de 20 mètres est observée sur seulement 8,5% de la superficie de l'île. La figure 5.6 montre la distribution détaillée de l'erreur cumulée pour l'intervalle 0-5 mètres. Plus de 20% de la superficie de l'île possède une erreur de 0 à 3 mètres. Ces résultats sont largement acceptables étant donné la nature régionale du modèle et le manque de données fiables pour la calibration du modèle. De plus, il est tout à fait normal d'avoir des zones de plus grande certitude et que dans ces zones l'erreur de calibration soit faible (Woessner et Anderson, 1990). En théorie, nous devrions définir préalablement des niveaux de calibration associés à différente zone du modèle (ASTM, 1994b).

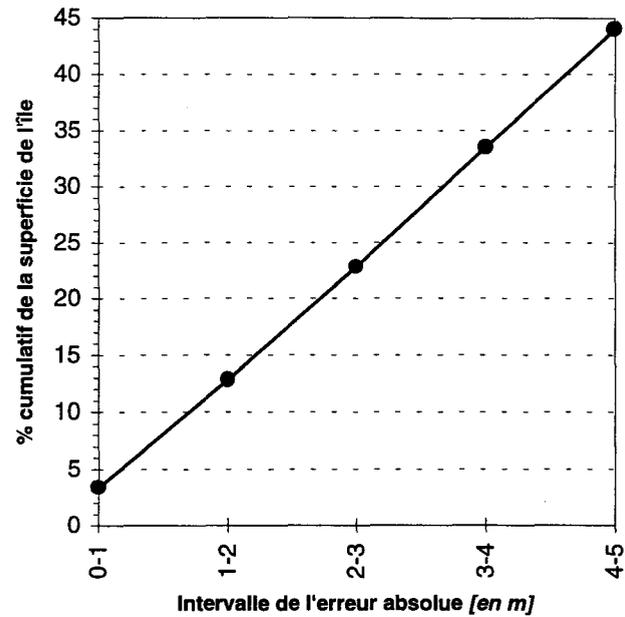


FIGURE 5.6: Pourcentage cumulatif de l'erreur absolue pour l'intervalle 0-5 mètre.

La figure 5.7 montre la distribution de l'erreur en deux classes: erreur positive et erreur négative (Anderson et Woessner, 1992; ASTM, 1994b). Une erreur positive signifie que la charge piézométrique simulée est plus élevée que celle observée. Nous avons la relation inverse pour une erreur négative. Nous observons que la charge simulée est généralement surévaluée.

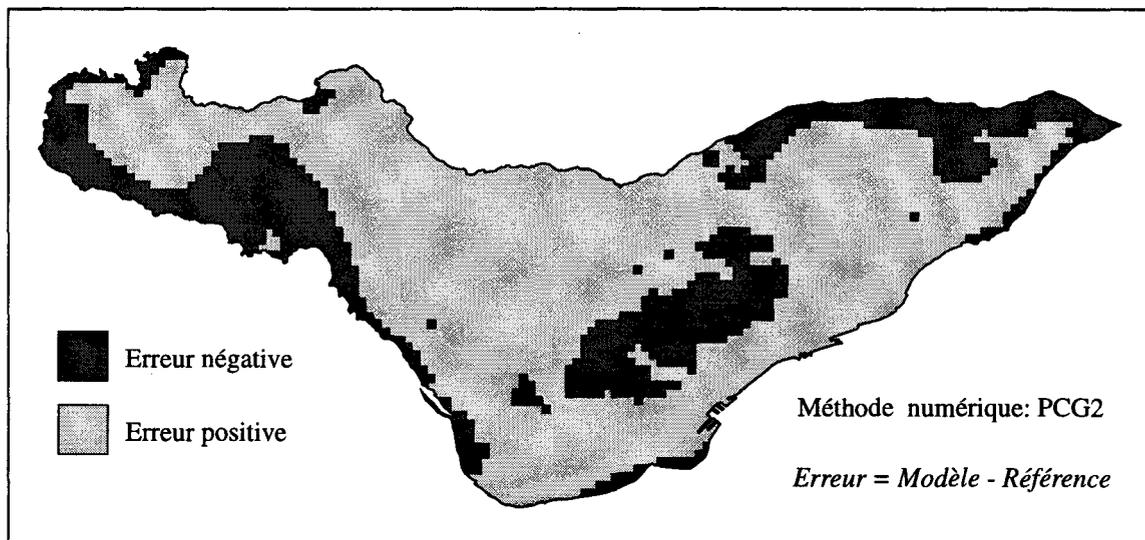


FIGURE 5.7: Distribution du signe de l'erreur [couche 3].

Nous présentons, à la figure 5.8, un graphique montrant les charges de références (*Bériault et Simard, 1978*) en abscisse et, en ordonnée, les charges simulées pour l'ensemble des cellules (*Anderson et Woessner, 1992; ASTM, 1994b*). Nous avons calculé une droite de régression pour tous ces points, à l'exception des charges observées supérieures à 60 mètres, étant donné que l'on limite la région du Mont-Royal à cette élévation. Le coefficient de corrélation est de 70,4%. La droite de régression intercepte l'ordonnée à 7,86 (mètres). Nous avons également représenté la droite à 45°, ce qui représente la calibration parfaite entre les charges simulées et celles observées. À partir de la droite de régression, nous avons déterminé des droites représentant un intervalle de confiance à 95%. Cet intervalle de confiance est également représenté à la figure 5.8.

Même si les charges simulées ne semblent par coïncider parfaitement avec les charges observées, on note sur la figure 5.8 une grande concentration de points autour de la droite à 45°. Si nous choisissons quelques points d'observation dans la région du CTED, la correspondance est meilleure. À la section 5.7, nous présentons, pour la région du CTED, un aperçu de la précision obtenue pour la calibration de ce secteur.

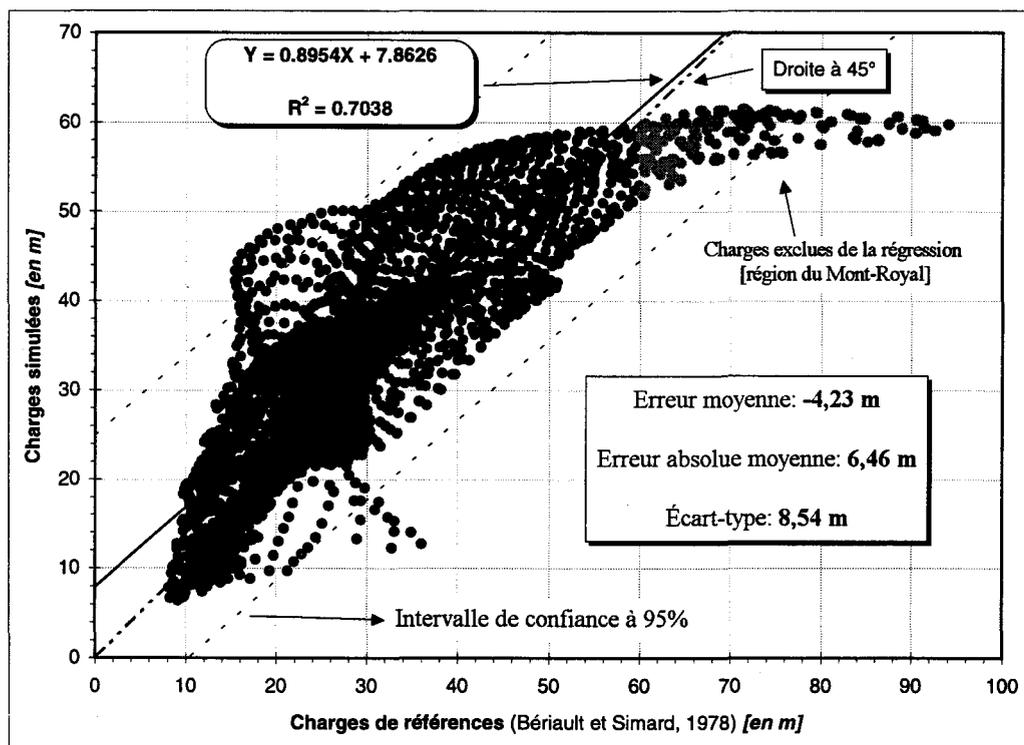


FIGURE 5.8: Graphique des charges observées (*charges de références*) versus les charges simulées (*toutes les cellules du modèle*).

5.4 BILAN VOLUMÉTRIQUE

Le bilan volumétrique des sources et pertes calculé par MODFLOW est un bon indicateur de la convergence de la solution numérique. Généralement, une erreur de moins de 1% entre les sources et les pertes est un signe de convergence (*Anderson et Woessner, 1992; ASTM, 1994b*). Une erreur supérieure peut indiquer une mauvaise convergence ou un critère de convergence trop élevé. Dans un tel cas, la calibration est à refaire ou le modèle conceptuel à redéfinir.

Pour le modèle de l'île de Montréal, nous pouvons, sur la base du bilan, conclure que le modèle a convergé. En effet, la différence entre les intrants et les extrants est inférieure à $5,96 \times 10^{-7}$ %. Les tableaux 5.3 et 5.4 présentent le bilan volumétrique des sources et pertes modélisées pour chaque couche du modèle (*tableau 5.3*) et pour l'ensemble du modèle (*tableau 5.4*). Pour la couche 1, la source principale est la recharge par infiltration. La couche 2 reçoit de l'eau des couches du haut et du bas (échanges verticaux), ainsi qu'une partie de l'infiltration. La recharge est appliquée à la cellule active la plus élevée. Les couches 2 et 3 perdent de l'eau par les cellules à charges constantes. Cette eau est alors retirée du système.

Les échanges vers le haut et vers le bas entre les différentes couches sont dus à la forme des lignes d'écoulement (composante en x ou y et en z). La figure 5.9 montre une coupe, selon une colonne du maillage, représentant l'écoulement. Cette représentation a été réalisée à l'aide du logiciel de traçage de particules MODPATH (*Pollock, 1989*). Des particules ont été assignées aux limites du modèle et l'écoulement a été calculé par substitution arrière jusqu'aux zones de recharge. La représentation de l'écoulement est simplifiée car nous n'avons imposé qu'une seule particule par cellule. Cette illustration sert seulement à démontrer les composantes horizontale et verticale de l'écoulement. À la section 5.7, nous traiterons plus en détail de l'utilisation des lignes d'écoulement du modèle régional.

La recharge totale simulée est de 80 millions de mètres cubes, comparativement à une estimation de 65,2 millions de mètres cubes, une différence de plus de 20%. Néanmoins, la quantité d'eau qui entre dans le modèle est du même ordre de grandeur que la valeur estimée par le bilan global (*chapitre 3, section 3.7*). La différence entre ces deux valeurs provient du fait que l'on a calculé la recharge pour chaque cellule à partir de la carte de la distribution de la recharge (*figure*

3.18). L'estimation ainsi obtenue est plus élevée que celle obtenue à l'aide du bilan global moyen, ce qui se reflète dans le bilan modélisé.

TABLEAU 5.3: Bilan volumétrique des sources et pertes selon chaque couche.

COUCHE= 1			
	<i>Sources</i>	<i>Pertes</i>	<i>Différence</i>
<i>Emmagasinement</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Charge constante</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Échanges horizontaux</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Échange vers le HAUT</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Échange vers le BAS</i>	8.90E+05	3.49E+07	-3.40E+07
<i>Puits</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Drains</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Recharge</i>	3.40E+07	0.00E+00	3.40E+07
<i>Évapotranspiration</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Fuite des rivières</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Limites à charge dép.</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
TOTAL :	3.49E+07	3.49E+07	8.00E+00

COUCHE= 2			
	<i>Sources</i>	<i>Pertes</i>	<i>Différence</i>
<i>Emmagasinement</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Charge constante</i>	0.00E+00	7.38E+07	-7.38E+07
<i>Échanges horizontaux</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Échange vers le HAUT</i>	3.49E+07	8.90E+05	3.40E+07
<i>Échange vers le BAS</i>	3.62E+05	6.86E+06	-6.49E+06
<i>Puits</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Drains</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Recharge</i>	4.63E+07	0.00E+00	4.63E+07
<i>Évapotranspiration</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Fuite des rivières</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Limites à charge dép.</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
TOTAL :	8.15E+07	8.15E+07	4.00E+01

COUCHE= 3			
	<i>Sources</i>	<i>Pertes</i>	<i>Différence</i>
<i>Emmagasinement</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Charge constante</i>	0.00E+00	6.73E+06	-6.73E+06
<i>Échanges horizontaux</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Échange vers le HAUT</i>	6.86E+06	3.62E+05	6.49E+06
<i>Échange vers le BAS</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Puits</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Drains</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Recharge</i>	2.38E+05	0.00E+00	2.38E+05
<i>Évapotranspiration</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Fuite des rivières</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
<i>Limites à charge dép.</i>	0.00E+00	0.00E+00	0.00E+00
TOTAL :	7.09E+06	7.09E+06	0.00E+00

TABLEAU 5.4: Bilan volumétrique global des sources et des pertes.

	<i>SIP</i>	<i>PCG2</i>
SOURCES (m^3)		
Emmagasinement:	0	0
Charge constante:	0	0
Recharge:	8.05E+07	8.05E+07
TOTAL:	8.05E+07	8.05E+07
PERTES (m^3)		
Emmagasinement:	0	0
Charge constante:	8.05E+07	8.05E+07
Recharge:	0	0
TOTAL:	8.05E+07	8.05E+07
DIFFÉRENCE (m^3)	24	48
DIFFÉRENCE (%)	0.00	0.00

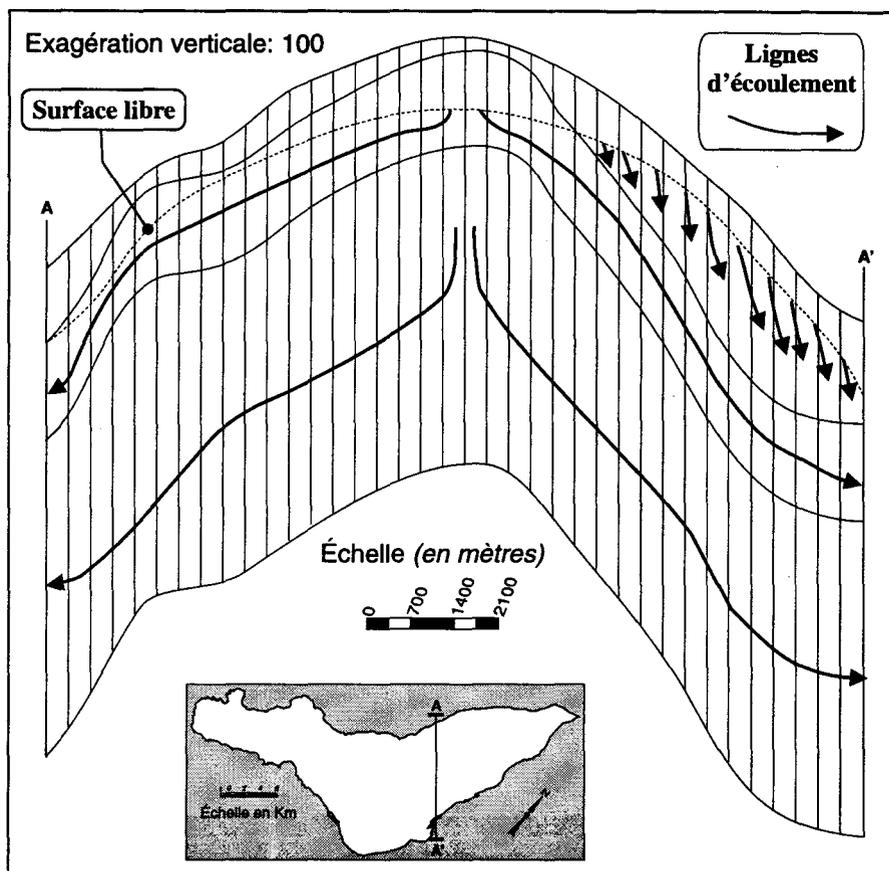


FIGURE 5.9: Coupe schématique montrant l'écoulement radial.

5.5 CELLULES SÈCHES

Étant donné le modèle conceptuel que l'on a défini au chapitre 3, la nappe est généralement présente dans la couche 2 du modèle, mais également localement présente dans la couche 1. À partir des différentes coupes du modèle conceptuel (*annexe E*), nous avons estimé les régions où l'on retrouve des cellules sèches dans la couche 1 du modèle. La figure 5.10a présente la distribution des cellules sèches pour la couche 1 initialement. Les figures 5.10b et 5.10c montrent la répartition des cellules sèches modélisées selon les différentes solutions numériques (*PCG2 et SIP*). La progression de l'apparition des cellules sèches est également représentée en fonction de l'itération. Le pourcentage de cellules sèches apparaissant à une itération donnée est indiqué.

Plus de 93% des cellules sèches apparaissent lors de l'itération 1. La distribution des cellules sèches initiales correspond relativement bien à celle des cellules modélisées. Un nombre très élevé de cellules sèches, comme dans le cas présent, peut influencer la convergence de la solution numérique. Aucune mesure n'a pu être prise pour contrôler ce phénomène.

Nous avons tenté d'utiliser le module inclus dans MODFLOW qui permet de remouiller les cellules sèches (*McDonald et al., 1991*). Cependant, ce module rend le système d'équations à résoudre hautement non linéaire et des problèmes numériques de convergence apparaissent. De plus, son utilisation requiert certaines données (par exemple, le facteur de mouillabilité des cellules, la répartition exacte des cellules qui doivent être sèches) qui ne sont pas disponibles pour le modèle régional de l'île de Montréal. Pour toutes ces raisons, cette approche n'a pas été utilisée.

5.6 CONVERGENCE DE LA SOLUTION NUMÉRIQUE

Afin de résoudre le système d'équations représentant l'écoulement, deux méthodes numériques de solutions itératives ont été employées. Ces méthodes sont: *SIP (strongly implicit procedure)* et *PCG2 (preconditioned conjugate gradient)*. Pour plus de détails sur ces méthodes, le lecteur peut se référer à *McDonald et Harbaugh (1988)*, *Hill (1990a)*, *Kuiper (1987)* et *Remson et al. (1971)*.

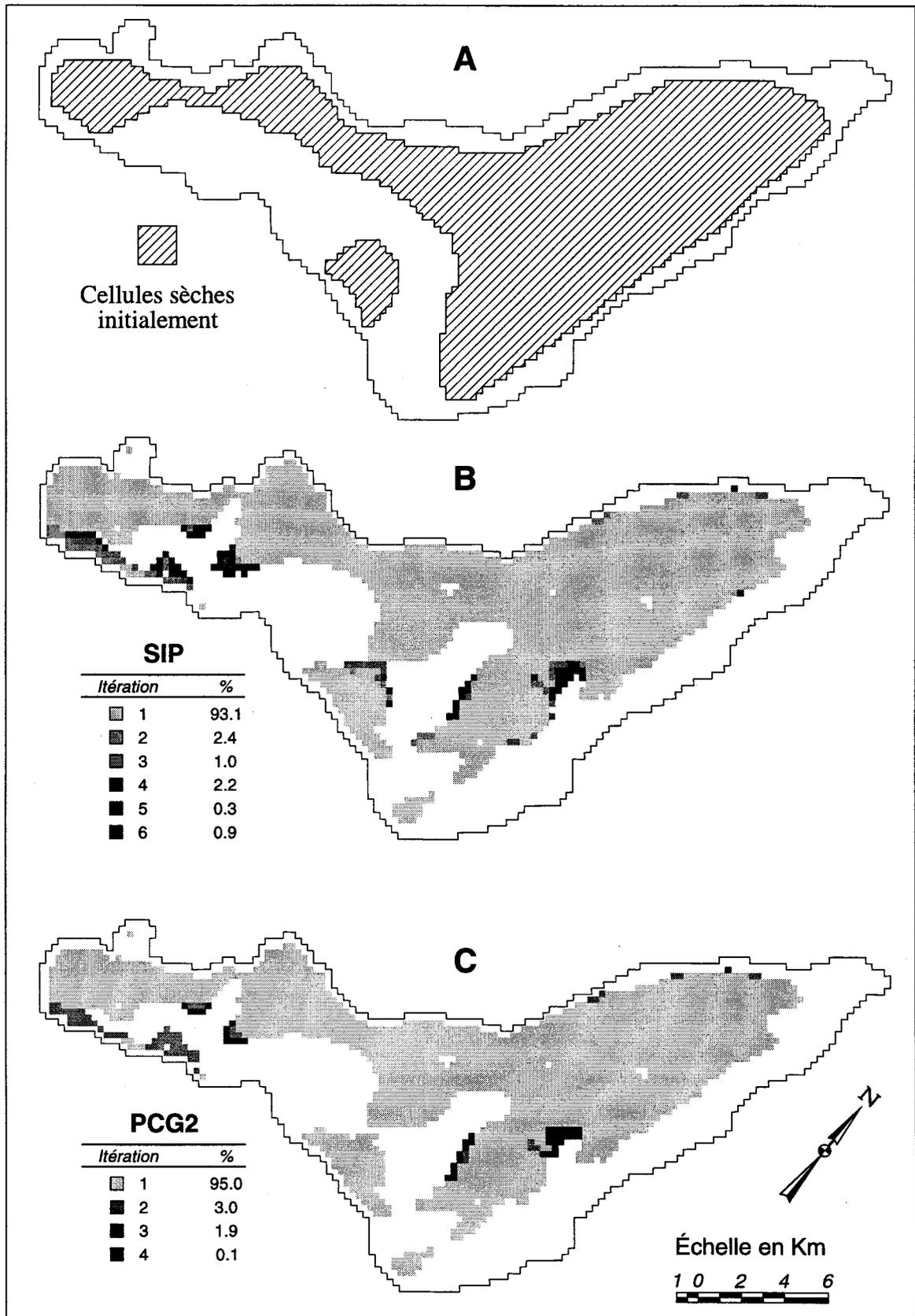


FIGURE 5.10: Distribution des cellules sèches pour la couche 1 en fonction de l'itération.

Les deux méthodes parviennent sensiblement aux mêmes résultats (section 5.2). Cependant, la méthode du gradient conjugué permet de fixer comme critère de convergence la valeur du résidu et le changement maximum de la charge pour deux itérations successives. Cette méthode permet donc d'être sûr de la convergence au niveau des résidus. Selon Hill (1990a), pour la méthode de solution PCG2, le critère de convergence pour la charge et le résidu devrait être de l'ordre de 1×10^{-2} . Il est à noter que la méthode SIP ne vérifie pas la convergence au sens des résidus mais seulement la convergence pour le changement maximum de la charge.

Le tableau 5.5 présente les différents paramètres numériques utilisés selon les deux méthodes numériques employées. Outre les critères de convergence fixés et observés, nous avons indiqué le nombre d'itérations requis par chaque solution. Le temps d'exécution sur un ordinateur 486-DX4-100 Mhz avec 8 Mo de mémoire vive est d'environ 5 minutes pour le gradient conjugué et de 3 minutes pour la solution par SIP. Le temps de calcul est relativement court, ce qui permet plus de souplesse lors de la calibration.

À l'annexe G, une série de figures (G.1, G.2 et G.3) présente, pour chaque solution, la progression de la convergence en fonction de l'itération. La convergence pour le changement absolu maximum de la charge, ainsi que pour le résidu est présentée. Pour la solution par gradient conjugué, on montre, dans un premier cas, l'évolution pour les itérations internes et externes et, dans un second cas, l'évolution pour les itérations externes seulement.

Pour cette méthode, les oscillations représentées dans la convergence en fonction des itérations internes et externes sont inhérentes à la méthode. Dans un premier temps, la partie non linéaire est solutionnée (itérations internes = 10) et, dans un second temps, la partie linéaire est solutionnée. Après les 10 itérations internes, le résidu (ou le changement maximum de la charge) est corrigé. La figure G.3 (*annexe G*) montre l'évolution de la convergence pour les itérations externes seulement. Nous observons facilement la convergence rapide de cette solution. Pour ce qui est de la solution SIP, elle semble osciller mais elle converge vers la même solution que par PCG2 et dans le même ordre de certitude (résidu et charge). Afin de vérifier l'exactitude de la convergence, les routines SIP et PCG2 de MODFLOW ont été modifiées pour permettre la visualisation de la distribution du résidu lors de la convergence. Les figures G.4 et G.5 (*annexe G*) montrent pour chaque couche, selon les deux méthodes employées, la répartition du résidu.

TABLEAU 5.5: Résumé des différents paramètres numériques et critères de convergence utilisés.

Méthode: PCG2		
Pré-conditionnement:	<i>Cholesky</i>	
Maximum d'itérations externe	100	
Maximum d'itérations interne:	10	
Facteur de relaxation:	1	
	<u><i>Critère</i></u>	<u><i>Modèle</i></u>
Changement maximum de la charge pour la convergence:	1.0E-03	7.77E-07
Résidu maximum pour la convergence:	1.0E-01	-9.04E-02
<u>Nombre d'itérations pour la convergence</u>		
	Externe:	62
	Totale:	447
Méthode: SIP		
Facteur d'accélération:	1	
Nombre de paramètres:	5	
	<u><i>Critère</i></u>	<u><i>Modèle</i></u>
Changement maximum de la charge pour la convergence:	1.0E-05	9.96E-06
Résidu maximum:		-4.70E-01
<u>Nombre d'itérations pour la convergence</u>		
	Totale:	66

En général, les résidus maximaux sont observés dans la région du Mont-Royal, ce qui est normal car cette zone est associée à la plus grande erreur. Les résidus obtenus par SIP sont généralement plus élevés que ceux obtenus par la solution du PCG2. Il est à noter une certaine tendance dans la répartition des résidus, surtout pour la méthode de solution par gradient conjugué. Cette tendance ne peut être expliquée actuellement et requiert une étude plus approfondie qui dépasse le cadre de cette modélisation.

Les figures G.6a et G.6b (*annexe G*) présentent des histogrammes montrant la distribution du résidu, en fonction de la méthode de solution et de la couche du modèle. Nous observons que, selon la couche et la méthode, la moyenne varie passablement. Le résidu moyen obtenu par la solution SIP est de l'ordre de 1×10^{-2} à 1×10^{-3} . Avec la solution par gradient conjugué, l'écart entre la distribution selon les différentes couches est plus faible qu'avec une solution SIP. Le résidu moyen est d'environ 1×10^{-3} à 1×10^{-4} . Il y a un ordre de grandeur de différence entre les résidus obtenus avec une solution SIP, comparativement à une solution par PCG2.

À la lumière de cette brève étude sur les résidus, il est conseillé d'utiliser la méthode du gradient préconditionné car elle implique directement les résidus dans son critère de convergence. Les modifications aux routines de MODFLOW ont permis de représenter la distribution du résidu. Ultérieurement, d'un point de vue théorique, cette répartition pourrait faire l'objet d'une étude plus poussée.

5.7 MODÈLE LOCAL: CTED

La calibration du modèle d'écoulement régional présenté dans les sections précédentes permet de fixer les conditions aux limites pour la modélisation locale de l'écoulement au CTED. Une fois la distribution de la charge hydraulique obtenue, nous procédons au traçage des lignes de courant et de la ligne de partage des eaux. Ces limites serviront de frontières au modèle local.

5.7.1 Calibration locale

À l'aide des différents piézomètres installés dans la région du CTED (*Rouillard et Bodineau, 1995*), nous pouvons quantifier la précision de la calibration pour ce secteur. La figure 5.11 présente, pour quatre piézomètres installés dans le secteur du CTED (*Rouillard et Bodineau, 1995; Les Constructions R.R.N. Inc., 1993*), la différence entre la charge simulée par le modèle régional et le niveau piézométrique mesuré. Nous avons utilisé seulement quatre piézomètres, car les autres sont jugés trop près du CTED et de la carrière Francon et peuvent être grandement influencés par le pompage effectué dans ce secteur.

En moyenne, l'erreur dans ce secteur est de moins de 2 mètres. La figure 5.12 présente un graphique de la charge simulée versus la charge observée dans les quatre piézomètres. Les points ainsi générés s'alignent bien le long de la droite à 45° représentant la calibration parfaite. Les charges hydrauliques simulées dans cette région serviront de valeurs initiales pour le modèle local et seront utilisées comme étalons lors de la calibration des conditions limites.

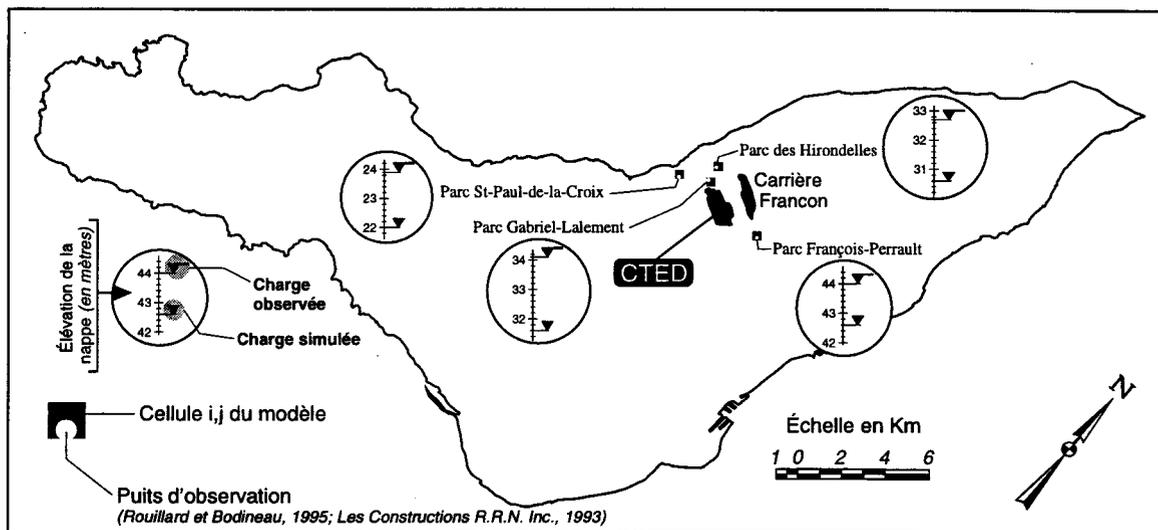


FIGURE 5.11: Différence entre la charge simulée par le modèle régional et la charge observée dans la région du CTED.

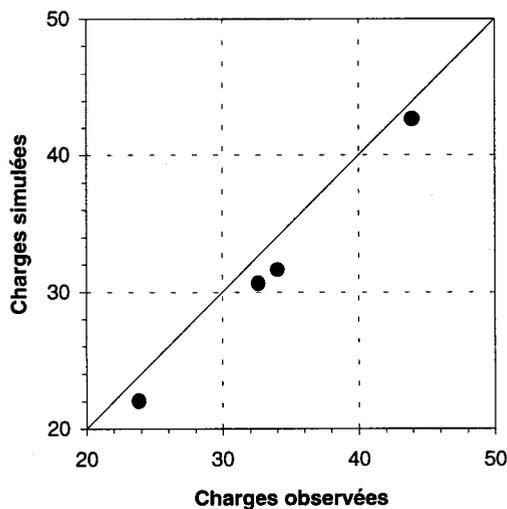


FIGURE 5.12: Charges simulées versus charges observées pour les piézomètres de la région du CTED.

5.7.2 Lignes d'écoulement

Le logiciel MODPATH/MODPATH-PLOT (Pollock, 1989) a été utilisé afin de générer les lignes de courant. Pour ce faire, nous avons distribué des particules aux cellules à charge constante en périphérie de l'île. À l'aide du traçage de particules par substitution arrière, nous avons pu déterminer les différentes lignes de courant ainsi que les zones de recharge. La figure 5.13 présente les résultats de cette simulation. On observe très bien l'écoulement radial de l'eau souterraine vers le fleuve St-Laurent et la rivière des Prairies. Les zones de recharge correspondent au Mont-Royal et aux environs de l'aéroport de Dorval (partie ouest de l'île). Nous indiquons également sur cette carte l'emplacement de la ligne de partage des eaux. Cette limite divise, au sens de l'écoulement, l'île en deux parties. Cette limite correspond aux hauts piézométriques et topographiques. Elle a été déterminée manuellement à l'aide des lignes d'écoulement.

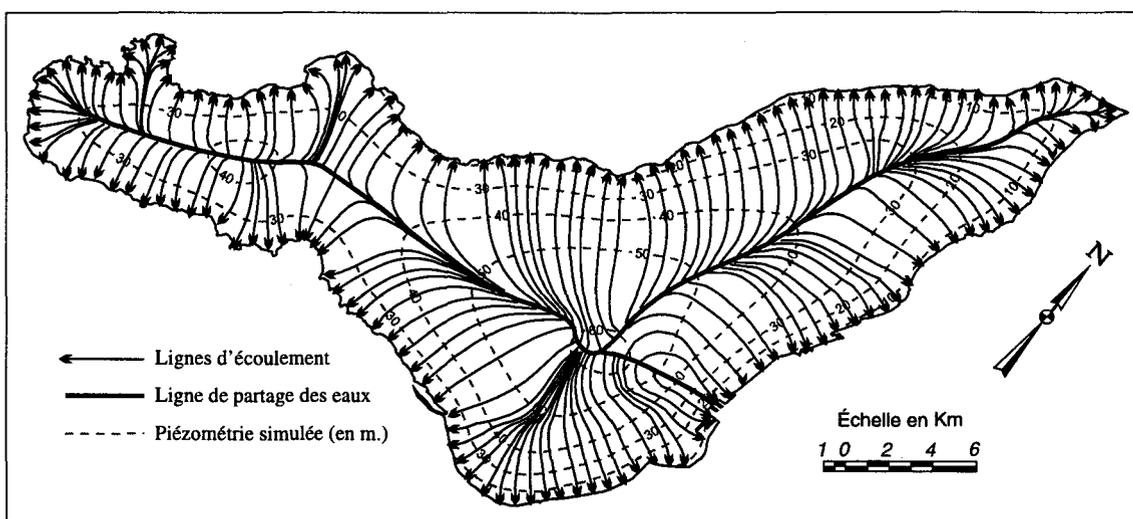


FIGURE 5.13: Simulation des lignes de courant pour le modèle régional de l'île de Montréal.

La méthode utilisée pour tracer les lignes de courant requiert la porosité efficace des différentes unités. Étant donné que l'on ne possède pas d'informations pertinentes sur cette valeur, nous avons décidé d'assigner une valeur unitaire (1) comme porosité pour toutes les unités de l'île. Selon cette hypothèse, nous ne pouvons cependant pas calculer les flux, les vitesses, les temps de résidence ou les temps de parcours des différentes particules. Cependant, la trajectoire des lignes de courant est indépendante de la porosité et nous obtenons ainsi une représentation normalisée de l'écoulement.

5.7.3 Limites du maillage pour le modèle local

À partir des lignes de courant, de la piézométrie régionale et de la ligne de partage des eaux, il est possible de positionner les limites du maillage (*ASTM, 1994a*) pour le modèle local au CTED. Les limites de ce modèle seront:

1. Limites à charge constante: équipotentielle 20 mètres (au nord)
2. Limites imperméables: ligne de partage des eaux (au sud)
3. Flux nul (imperméable): lignes de courant (à l'est et à l'ouest)

Les limites est et ouest du maillage local sont tangentes aux lignes d'écoulement. Il n'est pas possible de suivre parfaitement les lignes de courant, car elles courbent radialement vers la ligne de partage des eaux. Cette différence entre la limite du maillage et la ligne de courant se compense d'un côté par rapport à l'autre: la réduction du flux d'eau d'un côté est compensée par le gain de l'autre côté. L'erreur ainsi commise est négligeable.

Afin de déterminer adéquatement les distances par rapport au CTED des limites est et ouest du maillage du modèle local, il est important de déterminer le rayon d'influence des pompages effectués au CTED et à la carrière Francon. Ces limites doivent être fixées suffisamment loin pour ne pas influencer les résultats du modèle local. Pour ce faire, nous avons utilisé le modèle analytique *DREAM (Bonn et Rounds, 1990)*. Ce modèle simplifié simule le rabattement obtenu par pompage pour un domaine isotrope et homogène à l'aide de l'équation de Theis (*Domenico and Schwartz, 1990*). De cette façon, on estime le rayon d'influence des puits de pompage de façon conservatrice. En utilisant un modèle qui ne tient pas compte de la recharge, qui a pour effet d'apporter un volume d'eau aux puits et de réduire ainsi le cône de rabattement, nous simulons le pire cas. De plus, en considérant un aquifère captif au lieu d'une nappe libre, nous ne tenons pas compte de l'eau disponible dans la partie non saturée du sol. Cette eau est généralement disponible par drainage par gravité pour alimenter les puits de pompage.

Le pompage au CTED et à la carrière Francon est représenté par 5 puits. Les débits de ces puits sont tels que leur somme équivaut au total pompé quotidiennement (voir tableau 3.11). Les propriétés de l'aquifère sont données selon une transmissivité moyenne pour un aquifère saturé de 100 mètres. La transmissivité utilisée est $26 \text{ m}^2/\text{j}$. Nous avons ajouté deux puits images d'injection

au nord afin de représenter le niveau constant de la rivière des Prairies (rabattement nul) (*Gélinas et Lefebvre, 1992*).

Le rabattement simulé est présenté à la figure 5.14. Nous considérons que le rabattement maximum acceptable est de 1 à 2 mètres afin de définir les limites du rayon d'influence maximum des différents puits de pompage. La limite ouest du maillage est fixée à 3 000 mètres par rapport au centre entre le CTED et la carrière Francon. La limite est est assignée symétriquement. On observe que le rayon d'influence ne se rend pas jusqu'à la limite de partage des eaux. Cette limite n'a cependant pas été simulée.

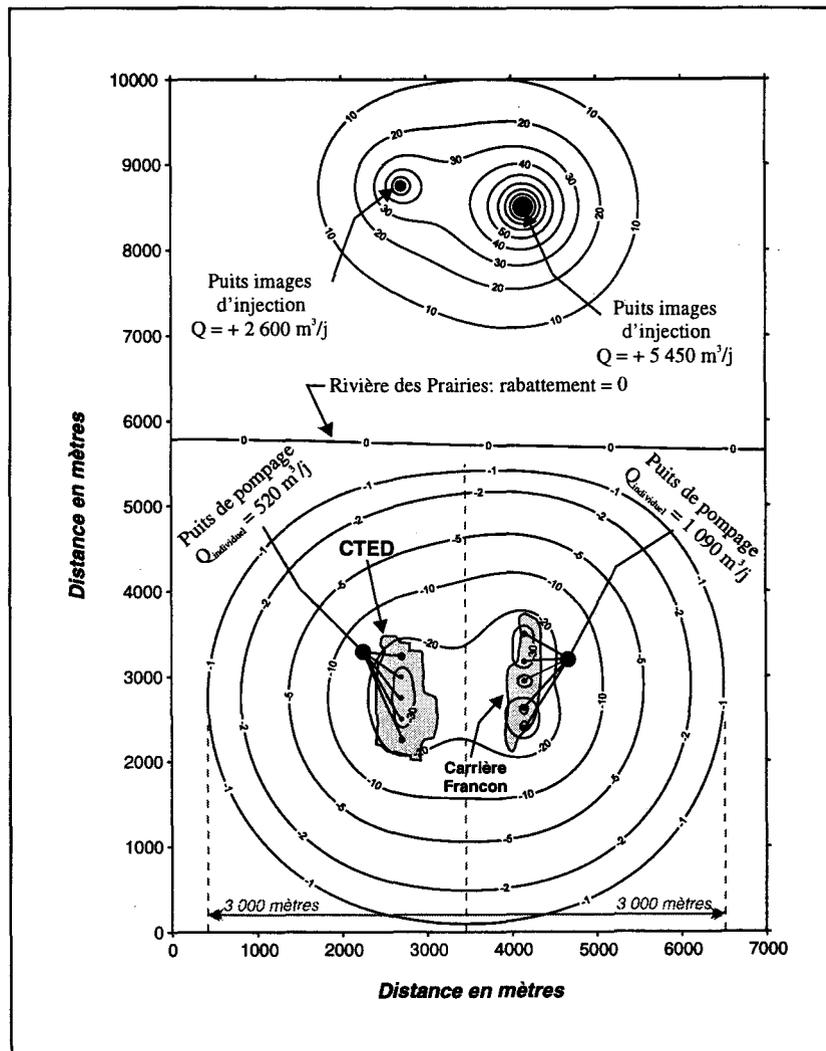


FIGURE 5.14: Rabattement simulé pour déterminer le rayon d'influence des puits de pompage du CTED et de la carrière Francon.

La figure 5.15 présente les limites du maillage qui seront utilisées pour la modélisation locale. Les différentes distances sont indiquées sur la figure. La figure 5.16 montre la piézométrie détaillée de la zone considérée pour le modèle local. Cette piézométrie servira de charge initiale et les valeurs aux limites seront utilisés comme étalons de calibration.

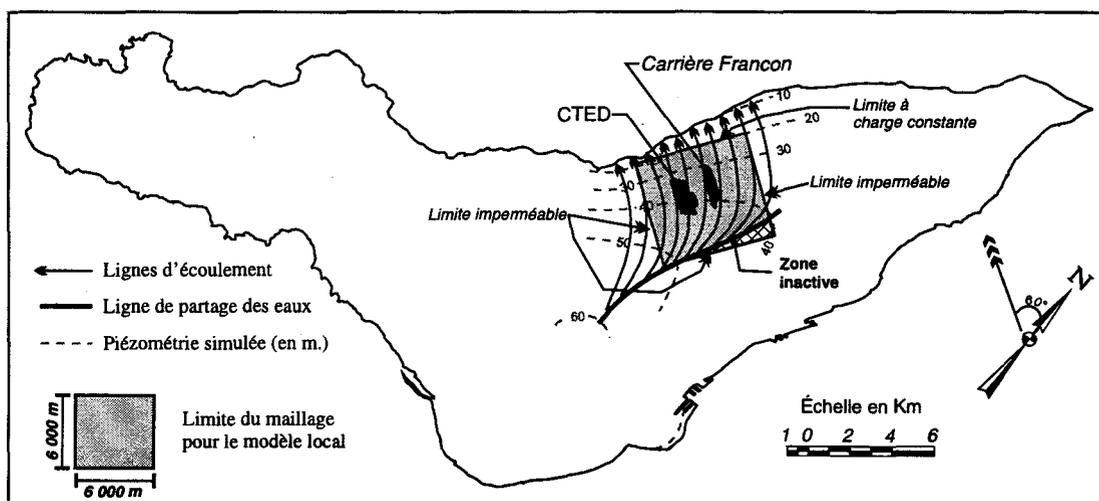


FIGURE 5.15: Limite du maillage pour la modélisation locale.

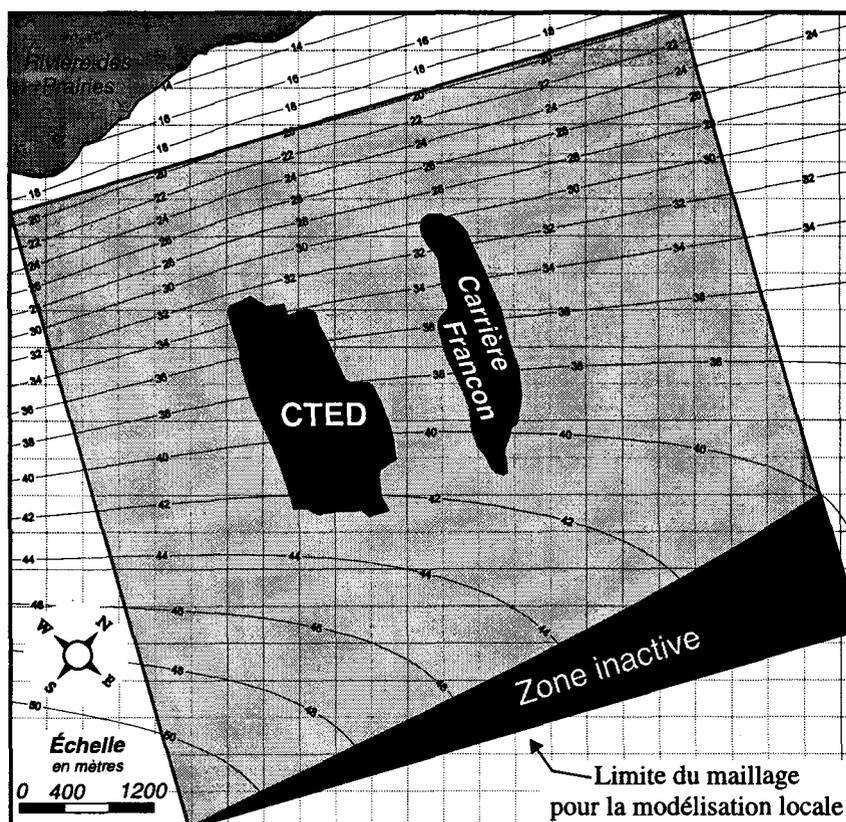


FIGURE 5.16: Piézométrie simulée par le modèle régional pour les secteurs du CTED et de la carrière Francon.

5.8 DISCUSSION

Suite à cet exercice de modélisation, nous possédons maintenant un outil capable de prédire raisonnablement le niveau de la nappe d'eau pour l'ensemble de l'île de Montréal. L'effort d'identification des paramètres pour le modèle régional a permis de définir l'hydrologie et les paramètres hydrogéologiques moyens de l'île de Montréal. De façon générale, le modèle régional d'écoulement est considéré comme satisfaisant. Il est évident que, pour la région du Mont-Royal, l'erreur associée est grande. Étant donné les informations disponibles et la résolution employée, nous ne pouvons pas arriver à une meilleure calibration sans renoncer au concept de régionalisation des propriétés hydrogéologiques (conductivité hydraulique, recharge, hydrologie).

Un tel modèle régional pourra être employé afin de déterminer les conditions limites d'un site faisant l'objet d'une étude plus locale. Une telle approche sera utilisée pour développer un modèle d'écoulement plus détaillé et raffiné pour le site du *Centre de Tri et d'Élimination des Déchets de la Ville de Montréal* [CTED]. Cette modélisation locale sera présentée dans la deuxième partie du présent mémoire.

Cette méthode de modélisation par maillage télescopique (*Ward et al., 1987*) permet de déterminer exactement les différentes conditions limites à l'aide du modèle régional. Elle pourrait être appliquée à tout autre site présent sur l'île de Montréal. Cependant, il faut tenir compte que, pour les autres secteurs de l'île, l'erreur associée à la distribution de la charge hydraulique est grande comparativement à la région du CTED. Il faut donc utiliser les valeurs de charges hydrauliques avec précautions. Les lignes de courant et la ligne de partage des eaux peuvent être utilisées avec plus de confiance, car elles ne varieraient pas énormément même si les charges étaient mieux calibrées. Or, pour déterminer les conditions de flux nul (limites imperméables), le modèle régional est bien adapté. De plus, à l'aide du modèle régional il sera également possible de prédire l'effet de la variation future de certains paramètres (conductivité, recharge) sur la piézométrie.

Le modèle régional reproduit très bien les charges observées au CTED. Les zones possédant une forte erreur sont jugées assez loin de la zone détaillée (*modèle local*) et n'influencent pas les résultats. Si une modélisation locale pour un autre secteur de l'île était nécessaire, peu d'effort serait nécessaire pour recalibrer le modèle régional afin de minimiser l'erreur dans ce nouveau secteur. Cependant, la zone du Mont-Royal (centre-ville) sera toujours difficile à calibrer

si nous gardons la même résolution du maillage. Pour une étude dans ce secteur, il faudrait augmenter la résolution autour du Mont-Royal afin de mieux représenter le fort gradient hydraulique présent dans ce secteur.

Le modèle régional a également permis de déterminer un bilan détaillé de l'hydrologie de l'île. Ce bilan sert à déterminer la distribution des précipitations, du ruissellement et de l'évapotranspiration sur l'île de Montréal. Nous pouvons alors, à l'aide de ces paramètres, déterminer une distribution de la recharge nette sur l'aquifère. Une étude des différentes formes de pompage présentes sur l'île a également été réalisée et a été intégrée à ce bilan. À l'aide des distributions des différents paramètres, le bilan hydrologique pour une sous-région de l'île peut être facilement calculé.

Le manque de données sur la distribution de la conductivité hydraulique demeure le point faible du modèle. Cependant, une attention particulière a été portée à l'assignation de ce paramètre. Les résultats de la calibration sont conditionnels à la distribution supposée. Afin de remédier à ce manque, on aurait pu utiliser les estimations de la conductivité hydraulique disponibles autour du site du CTED. Cependant, une telle concentration de données aurait pu fausser les extrapolations de cette propriété régionalement et aurait sûrement introduit un biais dans la représentation du champ de conductivité hydraulique. Pour cette raison, ces valeurs seront utilisées uniquement pour la modélisation locale.

Une autre limitation du modèle régional provient de l'utilisation d'une représentation discrète et transformée du niveau piézométrique dérivée de Bériault et Simard (1978). Le niveau de référence n'est pas jugé précis. Même si nous supposons que les niveaux sont demeurés sensiblement les mêmes, nous pouvons mettre en doute l'exactitude des contours de base étant donné que l'on ne connaît même pas, par exemple, les points de contrôle ni les critères utilisés lors du traçage des courbes piézométriques. Par ailleurs, même à l'aide de la banque de données de la Ville de Montréal, il n'a pas été possible de construire une carte piézométrique représentative.

Pour diminuer l'objectivité introduite par la calibration par essais-erreurs, une autre approche aurait pu être utilisée. L'utilisation d'une méthode de solution inverse du système d'équations représentant l'écoulement aurait amélioré la calibration. Le lecteur est invité à

consulter les références suivantes pour plus d'informations: Carrera et Neuman (1986a, 1986b et 1986c), Sun et Yeh (1990a, 1990b) et Carrera et al. (1989).

Il existe actuellement plusieurs modèles capables de résoudre le problème inverse tel que formulés par *MODFLOW* (par exemple: Hill, 1990b; Olsthoorn, 1995). Encore là, la distribution de la conductivité hydraulique aurait alors été beaucoup plus variable et n'aurait pas représenté les valeurs moyennes régionales des différentes conductivités hydrauliques associées aux lithologies. Une telle approche aurait également nécessité plus de valeurs observées de la charge et une meilleure estimation de la distribution de la conductivité hydraulique afin de converger vers une calibration unique. Le problème majeur des solutions inverses demeure la non-unicité de la solution. Il faut donc utiliser une telle approche avec précautions.

En conclusion, le développement d'un modèle régional d'écoulement de l'eau souterraine a permis de définir un contexte représentatif pour la modélisation locale du CTED. Sans cette approche, les limites du domaine modélisé auraient dû être estimées arbitrairement et la représentativité de ce modèle aurait été diminuée. De plus, le modèle régional a permis de déterminer une série de valeurs possibles de la conductivité hydraulique des différents dépôts et lithologies de l'île de Montréal. Il a également permis de définir précisément le cadre hydrologique de l'île. Nous pouvons maintenant représenter l'infiltration nette d'eau et ainsi quantifier la recharge de l'aquifère principal de l'île.

Il est évident qu'un développement plus approfondie serait nécessaire afin de représenter parfaitement le système aquifère de l'île de Montréal. Cependant, pour les besoins de la présente étude, le modèle régional tel que développé est largement suffisant.

PARTIE II

MODÈLE D'ÉCOULEMENT LOCAL

CENTRE DE TRI ET D'ÉLIMINATION DES DÉCHETS
DE LA VILLE DE MONTRÉAL (CTED)

CHAPITRE 6

CONTEXTE LOCAL

La Ville de Montréal opère un important site d'enfouissement sanitaire, le Centre de Tri et d'Élimination des Déchets (CTED). Ce site présente plusieurs particularités que l'on ne retrouve pas ailleurs au Québec. Par exemple, la dimension exploitée pour l'enfouissement le place au premier rang au Québec. Il se classe au troisième rang parmi les plus grands lieux d'élimination de déchets domestiques en Amérique du Nord (*Fortin et Thibault, 1994*). Par ailleurs, sa localisation en milieu urbain en plus de son implantation dans une ancienne carrière caractérisée par un roc qui peut être par endroits fortement fracturé, en fait également un cas unique en Amérique. De surcroît, le fond de l'excavation, qui n'est pas imperméable, est situé bien en dessous du niveau de la surface libre, ce qui fait en sorte que ce lieu d'enfouissement sanitaire génère une quantité importante d'eau de lixiviation qu'il faut contrôler et traiter (*Fortin et Thibault, 1994*).

Le présent chapitre a pour but de situer et de décrire le contexte local au CTED. Premièrement, le CTED sera localisé dans son contexte urbain. Par la suite, une brève description de l'historique du site précédera sa description détaillée.

6.1 LOCALISATION

Le Centre de Tri et d'Élimination des Déchets (CTED) est situé sur le territoire de la ville de Montréal dans la communauté urbaine de Montréal. Le CTED occupe le site de l'ancienne carrière Miron. L'immense trou laissé par l'excavation de la carrière sert à l'enfouissement des déchets solides. Le site est limité par la rue Jarry au sud, la rue Champdoré au nord, l'avenue Papineau à l'ouest, la rue d'Iberville et les 2^e et 8^e avenues à l'est. Il est à noter que le système de référence de l'île de Montréal n'est pas orienté selon les axes géographiques. Ainsi, le *nord* montréalais correspond au nord géographique moins 40°. Nous observons, dans un rayon d'environ deux kilomètres, la rivière des Prairies au *nord* et la carrière Francon à l'*est*. Cette dernière appartient également à la ville de Montréal et sert de dépôt de neige usée. La figure 6.1a situe la zone modélisée sur l'île de Montréal. La figure 6.1b montre la localisation du CTED par rapport aux limites de la zone modélisée (*voir chapitre 5.7.3*). Nous indiquons également sur cette figure la topographie régionale autour des carrières.

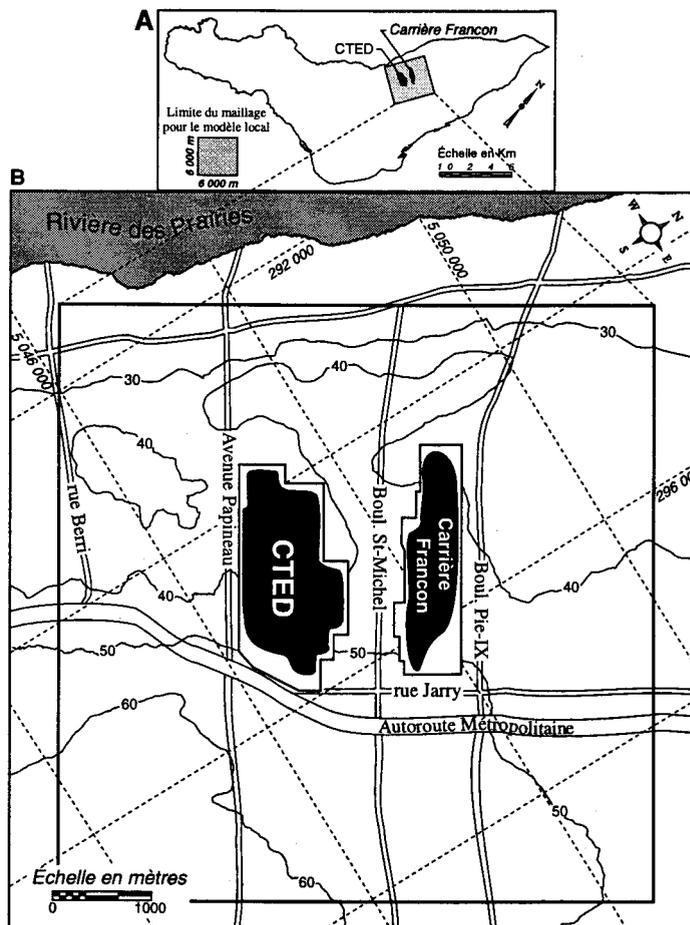


FIGURE 6.1: Carte de localisation de la zone modélisée et topographie autour du CTED (élévation en mètres p/r au N.M.M.).

6.2 HISTORIQUE

Les activités d'excavation sur le site de l'ancienne carrière Miron ont débuté en 1925 et se sont poursuivies jusqu'en 1987. La compagnie Miron a débuté les opérations d'enfouissement de déchets vers 1968 en même temps qu'elle poursuivait l'excavation de la carrière. Au début, les déchets enfouis comprenaient des ordures domestiques de la région de Montréal, des déchets industriels (sables de fonderie) et des déchets de raffinerie. Il est à noter qu'à cette époque il n'existait aucun règlement interdisant l'enfouissement de certaines catégories de déchets, comme les déchets de raffinerie, dans des dépotoirs municipaux. En 1979, la compagnie Miron s'est conformée au nouveau règlement sur les déchets solides (Q-2, r.3.2) et a implanté un lieu d'enfouissement sanitaire dans la carrière (*Fortin et Thibault, 1994*).

Au début des années 1980, suite à une ordonnance du Ministère de l'environnement concernant le traitement des eaux de lixivation et le captage des biogaz, la compagnie Miron a installé des cheminées jusqu'au fond des cellules d'enfouissement afin de capter les biogaz et l'étang de traitement des eaux a dû être relocalisé. Il est à noter que les eaux de lixivation ont toujours été captées et traitées avant leur rejet à l'égout de la Ville (*Fortin et Thibault, 1994*).

En 1984, la Ville de Montréal est devenue propriétaire de la carrière Miron. La compagnie Miron a continué d'opérer le site d'enfouissement jusqu'en 1987. Un comité, composé de la Ville de Montréal, de la compagnie Miron et du Ministère de l'environnement, a été formé afin de faciliter le transfert des activités d'enfouissement à la Ville. Une série d'études a alors été commandée afin de caractériser les biogaz et les eaux de lixivation. Ces études avaient pour but d'évaluer l'état du site. Des plans pour la fermeture du site, alors prévue pour 1993, ont aussi été envisagés. Cependant, en raison de la baisse depuis 1990 du volume annuel de déchets enfouis, la capacité maximale du site n'a pas été atteinte. Le permis actuel d'exploitation du site permet la poursuite des opérations jusqu'en 1998 afin de combler le site au rythme actuel d'enfouissement.

Plusieurs actes statutaires concernant l'exploitation du lieu d'enfouissement ont été délivrés par le Ministère depuis l'ouverture de la carrière. Nous les retrouvons dans le rapport d'évaluation du CTED, préparé par le ministère de l'Environnement (*Fortin et Thibault, 1994*).

6.3 DESCRIPTION DU SITE

6.3.1 Le CTED

Le site d'enfouissement couvre une superficie totale de plus de 190 ha, dont 80 ha dédiés à l'enfouissement des déchets (42%). La zone excavée a une largeur d'environ 900 mètres et une longueur de plus de 2 200 mètres. Le CTED est situé à environ 1,8 km de la rivière des Prairies et à 800 mètres de la carrière Francon. Cette dernière couvre une superficie d'environ 110 ha, soit 500 mètres de largeur par 2 300 mètres de longueur. Le fond de l'excavation, à la carrière Francon, se situe à l'élévation -40 mètres. La profondeur de l'excavation est de plus de 80 mètres.

Il est à noter que ni les parois ni le fond de l'excavation de l'ancienne carrière Miron n'ont été imperméabilisés avant de procéder à l'enfouissement des déchets. Les déchets, le lixiviat et les biogaz sont en contact direct avec le réseau de fractures de la roche encaissante. Par contre, un tapis de pierre concassée d'un mètre d'épaisseur a été installé sur le plancher de la zone 4 afin de drainer les eaux de lixiviation vers la station de pompage localisée au point bas de cette zone (*voir description des zones à la section 6.3.3*).

6.3.2 L'enfouissement sanitaire

Actuellement, le CTED reçoit annuellement 600 000 tonnes de déchets, dont 250 000 tonnes représentent la quantité de déchets domestiques produite par la Ville de Montréal. Le reste provient des industries, des commerces et, à l'occasion, des villes avoisinantes (*Fortin et Thibault, 1994*). La figure 6.2 présente l'évolution, depuis le début de l'enfouissement, du tonnage enfoui annuellement ainsi que le volume cumulé enfoui. Le CTED évalue à environ 31 millions de tonnes la quantité de déchets enfouis à ce jour dans l'ancienne carrière Miron (*Rouillard et Bodineau, 1995*). Les volumes enfouis durant la période de 1968 à 1988 sont estimés à partir de photos aériennes prises du site à différentes époques. Depuis 1988, il y a un contrôle permanent du volume de déchets enfouis. Les valeurs pour les années 1993 et 1994 sont des prévisions (*Ville de Montréal, 1991*).

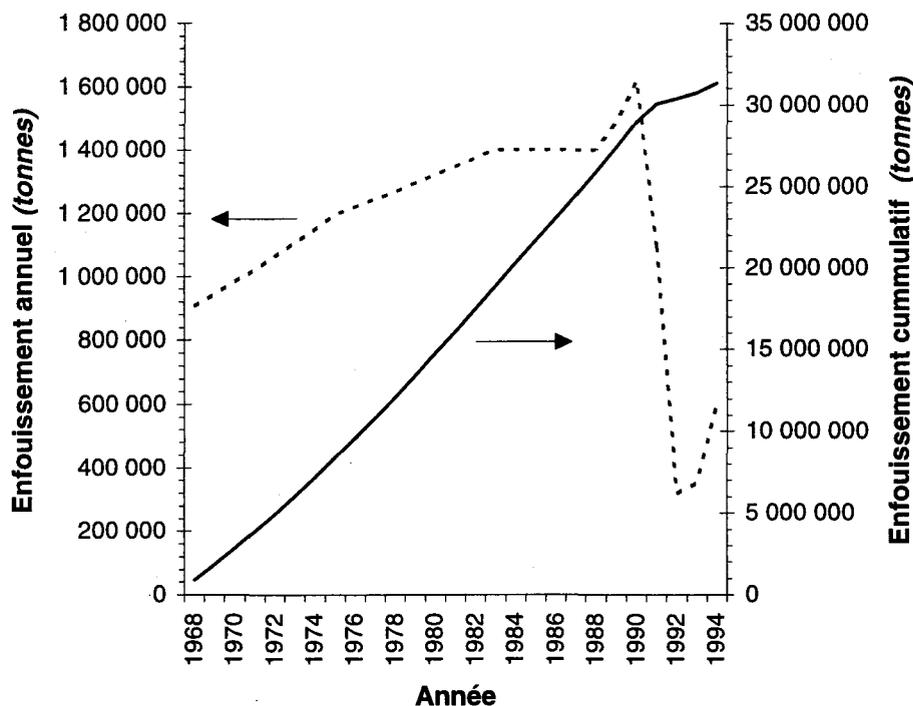


FIGURE 6.2: Évolution de l'enfouissement des déchets au CTED (modifié de *Ville de Montréal, 1991*).

La figure 6.3 montre l'origine et la composition des déchets enfouis au CTED (*Ville de Montréal, 1991*). Les déchets domestiques et industriels contribuent pour 97,5% du tonnage total pour l'année 1989 (tonnage total: 1 149 100 t). La majorité des déchets enfouis se compose de papier et de déchets de table ou matières organiques.

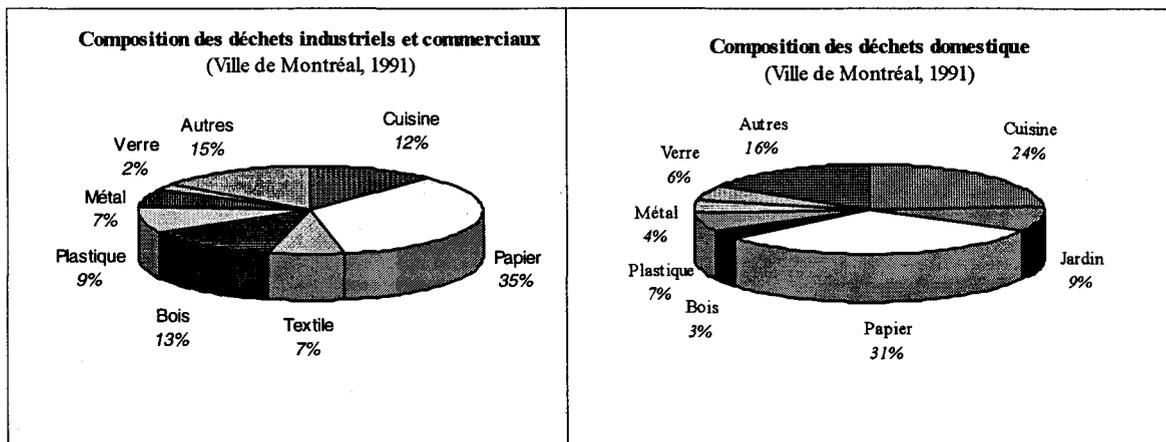


FIGURE 6.3: Composition des déchets de la Ville de Montréal (*Ville de Montréal, 1991*).

Les déchets sont enfouis par couches de 2 mètres d'épaisseur; par la suite, ils sont compactés et recouverts quotidiennement par une couche de 20 cm de remblais. L'enfouissement se fait, le plus possible, en gardant des talus sécuritaires.

6.3.3 Le zonage du site

Le site d'enfouissement a été subdivisé en zones afin d'en améliorer la gestion (*figure 6.4*). La description des zones d'enfouissement est tirée de Lefebvre et al. (1994), de Fortin et Thibault (1994) et de Rouillard et Bodineau (1995). La zone 1A, utilisée de 1968 à 1973, a été qualifiée de décharge incontrôlée. Cependant, les eaux de lixivation étaient captées, probablement pour les besoins d'opération de la carrière. Cette zone a une épaisseur de 67 mètres. La zone 1B, utilisée de 1973 à 1976, a sensiblement les mêmes caractéristiques que la zone 1A. La zone 2A, utilisée de 1973 à 1976, possède des installations de captage des biogaz à travers les déchets. Les parois de cette zone ont été imperméabilisées avec de l'argile. La zone 2B, utilisée de 1978 à 1985, a été exploitée de la même façon que la zone 2A. Par contre, les eaux de lixivation et les biogaz n'y sont captés et traités que depuis 1980. Une partie des gaz fut utilisée pour les opérations de la cimenterie. Les zones 3, 3A et 4 ont été actives respectivement de 1984 à 1990, de 1986 à 1990 et de 1991 à aujourd'hui. Ces trois zones ont une épaisseur de 60 mètres. Elles ne sont pas encore complétées. La zone 4 est la dernière qui a été mise en opération.

La figure 6.4 présente également, de façon schématique, la profondeur maximum atteinte par l'exploitation de la carrière (*Rouillard et Bodineau, 1995*). Cette figure montre la topographie qu'aurait le fond de l'excavation si aucun remblayage ou enfouissement de déchets n'avait eu lieu. Le plancher des zones d'enfouissement 1 et 2 se situe entre les élévations -25 et -40 mètres, sauf pour un secteur d'environ 40 000 m² où le fond atteint une élévation de -2,6 mètres. Dans ces zones d'enfouissement, la surface du sol se situe autour de l'élévation +40 mètres. L'épaisseur des déchets varie donc de 65 à 80 mètres. Le plancher de la zone d'enfouissement 3 se situe entre -28 et -38 mètres. Dans ce secteur, l'épaisseur des déchets varie entre 63 et 73 mètres et la surface du sol se trouve autour de l'élévation +35 mètres. Dans la zone d'enfouissement 4, le plancher de l'excavation présente plusieurs paliers s'échelonnant entre les élévations -15 et -37 mètres. Les paliers les moins profonds sont localisés en périphérie de la zone et la plus grande profondeur se situe autour de la station de pompe #1. Dans la zone d'enfouissement 4, la surface des déchets atteint présentement une élévation de +15 mètres, ce qui correspond à une épaisseur de déchets

d'environ 60 mètres. Le secteur autour du CTED se situe à une élévation topographique naturelle variant entre +30 et +50 mètres (voir figure 6.1).

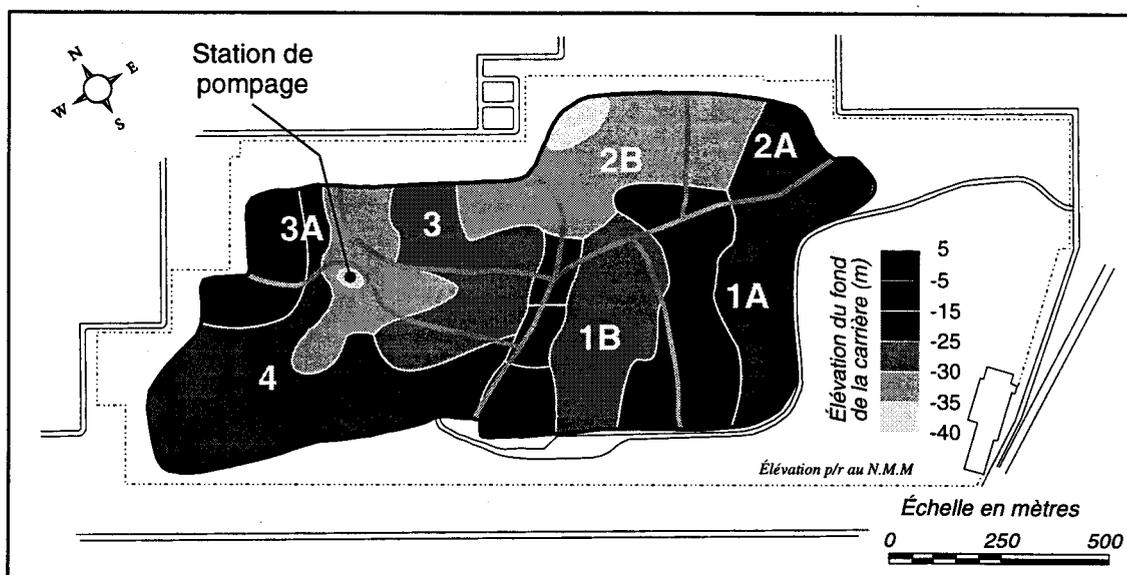


FIGURE 6.4: Zones d'enfouissement au CTED et élévation du fond de l'ancienne carrière Miron (élévation en mètres – p/r au N.M.M.) (adapté de Hamel, 1995).

6.4 GESTION DES EAUX DE LIXIVATION

6.4.1 Lixiviat

La majorité des eaux de lixivation est pompée et acheminée vers la station de pompage située dans la zone 4 (voir figure 6.4). Le pompage à la station #1 provoque l'acheminement, à travers les déchets, d'eau non contaminée provenant de l'extérieur du site. Cet apport d'eau propre a pour effet de diluer le lixiviat. La nature chimique du lixiviat varie selon le temps passé dans les déchets et la nature de ces derniers. Au CTED, la composition relative du lixiviat ne change pas beaucoup d'une zone à l'autre, tandis que la concentration est plus variable (Fortin et Thibault, 1994). Les eaux de lixivation, une fois traitées, sont rejetées à l'égout municipal. Ce sont les normes de rejet à l'égout de la ville de Montréal qui sont alors en vigueur. Afin de traiter le lixiviat, un étang de rétention et de traitement des eaux est situé près de la station de pompage. Le traitement se fait à l'aide de peroxyde d'hydrogène qui réduit, par oxydation, la concentration des paramètres supérieurs à la limite permise pour le rejet à l'égout de la ville (Fortin et Thibault, 1994).

6.4.2 Réseau de puits de surveillance

Un système de puits de surveillance du lixiviat et des biogaz est installé autour du site (Rouillard et Bodineau, 1995). Le réseau de surveillance comprend 26 nids de puits automatisés, incluant jusqu'à 4 puits chacun. Dans les nids, les profondeurs des puits sont différentes afin d'assurer le suivi de plusieurs unités stratigraphiques. Chaque nid est équipé de détecteurs de gaz reliés directement à un ordinateur, d'instruments pour prélever des échantillons d'eau et d'instruments pour mesurer les niveaux piézométriques. Vingt et un puits sont situés aux abords du site. Les cinq autres puits se trouvent dans des parcs publics avoisinants: les parcs Saint-Paul-de-la-Croix, Gabriel-Lallemant, des Hirondelles, Sainte-Yvette et François-Perrault.

Le programme de surveillance des eaux de lixiviation permet de faire quotidiennement plus de 1 000 analyses et de mesurer plus de 300 paramètres. En plus des nids de puits automatisés, environ 75 puits de surveillance font l'objet de lectures périodiques: six à huit sont sujets à des lectures quotidiennes, environ 17 à des lectures hebdomadaires et environ 50 autres à des lectures de 4 fois par an (Lefebvre et al., 1994). La figure 6.5 présente le réseau de puits de surveillance (puits PS) ainsi que les autres piézomètres installés sur le site.

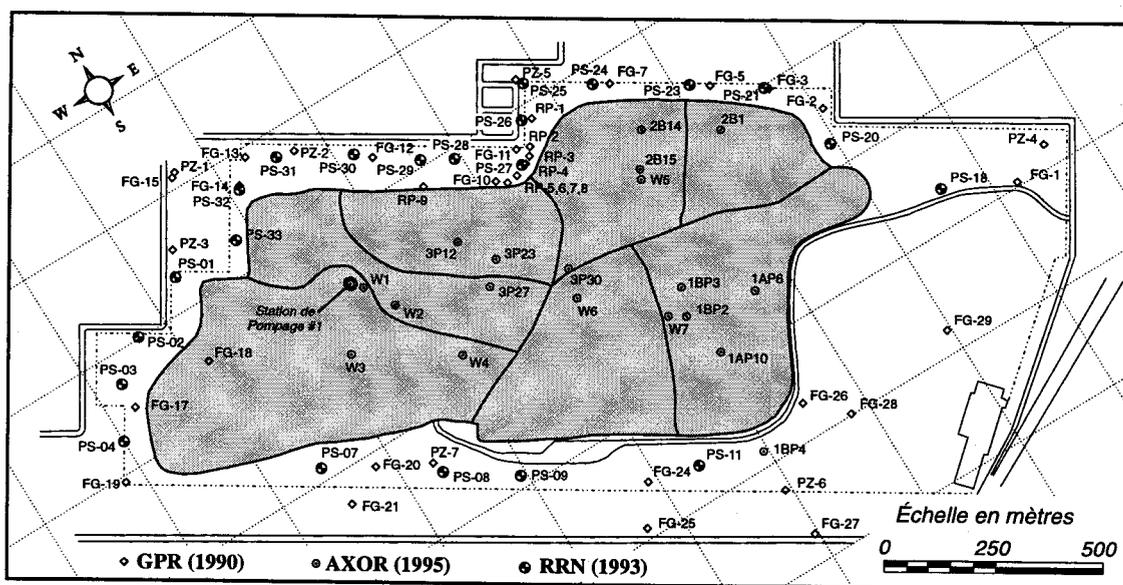


FIGURE 6.5: Réseau des puits de surveillance et des piézomètres sur le site (adapté de Hamel, 1995).

6.5 CONTEXTE GÉOLOGIQUE

La géologie locale du CTED est identique à la description régionale de la géologie de l'île de Montréal faite au chapitre 2, aux sections 2.2 et 2.3. Le CTED se situe dans des roches sédimentaires calcaires, formées par les groupes de Chazy, de Black River et de Trenton (Poulin, 1979). Ces roches sont recoupées par des filons-couches et des dykes d'âge Crétacé, associés aux collines montréalaises. Des dépôts meubles du Quaternaire recouvrent les séquences calcaires du Paléozoïque inférieur. Pour une description détaillée de ces unités, le lecteur peut se référer au chapitre 2. La figure 6.6 montre une coupe schématique de la géologie présente au CTED. Cette coupe est orientée à 60° par rapport au nord géographique, soit selon l'axe le plus long de la carrière. Le site se situe sur le flanc nord-ouest de l'anticlinal de Villeray dont les strates ont un pendage vers le nord-ouest de 2° à 3°. Cependant, dans la partie sud-est de la carrière, soit à proximité de l'axe du pli anticlinal, ce pendage peut atteindre un maximum de 8°. Selon une étude de GPR (1990), nous observons trois réseaux importants de fractures dans la roche encaissante du CTED. Les diaclases sont orientés E-O, NO-SE et N-S et leur pendage varie de 70° à 90°, avec une moyenne de 83°.

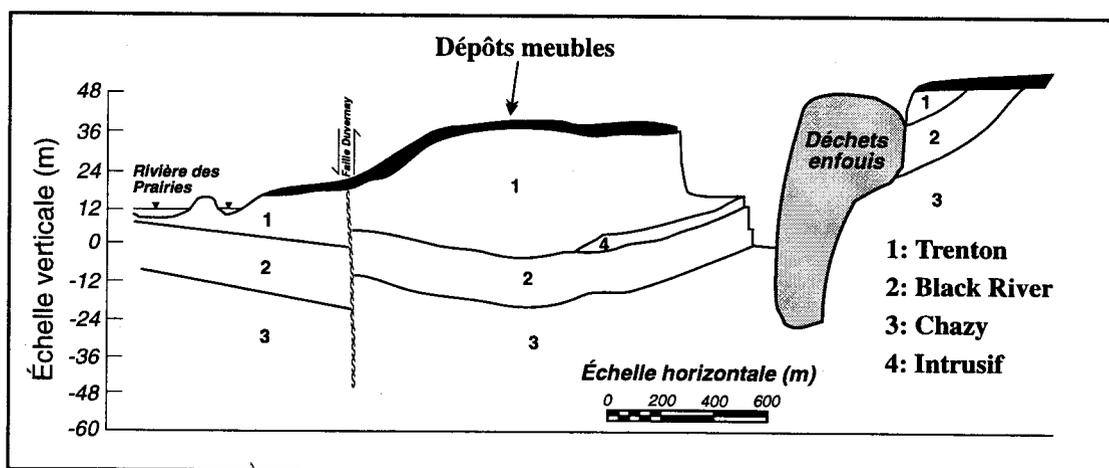


FIGURE 6.6: Coupe géologique typique au CTED (adapté de Poulin, 1979).

Les principaux dépôts meubles présents dans les environs du CTED sont présentés à la figure 6.7. Nous retrouvons principalement des dépôts de till non différencié, d'argile et des affleurements de roche. La description de ces dépôts est présentée au chapitre 2, à la section 2.3.

Nous avons estimé l'épaisseur moyenne des dépôts meubles dans ce secteur de l'île à l'aide des descriptions de 59 forages effectués autour du CTED (*GPR, 1990; RRN, 1993*). Cette épaisseur est estimée à 3,22 mètres avec un écart type de 1,45 mètre (*voir tableau H.1, annexe H*). Nous avons vérifié cette estimation à l'aide de la carte régionale (figure 2.5) de la distribution de l'épaisseur des dépôts meubles de l'île. Nous avons calculé l'épaisseur moyenne pour le secteur de la modélisation locale. Nous obtenons une épaisseur moyenne de 3,35 mètres avec un écart type de 1,39 mètre. Les deux valeurs ainsi estimées sont similaires. Afin de représenter l'épaisseur de la couche de dépôts meubles qui recouvre la roche dans le secteur du CTED, nous prendrons une valeur uniforme de trois mètres pour caractériser cette épaisseur lors du développement du modèle conceptuel.

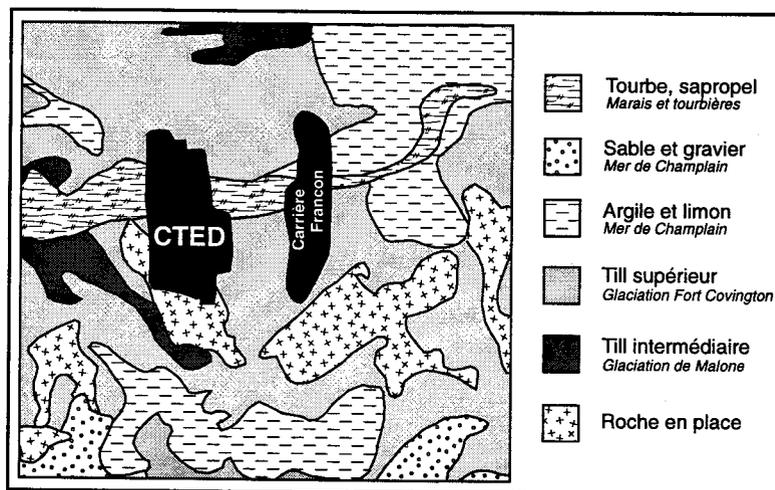


FIGURE 6.7: Distribution des dépôts de surface autour du CTED.

CHAPITRE 7

MODÈLE CONCEPTUEL - modèle local

Les objectifs spécifiques du modèle local d'écoulement sont de déterminer les propriétés hydrogéologiques moyennes présentes au site du CTED et d'intégrer toutes les données actuellement disponibles afin de comprendre la dynamique de l'écoulement. De plus, le modèle local servira à vérifier certaines hypothèses concernant l'étanchéité du site et à déterminer les données nécessaires à acquérir afin de mieux comprendre et représenter numériquement la dynamique d'écoulement au CTED. Ultérieurement, ce modèle servira de base à l'élaboration d'un outil de gestion et de prédiction pour les opérations futures de gestion de contrôle du lixiviat au CTED.

7.1 MODÈLE CONCEPTUEL

Pour représenter la situation locale, le modèle conceptuel suivant est utilisé. Premièrement, la zone non-saturée importante dans les déchets est prise en considération. Un modèle à saturation variable est donc utilisé pour simuler l'écoulement (*section 7.4*). Le modèle est en régime permanent car nous désirons évaluer les conditions générales d'écoulement et non pas l'effet des changements de courte durée. Le modèle tient compte de la topographie du fond du CTED (*figure 6.4*), de la géométrie du CTED et de la carrière Francon et de la topographie locale (*figure 6.1*).

Les principales unités lithologiques prises en considération sont une couche uniforme de 3 mètres de dépôts meubles, une série de couches de roc et de déchets en fonction de la géométrie et des topographies. Le roc fracturé est représenté par un milieu poreux équivalent. Les paramètres hydrogéologiques (conductivité hydraulique) sont obtenus à partir des résultats du modèle régional et des résultats de Blais (1995). Les propriétés capillaires sont déterminées à partir de valeurs moyennes tirées de la littérature étant donné le manque de données (*section 7.3*). Les composantes hydrologiques considérées sont le pompage au CTED et une recharge variable sur la zone modélisée. La recharge est déterminée par bilan (*section 7.2*).

La calibration du modèle est basée sur une série de mesures faite en juin 1994 dans les puits de surveillance situés en périphérie du site et dans quelques puits de biogaz situés dans les zones d'enfouissement. La section 7.3.1 présente la piézométrie locale observée.

Finalement, les conditions limites du modèle local sont (*figure 5.15*):

- au nord: limite à charge constante;
- à l'est et à l'ouest: limites imperméables (lignes de courant);
- au sud: limite imperméable (ligne de partage des eaux);
- carrière Francon: charge constante;

Toutes ces limites ont été déterminées à partir du modèle régional sauf pour la condition de charge imposée à la carrière Francon. Cette dernière est déterminée à partir d'un modèle en coupe représentant les conditions à la paroi de la carrière. La section 7.5 présentera ce modèle.

7.2 CONTEXTE HYDROLOGIQUE

Tout comme nous l'avons fait pour le modèle régional, nous calculons un bilan hydrologique pour le modèle local du CTED. Ce bilan sert à quantifier la recharge nette de l'aquifère. Les principaux paramètres du bilan local sont dérivés et adaptés du bilan régional (*chapitre 3, section 3.7*). Nous considérons deux zones de recharge différentes pour le modèle local. La première région est la zone périphérique du CTED (contexte urbain) et la seconde, le CTED. Ces deux régions ont donc des bilans différents. La recharge pour chacune de ces zones est considérées comme uniforme.

7.2.1 Zone périphérique

Pour la zone urbaine située en périphérie du site, le bilan s'exprime sous la forme générale suivante:

$$PTE - R - ETR = Rch \quad (7.1)$$

où:	PTE = Précipitations	(mm/an)
	R = Ruissellement	(mm/an)
	ETR = Évapotranspiration réelle	(mm/an)
et	Rch = Recharge annuelle nette	(mm/an)

Pour l'ensemble de la région modélisée, les précipitations sont estimées à environ 1 020 mm/an (*chapitre 3, section 3.4.1*) et nous supposons qu'elles sont uniformes et constantes sur la superficie considérée. L'évapotranspiration potentielle est également uniforme et elle est estimée à 600 mm/an (*chapitre 3, section 3.4.2*). Cette dernière est corrigée afin de tenir compte de la nature des divers sols en milieu urbain (*chapitre 3, section 3.5.3*). L'évapotranspiration corrigée est estimée à environ 270 mm/an.

Le ruissellement est variable et dépend de l'occupation du sol. Les valeurs du coefficient de ruissellement sont extrapolées à partir de celles calculées à l'aide de la relation 3.5 (*figure 3.10*). La figure 7.1 montre la répartition du coefficient de ruissellement autour du CTED. Étant donné le peu de variations, nous considérons un coefficient de ruissellement uniforme. Nous estimons que le coefficient de ruissellement moyen est égal à 55% pour l'ensemble de la zone autour du CTED. Nous obtenons alors un ruissellement de 560 mm/an. La recharge nette, calculée à l'aide du bilan [*équation 7.1*], est estimée à environ 190 mm/an pour la zone autour du CTED.

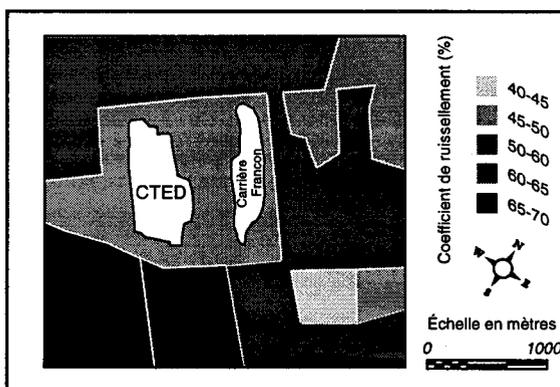


FIGURE 7.1: Coefficient de ruissellement autour du CTED.

7.2.2 Bilan pour le CTED

Le site du CTED possède un bilan légèrement différent de celui de la région qui l'entoure, ce qui fait que nous devons considérer cette zone de recharge séparément. Plusieurs études ont été réalisées afin de caractériser l'infiltration pour un site d'enfouissement. Cet effort est guidé par le fait que la quantité d'eau qui s'infiltre est directement liée à la quantité de lixiviat que les administrateurs ont à traiter et à gérer afin de respecter les normes. Plusieurs méthodes et modèles existent afin de quantifier le taux d'infiltration (*Ahmed et al., 1992; Bagchi, 1990; Farquhar, 1989; Khanbilvardi et al., 1987*). Dans le cas présent, nous utilisons une simplification de la méthode du bilan d'eau (*water balance*), telle que décrite par Lu et al. (1985), Campbell (1983), Holmes (1980) et Fenn et al. (1975).

Le bilan hydrologique du CTED est caractérisé par un taux d'évapotranspiration très faible, voire négligeable, un ruissellement considéré nul et un apport d'eau provenant des eaux souterraines s'écoulant vers les déchets. Dans ce bilan, étant donné le manque d'information, nous ne considérons pas le changement d'emmagasinement d'eau dans les déchets. Ce paramètre est relativement important dans un tel bilan mais ne peut être pris en considération directement.

Étant donné l'absence totale de végétation sur le site et la profondeur relative de la nappe contenue dans les déchets, nous supposons que le taux d'évapotranspiration est presque nul. Actuellement, aucune donnée n'est disponible pour vérifier cette hypothèse. Nous devons calculer le taux d'évapotranspiration par différence à partir des autres composantes du bilan, et vérifier si l'hypothèse formulée peut être ainsi validée.

Le ruissellement vers le site est également considéré comme négligeable. Il existe un drain, (*station de pompage #2*) en périphérie du CTED, qui capte les eaux de ruissellement provenant de l'extérieur du site et qui les achemine vers l'égout municipal. Ces eaux ne contribuent donc pas à la recharge de la nappe sous le site. Nous supposons également qu'il n'y a pas de pertes par ruissellement sur le site. Par conséquent, toute l'eau qui tombe est infiltrée.

En plus des précipitations, il existe un débit d'infiltration provenant des eaux souterraines. Rouillard et Bodineau (1995) estiment l'apport d'eau souterraine à environ 360 m³/jour. Cette quantité correspond à une lame d'eau équivalente à 164 mm/an, soit 16% des précipitations.

L'infiltration des précipitations représente donc la majeure partie du lixiviat pompé quotidiennement au CTED. Le débit moyen à la station de pompage #1 du CTED est de 2 660 m³/jour (Rouillard et Bodineau, 1995) [voir section 7.2.3].

À l'aide de toutes ces données, nous pouvons établir l'équation de bilan suivante:

$$PTE + ES - R - ETR = Rch \quad (7.2)$$

où:	PTE = Précipitations	(mm/an)
	ES = Eau souterraine	(mm/an)
	R = Ruissellement	(mm/an)
	ETR = Évapotranspiration réelle	(mm/an)
et	Rch = Recharge annuelle nette	(mm/an)

Étant donné que, sur une base annuelle, le niveau de la nappe est maintenu presque constant, nous pouvons poser l'équation de bilan simplifiée suivante:

$$PTE + ES = Q + [R + ETR] \quad (7.3)$$

où:	PTE = Précipitations	(mm/an)
	ES = Eau souterraine	(mm/an)
	Q = pompage moyen à la station #1	(m ³ /an)
	R = Ruissellement	(mm/an)
et	ETR = Évapotranspiration réelle	(mm/an)

Pour une superficie de 800 000 m² et les valeurs présentées précédemment, nous obtenons:

$$[1\ 020\ \text{mm/an} * 800\ 000\ \text{m}^2 * 0,001\ \text{m/mm}] + [360\ \text{m}^3/\text{j} * 365\ \text{j/an}] = \\ [2\ 660\ \text{m}^3/\text{j} * 365\ \text{j/an}] + [R + ETR] \quad (7.3a)$$

Donc,

$$816\ 000\ \text{m}^3/\text{an} + 131\ 400\ \text{m}^3/\text{an} = 970\ 900\ \text{m}^3/\text{an} + [R + ETR] \quad (7.3b)$$

$$947\ 400\ \text{m}^3/\text{an} = 970\ 900\ \text{m}^3/\text{an} + [R + ETR] \quad (7.3c)$$

Finalement, la différence absolue entre les différents termes du bilan donne la somme du ruissellement et de l'évapotranspiration réelle:

$$|(PTE + ES) - Q| = |R + ETR| = 23\ 500\ \text{m}^3/\text{an} = 29,4\ \text{mm/an} \quad (7.3d)$$

À partir de la relation 6.3, nous pouvons conclure que les taux d'évapotranspiration et de ruissellement ne sont pas nécessairement nuls si l'on veut balancer cette équation en considérant que la valeur estimée du débit des eaux souterraines ainsi que le débit de pompage sont valables. La différence entre les précipitations plus l'apport des eaux souterraines et le débit pompé est relativement faible, soit environ 30 mm/an. L'erreur engendrée en considérant le ruissellement et l'évapotranspiration comme nuls est minime. Considérant le manque de données, nous devons conclure que la recharge maximale est égale au volume des précipitations plus l'apport d'eau souterraine. Comme première estimation, le bilan ainsi formulé est acceptable. Cependant, la recharge au site du CTED devra être calibrée lors de la modélisation.

En résumé, la recharge pour le site du CTED est au maximum de 1 184 mm/an, tandis que la recharge de la zone autour du CTED est égale à 190 mm/an. Ces valeurs seront ajustées au cours de la modélisation. Cependant, l'ordre de grandeur ne devrait pas changer pour la valeur de recharge de la zone périphérique tandis que celle pour le site, beaucoup plus incertaine, pourra être considérablement modifiée.

7.2.3 Pompage au CTED

Le patron naturel d'écoulement autour du site est modifié par le pompage de la station #1, située dans la zone d'enfouissement 4 (figure 6.4). Ce pompage a pour but d'assurer le captage des eaux de lixivation. Pour les années 1992 et 1993, Rouillard et Bodineau (1995) estiment le taux de pompage moyen à 2 660 m³/j. La figure 7.2 présente la variation du débit de pompage durant cette période. Un tel pompage permet de garder le niveau de la nappe à une élévation de -33 mètres (p/r au *N.M.M.*) dans la zone 4. Le cône de rabattement de la nappe s'atténue avec la distance, de sorte que les déchets des zones 1 et 3 se retrouvent en grande partie saturés.

Pour la carrière Francon, Rouillard et Bodineau (1995) estiment par un bilan que le débit d'eau pompée provenant de l'aquifère afin de maintenir le niveau de la nappe à une élévation de -40 mètres est de 5 478 m³/jour. Cette estimation tient compte de l'apport d'eau par l'opération du dépôt de neige usée de la Ville de Montréal ainsi que des précipitations.

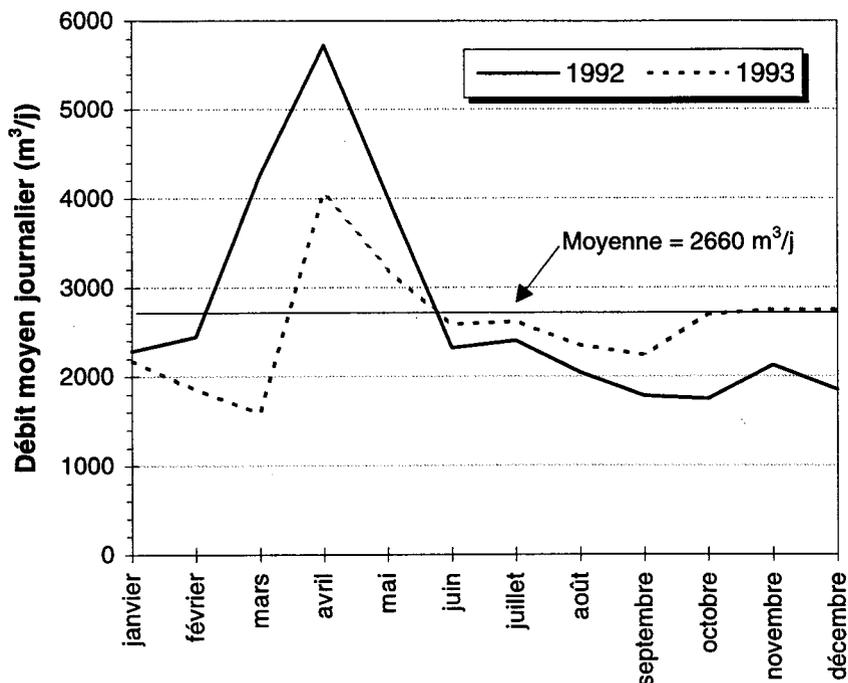


FIGURE 7.2: Variation du débit pompé à la station de pompage #1 du CTED.

7.3 CONTEXTE HYDROGÉOLOGIQUE

La première partie du présent mémoire portait sur la détermination des conditions hydrogéologiques de l'île de Montréal. Suite à cette étude, nous sommes en mesure de mieux définir le contexte hydrogéologique du CTED. L'écoulement naturel des eaux souterraines sur l'île de Montréal se fait du centre vers la périphérie (*figure 5.13*). Dans la région du CTED, l'écoulement se fait vers la rivière des Prairies. La piézométrie autour du site a été déterminée à l'aide du modèle régional. La piézométrie ainsi définie est similaire à celle décrite par Bériault et Simard (1978). La figure 7.3 présente les résultats obtenus par le modèle régional. Nous présentons de façon détaillée la piézométrie locale du CTED à la prochaine section.

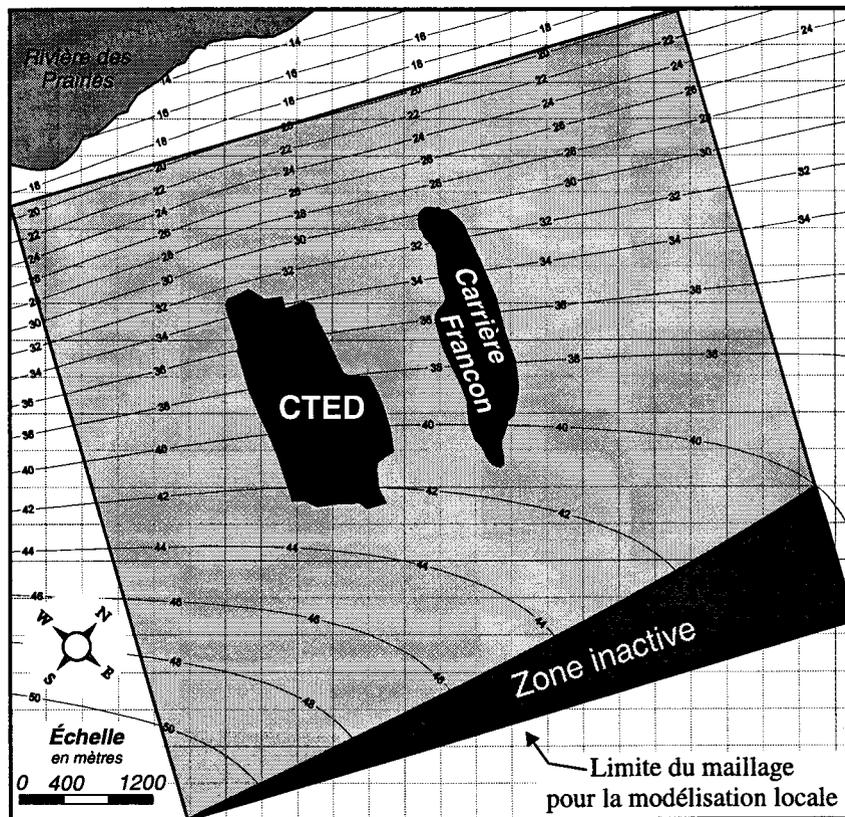


FIGURE 7.3: Piézométrie régionale simulée autour du CTED.

7.3.1 Piézométrie locale

La piézométrie locale est déterminée à l'aide des mesures de niveaux d'eau prises au printemps de 1994. La figure 7.4 montre la distribution des piézomètres utilisés. Le niveau de la nappe dans le roc autour du CTED a été mesuré dans les puits de surveillance, tandis que les mesures dans les déchets ont été effectuées dans les piézomètres W1, W3, W4, W5, W6, W7, dans les puits de captage de biogaz 1AP10, 2B1 et 2B14, ainsi qu'à la station de pompage #1.

Le tableau 7.1 présente les niveaux de ces puits pour deux périodes, soit l'automne 1993 et le printemps 1994 (Rouillard et Bodineau, 1995). Les mesures de 1993 ne sont indiquées qu'à titre de référence. La figure 7.5 présente la piézométrie locale telle qu'interprétée par Rouillard et Bodineau (1995). Cette carte piézométrique servira d'étalon lors de la calibration du modèle numérique pour la région du CTED. Les traits pointillés sur cette carte indiquent les isopièzes approximatifs. Le gradient à la paroi de la carrière Francon est sûrement plus élevé que celui interprété. L'écoulement régional se fait vers la rivière des Prairies tandis que l'écoulement local se

fait vers la station de pompage et vers Francon. Une ligne de partage des eaux est supposée entre les deux carrières. Un gradient vertical important est observé dans plusieurs puits à niveau multiples. En se basant sur les niveaux piézométriques observés dans les puits en périphérie du CTED, il est possible de démontrer qu'il existe, en profondeur, des gradients vers l'extérieur du site du côté de Francon (Rouillard et Bodineau, 1995). Ces hypothèses seront vérifiées ultérieurement.

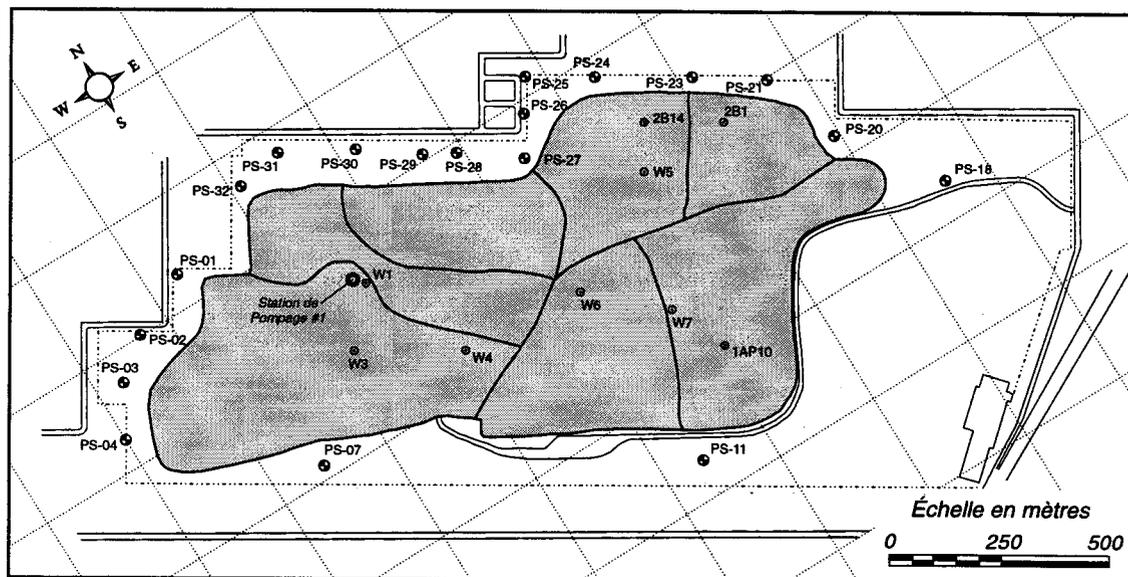


FIGURE 7.4: Piézomètres mesurés en juin 1994.

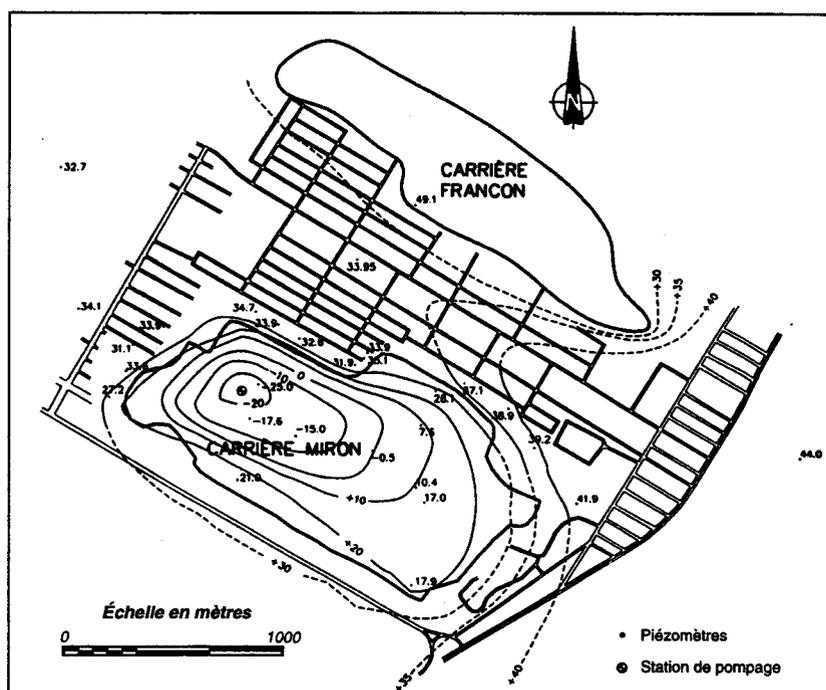


FIGURE 7.5: Piézométrie mesurée et interprétée au CTED en juin 1994 (Rouillard et Bodineau, 1995).

TABLEAU 7.1: Niveaux piézométriques mesurés (1993 et 1994) [FP = forage profond; FS = forage de surface; FI = forage intermédiaire] (tiré de Rouillard et Bodineau, 1995).

Élévation des niveaux d'eau dans les déchets		
<i>PIÉZO</i>	<i>20-sep-93</i>	<i>26-mai-94</i>
S.P. #1	-33.01	-33.05
W-1	-26.90	-24.98
W-3	-18.61	-17.54
W-4	-12.42	-14.97
W-5	6.29	7.65
W-6	-9.41	-0.50
W-7	10.53	10.40
1AP10	7.62	16.97
2B1	23.70	31.02
2B14	28.20	28.06

Élévation des niveaux d'eau dans les puits de surveillance périphérique					
<i>PIÉZO</i>	<i>juin 94</i>	<i>PIÉZO</i>	<i>juin 94</i>	<i>PIÉZO</i>	<i>juin 94</i>
PS-1 FP	31.32	PS-18 FS	41.91	PS-26 FP	26.37
PS-1 FS	33.94	PS-18 FI1	29.84	PS-26 FS	33.07
PS-2 FP	22.07	PS-20 FP	32.62	PS-27 FP	6.21
PS-2 FS	32.13	PS-20 FS	39.15	PS-27 FS	31.89
PS-3 FP	26.80	PS-20 FI1	34.78	PS-28 FP	32.74
PS-3 FS	33.64	PS-21 FP	37.63	PS-29 FP	1.05
PS-4 FP	14.20	PS-21 FS	38.93	PS-29 FS	32.56
PS-4 FS	27.22	PS-21 PI1	36.18	PS-30 FP	15.07
PS-7 FP	13.08	PS-23 FP	9.96	PS-30 FS	33.86
PS-7 FS	21.01	PS-23 FS	37.16	PS-30 FI1	15.07
PS-11 FP	13.79	PS-24 FP	34.89	PS-31A FP	-1.52
PS-11 FS	17.93	PS-25 FP	13.88	PS-31A FS	34.77
PS-11 FI1	11.23	PS-25 FS	33.94	PS-32 FP	31.22
PS-18 FP	34.41	PS-25 FI2	17.97	PS-32 FP	32.95

Élévation des niveaux d'eau dans le roc							
<i>PIÉZO</i>	<i>Élévation de la crépine (m)</i>			<i>PIÉZO</i>	<i>Élévation de la crépine (m)</i>		
	<i>sept. 93</i>	<i>de</i>	<i>à</i>		<i>sept. 93</i>	<i>de</i>	<i>à</i>
PZ-1-2	0.78	0.02	-20.48	PZ-5-2	10.21	-29.34	-54.34
PZ-1-6	33.58	39.32	17.52	PZ-5-6	34.32	37.16	-15.34
PZ-2-6	32.82	38.76	22.26	PZ-6-2	23.54	-0.06	-24.94
PZ-3-6	33.68	38.92	-6.08	PZ-6-6	31.50	35.06	12.56
PZ-4-2	44.55	-17.00	-42.00	PZ-7-2	16.97	-11.50	-36.50
PZ-4-6	40.07	49.50	3.50	PZ-7-6	22.25	23.50	1.00

7.3.2 Conductivité hydraulique

Plusieurs campagnes d'essais de pompage et d'essais Lugeon (essais d'injection d'eau) ont été menées au CTED afin de quantifier la conductivité hydraulique des déchets et du roc autour de la carrière. Blais (1995) procède présentement à la réinterprétation détaillée des essais de pompage effectués au CTED. Prochainement, on procédera à une série d'essais de pompage de longue durée afin de mieux définir les propriétés hydrauliques présentes au CTED.

7.3.2.1 Déchets

Deux campagnes d'essais de pompage (1992 et 1993) ont été réalisées dans les déchets des zones 1 à 3. La conductivité hydraulique moyenne dans les déchets est, pour les zones 1 et 3, de l'ordre de 5×10^{-6} m/s, tandis que pour la zone 2, elle est de l'ordre de 7×10^{-7} m/s. Pour la zone 4, la conductivité hydraulique est estimée à environ 6×10^{-5} m/s par Rouillard et Bodineau (1995) et à 4×10^{-5} par Blais (1995). Ces valeurs de conductivité sont plus élevées que celles pour les autres zones, car les déchets de la zone 4 sont moins compactés que ceux, plus anciens, des zones 1, 2 et 3. De plus, nous retrouvons un lit de pierre concassée d'un mètre d'épaisseur à la base de la zone 4, ce qui a pour effet d'augmenter la conductivité moyenne de la zone.

Le tableau 7.2 présente un résumé des conductivités hydrauliques obtenues par Rouillard et Bodineau (1995) et Blais (1995) pour les essais dans les déchets. La figure 7.6 présente l'emplacement des essais interprétés par Blais (1995). Les résultats présentés par Rouillard et Bodineau (1995) sont jugés moins fiables car la méthodologie utilisée lors de l'interprétation est moins complète. Par conséquent, Blais (1995) a réinterprété certains essais de pompage de longue durée. Ces données sont jugées beaucoup plus représentatives que celles présentées par Rouillard et Bodineau (1995). Il est à noter la grande variabilité dans les valeurs obtenues pour la conductivité hydraulique des déchets. Par exemple, les résultats obtenus pour les piézomètres 1BP2, 1BP3 et 1BP4 diffèrent de près de deux ordres de grandeur et ces points de mesures ne sont séparés que par 75 mètres. La caractérisation de cette propriété est très difficile. Par conséquent, la plage des valeurs possibles de conductivité est de $1,7 \times 10^{-5}$ à $9,6 \times 10^{-7}$ m/s. Nous évaluons à $8,3 \times 10^{-6}$ m/s la conductivité hydraulique moyenne dans les déchets. Cette valeur est considérée comme uniforme et représentative pour l'ensemble des zones du CTED.

TABLEAU 7.2: Conductivité hydraulique dans les déchets [en m/s]
(*Ref. A: Rouillard et Bodineau, 1995; Ref. B: Blais, 1995*).

PUITS	3P27	3P23	1BP2	1AP6	1BP3	1AP10	2B15	W5	3P20	1BP4	SP-1
Ref. A	6.0E-06	7.0E-06	2.3E-04	5.0E-06	1.0E-06	8.0E-07	5.0E-07	1.0E-06	1.5E-06	1.5E-06	6.0E-05
Ref. B	9.0E-06		1.7E-05		2.7E-06	1.6E-06	8.2E-07	9.6E-07	1.8E-06	8.9E-07	4.0E-05
Moyenne référence A : 2.9E-05 m/s											
Moyenne référence B : 8.3E-06 m/s											

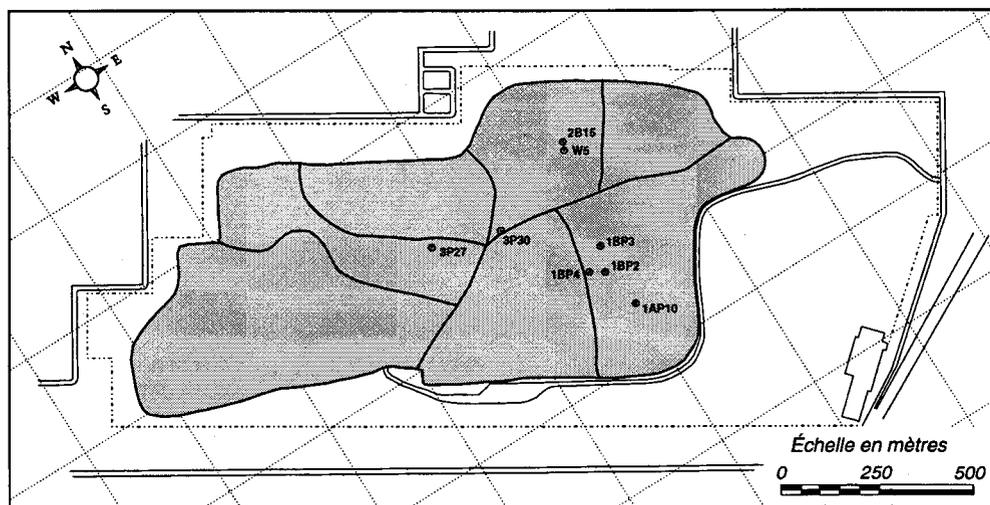


FIGURE 7.6: Emplacement des essais dans les déchets interprétés par Blais (1995).

7.3.2.2 Roc

Entre 1979 et 1990, plusieurs études hydrogéologiques ont été réalisées afin de déterminer les principaux paramètres hydrauliques de la roche encaissante. Le tableau 7.3 résume les résultats obtenus par différents auteurs pour quantifier la conductivité hydraulique du roc. Nous indiquons également les résultats obtenus par Blais (1995) pour différents puits dont les essais ont été réinterprétés. Tout comme pour les essais dans les déchets, les résultats obtenus par Blais (1995) sont jugés plus fiables. La figure 7.7 illustre l'emplacement des différents points de mesures utilisés par Blais (1995). Il est à noter que les essais de 1983 ont été réalisés sous la zone d'enfouissement 3.

La conductivité hydraulique varie énormément étant donné la nature fracturée du roc. Afin de simplifier la représentation du roc fracturé, nous utilisons le concept de milieu poreux équivalent (*de Marsily, 1986*). Par conséquent, nous considérons que la conductivité hydraulique moyenne

pour l'ensemble du roc est d'environ $1,0 \times 10^{-7}$ m/s. La plage de valeurs possibles est très large, variant de 2×10^{-4} à 2×10^{-9} m/s. Encore ici, étant donné la distribution spatiale des points de mesures, il est très difficile de caractériser la variation spatiale de la conductivité hydraulique autour du CTED.

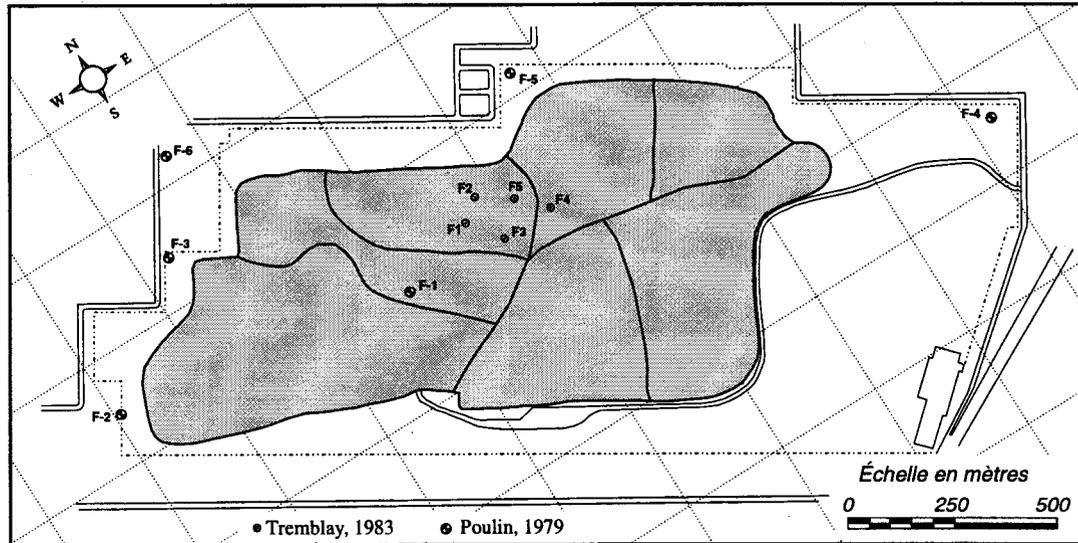


FIGURE 7.7: Emplacement des essais dans le roc interprétés par Blais (1995).

Hamel (1995) a compilé les résultats des différents essais d'injection d'eau avec obturateurs faits au cours des ans au CTED (*GPR, 1990; RRN, 1993*). Pour chaque forage où des essais ont été réalisés et pour chaque intervalle de mesure, la conductivité hydraulique a été regroupée selon huit classes. La distribution de la fréquence des différentes classes de conductivité hydraulique est présentée à la figure 7.8. La fréquence d'apparition a été pondérée par la longueur totale de chaque classe et par le nombre de mesures pour chaque classe. Les deux méthodes de pondération donnent des résultats similaires.

Étant donné la nature fracturée du milieu poreux considéré, la distribution de la conductivité hydraulique est très étalée et nous observons plusieurs maxima dans cette distribution. Ces nombreux pics représentent soit la conductivité des fractures, soit celle de la matrice. Comme nous considérons un milieu poreux équivalent, nous estimons que la conductivité hydraulique moyenne est de l'ordre de $8,8 \times 10^{-7}$ m/s. Cette valeur est du même ordre de grandeur que les valeurs moyennes estimées précédemment.

TABLEAU 7.3: Conductivité hydraulique moyenne du roc.

ÉTUDE	Conductivité hydraulique (m/s)		
	Essais de pompage	Essais d'injection	
Poulin, 1979	10^{-8} à 10^{-5}	10^{-7} à 10^{-5}	
Tremblay, 1983	10^{-5} à 10^{-4}		
Wright et Sarrailh, 1983		10^{-7} à 10^{-5}	
Verge, 1987	6×10^{-8}		
GPR, 1990		10^{-10} à 10^{-4}	
Blais, 1995	PUITS		
	F-1	2.5E-09	Emplacement des puits décrit dans Poulin (1979)
	F-2	3.5E-09	
	F-3	1.7E-08	
	F-4	1.0E-04	
	F-5	1.0E-08	
	F-6	9.0E-08	
	F-1	1.3E-06	Emplacement des puits décrit dans Tremblay (1983)
	F-2	7.5E-07	
	F-3	7.4E-04	
	F-4	3.2E-07	
	F-5a	2.0E-04	
	F-5b	1.0E-05	
	F-5c	4.7E-05	

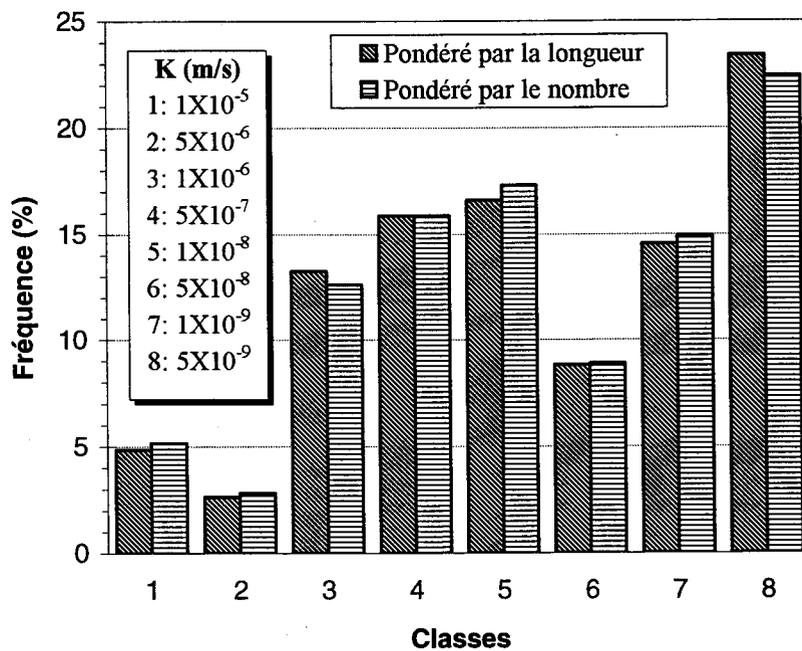


FIGURE 7.8: Distribution de la conductivité hydraulique mesurée par les essais d'injection d'eau (adapté de Hamel, 1995).

7.3.2.3 Dépôts meubles

La conductivité hydraulique des dépôts meubles autour du site est estimée à partir de la carte de la conductivité de la couche 1 du modèle régional (*figure 3.22*) et des courbes granulométriques pour certains forages à proximité du site (*Poulin, 1979; GPR, 1990*). À l'aide de la relation de Hazen (*Gélinas et Lefebvre, 1992*) et des données granulométriques, il est possible de déterminer une valeur approximative de la conductivité hydraulique en utilisant la relation suivante:

$$K = d_{10}^2 \quad (7.4)$$

où d_{10} est en mm et K en cm/s

Cependant, cette relation n'a pu être utilisée sur tous les forages car les analyses granulométriques disponibles n'étaient pas complètes. Pour certain forages, la fraction fine, où l'on retrouve généralement le d_{10} , n'a pas été caractérisée. Cependant, dans quelques cas, nous avons pu obtenir, pour le till, une estimation de la conductivité hydraulique à l'aide des courbes granulométriques. La conductivité hydraulique moyenne estimée est de l'ordre de $2,3 \times 10^{-5}$ m/s. En se basant sur les valeurs déterminées à partir du modèle régional, nous estimons que la conductivité hydraulique des dépôts meubles est uniforme et égale à $1,0 \times 10^{-5}$ m/s. Cette valeur est égale à la conductivité hydraulique du till non différencié de l'île de Montréal. Dans la littérature (*Freeze et Cherry, 1979*), cette valeur de conductivité hydraulique est comprise dans l'intervalle de conductivité typique pour un till.

7.3.2.4 Littérature

Le tableau 7.4 présente une série de paramètres hydrauliques observés pour divers sites d'enfouissement. Ces valeurs sont tirées de la littérature (*Findikakis et Leckie, 1979; Oweis, 1986; Oweis et al., 1990; Bagchi, 1990*) et ont été compilées par Nastev (1995). Présentement, aucune information n'est disponible pour le CTED afin de comparer les valeurs des différents paramètres, à l'exception de la conductivité hydraulique. Cette dernière est sensiblement du même ordre de grandeur que les valeurs déterminées par les différents essais au CTED. Une campagne de caractérisation plus complète des différentes propriétés hydrauliques des déchets du CTED serait

souhaitable dans un avenir rapproché afin de caractériser les propriétés physiques de la masse de déchets présente au CTED.

TABLEAU 7.4: Paramètres hydrauliques moyens pour un site d'enfouissement
(adapté de Nastev, 1995).

PROPRIÉTÉS PHYSIQUES								
	Densité in-situ	Teneur en eau initiale	Teneur en eau initiale	Densité sèche	Capacité au champs	Débit spécifique	Porosité	Conductivité hydraulique
<i>Référence</i>	ρ_r	ω_c	ω_v	ρ_d	F_c	S_y	n	K
<i>Cité par Oweis, 1986</i>	(kg/m ³)	(kg/kg)	(m ³ /m ³)	(kg/m ³)	(m ³ /m ³)	(m ³ /m ³)	(m ³ /m ³)	(m/s)
Christensen, 1989	300.0	14.0 ~ 37.0	4.0 ~ 19.0	-	0.29 ~ 0.37	-	-	1.0E-6 ~ 1.0E-4
Findikakis, 1979	815.0	23.5	15.5	660.0	-	-	0.50	1.0E-05
Findikakis, 1979	700.0	30.0	21.0	490.0	-	-	0.50	1.0E-05
Fungaroli, 1971	265.1	18.2	4.0	224.3	0.29	-	-	-
Fungaroli, 1971	439.0	26.6	9.0	348.0	0.29	-	-	-
Fungaroli, 1979	312.0	19.7	5.2	264.0	0.34	-	-	1.0E-5 ~ 2.0E-4
Hughes, 1971	-	-	-	-	-	0.33 ~ 0.39	-	6.9E-6 ~ 7.4E-5
Hughes, 1971	-	-	-	-	-	0.34 ~ 0.46	-	2.3E-7 ~ 8.4E-5
Hughes, 1971	-	-	-	-	-	0.20 ~ 0.30	-	-
Koriatis, 1983	885.0	-	-	-	-	-	-	3.1E-5 ~ 5.1E-5
Oasim, 1970	407.0	88.0	20.0	215.0	0.34	0.14	0.48	-
Oweis, 1986	660.0	-	-	-	-	-	-	1.0E-05
Oweis, 1990	692.0	-	10.0 ~ 20.0	-	0.20 ~ 0.35	0.10	0.40 ~ 0.50	1.0E-05
Rovers, 1972	314.0	-	15.7	157.0	0.34	-	-	-
Rovers, 1972	338.0	-	21.0	130.0	0.31	-	-	-
Rovers, 1973	294.0	-	16.0	134.0	0.30	-	-	-
Walsh, 1979	480.0	54.0	16.2	312.0	0.32	-	-	-
Walsh, 1979	475.0	54.0	16.4	309.0	0.41	-	-	-
Walsh, 1981	442.0	57.3	16.5	288.0	0.40	-	-	-
Wigh, 1976	592.0	38.0	16.2	429.0	0.33	-	-	-
Wigh, 1979	364.0	29.3	8.3	283.0	0.37	-	-	-

Il est possible d'estimer la densité moyenne des déchets en considérant le volume (56×10^6 m³) et la masse de déchets enfouis (33×10^6 tonnes). La densité (ρ_r) serait alors de 589 kg/m³. Selon Feng (1983) (*cité par Oweis, 1986*), la conductivité hydraulique des déchets peut être reliée à la densité par la relation suivante:

$$K = 288 \times 10^{-2.3456 \rho_r} \quad (7.5)$$

où K est la conductivité hydraulique en m/j et ρ_r la densité en t/m³.

Dans le cas du CTED, nous estimons, à l'aide de la relation 7.5, la conductivité hydraulique des déchets à $1,4 \times 10^{-4}$ m/s. Cette valeur est inférieure d'environ un ordre de grandeur par rapport aux autres estimations. Il faut tenir compte que cette estimation de la conductivité hydraulique est basée sur la densité qui, dans notre cas, est également estimée. De plus, la relation 7.5 n'est valide que pour les densités comprises entre 0,5 et $1,2 \text{ t/m}^3$. La densité des déchets au CTED est près des limites de validité de cette relation. Cependant, une telle relation peut être utile lorsqu'on ne possède pas de données sur la conductivité hydraulique des déchets et que l'on désire obtenir rapidement une estimation.

7.3.3 Propriétés capillaires

Afin de caractériser l'écoulement en milieu non saturé, nous devons déterminer les propriétés capillaires du milieu poreux. Ces propriétés contrôlent la saturation en eau présente dans les matériaux et la facilité relative qu'ont l'air et l'eau à s'écouler (*perméabilité relative*). Pour ce faire, le modèle capillaire développé par van Genuchten (1980) a été utilisé. Ce modèle permet la représentation, à l'aide d'une expression analytique simple, des courbes de saturation effective (S_{we}) en fonction de la pression capillaire P_c à l'aide de deux paramètres: α (Pa^{-1}) et m .

$$S_{we} = \left[1 + (\alpha \cdot P_c)^n \right]^{-m} \quad \text{où } m = 1 - \frac{1}{n} \quad (7.6)$$

La saturation effective S_{we} permet de normaliser la saturation en eau mesurée S_w en fonction de la saturation en eau résiduelle S_{wr} et de la saturation totale S_{wt} . La saturation totale est supposée égale à 1. S_{we} est défini comme étant égal à:

$$S_{we} = \frac{S_w - S_{wr}}{1 - S_{wr}} \quad (7.7)$$

À l'aide du modèle analytique développé par Mualem (1976), van Genuchten (1980) a obtenu une relation entre la perméabilité relative à l'eau (K_{rw}) et la saturation effective:

$$K_{rw} = \sqrt{S_{we}} \left[1 - (1 - S_{we}^{1/m})^m \right]^2 \quad (7.8)$$

De façon similaire, Parker (1989), montre que la courbe de perméabilité à l'air K_{ra} peut être obtenue à l'aide de la relation suivante:

$$K_{ra} = \sqrt{1 - S_{we}} [1 - S_{we}^{1/m}]^{2m} \quad (7.9)$$

7.3.3.1 Dépôts meubles

Comme il a été mentionné à la section 6.5, le till non différencié de l'île de Montréal constitue le dépôt meuble représentatif pour le modèle local. Étant donné le manque de données et de mesures des propriétés capillaires relatives à ce till, nous avons utilisé des propriétés moyennes pour un dépôt similaire. Carsel et Parrish (1988) ont effectué une importante étude portant sur la caractérisation des propriétés capillaires pour différents types de dépôts. Pour un silt limoneux, dépôt similaire au till (*voir chapitre 2, section 2.5*), nous possédons un estimé de la teneur en eau saturée, de la teneur en eau résiduelle ainsi que des paramètres m et α de la relation de van Genuchten (1980). Le tableau 7.5 montre les valeurs supposées pour le till. Ces valeurs représentent la moyenne obtenue pour 1 093 échantillons. L'écart type, pour chaque paramètre, est également présenté. Afin de caractériser de façon représentative les dépôts meubles de l'île de Montréal, nous avons utilisé une porosité de 30% au lieu de 45% tel qu'illustré au tableau 7.5. Par conséquent, la saturation en eau résiduelle devient 20% ($\theta_{wr} = n S_{wr}$). Les paramètres α et m ont été conservés. Les courbes de pression capillaire et de perméabilité relative en fonction de la saturation sont présentées à l'annexe I. Ces courbes servent à représenter le comportement des dépôts meubles lors d'un écoulement non-saturé.

TABLEAU 7.5: Propriétés capillaires des dépôts meubles
(tiré de Carsel et Parrish, 1988).

	<i>Valeurs typiques pour un silt limoneux</i>			
	<i>moyenne</i>	<i>écart-type</i>	<i>+1 σ</i>	<i>-1 σ</i>
θ_{sat}	0.450	0.080	0.530	0.370
θ_{wr}	0.067	0.015	0.082	0.052
S_{wr}	0.149		0.155	0.141
<i>Paramètres de van Genuchten</i>				
n	1.410	0.12	1.530	1.290
m	0.291		0.346	0.225
α (m^{-1})	2.000	1.20	3.200	0.800
α (Pa^{-1})	0.0002		0.0003	0.0001

7.3.3.2 Déchets

Actuellement, il existe très peu d'information dans la littérature sur les propriétés capillaires d'une masse de déchet. Afin de déterminer une courbe capillaire représentative, quelques suppositions ont été faites. Premièrement, la porosité des déchets est fixée à 50% (*section 7.3.2.4*) et la saturation en eau résiduelle à 30% (*Schroeder et al., 1988*). Schroeder et al. (1988) proposent comme valeur de pression d'entrée pour des déchets municipaux la valeur de 0,2076 mètre [2036,56 Pa] et un indice de distribution des pores égal à 0,211. Cet indice est proportionnel au facteur m de la relation de van Genuchten (1980) et est égal à celui pour un silt limoneux. Par conséquent, nous considérons que m est égal à 0,29. Le paramètre m est relié à α par la relation suivante (*Fetter, 1992*):

$$\alpha = \frac{1}{h_b} (2^{1/m} - 1)^{1-m} \quad (7.10)$$

Il en découle que α est égal à 0,0025 Pa⁻¹. Le tableau 7.6 résume les résultats obtenus pour les déchets. À l'annexe I, les courbes caractéristiques de pression capillaire et de perméabilité relative en fonction de la saturation sont présentées.

TABLEAU 7.6: Propriétés capillaires des déchets.

n	0.52
S_{wr}	0.31
<i>Paramètres de van Genuchten</i>	
n	1.41
m	0.29
h_b (m)	0.2076
h_b (Pa)	2036.56
α (Pa ⁻¹)	0.0025

7.3.3.3 Roc

Afin de caractériser les propriétés capillaires du roc, nous avons utilisé les données capillaires de Wardlaw et McKellar (1981) pour un calcaire type. Ce calcaire a une porosité de 5% et une saturation en eau résiduelle de 10%. La courbe de pression capillaire en fonction de la

teneur en eau est présentée à l'annexe I. À partir de cette courbe, un modèle capillaire a été ajusté à l'aide d'une méthode graphique (*van Genuchten, 1980*). Cette méthode consiste à d'abord trouver le point central θ_p de la courbe capillaire:

$$\theta_p = \frac{\theta_s + \theta_r}{2} \quad (7.11)$$

où θ_s est la teneur en eau à la saturation (5%) et θ_r , la teneur en eau résiduelle (0,5%)

À cette valeur de teneur en eau, nous évaluons la charge de pression (h_p). Par la suite, pour $\theta = \theta_p$, nous déterminons la pente de la courbe capillaire, c'est-à-dire le changement de teneur en eau par rapport au changement de pression capillaire. La pente S_p est défini comme suit:

$$S_p = \frac{1}{\theta_s - \theta_r} \left| \frac{d\theta}{d(\log h)} \right| \quad (7.12)$$

Finalement, à l'aide de la pente S_p , et de la relation empirique 7.13 développé par van Genuchten (1980), le paramètre m peut être facilement déterminé. Une fois m trouvé, nous utilisons la relation 7.10 afin de calculer α .

$$\begin{aligned} \text{Si } 0 < S_p \leq 1 : & \quad m = 1 - e^{-0,8S_p} \\ \text{Si } S_p > 1 : & \quad m = 1 - \frac{0,5755}{S_p} + \frac{0,1}{S_p^2} + \frac{0,025}{S_p^3} \end{aligned} \quad (7.13)$$

Le tableau 7.7 présente les résultats obtenus pour le roc. À l'annexe I les courbes capillaires caractéristiques sont présentées. Une telle courbe représente un matériel qui demeure saturé jusqu'à des pressions d'entrée très élevées.

TABLEAU 7.7: Propriétés capillaires du roc.

n	0.05
S_{wr}	0.10
<i>Paramètres</i>	
<i>de van Genuchten</i>	
n	1.85
m	0.46
α (Pa^{-1})	3.0E-07

7.4 MODÈLES NUMÉRIQUES

Pour représenter numériquement le système d'écoulement local au CTED selon le modèle conceptuel présenté à la section 7.1, nous devons choisir un programme capable de simuler adéquatement l'écoulement dans un milieu à trois dimensions, hétérogène, anisotrope et à saturation variable. De plus, nous devons être en mesure de simuler l'effet des pompages, de la recharge et de plusieurs types de conditions limites. Plusieurs programmes pouvant répondre à ces critères sont présentement disponibles (*Anderson et al., 1992*). Selon les objectifs du projet à court et à long terme, nous avons opté pour l'utilisation de deux modèles ayant chacun leurs particularités et leurs limites.

Le premier modèle choisi pour résoudre numériquement l'équation d'écoulement est TOUGH2 (*Pruess, 1987; Pruess, 1991*). Ce modèle complet a été choisi car il possède amplement les capacités requises pour nos travaux. TOUGH2 a été développé au Lawrence Berkeley National Laboratory pour le Département américain de l'énergie dans le but de simuler des conditions d'écoulement non isotherme, multiphase, multicomposant pour un milieu poreux ou fracturé. Le modèle est largement utilisé par la communauté scientifique et est appliqué à plusieurs types de problèmes: simulation de réservoirs géothermiques, récupération d'huile et d'essence (contamination), confinement des déchets hautement radioactifs, protection de l'eau souterraine et dans le domaine du drainage minier acide (*Pruess, 1991; Lefebvre, 1994; Pruess, 1995*). L'efficacité, la flexibilité et la robustesse numérique sont les principales qualités de TOUGH2. De plus, étant donné son architecture ouverte, plusieurs modules de propriétés des fluides (module EOS – équation d'état) ont été développés pour des systèmes contenant l'eau et l'air, l'eau et le CO₂, l'eau et l'hydrogène, l'eau et le méthane, l'eau avec l'air et un composé organique volatile, etc. Ces modules permettent de représenter une variété de systèmes d'écoulement comme les aquifères, les zones non saturées et les réservoirs géothermiques (*Pruess, 1991*).

Nastev (1995) développe actuellement un module pour TOUGH2 pour simuler le transport et la génération du biogaz. Une fois opérationnel, ce modèle sera appliqué au CTED. Ultérieurement, afin de calibrer adéquatement le modèle, il sera possible d'utiliser une méthode de calibration automatique. Le problème inverse est solutionné à l'aide de ITOUGH (*Finsterle, 1993; Finsterle et Pruess, 1995*). Ce programme est spécialement conçu pour être utilisé avec TOUGH2 et permet de déterminer différents paramètres hydrogéologiques du modèle (par exemple, la

conductivité hydraulique) en se basant sur les données disponibles (par exemple, des mesures piézométriques). Malheureusement, cette application déborde le cadre de la présente étude. ITOUGH permet également de simuler plusieurs scénarios pour un système donné, et de déterminer les paramètres optimaux sous certaines contraintes. Le modèle d'écoulement développé dans le cadre du présent projet sera utilisé par Hamel (1995) pour optimiser les mesures de contrôle du lixiviat au CTED.

Malheureusement, l'utilisation de TOUGH2 est non conviviale et les fichiers d'entrée sont difficiles à générer (*voir exemple de fichier d'entrée à l'annexe J*). De plus, certains inconvénients reliés à l'utilisation de TOUGH2 sont de nature informatique. TOUGH2 requiert énormément de mémoire, de puissance de calcul (CPU) et d'espace disque. Étant donné la complexité et la lourdeur du code, l'exécution est souvent très lente (plusieurs heures), même sur des ordinateurs de type IBM/RS6000. Cependant, TOUGH2 demeure un code très robuste numériquement (utilisation de trois variables primaires) et largement utilisé dans la modélisation de processus d'écoulement et de transport multiphases et multicomposants.

Le second modèle choisi est FRAC3DVS (*Therrien et Sudicky, 1995*). Ce modèle permet de représenter l'écoulement et le transport de masse dans un milieu poreux ou fracturé à saturation variable. Les fractures sont représentées discrètement par des plans à deux dimensions dans un milieu à trois dimensions. Pour notre étude, les capacités du modèle pour simuler l'écoulement dans un milieu fracturé sont utilisées de façon limitées (section 8.2.5). Les principaux avantages de ce modèle sont reliés à la vitesse d'exécution, aux ressources informatiques nécessaires (mémoire et CPU) et à la simplicité des fichiers d'entrée (*voir exemple à l'annexe J*). Cependant, le modèle est moins robuste numériquement que TOUGH2 car il n'utilise qu'une seule variable lors de la solution d'un problème à deux phases fluides.

L'utilisation de ces deux modèles servira à déterminer les compromis que l'on devra faire entre la robustesse numérique, la rapidité, la résolution de la discrétisation et la complexité des processus représentés. Dans les prochaines sections, une brève description des bases mathématiques et numériques des deux codes utilisés est présentée. Dans le cas de TOUGH2, le lecteur peut se référer à Pruess (1987 et 1991) et à Lefebvre (1994) pour une discussion plus détaillée. Pour une description plus approfondie de FRAC3DVS, le lecteur peut se référer à Therrien et Sudicky (1995), à Therrien et al. (1994) et à Therrien (1992).

7.4.1 TOUGH2

7.4.1.1 Modèle mathématique

Pour représenter l'écoulement, nous devons d'abord exprimer les équations de continuité qui représentent le principe de conservation de masse et d'énergie. Dans TOUGH2, ces équations sont décrites sous forme intégrale pour un domaine arbitraire V_n pour lequel la masse et l'énergie doivent être conservées pour les trois composants κ du système: deux composants de masse ($\kappa=1$: eau; $\kappa=2$: air) et un composant d'énergie ($\kappa=3$: chaleur). Nous pouvons écrire la relation suivante pour chaque composant:

$$\frac{d}{dt} \int_{V_n} M^\kappa dv = \int_{\Gamma_n} F^\kappa \cdot nd\Gamma + \int_{V_n} q^\kappa dv \quad (7.14)$$

Le terme M^κ représente la capacité d'accumulation de la masse (kg/m^3) ou de l'énergie (J/m^3) dans le système. Dans le cas de la masse, le terme d'accumulation est égal à:

$$M^\kappa = \Phi \sum_{\beta=1}^{NPH} S_\beta \rho_\beta X_\beta^\kappa \quad \text{où } \kappa = 1 \text{ ou } 2 \quad (7.15)$$

où Φ est la porosité; S_β , la saturation de la phase β (l = liquide; g = gazeuse); ρ_β (kg/m^3), la densité de la phase β ; et X_β^κ , la fraction de masse du composant κ dans la phase β . NPH est le nombre de phases. Pour le terme d'accumulation d'énergie, il faut considérer non seulement la quantité emmagasinée dans les phases fluides, mais aussi l'énergie contenue dans la phase solide. Nous obtenons alors:

$$M^h = \Phi \sum_{\beta=1}^{NPH} S_\beta \rho_\beta u_\beta + (1-\Phi)\rho_r C_r T \quad (7.16)$$

où Φ est la porosité; S_β , la saturation de la phase β (l = liquide; g = gazeuse); ρ_β (kg/m^3), la densité de la phase β ; u_β (J/kg), l'énergie interne spécifique de la phase β ; ρ_r (kg/m^3), la densité des solides; C_r ($\text{J/kg}^\circ\text{C}$), la capacité thermique spécifique des solides; et T ($^\circ\text{C}$), la température.

Le terme F^κ dans 7.17 représente le flux de masse des composants et le flux d'énergie. Ces flux dépendent des processus d'advection des fluides et de diffusion des gaz dans le milieu poreux. Le flux de masse (kg/s m^2) est égal à:

$$F^\kappa = \sum_{\beta=1}^{NPH} X_\beta^\kappa F_\beta \quad (7.17)$$

où X_β^κ représente la fraction du composant κ dans la phase β ; et F_β , le flux de masse de la phase β . De même, le flux de chaleur F^h (W/m^2) est défini comme étant égal à la somme des processus de conduction thermique et d'advection:

$$F^h = -\lambda \nabla T + \sum_{\beta} h_\beta F_\beta \quad (7.18)$$

où λ ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$) est la conductivité thermique du milieu; et $h_\beta = u_\beta + P/\rho_\beta$, l'enthalpie spécifique de la phase β (J/kg).

Le flux de masse (F_β) de la phase β (liquide ou gaz) est déterminé à partir de la forme générale de la loi de Darcy pour un écoulement multiphase:

$$F_\beta = k \frac{k_{r\beta}}{\mu_\beta} \rho_\beta (\nabla P_\beta - \rho_\beta g) \quad (7.19)$$

où k est la perméabilité (m^2); $k_{r\beta}$, la perméabilité relative de la phase β ; μ_β , la viscosité de la phase β ($\text{Pa}\cdot\text{s}$); ρ_β , la densité de la phase β (kg/m^3); g , l'accélération gravitationnelle (m/s^2); et ∇P le gradient de pression de la phase β ($P_\beta = P_{\text{référence}} + P_{c\beta}$) (Pa).

7.4.1.2 Équation d'état

Afin de garder une architecture ouverte et générale, TOUGH2 utilise des équations d'état (module EOSn où $n = 1, 2, 3, \dots$) pour représenter différents systèmes fluides (Pruess, 1987; Pruess, 1991). Dans notre cas, nous utilisons le module EOS 3. Ce module permet à TOUGH2 de simuler l'écoulement de deux phases fluides, en plus de la phase solide et de deux composants fluides (eau et air). Les flux de liquide et de gaz par advection sont calculés par la loi de Darcy généralisée, en utilisant la perméabilité relative et la pression capillaire des fluides qui sont

variables en fonction de la saturation en eau. Le flux des composants en phase gazeuse est obtenu par le produit du coefficient effectif de diffusion pour un milieu poreux partiellement saturé et du gradient de densité partielle du composant dans la phase gazeuse. Le flux de chaleur est la somme de la conduction, de la diffusion et de l'advection. L'enthalpie spécifique des phases fluides est utilisée de telle sorte que la chaleur sensible et la chaleur latente soient considérées.

Les propriétés thermophysiques de l'eau sont calculées à partir des équations dérivées des tables de vapeur telles que formulées par l'International Formulation Committee (1967). L'air est considéré comme un gaz idéal et l'additivité des pressions partielles pour l'air et la vapeur est supposée dans la phase gazeuse ($P_g = P_a + P_v$). La viscosité du mélange air-vapeur est calculée à partir de données expérimentales et de la relation de Hirschfelder et al. (1954). La solubilité de l'air dans l'eau liquide est représentée par la loi de Henry (*Loomis, 1928*):

$$P_a = K_H \cdot X_l^{air} \quad (7.20)$$

où X_l^{air} représente la fraction molaire d'air dissout; P_a , la pression partielle dans le gaz; et K_H , la constante de Henry ($1,0 \times 10^{10}$ Pa).

Les variables primaires utilisées dans les calculs dépendent du nombre de phases. Dans le cas où une seule phase fluide est présente (gazeuse ou liquide), nous utilisons comme variables primaires la pression du fluide P (Pa), la fraction de masse d'air dans la phase fluide X_{air}^{fluide} et la température T (°C). Lorsque deux phases fluides sont présentes, la fraction de masse d'air dans le fluide est remplacée par la saturation en gaz plus 10 ($S_g + 10$). Dans notre cas, nous considérons le problème isotherme ($T = 5^\circ\text{C}$). Les propriétés des phases fluides sont des paramètres secondaires qui dépendent des variables primaires. Pour chaque phase, les paramètres suivants sont calculés par le module d'équation d'état: pression, température, fraction de masse d'air (dans le gaz et dans l'eau), saturation (en gaz et en liquide), pression capillaire et de saturation, ainsi que les divers flux (chaleur, liquide, gaz) entre les cellules.

Plusieurs modèles de perméabilité relative et de pression capillaire sont disponibles dans TOUGH2. Dans notre cas, les relations de van Genuchten (1980) sont utilisées afin de représenter les relations de capillarité et de perméabilité relative.

7.4.1.3 Méthode numérique

Les équations présentées précédemment représentent les processus physiques à l'intérieur d'un milieu continu. Pour résoudre ces équations, nous devons les discrétiser dans l'espace et le temps. Dans TOUGH2, l'espace est discrétisé par la méthode des différences finies intégrales (Narasimhan et Witherspoon, 1976). Une telle méthode permet de définir des maillages réguliers ou irréguliers. Pour un système dont les éléments sont réguliers et référencés à un système de coordonnées globales, la méthode des différences finies intégrales est équivalente à une discrétisation conventionnelle de différences finies. Pour chaque élément, les seules informations requises pour discrétiser l'espace sont: le volume, la superficie des interfaces entre les noeuds (connectivité), la distance nodale entre les blocs, et l'accélération gravitationnelle le long de la ligne entre deux noeuds. La méthode des différences finies intégrales a comme avantage de ne pas nécessiter un système global de référence. La figure 7.9 illustre l'approche utilisée par la méthode des différences finies intégrales pour représenter l'espace.

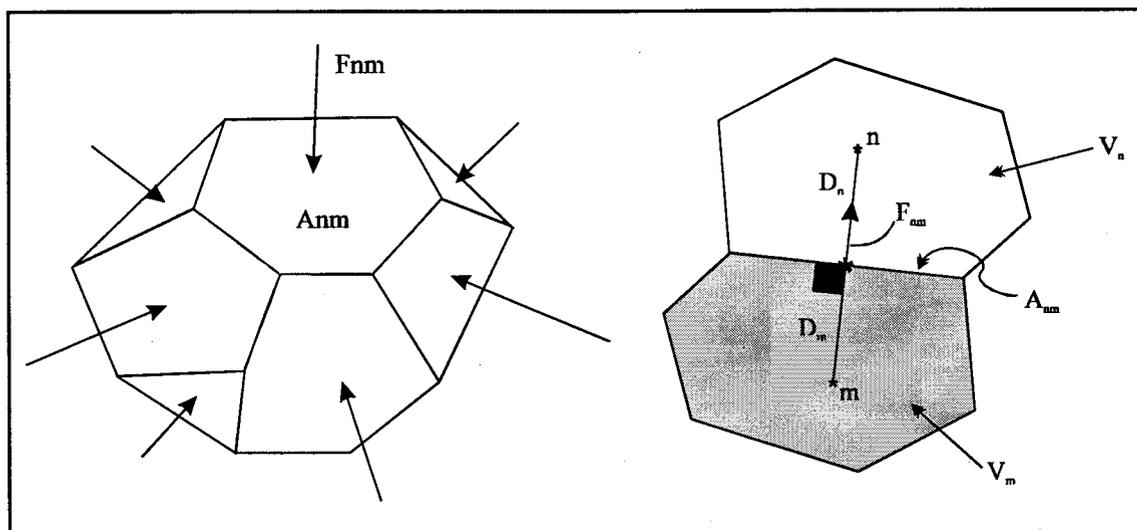


FIGURE 7.9: Discretisation spatiale et géométrie pour la méthode des différences finies intégrales (Pruess, 1991).

La méthode des différences finies intégrales se base sur le principe que l'intégration d'une propriété M dans un élément de volume V_n est remplacée par la valeur moyenne M_n dans ce volume, donc:

$$\int_{V_n} M \, dv = V_n M_n \quad (7.21)$$

De plus, l'intégration des flux F dans une direction n perpendiculaire à la surface Γ_n est estimée par la valeur moyenne F_{nm} du flux normal à la surface A_{nm} entre les éléments de volume V_n et V_m :

$$\int_{\Gamma_n} F \cdot n \, d\Gamma = \sum_m A_{nm} F_{nm} \quad (7.22)$$

Les flux sont discrétisés en utilisant les propriétés moyennes pour les éléments V_n et V_m . En substituant les relations 7.21 et 7.22 dans les équations de continuité (7.14), nous obtenons un système d'équations différentielles ordinaires du premier ordre par rapport au temps, ayant la forme suivante pour chaque composant κ :

$$\frac{dM_n^\kappa}{dt} = \frac{1}{V_n} \sum_m A_{nm} F_{nm}^\kappa + q_n^\kappa \quad (7.23)$$

Le temps est discrétisé implicitement à l'aide d'une différence finie arrière du premier ordre. Nous avons donc la relation suivante:

$$\frac{M_n^{\kappa(k+1)} - M_n^{\kappa(k)}}{\Delta t} \approx \frac{dM}{dt} \quad (7.24)$$

Étant donné que l'on connaît les variables thermodynamiques au pas de temps k , nous pouvons écrire le résiduel R_n pour le temps $k+1$, pour un élément n et pour un composant κ :

$$R_n^{\kappa(k+1)} = M_n^{\kappa(k+1)} - M_n^{\kappa(k)} - \frac{\Delta t}{V_n} \left\{ \sum_m A_{nm} F_{nm}^{\kappa(k+1)} + V_n q_n^{\kappa(k+1)} \right\} = 0 \quad (7.25)$$

Afin de trouver les nouvelles valeurs des variables thermodynamiques dont dépendent les termes de masse, de flux et de source, nous devons résoudre le système d'équations non linéaires couplées comprenant trois équations par élément, une pour chaque composant. Ces équations sont solutionnées simultanément et itérativement en utilisant la méthode de Newton-Raphson (*Burden et Faires, 1989*). Le système d'équations est linéarisé en développant le résiduel en série de Taylor; nous trouvons alors, de façon itérative, les valeurs des changements des variables primaires x qui

permettent de minimiser le résiduel. Pour l'itération $p+1$, en faisant le développement en série de Taylor du résiduel à l'itération p et en ne conservant que les termes du premier ordre, nous obtenons:

$$R_n^{\kappa(k+1)}(x_{i,p+1}) = R_n^{\kappa(k+1)}(x_{i,p}) + \sum_i \left. \frac{\partial R_n^{\kappa(k+1)}}{\partial x_i} \right|_p (x_{i,p+1} - x_{i,p}) = 0 \quad (7.26)$$

En regroupant les termes, nous obtenons le système à résoudre pour obtenir une nouvelle valeur des variables primaires $X_{i,p+1}$:

$$R_n^{\kappa(k+1)}(x_{i,p}) = - \sum_i \left. \frac{\partial R_n^{\kappa(k+1)}}{\partial x_i} \right|_p (x_{i,p+1} - x_{i,p}) \quad (7.27)$$

Le système d'équations généré par TOUGH2 est solutionné à l'aide d'une méthode directe ou itérative. Les méthodes directes ont l'avantage d'être robustes et de parvenir à une solution exacte du système d'équations (en supposant que les erreurs d'arrondis sont nulles). Cependant, ces méthodes demandent beaucoup de ressources informatiques (mémoire) et sont lentes. En revanche, les solutions de type itératives sont moins exigeantes au point de vue stockage des matrices (mémoire) et sont plus rapides mais ne convergent pas nécessairement vers la bonne solution. La complexité des matrices générées par TOUGH2 rend possible l'utilisation de solveur direct pour des problèmes simples (2D de l'ordre de 1000 cellules). Les méthodes itératives permettent de solutionner des matrices complexes et d'ordre supérieures. Ce type de solveur est utilisé dans le cadre des présentes modélisations.

Dans le cas de la méthode directe, la solution recherchée pour chaque équation linéaire est obtenue à l'aide d'une décomposition LU avec substitution arrière [solveur MA28] (Duff, 1977). Si la convergence n'est pas obtenue après le nombre maximal d'itérations, le pas de temps est automatiquement ajusté et un nouveau processus d'itération est engagé.

Moridis et Pruess (1995) ont récemment développé une série de solveurs itératifs pour TOUGH2. Ces solveurs se basent sur la méthode du gradient conjugué telle que développée par Seager (1988). Bien qu'itérative, cette méthode est assez robuste pour solutionner les matrices complexes engendrées par TOUGH2. Les trois solveurs itératifs présentement disponibles sont: (1) gradient bi-conjugué [DSLUBC] (Fletcher, 1976), (2) gradient bi-conjugué carré de type Lanczos

[DSLUCS] (Sonneveld, 1989), et (3) résidus minimums généralisés [DSLUGM] (Saad et Schultz, 1986). Dans notre cas, nous utilisons la méthode DSLUCS avec un préconditionnement réalisé à l'aide d'une factorisation LU en ligne incomplète [ILLU] (Sonneveld, 1989).

La convergence est atteinte lorsqu'un des critères de convergence, soit relatif, soit absolu, est rencontré:

$$\text{Critère relatif: } \left| \frac{R_n^{\kappa(k+1)}}{M_n^{\kappa(k+1)}} \right| \leq \varepsilon_1 \quad \text{par défaut } \varepsilon_1 = 10^{-5} \quad (7.28a)$$

$$\text{Critère absolu: } |R_n^{\kappa(k+1)}| \leq \varepsilon_1 \varepsilon_2 \quad \text{par défaut } \varepsilon_2 = 1 \quad (7.28b)$$

7.4.2 FRAC3DVS

7.4.2.1 Modèle mathématique

La description complète des relations utilisées par FRAC3DVS pour représenter l'écoulement tient compte de la matrice poreuse et des fractures. Nous ne présentons ici que la partie concernant la matrice poreuse. L'écoulement tridimensionnel de l'eau souterraine en régime transitoire est décrit à l'aide d'une forme modifiée de l'équation de Richard (Huyakorn et al., 1984):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(K_{ij} k_{rw} \frac{\partial (\psi + z)}{\partial x_i} \right) \pm Q = \frac{\partial}{\partial t} (\theta_s S_e) \quad i, j = 1, 2, 3 \quad (7.29)$$

où K_{ij} est le tenseur de conductivité hydraulique saturé; k_{rw} , la perméabilité relative (qui est fonction de la saturation S_w); ψ , la charge de pression; z , la charge d'élévation; et θ_s , la teneur en eau à la saturation (porosité). La saturation est reliée à la teneur en eau θ selon:

$$S_w = \frac{\theta}{\theta_s} \quad (7.30)$$

Les sources et les pertes dans le système sont représentées par le terme générique Q .

Dans le but de résoudre l'équation non linéaire représentant l'écoulement (équation 7.29), des relations entre les variables primaires (ψ et S_w) doivent être déterminées. Étant donné que l'équation 7.29 est solutionnée en terme de la charge de pression, la saturation S_w est exprimée en fonction de ψ à l'aide du modèle de van Ganuchten (1980) [relations 7.6 à 7.9]:

Le terme d'accumulation (côté droit de l'équation 7.29) est exprimé en fonction de la charge de pression ψ de la façon suivante (Cooley, 1971; Neuman, 1973):

$$\frac{\partial}{\partial t} \theta_s S_w \approx S_w S_s \frac{\partial \psi}{\partial t} + \theta_s \frac{\partial S_w}{\partial t} \quad (7.31)$$

où S_s représente le coefficient d'emménagement du milieu poreux (Freeze et Cherry, 1979).

7.4.2.2 Méthode numérique

L'approche du volume de contrôle élémentaire (Forsyth, 1991; Kropinski, 1990) est utilisée afin de discrétiser et de résoudre numériquement l'équation 7.29. La linéarisation de l'équation discrétisée est obtenue à l'aide d'itérations de type Newton-Raphson. La matrice linéarisée résultante est solutionnée à l'aide du solveur préconditionné ORTHOMIN (Behie et Forsyth, 1984).

Le but de l'approche par volume de contrôle élémentaire est d'obtenir une forme discrétisée de l'équation d'écoulement basée sur la conservation locale de la masse. Pour ce faire, un volume de contrôle est assigné à chaque noeud. Pour chacun de ces noeuds, l'équation discrétisée est donnée par un terme représentant le changement de l'accumulation de masse pour le volume considéré et un terme représentant la divergence du flux de masse du fluide dans le volume. Le flux de masse dépend alors des propriétés physiques associées à ce volume et de la différence de charge de pression (variable primaire) entre le noeud et ses voisins.

L'équation représentant l'écoulement (7.29) est discrétisée en utilisant la méthode de Galerkin (Huyakorn et Pinder, 1983) pour un domaine V :

$$\int_V \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{ij} k_{rw} \frac{\partial (\psi + z)}{\partial x_j} \right] + Q - S_s S_w \frac{\partial \psi}{\partial t} - \theta_s \frac{\partial S_w}{\partial t} \right) N_I dV = 0 \quad (7.32)$$

où $x_i (i = 1, 2, 3)$ sont les coordonnées spatiales; I et J, des index nodaux variant de 1 à n , où n est le nombre total de noeuds. La fonction d'approximation utilisée a la forme suivante:

$$\psi(x_i, t) = \sum_J N_J \psi_J(t) \quad (7.33)$$

Le temps est approximé par une différence finie, ce qui permet d'écrire le terme d'accumulation sous la forme:

$$\int_V \left(S_s S_w \frac{\partial \psi}{\partial t} - \theta_s \frac{\partial S_w}{\partial t} \right) N_I dV = \left(S_s S_w^{L+1} \frac{(\psi^{L+1} - \psi^L)}{\Delta t} + \theta_s \frac{(S_w^{L+1} - S_w^L)}{\Delta t} \right) \int_V N_I dV \quad (7.34)$$

où v est le volume de contrôle associé au noeud I; L, l'index de temps; et Δt , le pas de temps.

Afin d'obtenir une relation entre la différence de charge au noeud I et celle de ses voisins, le théorème de la divergence est appliqué au terme de gauche de l'équation 7.34:

$$\int_V \left(\frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_{ij} k_{rw} \frac{\partial (\psi + z)}{\partial x_j} \right] \right) N_I dV = - \int_V K_{ij} k_{rw} \frac{\partial (\psi + z)}{\partial x_j} \frac{\partial N_I}{\partial x_i} dV + \int_B q \cdot N_I dB \quad (7.35)$$

où le dernier terme de 7.35 représente le flux normal à la limite B du volume v . Ce terme est égal à zéro sauf si l'on impose un flux comme condition limite (condition du 2e type).

En utilisant certaines relations dérivées de la fonction d'approximation et en réarrangeant 7.35, la forme finale de l'équation discrétisée représentant l'écoulement à saturation variable dans un milieu poreux pour le noeud I est définie par:

$$\left(S_s S_w^{L+1} \frac{(\psi^{L+1} - \psi^L)}{\Delta t} + \theta_s \frac{(S_w^{L+1} - S_w^L)}{\Delta t} \right) v_I = \sum_{J \in \eta_I} (\gamma_{IJ} \lambda_{IJ} \Gamma_{IJ})^{L+1} + Q_I^{L+1} \quad (7.36)$$

$$\left(S_s S_w^{L+1} \frac{(\Psi^{L+1} - \Psi^L)}{\Delta t} + \theta_s \frac{(S_w^{L+1} - S_w^L)}{\Delta t} \right) v_I = \sum_{J \in \eta_I} (\gamma_{IJ} \lambda_{IJ} \Gamma_{IJ})^{L+1} + Q_I^{L+1} \quad (7.36)$$

où v_I égale le volume d'influence du noeud I:

$$v_I = \int_v N_I dv \quad (7.37)$$

et,

$$\gamma_{IJ} = (\psi_J + z_J) - (\psi_I + z_I) \quad (7.38)$$

λ_{IJ} représente une valeur pondérée de la perméabilité relative aux noeuds I et J. Une pondération vers l'amont est utilisée afin d'obtenir une meilleure stabilité numérique:

$$\lambda_{IJ} = \begin{cases} k_{rwJ} & \text{si } \Gamma_{IJ}(\psi_J + z_J - \psi_I + z_I) > 0 \\ k_{rwI} & \text{si } \Gamma_{IJ}(\psi_J + z_J - \psi_I + z_I) < 0 \end{cases} \quad (7.39)$$

où:

$$\Gamma_{IJ} = K_{ij} \int_v \frac{\partial N_J}{\partial N_j} \frac{\partial N_I}{\partial N_i} dv \quad (7.40)$$

Finalement, le terme des sources et pertes Q_i est égal à:

$$Q_I = \int_v Q N_I dv \quad (7.41)$$

Le terme Q_I est également utilisé afin de spécifier certaines conditions limites. Par exemple, pour imposer une condition de charge constante ψ^* , on n'a que:

$$Q_I = K_{ij} k_{rw} W_I (\psi^* - \psi_I) \quad (7.42)$$

où W_I représente une valeur très grande (i.e. 10^{20}) afin de spécifier que $\psi_I = \psi^*$ lors de l'assemblage de la matrice à résoudre.

L'équation 7.36 est linéarisée à l'aide de la méthode de Newton-Raphson (*Huyakorn et Pinder, 1983*). En écrivant l'équation 7.36 sous la forme suivante:

$$f_I^r = \left(S_s S_w^r \frac{(\Psi^r - \Psi^L)}{\Delta t} + \theta_s \frac{(S_w^r - S_w^L)}{\Delta t} \right) v_I - \sum_{J \in \eta_I} (\gamma_{IJ} \lambda_{IJ} \Gamma_{IJ})^r + Q_I^r \quad (7.43)$$

où r représente l'index de l'itération. On peut alors directement appliquer la méthode de Newton à 7.43:

$$F_{IJ}^r \Delta \psi_J^{r+1} = -f_I^r \quad (7.44)$$

où $(F_{IJ})^r$ est une matrice Jacobienne définie par:

$$F_{IJ}^r = \frac{\partial f_I^r}{\partial \psi_J^r} \quad (7.45)$$

Le processus itératif est répété jusqu'à ce que le changement de la charge de pression $\Delta \psi_J^{r+1}$ soit inférieur à un seuil de tolérance fixé par l'utilisateur. Le résidu f_I^r est également calculé afin d'assurer la convergence. Le Jacobien est évalué par différentiation numérique, et les intégrales de l'équation 7.35 sont déterminées analytiquement par la technique des coefficients d'influence (*Huyakorn et al., 1984*) en utilisant des éléments à géométrie simple.

Le système d'équations résultant est solutionné à l'aide d'un solveur préconditionné ORTHOMIN (*Behie et Forsyth, 1984*). Le préconditionnement consiste en une factorisation ILU de la matrice assemblée des coefficients. Le système est ensuite solutionné à l'aide d'une élimination de Gauss.

CHAPITRE 8

RÉSULTATS ET DISCUSSION modélisation locale

Ce chapitre présente les résultats obtenus pour la modélisation locale de l'écoulement de l'eau souterraine au CTED. Étant donné les objectifs fixés pour la modélisation locale ainsi que les limites des modèles employés, il n'a pas été possible de représenter adéquatement la dynamique d'écoulement à l'aide d'un seul modèle. Nous avons donc utilisé deux modèles d'écoulement, TOUGH2 (Pruess, 1987; 1991) et FRAC3DVS (Therrien et Sudicky, 1995). Ces modèles ont été introduit au chapitre 7. Le présent chapitre se divise donc en deux parties. La première partie présente les résultats obtenus avec TOUGH2 [section 8.1]. À l'aide de ce modèle, il a été possible de simuler les conditions de pression et de saturation à la paroi de la carrière Francon. Ce modèle en coupe sert à déterminer les conditions limites à imposer en périphérie de Francon pour le modèle tridimensionnel local. À l'aide de ces résultats et du modèle conceptuel décrit au chapitre 7, un modèle à trois dimensions est développé pour représenter les conditions locales d'écoulement. Étant donné les limites informatiques imposées par les ordinateurs disponibles, ce modèle est de faible résolution. Néanmoins, nous représentons les patrons généraux d'écoulement adéquatement. Pour pallier à ce manque de résolution, un modèle à haute résolution est développé à l'aide de FRAC3DVS [section 8.2]. Ce modèle étant moins robuste numériquement que TOUGH2, il n'a pas été possible de le faire converger pour des conditions de saturation variable. Cependant, une bonne calibration a pu être obtenue en condition saturée pour les puits situés au roc.

8.1 RÉSULTATS AVEC TOUGH2

Cette section présente les résultats obtenus avec le modèle TOUGH2. La première partie illustre les résultats pour le modèle en coupe. La section suivante présente le maillage haute résolution qui serait requis pour représenter de façon adéquate l'écoulement au CTED avec TOUGH2. Finalement, les résultats obtenus avec un maillage plus grossier sont présentés.

8.1.1 Détermination des conditions limites à la paroi de Francon

Afin de déterminer les conditions limites aux parois de la carrière Francon, un modèle en coupe a été développé. Ce modèle représente une section unitaire de la paroi et permet de calibrer les propriétés capillaires et hydrogéologiques du roc. De plus, ce modèle sert à déterminer les conditions de pression et de saturation à imposer aux parois de la carrière Francon pour le modèle local. À l'aide de ce modèle, il est également possible de vérifier l'influence des dimensions du maillage sur l'écoulement. À partir de ces résultats, la résolution du maillage pour le modèle local en trois dimensions sera fixée.

La figure 8.1 présente l'emplacement du modèle en coupe [ligne AA']. La coupe est orientée suivant la direction approximative d'une ligne de courant vers la carrière Francon en fonction du réseau d'écoulement tel que tracé par Rouillard et Bodineau (1995). Le modèle est ainsi orienté afin de négliger l'apport d'eau latéral provenant de l'écoulement régional et d'avoir un système d'écoulement pouvant être représenté en deux dimensions. La figure 8.2 montre de façon schématique une coupe entre le CTED et la carrière Francon [ligne BB']. Afin de faciliter les références d'élévation, le datum est fixé à l'élévation -60 mètres.

Le modèle conceptuel utilisé est présenté à la figure 8.3. L'infiltration est simulée par une série de sources situées dans la couche supérieure du modèle. Le flux de ces sources est déterminé en fonction d'une infiltration de 190 mm/an [section 7.2]. Pour TOUGH2, les flux sont exprimés en terme de flux de masse q_m (kg/s). Pour une infiltration de 190 mm/an et une surface de 1 m², le flux de masse correspondant est de $6,02 \times 10^{-6}$ kg/s. Afin de faire la conversion de kg/s à m/s, la relation suivante est utilisée:

$$q_m = q \cdot \rho \cdot A \quad (8.1)$$

où q_m est le flux de masse [kg/s];
 q le flux d'infiltration [m/s];
 ρ la densité de l'eau [1000 kg/m³];
 et A l'aire normale au flux [m²].

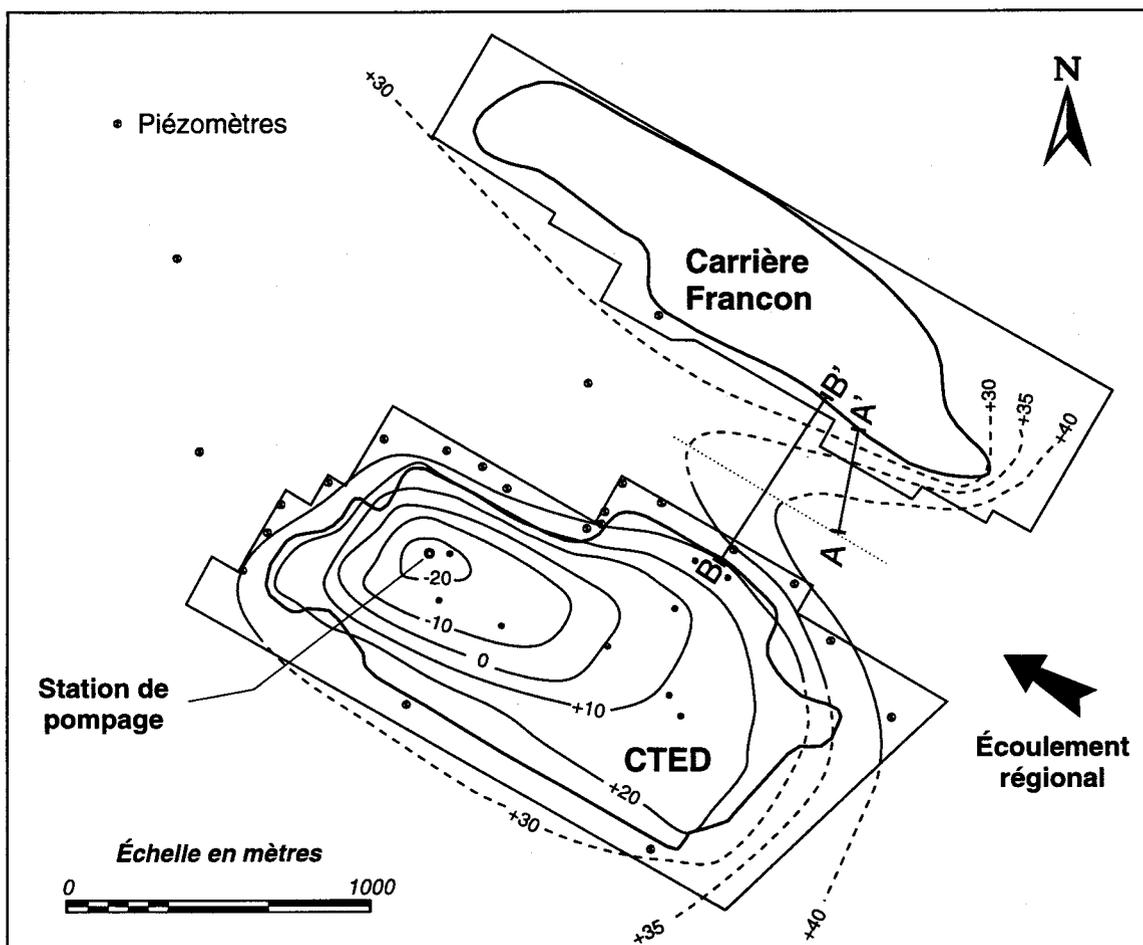


FIGURE 8.1: Localisation du modèle en coupe.

La condition limite de gauche représente une charge constante à la surface du sol. Le gradient de pression imposé correspond à cette charge. Pour TOUGH2, afin d'imposer une telle condition, la pression et la fraction de masse d'air dans l'eau (X_{air}^{fluide}) sont requises. Pour calculer la fraction de masse d'air dans l'eau, la pression partielle d'air dans le gaz est d'abord évaluée:

$$P_{air}^{gaz} = P_{gaz} \cdot X_{air}^{gaz} \quad (8.2)$$

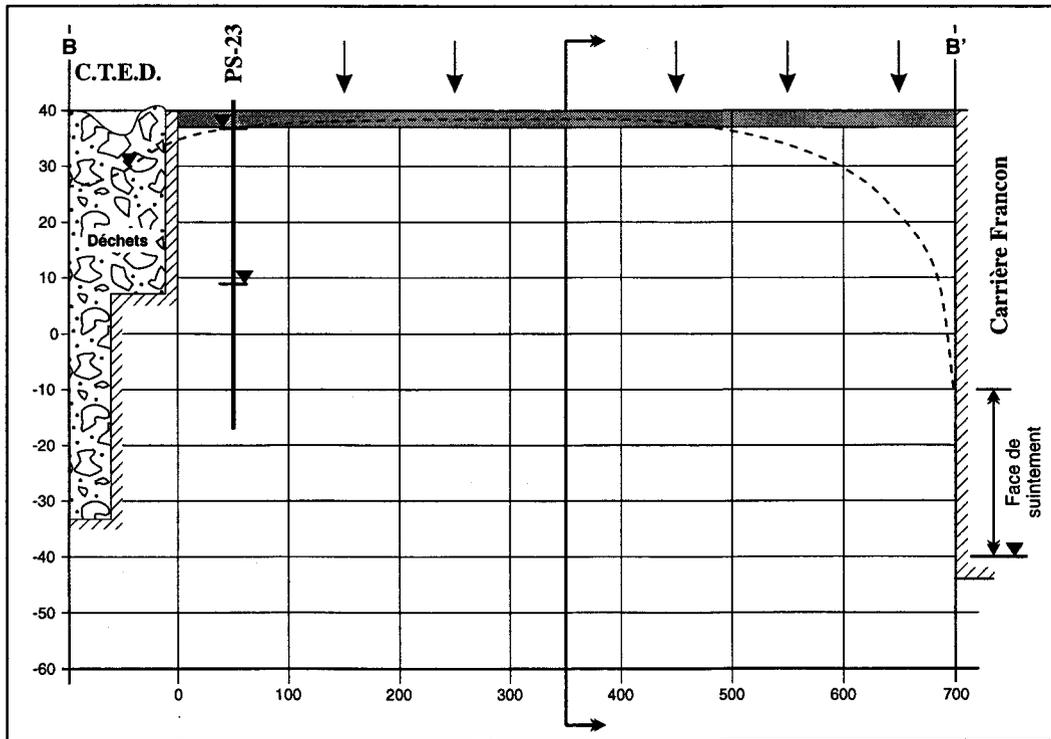


FIGURE 8.2: Coupe schématique entre le CTED et la carrière Francon
(adapté de Rouillard et Bodineau, 1995).

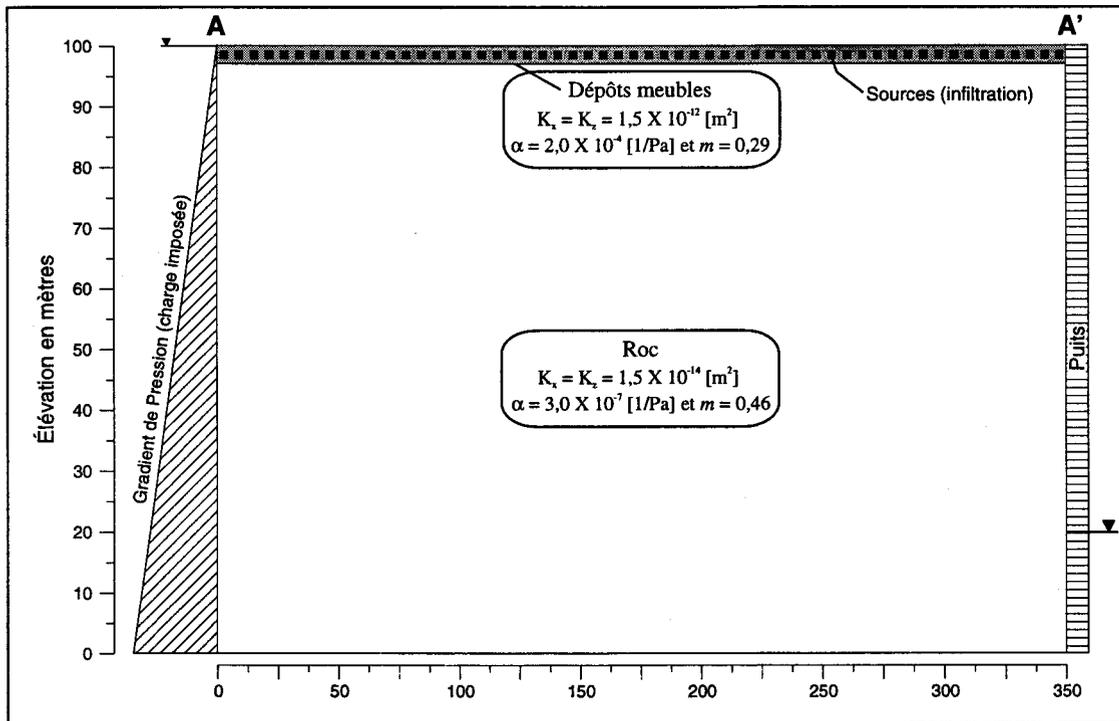


FIGURE 8.3: Modèle conceptuel (coupe vers Francon); les paramètres hydrogéologiques indiqués représentent les valeurs initiales avant calibration.

où:

$$X_{air}^{gaz} = \frac{\left[\frac{\omega_{air}^{gaz}}{M_{air}} \right]}{\left[\frac{\omega_{air}^{gaz}}{M_{air}} + \frac{(1 - \omega_{air}^{gaz})}{M_{eau}} \right]} \quad (8.3)$$

et,

$$\omega_{air}^{gaz} = \frac{\rho_{air} \cdot M_{air}}{\rho_{air} \cdot M_{air} + \rho_{eau} \cdot M_{eau}} \quad (8.4)$$

où M_{air} est la masse molaire de l'air [28,96 g/mol]; M_{eau} , la masse molaire de l'eau [18,016 g/mol].

La densité de l'air est déterminée pour une température de 5°C à l'aide de:

$$\rho_{air} = \frac{P \cdot M_{air}}{R \cdot T} \quad (8.5)$$

où R est la constante des gaz [8,31456 Pa m³/mol °K]; T, la température [273.15 + 5 °K]; et P, la pression atmosphérique de référence [101 325 Pa]. La densité de l'air ainsi calculée est de 1,2688 kg/m³.

Ensuite, la fraction molaire X_{mole} est calculée à l'aide de la loi de Henry:

$$X_{mole} = P_{air}^{gaz} \cdot K_H^{-1} \quad (8.6)$$

où $K_H = 1 \times 10^{10}$ Pa.

Finalement,

$$X_{air}^{eau} = \frac{X_{mole} \cdot M_{air}}{X_{mole} \cdot M_{air} + (1 - X_{eau}) \cdot M_{eau}} \quad (8.7)$$

Pour des conditions de saturation de 100% et une pression de référence de 101 325 Pa, la fraction de masse d'air dans l'eau (X_{air}^{fluide}) est égale à $1,6146 \times 10^{-5}$.

Afin d'obtenir la distribution de la saturation pour la paroi de la carrière Francon, nous imposons comme condition limite de droite un puits pour lequel la pression est spécifiée. Le modèle calcule alors le débit nécessaire afin de maintenir cette pression dans le puits [*well on delivirability*] (Pruess, 1991). Le seul paramètre nécessaire pour imposer une telle condition est l'indice de production [IP]. Ce paramètre est évalué de façon théorique à l'aide de la relation suivante (Dake, 1978):

$$IP = \frac{2\pi \cdot k \cdot h}{\ln\left(\frac{r_e}{r_w} - \frac{1}{2} + S\right)} \quad (8.8)$$

où k est la perméabilité [m²];
 h la hauteur de la cellule [m];
 r_w le rayon du puits ($r_w = 0,50$) [m];
 S le facteur de surface ($S = 1$) [-];

et $r_e = \sqrt{\frac{\Delta x \cdot \Delta y}{\pi}}$ où Δx et Δy représentent les dimensions de la cellule [m].

Les flux [kg/s] générés par le puits sont directement liés au volume total pompé à la carrière Francon. Ils correspondent à l'apport en eau souterraine équivalent pour une section unitaire. Rouillard et Bodineau (1995) estiment la quantité d'eau pompée provenant de l'eau souterraine à 1 999 350 m³/an. Le tableau 8.1 présente le calcul effectué afin d'obtenir une estimation du débit provenant d'une section d'un mètre de largeur. Le flux maximum tient compte d'un apport d'eau provenant exclusivement des parois, tandis que le flux minimum tient compte des parois et du fond de la carrière. Ces valeurs sont approximatives mais donnent l'ordre de grandeur du flux que nous devons obtenir au puits.

Le gradient de pression (air et eau) imposé dans le puits considère un niveau d'eau dans la carrière Francon situé à l'élévation -40 mètres (Rouillard et Bodineau, 1995). Comparativement aux interprétations de Rouillard et Bodineau (1995), nous considérons qu'il existe une surface de suintement h' à la base de la carrière. Cette hauteur est déterminée à l'aide du modèle et comparée à la valeur obtenue en utilisant la relation 8.9 dérivée de l'équation de Thiem (Gélinas et Lefebvre, 1992). La hauteur de suintement estimée est égale à 32 mètres.

$$h' = \frac{(H-h)^2}{2 \cdot H} \quad (8.9)$$

où H est le niveau initial (H = 100) [m];
 et h le niveau mesuré près du puits (h = 20) [m].

TABLEAU 8.1: Calcul du flux théorique vers Francon pour une section unitaire.

Q	1 999 350 m ³ /an 6.340E-02 m ³ /s
Périmètre	5 150 m
Hauteur	80 m
Aire parois	412 000 m ²
Aire fond	876 200 m ²
Aire totale	1 288 200 m ²
Flux min.	4.922E-08 m/s 3.937E-03 kg/s
Flux max.	1.539E-07 m/s 1.231E-02 kg/s

Une fois les gradients de saturation et de pression obtenus à la paroi, ces valeurs seront imposées comme conditions limites et le puits sera enlevé. Cette approche est utilisée afin de réduire les calculs introduits par le puits et de faciliter la représentation des conditions aux parois de la carrière Francon pour le modèle local à trois dimensions.

Les tableaux 8.2 et 8.3 présentent respectivement les paramètres hydrogéologiques et numériques utilisés pour ce modèle. Le tableau 8.3 montre également les valeurs par défaut utilisées par TOUGH2. Les paramètres hydrogéologiques utilisés ont été introduits aux chapitre 6 et 7. Les paramètres présentés au tableau 8.3 seront utilisés pour l'ensemble des simulations réalisées dans cette étude à l'aide de TOUGH2. Pour cette partie, les simulations faites à l'aide de TOUGH2 sont réalisées à partir d'un ordinateur de type IBM RS/6000.

TABLEAU 8.2: Paramètres hydrogéologiques.

Paramètres		Valeur	
Description	unité	DM	ROC
Densité des solides (ρ_s)	kg/m ³	2680	2710
Porosité (n)	%	30.0	5.0
Perméabilité initiale en X (k_x)	m ²	1.5E-12	1.5E-14
Perméabilité initiale en Y (k_y)	m ²	1.5E-12	1.5E-14
Perméabilité initiale en Z (k_z)	m ²	1.5E-12	1.5E-14
Paramètre m de van Genuchten	-	0.29	0.46
Paramètre α de van Genuchten	1/Pa	2.0E-04	3.0E-07
Saturation en eau résiduelle	%	15.0	10.0
Saturation en eau maximale	%	100.0	100.0
Pression capillaire maximale	Pa	1.0E+07	1.0E+07

TABLEAU 8.3: Paramètres par défaut utilisés par TOUGH2.

Paramètres		Valeur par défaut
Description	unité	
Conductivité thermique sèche (λ_d)	W/m°C	3.0
Conductivité thermique saturée (λ_w)	W/m°C	3.0
Capacité thermique des solides (c_{ps})	J/kg°C	830
Compressibilité	m ² /N	0
Expansibilité	1/°C	0
Facteur de tortuosité pour la diffusion binaire (τ)	-	0
Coefficient de diffusion standard (D_0)	m ² /s	2.13E-05
Coefficient de température de diffusion (D_θ)	-	1.80
Critère de convergence relatif	-	1.0E-05
Critère de convergence absolu	-	1
Paramètre pour le pivot	-	0.1
Facteur de pondération (<i>upstream weighting factor</i>)	-	1
Facteur de pondération : méthode de Newton-Raphson	-	1
Facteur d'incrément pour les dérivées numériques	-	1.0E-08

Plusieurs maillages sont utilisés afin de déterminer la résolution optimale (figure 8.4). La région modélisée a une épaisseur de 100 mètres par 350 mètres de longueur. Le maillage de référence employé afin de discrétiser l'espace est composé de 11 couches [3 m; 5 m; 7 m; 7 couches de 10 m; et une couche de 15 m] et de 40 cellules de longueurs variables [total de 440 cellules] (figure 8.4a). La longueur des cellules en bordure de la paroi varie de 10 mètres à un mètre selon une progression par un facteur 1,5. Les autres maillages employés (figure 8.4b à 8.4f) varient de

385 à 56 cellules au total. Par exemple, le maillage F représente 7 cellules de 50 mètres de longueur et 8 couches d'une épaisseur variable [3 m; 5 m; 7 m; 10 m; 15 m; et 3 couches de 20 m].

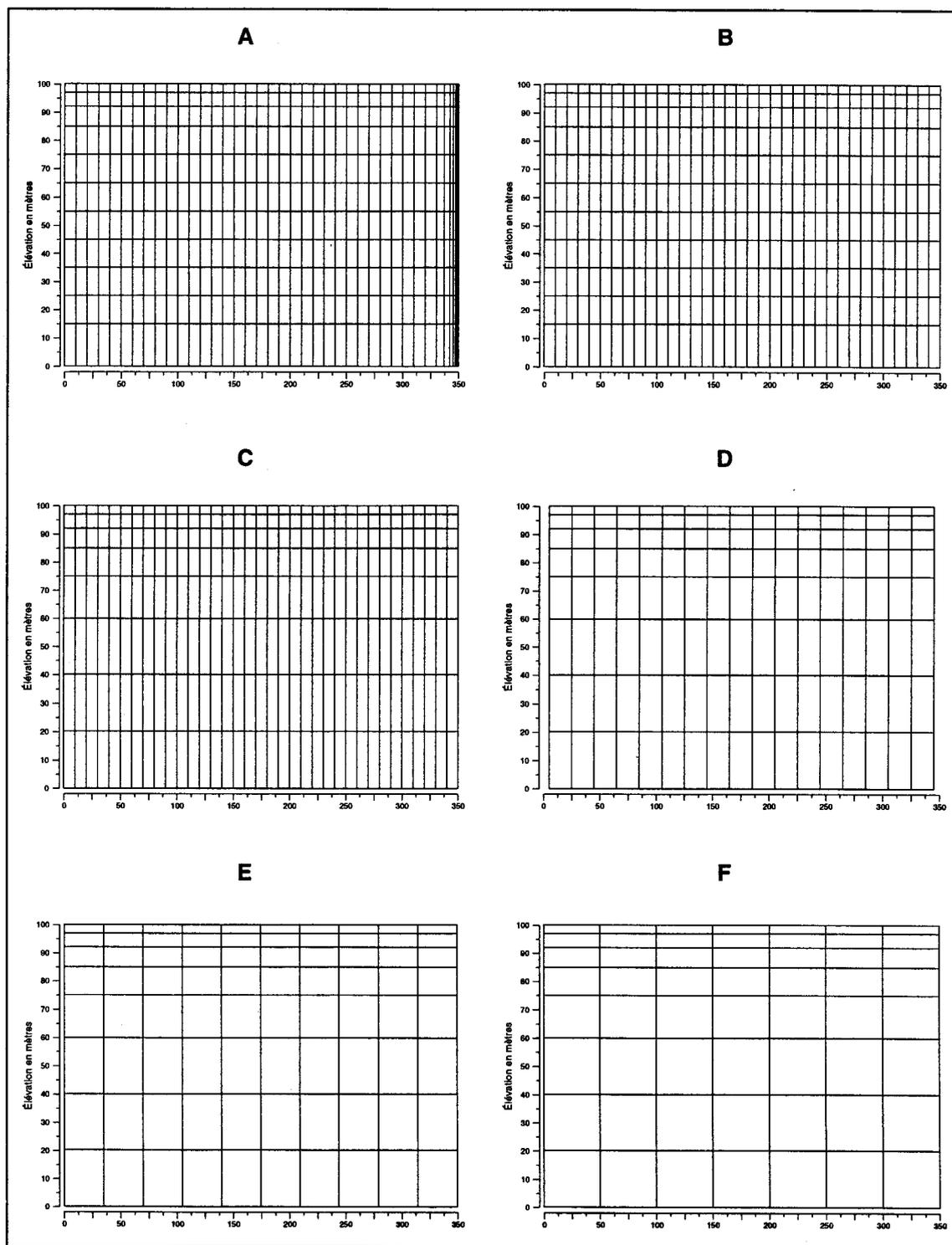


FIGURE 8.4: Maillages utilisés pour le modèle en coupe.

À partir des valeurs initiales de la perméabilité des dépôts meubles et du roc, la perméabilité verticale [k_z] a été calibrée afin d'introduire une anisotropie dans chaque lithologie. Le tableau 8.4 présente les perméabilités obtenues par calibration. La relation utilisée pour transformer les perméabilités en conductivités hydrauliques est la suivante (Freeze et Cherry, 1979):

$$K = k \frac{\rho \cdot g}{\mu} \quad (8.10)$$

où	K est la conductivité hydraulique	[m/s];
	k, la perméabilité	[m ²];
	ρ , la densité	[1000 kg/m ³];
	g, l'accélération gravitationnelle	[9,81 m/s ²];
et	μ , la viscosité de l'eau	[1,5 X 10 ⁻³ Pa s].

Étant donné le manque d'informations sur les niveaux d'eau pour cette région, la calibration de ces valeurs est basée sur un ajustement visuel des lignes d'écoulement, de la position de la nappe et de la hauteur de suintement. La valeur des flux sortant de la section et la distribution de la saturation en bordure de la paroi sont également prises en considération lors de l'ajustement. La hauteur de suintement calculée à partir des résultats du modèle est de 39 mètres. Cette valeur est du même ordre de grandeur que la hauteur de suintement calculée à l'aide de la relation 8.9.

TABLEAU 8.4: Perméabilités (conductivités) calibrées pour le modèle en coupe.

	<i>Perméabilité [m²]</i>		<i>Anisotropie</i>
	k_x	k_z	k_x/k_z
DM	1.50E-12	3.00E-13	5.0
Roc	1.50E-14	5.00E-15	3.0
	<i>Conductivité [m/s]</i>		
DM	1.00E-05	2.00E-06	5.0
Roc	1.00E-07	3.33E-08	3.0

Le tableau 8.5 présente les résultats des simulations pour différents cas. Ce tableau présente la valeur du flux à la paroi de la carrière Francon, le flux qui passe sous la carrière (dernière couche du modèle) ainsi que le flux total à la paroi. Le temps réel pour atteindre le régime permanent est également indiqué. Le tableau 8.6 présente, pour chaque cas, le nombre de pas de temps nécessaire à la solution numérique et le temps de calcul.

TABLEAU 8.5: Résultats des simulations pour le modèle en coupe selon différents cas; les changements sont indiqués en gras [C.L.: conditions limites; Sat.: profil de pression et de saturation; Propriétés capillaires: paramètres de van Genuchten].

CAS	Maillage	C. L.		Propriétés capillaires			Flux (kg/s)			Temps (années)
		Puits	Sat.	α	m	S_{wr}	Parois	Fond	Total	
1	A	X		3.0E-07	0.46	0.10	-2.393E-03	-9.821E-04	-3.375E-03	1.1145
2	A		X	3.0E-07	0.46	0.10	-2.371E-03	-9.824E-04	-3.353E-03	1.3481
3	A	X		3.0E-06	0.46	0.10	-2.384E-03	-9.815E-04	-3.366E-03	1.3975
4	A	X		3.0E-05	0.46	0.10	-2.387E-03	-9.822E-04	-3.369E-03	1.0984
5	A	X		3.0E-07	0.56	0.10	-2.394E-03	-9.818E-04	-3.376E-03	1.1351
6	A	X		3.0E-07	0.36	0.10	-2.386E-03	-9.816E-04	-3.367E-03	1.3996
7	A	X		3.0E-07	0.46	0.20	-2.392E-03	-9.821E-04	-3.374E-03	1.1200
8	A	X		3.0E-07	0.46	0.05	-2.383E-03	-9.813E-04	-3.364E-03	1.4081
9	B	X		3.0E-07	0.46	0.10	-2.358E-03	-9.878E-04	-3.346E-03	2.1521
10	C	X		3.0E-07	0.46	0.10	-2.324E-03	-1.002E-03	-3.326E-03	1.8774
11	D	X		3.0E-07	0.46	0.10	-1.837E-03	-1.474E-03	-3.311E-03	2.5754
12	E	X		3.0E-07	0.46	0.10	-1.880E-03	-1.457E-03	-3.336E-03	1.9845
13	F	X		3.0E-07	0.46	0.10	-1.966E-03	-1.428E-03	-3.394E-03	64.3515
14	F		X	3.0E-07	0.46	0.10	-1.972E-03	-1.419E-03	-3.391E-03	4.8E+05

TABLEAU 8.6: Temps de calcul pour les différents cas simulés.

CAS	Nb. de pas de temps	Temps de calcul (s)
1	343	308.08
2	449	362.22
3	364	317.67
4	279	275.46
5	368	309.06
6	372	336.17
7	364	326.04
8	365	322.15
9	336	264.16
10	224	74.67
11	238	55.30
12	203	25.10
13	339	23.89
14	233	12.55

Pour le maillage A, divers paramètres capillaires du roc ont été changés afin de vérifier leur sensibilité. En général, nous observons peu de changements sur les flux lorsque les paramètres α , m et S_{wr} de la relation de van Genuchten sont modifiés [cas 1 à 8]. Les résultats pour les différents maillages sont similaires à ceux obtenus pour le maillage raffiné (maillage A). La différence entre

les flux à la paroi calculés avec le maillage A est de $4,18 \times 10^{-4}$ kg/s (17,5%), comparativement à ceux calculés pour le maillage F. On note que le temps nécessaire pour atteindre le régime permanent est relativement grand dans le cas 14 (maillage F). La faible résolution employée pour ce maillage en est la cause car, pour les autres cas, le régime permanent est atteint en moyenne en 1,55 année. Cependant, même si le temps réel est plus long pour atteindre le régime permanent, un tel maillage permet la représentation des flux à la paroi de la même façon que le maillage raffiné, mais en un temps de calcul 25 fois plus court. Le fait que le régime permanent soit atteint après un très grand nombre d'années peut être une limite du modèle local pour effectuer des simulations en régime transitoire. Cette limitation sera vérifiée lors des simulations du modèle local.

Les figures 8.5 et 8.6 présentent respectivement les résultats pour les maillages A et F. Ces figures illustrent le cas où la condition limite de droite est un puits (a) et celui où cette condition est remplacée par un gradient de pression et de saturation (b). Les résultats obtenus pour les autres cas sont très similaires et ne sont pas présentés ici. Les figures 8.5 et 8.6 illustrent la position de la surface libre (trait pointillé), les lignes d'écoulement (flèches), ainsi que la distribution de la charge hydraulique (trait plein). Dans les deux cas (maillage A et maillage F), nous observons que les patrons d'écoulement sont les mêmes, que la condition limite soit imposée par le puits ou par un gradient de saturation et de pression. Par conséquent, il est possible de représenter les conditions à la paroi de la carrière par un gradient de pression et de saturation. La figure 8.7 présente la distribution de la pression capillaire pour le maillage A pour une condition limite imposée par un profil de saturation et de pression. À l'aide de cette représentation, il est possible de définir les régions saturées par rapport à celles non saturées. La zone non saturée se situe en bordure de la paroi pour les couches supérieures et dans, environ, la moitié de la première couche du modèle.

Pour ce qui est de la résolution du maillage, les différences entre les deux sections au niveau des patrons d'écoulement sont négligeables. La résolution employée pour le maillage F permet de représenter de façon générale l'écoulement dans la section. L'utilisation d'un tel maillage permet de réduire les temps de calcul tout en conservant les patrons généraux d'écoulement. Le maillage du modèle local à trois dimensions sera discrétisé de la même façon que le maillage F, soit: des cellules de 50 mètres par 50 mètres, et 8 couches d'épaisseurs variables pour discrétiser la verticale.

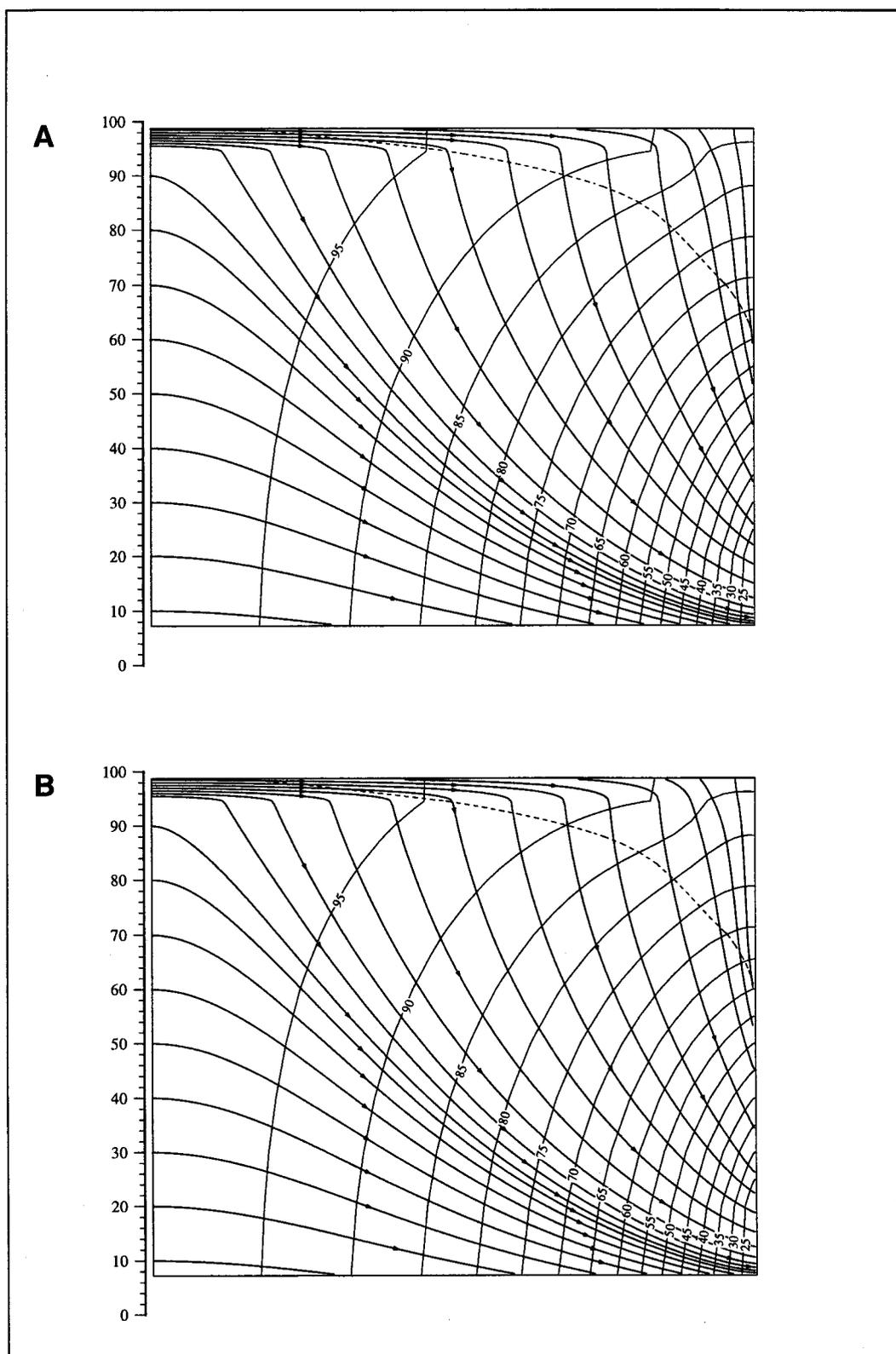


FIGURE 8.5: Résultats de la modélisation en coupe pour le maillage raffiné. (A) condition limite: puits; (B) condition limite: gradient de pression et de saturation.

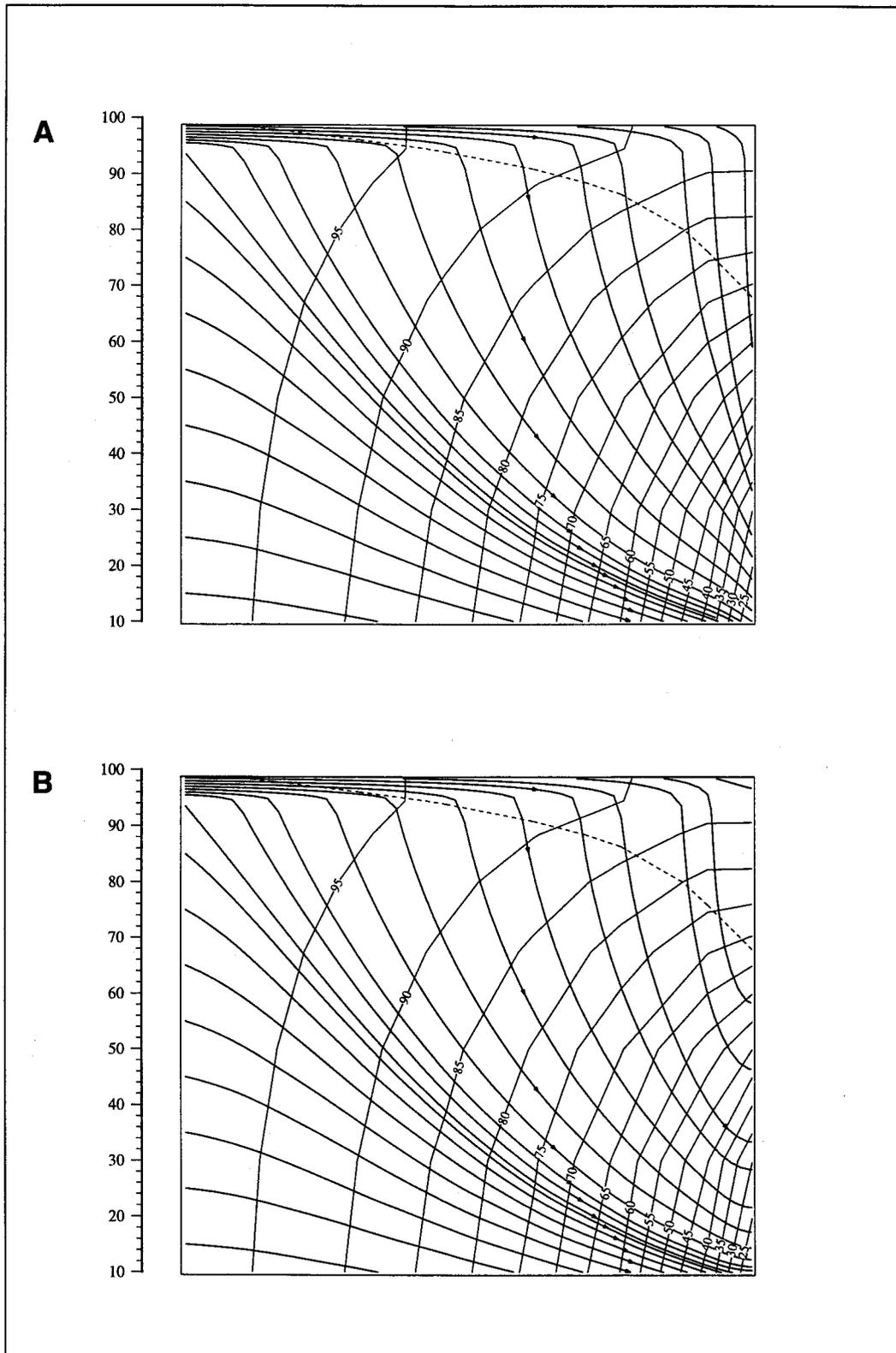


FIGURE 8.6: Résultats de la modélisation en coupe pour le maillage grossier. (A) condition limite: puits; (B) condition limite: gradient de pression et de saturation.

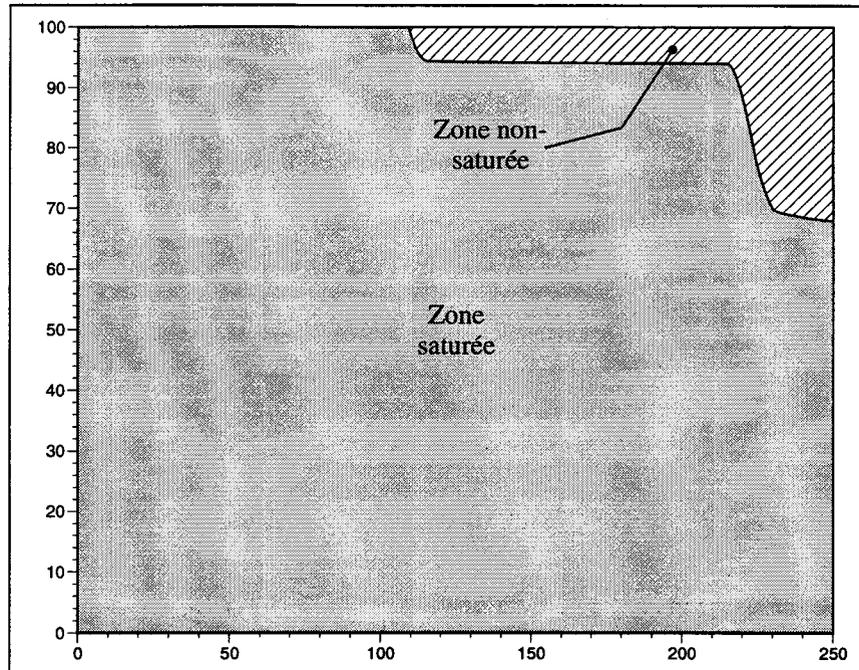


FIGURE 8.7: Zone non saturée et saturée pour le cas 2 [maillage A et conditions limites imposées par un gradient de pression et de saturation].

8.1.2 Discrétisation spatiale pour le modèle local

Afin d'utiliser le modèle numérique, l'espace du système d'écoulement à représenter doit être discrétisé en un nombre fini de cellules. Pour TOUGH2 qui utilise la méthode des différences finies intégrales, les cellules peuvent être de dimensions variables et de géométries différentes. Dans notre cas, des cellules carrés mais de dimension variables sont utilisées. La première partie de cette section présente la discrétisation qui serait souhaitable pour représenter adéquatement les processus d'écoulement au CTED. Présentement, étant donné la capacité des ordinateurs disponibles, il n'est toutefois pas possible d'utiliser un tel maillage. La deuxième partie de cette section présente le maillage plus grossier utilisé pour pallier à la limite physique imposée par les ordinateurs utilisées lors de la présente étude.

Pour des raisons pratiques, fonctionnelles et pour des délais raisonnables de calcul, il a été convenu d'utiliser un tel maillage. Le compromis entre la résolution et le temps de calcul est important car il limite les possibilités de modélisation et de représentation des processus locaux d'écoulement. Cet aspect sera discuté à la fin du présent chapitre.

8.1.2.1 Maillage raffiné

Suite aux résultats du modèle régional et du modèle en coupe, il est maintenant possible de déterminer les paramètres et limites à imposer pour le modèle local au CTED. La figure 8.8 présente le maillage raffiné développé avec TOUGH2 pour discrétiser la région du CTED. La figure 8.8a illustre le maillage en plan pour la couche supérieure du modèle. Les dimensions de la zone modélisée sont de 6000 x 6000 x 100 mètres. Les cellules extérieures ont une dimension de 100 x 100 mètres tandis que les cellules intérieures font 50 x 50 mètres. Les dimensions des cellules intérieures sont déterminées à partir des résultats du modèle en coupe. La direction verticale est discrétisée à l'aide de huit couches de dimensions variables. La première couche représente les dépôts meubles et son épaisseur est de 3 mètres. Le roc et les déchets sont simulés par 7 couches d'épaisseur variables; les couches ont respectivement 5, 7, 10, 15, 20, 20 et 20 mètres. Le maillage utilisé correspond à 6830 cellules par couche pour un total de 56 640 cellules. Pour tenir compte de la topographie locale, le bloc représentant l'ensemble du maillage est incliné de 0,5833%¹ afin de représenter la pente moyenne du sol. La figure 8.8b illustre de façon schématique une représentation tridimensionnelle du maillage généré pour la modélisation locale. La topographie du fond du site est représentée de façon grossière à l'aide de plusieurs zones de différentes élévations représentant soit des déchets soit du roc. La figure 8.9 illustre, pour le secteur du CTED, la discrétisation verticale utilisée pour représenter la topographie du fond de l'ancienne carrière. Cette figure illustre également de façon plus détaillée la géométrie utilisée pour représenter le CTED et la carrière Francon.

Les conditions limites utilisées sont les suivantes (figure 8.8): charges imposées à la limite nord (résultats du modèle régional); charges imposées en périphérie de la carrière Francon (résultats du modèle en coupe); limites imperméables au sud, à l'est et à l'ouest. La limite imperméable sud représente la ligne de partage des eaux tandis que les limites est et ouest représentent des lignes de courant. La position de ces limites est déterminée à partir des résultats du modèle régional et d'une solution analytique représentant globalement l'effet des carrières (section 5.7.3). L'emplacement du puits de pompage au CTED est indiqué sur la figure 8.8. Comme il a été mentionné à la section 8.1.1, les conditions initiales et limites sont simulées dans

¹ $Pente = \frac{\Delta H}{\Delta L} = \frac{(60 - 35)}{6000} = 0,5833\%$

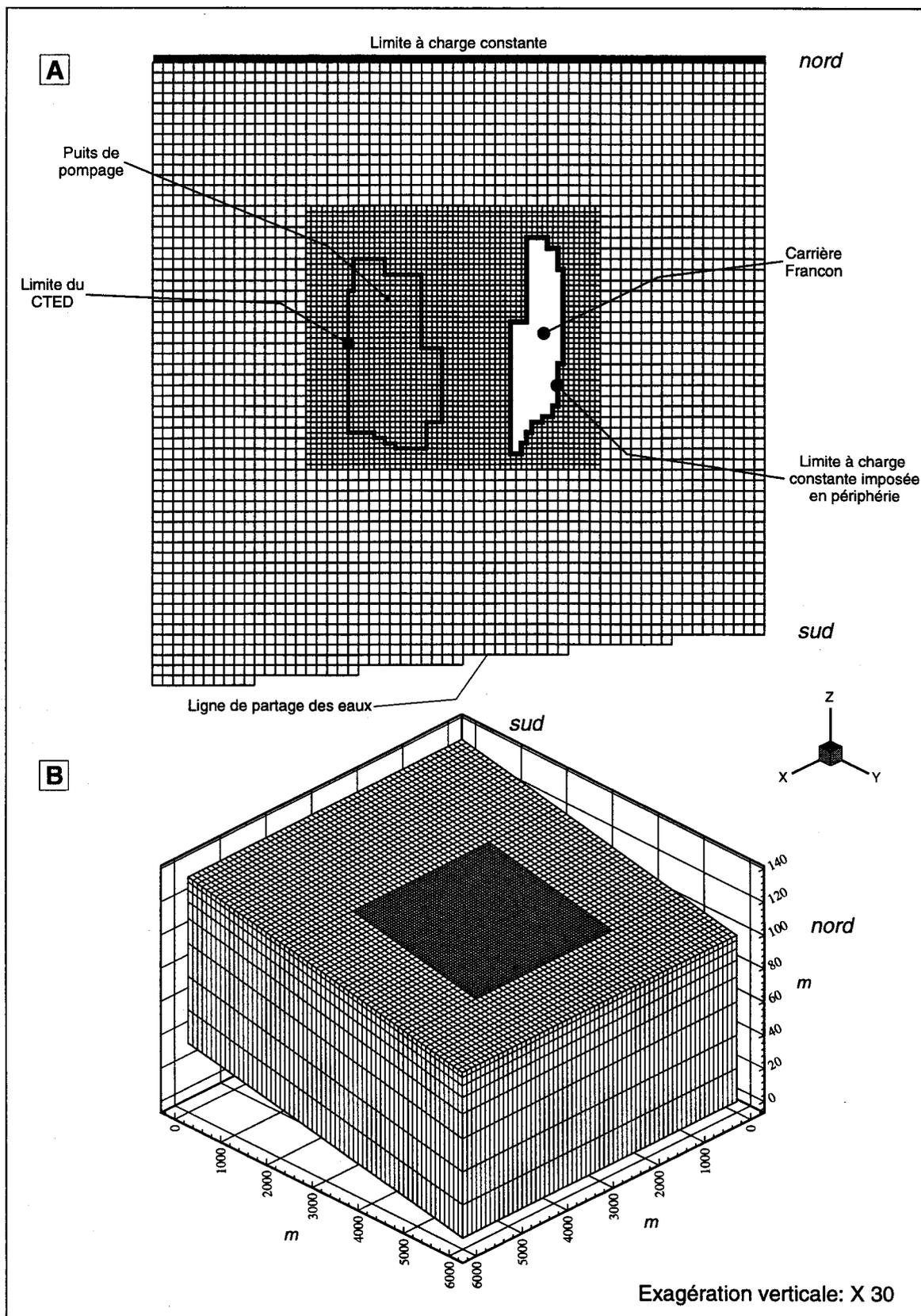


FIGURE 8.8: Discretisation tridimensionnelle souhaitable pour le modèle local avec TOUGH2.

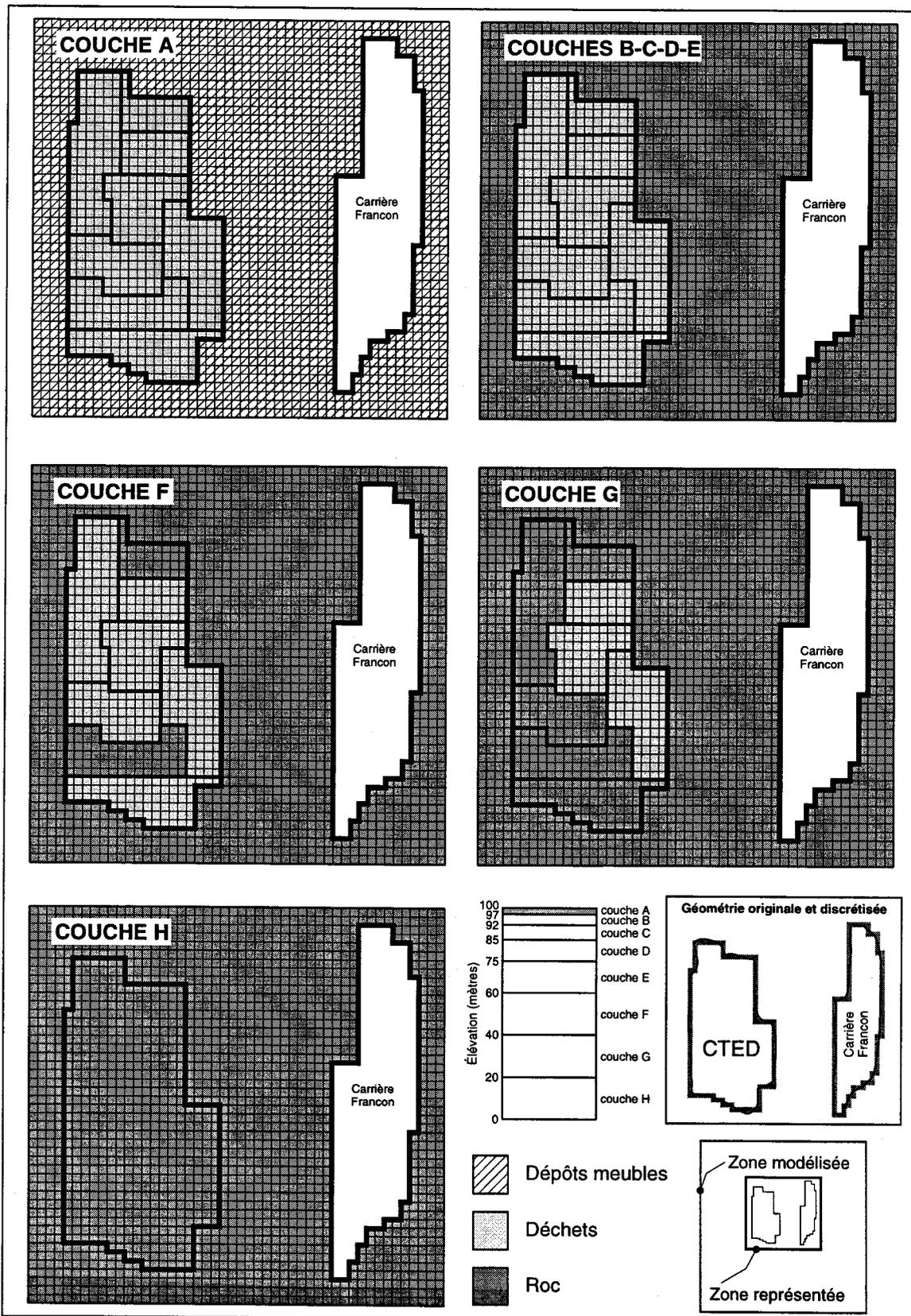


FIGURE 8.9: Discretisation de la topographie du fond du CTED et de la géométrie du CTED et de la carrière Francon.

TOUGH2 en imposant un gradient de pression des fluides équivalent à la charge et la fraction de masse d'air dans l'eau [équations 8.2 à 8.7]. Les conditions initiales imposées sont telles que le milieu est complètement saturé [X_{air}^{fluide} égale à $1,6146 \times 10^{-5}$] et un profil de pression hydrostatique est appliqué pour simuler des conditions initiales d'équilibre.

Les paramètres hydrologiques et hydrogéologiques employés pour ce modèle sont ceux présentés au chapitre 7. Ces paramètres sont résumés au tableau 8.7. Les paramètres par défaut utilisés par TOUGH2 sont ceux présentés au tableau 8.3. La recharge est simulée par une série de sources situées dans la première couche du modèle (couche A). Selon le bilan hydrologique établi au chapitre 7, deux taux différents d'infiltration sont utilisés à l'intérieur et à l'extérieur du CTED pour simuler la recharge.

TABLEAU 8.7: Paramètres hydrogéologiques initiaux utilisés pour le modèle local avec TOUGH2 [valeurs introduites au chapitre 7].

Description	Paramètres	unité	Valeurs		
			DM	ROC	DÉCHET
Densité des solides (ρ_s)		kg/m ³	2680	2710	560
Porosité (n)		%	30.0	5.0	50.0
Conductivité hydraulique initiale en X (K_x)		m/s	1.0E-05	1.0E-07	8.0E-06
Conductivité hydraulique initiale en Y (K_y)		m/s	1.0E-05	1.0E-07	8.0E-06
Conductivité hydraulique initiale en Z (K_z)		m/s	1.0E-05	1.0E-07	8.0E-06
Paramètre m de van Genuchten		-	0.29	0.46	0.29
Paramètre α de van Genuchten		1/Pa	2.0E-04	3.0E-07	2.5E-03
Saturation en eau résiduelle		%	15.0	10.0	30.0
Saturation en eau maximale		%	100.0	100.0	100.0
Pression capillaire maximale		Pa	1.0E+07	1.0E+07	1.0E+07

La discrétisation raffinée décrite dans cette section n'a pu être utilisée étant donné les limites informatiques imposées par les ressources disponibles. Ce maillage représente, d'après nous, le meilleur compromis que l'on pouvait faire sans diminuer la résolution horizontale ou verticale. La résolution horizontale est importante afin de représenter les échanges entre le CTED et la carrière Francon. Une bonne résolution verticale est aussi nécessaire pour représenter la topographie du fond de l'excavation du CTED. Cette topographie influence grandement l'écoulement vers le puits de pompage (i.e. haut topographique entre la zone 4 et la zone 1) [figure 6.4]. Une bonne

résolution est nécessaire afin d'obtenir un outil de gestion et d'intégration capable de représenter adéquatement les processus d'écoulement et d'échange surtout lors de la vérification des hypothèses concernant l'étanchéité du site. Le modèle conceptuel discrétisé de cette façon représente l'objectif ultime à atteindre pour la modélisation locale de l'écoulement à l'aide de TOUGH2 mais son utilisation devra attendre la disponibilité de ressources informatiques plus performantes.

8.1.2.2 Maillage grossier

Afin de pouvoir utiliser TOUGH2 pour représenter l'écoulement au CTED, nous avons utilisé un maillage beaucoup plus grossier que celui que nous croyons idéal qui a été présenté à la section précédente. La figure 8.10 illustre la discrétisation employée. Les dimensions des cellules utilisées sont uniformes. Chaque cellule a 200 x 200 mètres. La région modélisée est représentée par 900 cellules par couche. La direction verticale est discrétisée à l'aide de 4 couches d'épaisseurs variables. La première couche, d'une épaisseur de 3 mètres, représente les dépôts meubles. Les trois autres couches représentent le roc et les déchets. Les épaisseurs de ces couches sont de 27, 50 et 50 mètres, pour une hauteur modélisée totale de 130 mètres. Le maillage grossier est représenté par 3600 cellules au total comparativement à 56640 cellules pour le maillage raffiné. Étant donné la faible résolution du maillage employé, il n'est pas possible de représenter la topographie du fond du CTED. La géométrie du CTED et de la carrière Francon sont représentées par des formes simples. La ligne de partage des eaux n'est plus représentée. Le puits de pompage est appliqué seulement dans la troisième couche du modèle. Finalement, afin de minimiser le nombre de sources, donc l'espace mémoire requis par le modèle, la recharge est appliquée sur le site du CTED seulement. Cette recharge représente la différence entre la recharge uniforme de 190 mm/an sur la région locale et le plus fort taux de recharge imposé localement au CTED. La recharge sur le reste du domaine modélisé est simulée en imposant une limite à charge constante au sud. La charge imposée correspond au sommet de la première couche du modèle (élévation de +40 mètres).

Une condition de charge imposée est appliquée au nord et sous la carrière Francon. Au lieu d'imposer un profil de saturation et de pression à la paroi de la carrière Francon, nous imposons une pression sous la carrière correspondant au niveau de la surface libre simulé par le modèle en coupe. La condition de charge constante imposée à la limite nord correspond à une charge de pression équivalente à un niveau piézométrique d'environ +30 mètres par rapport au *N.M.M.* Les conditions de pression et de saturation pour cette limite ont été déterminées en utilisant les résultats

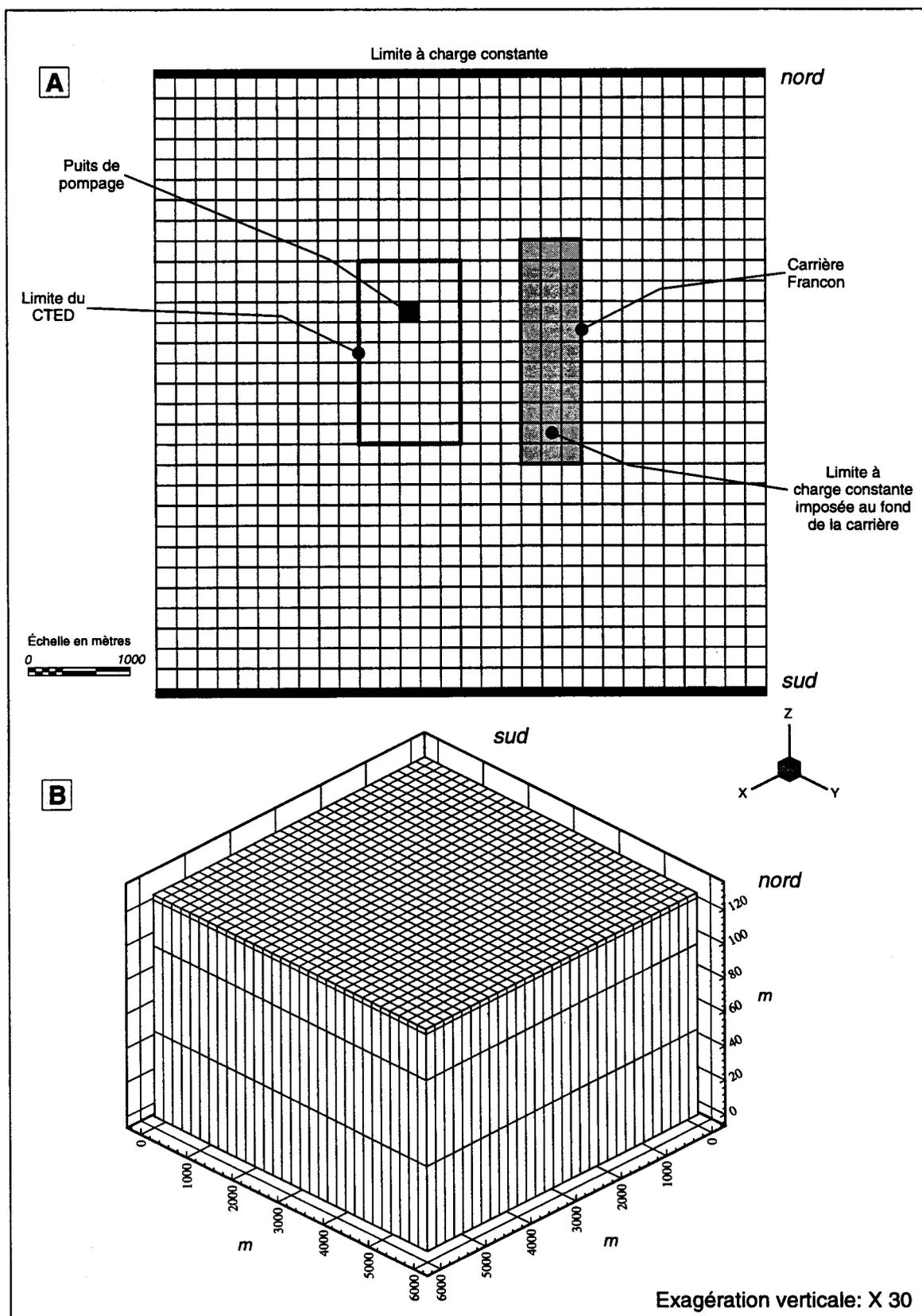


FIGURE 8.10: Discretisation tridimensionnelle utilisée pour le modèle local avec TOUGH2.

d'un modèle similaire où seulement la limite sud était imposée. Le niveau à la limite nord est ainsi imposé afin d'éviter d'avoir à imposer des conditions de saturation variable que l'on devrait alors déterminer arbitrairement. Cette simplification implique que le niveau de la nappe se retrouve légèrement au-dessus de la limite imposée par le modèle régional ($h = 20$ mètres). Cependant, il est important de noter que l'on ne considère pas la topographie du sol dans ce modèle et qu'il est donc difficilement possible d'imposer un gradient régional aussi important en fixant la charge à une des extrémités à 20 mètres et en considérant l'élévation du sommet des cellules (40 mètres). Lors de développements futurs du modèle d'écoulement, la condition limite nord devrait tenir compte des conditions de saturation variable présentes dans les premiers mètres du sol et le maillage de la topographie du sol. Les conditions initiales sont imposées par un gradient hydrostatique pour des conditions saturées (pression et fraction de masse d'air dans l'eau). La prochaine section présente les résultats obtenus à l'aide de cette discrétisation.

8.1.2.3 Résultats

La figure 8.11 présente les résultats de la représentation de l'écoulement obtenus avec TOUGH2. Cette figure illustre la position de la surface libre. Le niveau simulé dans la cellule représentant le puits au CTED est de -20 mètres comparativement à un niveau observé dans le puits de pompage de -33 mètres [*tous les niveaux sont p/r N.M.M.*]. Le niveau simulé autour de la carrière Francon est de -10 mètres comparé à un niveau observé moyen de 5 mètres. Ces différences sont relativement faibles en considérant la résolution employée pour la discrétisation. De plus, avec une telle discrétisation, il est difficile de calibrer le modèle en se basant sur les mesures observées dans les piézomètres en périphérie du site. Pour une cellule de 200 X 200 mètres, plusieurs piézomètres peuvent se retrouver dans la même cellule. Il est donc impossible d'obtenir une mesure de la calibration.

Malgré la faible résolution utilisée, nous sommes capables de représenter les patrons généraux d'écoulement [*comparaison avec l'interprétation de Rouillard et Bodineau (1995) – figure 7.5*]. L'écoulement régional est représenté par la pente générale de la surface libre. Sur la figure 8.11, nous remarquons le point haut piézométrique entre le CTED et la carrière Francon. Cette ligne de partage des eaux était également observée dans l'interprétation de la piézométrie par Rouillard et Bodineau (1995). Nous observons également que le niveau de la surface libre est plus haut dans les zones 1 et 2 du CTED. Ces zones sont situées loin du puits de pompage et l'effet de

celui-ci devient faible. De plus, malgré l'absence de l'effet de la topographie du fond de l'excavation, ces zones présentent des niveaux susceptibles de causer des problèmes d'étanchéité. En effet, étant donné la possibilité d'un gradient hydraulique vers l'extérieur du site [niveau imposé à Francon plus bas], des fuites pourraient être observées. Afin de vérifier cette hypothèse, la résolution de la discrétisation employée devra être augmentée.

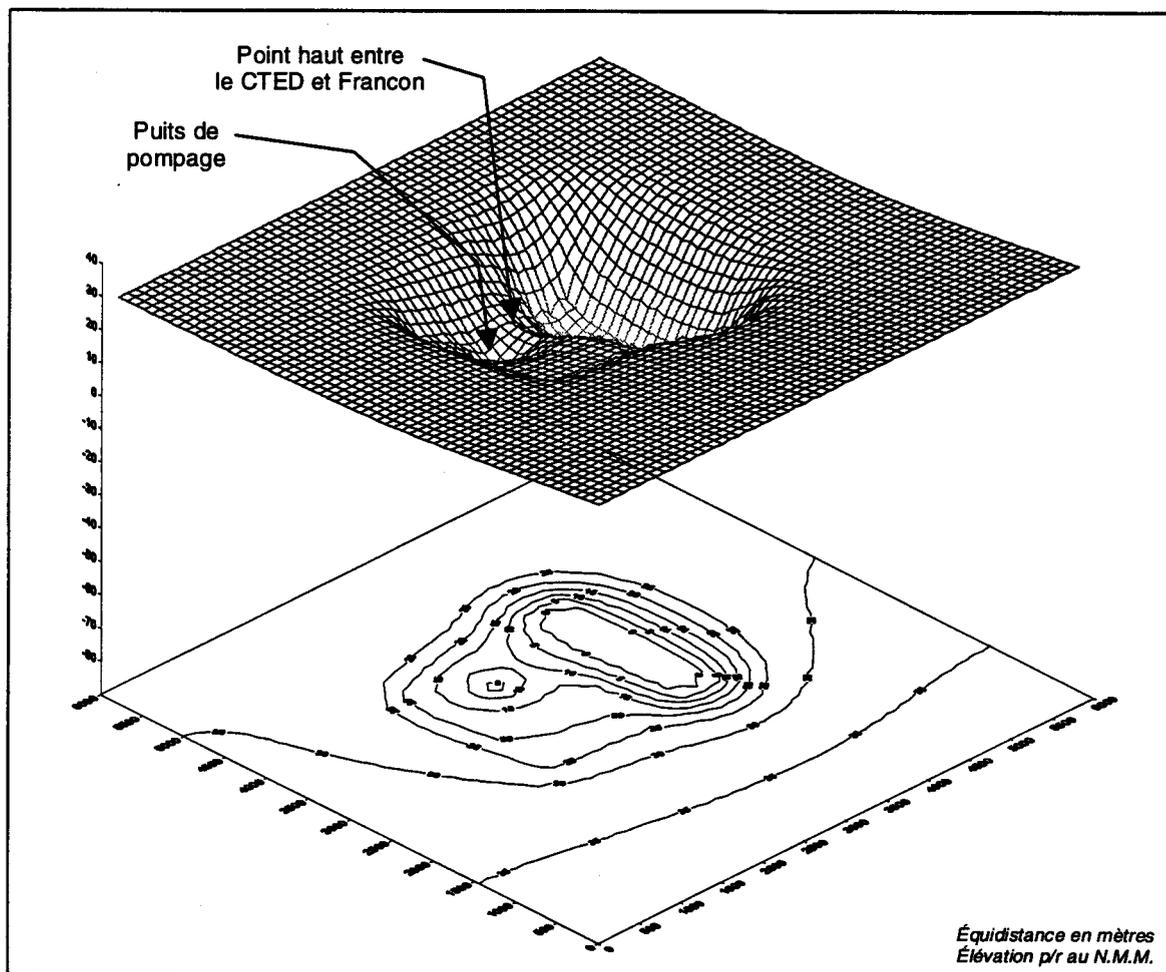


FIGURE 8.11: Résultats de la modélisation locale avec TOUGH2.

Les paramètres hydrogéologiques calibrés pour ce modèle sont présentés au tableau 8.8. Il n'y a aucun changement pour les paramètres du roc et des dépôts meubles par rapport aux valeurs calibrées pour le modèle en coupe. Le seul paramètre changé est la conductivité hydraulique des déchets. La valeur initiale introduite au chapitre 7 était de 8×10^{-6} m/s. La valeur calibrée est de 4×10^{-6} m/s. Les propriétés capillaires de tous les matériaux sont inchangées. La recharge imposée sur le site est de 100 mm/an. Par conséquent, la recharge réelle au CTED est de l'ordre de 300 mm/an [190 mm/an de base +100 mm/an]. Cette recharge est trois fois plus faible que la

recharge maximum calculée à l'aide du bilan. Le débit pompé utilisé dans le modèle est d'environ 1800 m³/j comparativement à une valeur observée moyenne de 2600 m³/j. La différence entre la valeur observée et simulée est reliée à la résolution employée pour représenter le site et le puits et les simplifications utilisées pour la représentation des processus de recharge.

TABLEAU 8.8: Conductivités hydrauliques calibrées pour le modèle local avec TOUGH2.

Paramètres		Valeurs		
Description	unité	DM	ROC	DÉCHET
Conductivité hydraulique calibrée en X (K_x)	m/s	1.0E-05	1.0E-07	4.0E-06
Conductivité hydraulique calibrée en Y (K_y)	m/s	1.0E-05	1.0E-07	4.0E-06
Conductivité hydraulique calibrée en Z (K_z)	m/s	2.0E-06	3.3E-08	4.0E-06

La simulation est effectuée en régime transitoire pour une période d'un an. Les derniers pas de temps sont de 26.5 jours. Pour des pas de temps de cette taille, nous considérons que le régime permanent est pratiquement atteint. Pour cette simulation, 396 pas de temps sont nécessaires et le temps de calcul est de 1.2 heures sur une plate-forme IBM/RS6000 3CT avec 64 meg de mémoire vive.

La figure 8.12 présente, pour un plan en deux dimensions, les lignes de courant décrivant les directions d'écoulement pour la modélisation locale. Le traçage des lignes de courant est réalisé avec le logiciel graphique TECPLOT (*Amtec Engineering inc., 1994*). L'écoulement régional est principalement intercepté par le puits de pompage du CTED. L'effet de drain produit par la carrière Francon est également important. Étant donné la résolution employée, l'effet du puits de pompage simulé est possiblement plus grand qu'en réalité. En effet, l'écoulement simulé indique même une direction allant de la limite à charge constante sud (rivière des Prairies) vers le site des carrières. Nous observons une ligne de partage des eaux entre le puits de pompage et la carrière Francon. La position de cette zone d'appel peut servir à l'évaluation des différents scénarios de contrôle hydraulique du lixiviat proposés par Bodineau (1994). En simulant les options proposées (*Hamel, 1995*), nous pouvons déterminer les changements dans les patrons d'écoulement et vérifier l'efficacité potentielle des mesures de contrôle. Par exemple, une ligne de partage des eaux située à l'extérieur du site permet de supposer que les fuites vers Francon sont négligeables. Cependant, avant d'utiliser cette méthode, le modèle local devra être raffiné afin de mieux représenter l'écoulement local au CTED.

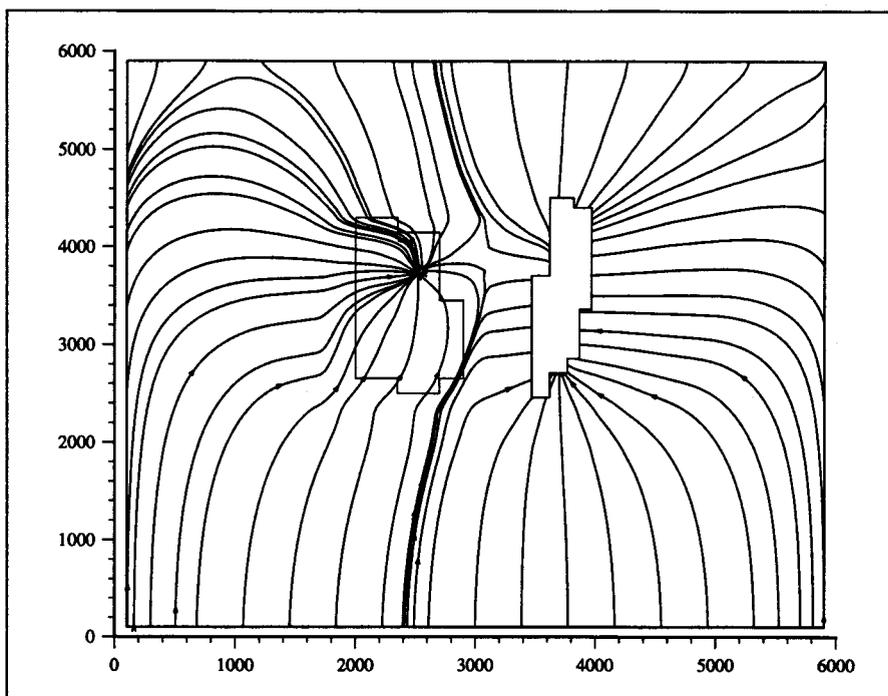


FIGURE 8.12: Lignes d'écoulement dérivées des charges hydrauliques obtenues avec TOUGH2 pour la modélisation locale au CTED.

L'utilisation de TOUGH2 permet une bonne représentation des processus d'écoulement généraux mais, pour les buts de l'étude, cette résolution ne permet pas de satisfaire certains objectifs spécifiques de la modélisation locale. L'utilisation du maillage haute résolution présentée à la section 8.1.2.1 permettrait probablement de représenter les phénomènes d'écoulement de façon plus précise et satisfaisante. L'utilisation de TOUGH2 est souhaitable étant donné sa robustesse et la possibilité d'utiliser le modèle inverse ITOUGH pour la calibration et l'optimisation (*Finsterle, 1993; Finsterle et Pruess, 1995*). Pour ce faire, la résolution doit être augmentée et un ordinateur puissant ayant les caractéristiques suivantes est nécessaire: plate-forme de type IBM/RS6000, VAX/VMS ou CRAY avec au moins 128 meg de RAM. Présentement, un tel équipement n'est pas disponible.

En conclusion, étant donné les résultats obtenus avec TOUGH2 et les objectifs fixés pour la présente étude, un modèle à plus haute résolution est nécessaire. Pour ce faire, étant donnée les limites informatiques présentement imposées, le modèle FRAC3DVS est utilisé. Ce modèle est beaucoup moins exigeant numériquement (ressources informatiques) que TOUGH2. La prochaine section présente la discrétisation utilisée ainsi que les résultats obtenus avec ce modèle.

8.2 RÉSULTATS AVEC FRAC3DVS

Dans cette section nous présentons les résultats obtenus avec FRAC3DVS. Ce modèle est utilisé afin d'utiliser une résolution plus élevée que celle que nous avons pu employer avec TOUGH2 afin de mieux représenter les conditions d'écoulement au CTED. De plus, étant donné les caractéristiques du modèle numérique [section 7.4], nous devrions être en mesure de calibrer adéquatement le modèle pour des conditions de saturation variable et vérifier certaines hypothèses concernant l'étanchéité du site. Malheureusement, nous n'avons pu utiliser les capacités du modèle pour représenter l'écoulement à saturation variable. Des problèmes de convergence numérique ont été rencontrés lors de la calibration du modèle à saturation variable. Nous avons donc utilisé un modèle saturé. Cette simplification est possible étant donné que la majorité du domaine modélisé (le roc), présente de telles conditions. Cependant, cette approximation n'est pas valide pour la zone d'enfouissement du CTED et les conditions en bordure de la carrière Francon. En utilisant un tel modèle, les capacités de simulation et d'interprétation sont grandement diminuées. Cependant, les patrons généraux d'écoulement et les comportements de l'écoulement dans le roc peuvent quand même être bien représentés. Nous présentons ici les résultats obtenus avec FRAC3DVS ainsi que des exemples de simulations, d'interprétations et de résultats qui devront être reconsidérés dans une phase ultérieure de modélisation où un modèle à saturation variable devra être utilisé. Cette discussion est également valide pour l'utilisation de TOUGH2 avec une plus haute résolution.

Les problèmes de convergence numériques sont possiblement reliés à la robustesse de la solution numérique utilisée par FRAC3DVS. Comparativement à TOUGH2 qui utilise la pression et la saturation, FRAC3DVS utilise seulement la charge lors de la solution numérique du système d'équations. Cette différence peut expliquer les difficultés rencontrées lors de la calibration du modèle local. Un modèle en coupe, similaire à celui développé avec TOUGH2 (*section 8.1.1*), a été employé afin de vérifier l'effet des différents paramètres capillaires et numériques sur la convergence. Le paramètre α employé dans la relation de van Genuchten (1980) semble le plus important. Il a été possible d'obtenir la convergence de ce modèle en utilisant des paramètres numériques de sous relaxation très faibles ou en utilisant un α très petit (inférieur à 10^{-3} m^{-1}) pour les dépôts meubles. L'utilisation d'un α très petit est équivalent à considérer le milieu comme saturé. Nous avons également utilisé le modèle SWMS-2D (*Simunek et al., 1992*) afin de comparer les résultats obtenus. Ce modèle à deux dimensions permet la représentation de l'écoulement à saturation variable en coupe. Nous avons rencontré les mêmes problèmes de

convergence numérique et il n'a pas été possible d'obtenir la convergence du modèle. Ce modèle utilise également seulement la charge lors de la solution numérique.

Il est important de noter que FRAC3DVS a déjà été utilisé avec succès à plusieurs reprises pour la simulation de l'écoulement à saturation variable (*Therrien, 1992; Therrien et Sudicky, 1995*). Dans ce cas-ci, une combinaison de la géométrie de discrétisation, des propriétés hydrauliques et capillaires ainsi que la robustesse numérique de la solution employée rendent la convergence difficile. FRAC3DVS sera modifié sous peu selon l'approche proposée par Forsyth et al. (1995) afin de tenir compte de la charge et de la saturation lors de la solution.

Étant donné les caractéristiques particulières du problème de modélisation que nous étudions, nous nous retrouvons à la limite des capacités d'outils de modélisation très performants (TOUGH2 et FRAC3DVS) et d'ordinateur quand même relativement puissants (IBM RS/6000). Les principales particularités sont reliées, soit aux caractéristiques physiques du site (géométrie, dimensions, type de milieu: roc fracturé et déchets) ou sont de nature numérique, comme par exemple le fait de considérer le problème directement en régime permanent et à saturation variable.

8.2.1 Discrétisation spatiale

Comme il a été déjà mentionné, le modèle FRAC3DVS est utilisé afin de représenter avec une plus grande résolution la région du CTED. Le modèle conceptuel employé est le même que celui utilisé pour TOUGH2. La superficie modélisée est de 6000 par 6000 mètres. La hauteur considérée est de 130 mètres dont 3 mètres de dépôts meubles. Une condition de charge imposée est appliquée à la limite nord du domaine et en périphérie de la carrière Francon. Cette dernière est déterminée à partir des résultats du modèle en coupe présentés à la section 8.1.1. La figure 8.13 présente la discrétisation employée pour le modèle local avec FRAC3DVS. La dimension des cellules est variable et va de 100 mètres de côté pour les cellules extérieures à 3 mètres de côté pour les cellules autour du puits de pompage au CTED. Chaque couche est composée de 9900 cellules. La direction verticale est discrétisée au moyen de 12 couches d'épaisseur variables: 1 couche de 3, 5, et 7 mètres; 5 couches de 10 mètres; 3 couches de 15 mètres et 1 couche de 20 mètres. Le nombre de cellules est de 118 800 pour un total de 131 300 noeuds.

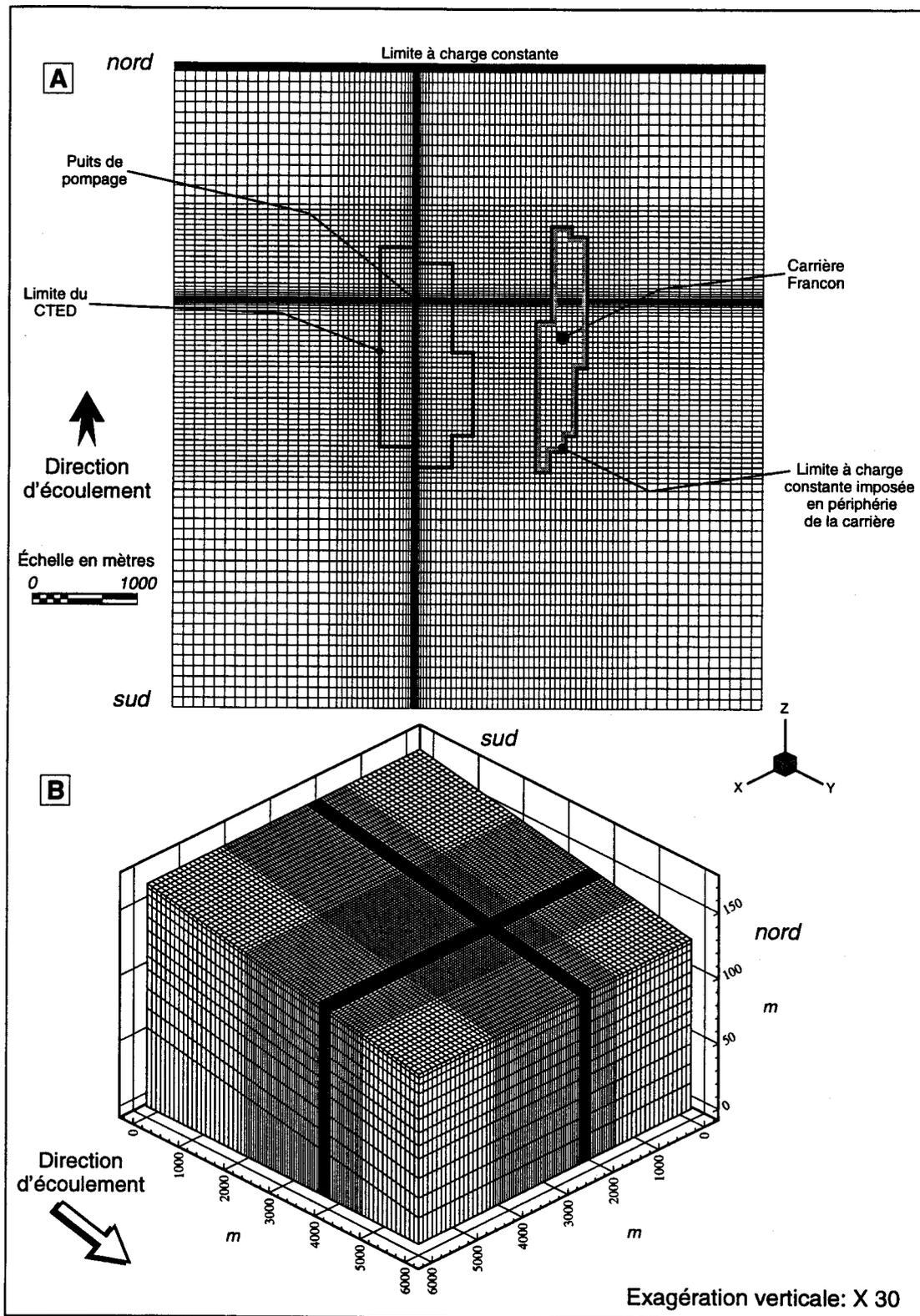


FIGURE 8.13: Discretisation utilisée pour le modèle local avec FRAC3DVS.

Le maillage est incliné de 0.67% afin de tenir compte de la topographie naturelle du terrain. Cette inclinaison est obtenue en modifiant les coordonnées des noeuds générés par le pré-processeur de FRAC3DVS. La figure 8.14 présente une série de trois coupes montrant la topographie observée comparée à celle utilisée par le modèle. En général, la pente du terrain est similaire à celle du maillage utilisé.

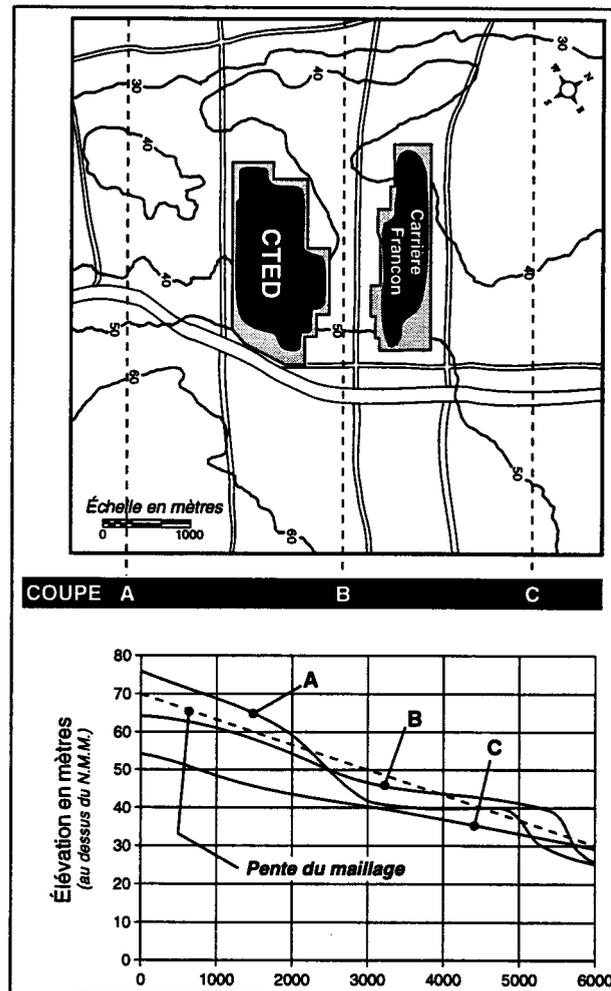


FIGURE 8.14: Topographie du terrain et pente du maillage.

La topographie du fond de l'excavation du CTED est considérée en utilisant des zones de conductivité hydraulique différentes. La figure 8.15 présente la discrétisation employée pour représenter les zones d'élévation différentes au CTED. La couche A représente la couche supérieure du modèle tandis que la couche L est la dernière. Afin de mieux représenter la discrétisation utilisée, la figure 8.16 présente deux coupes du CTED. Sur cette figure, l'inclinaison

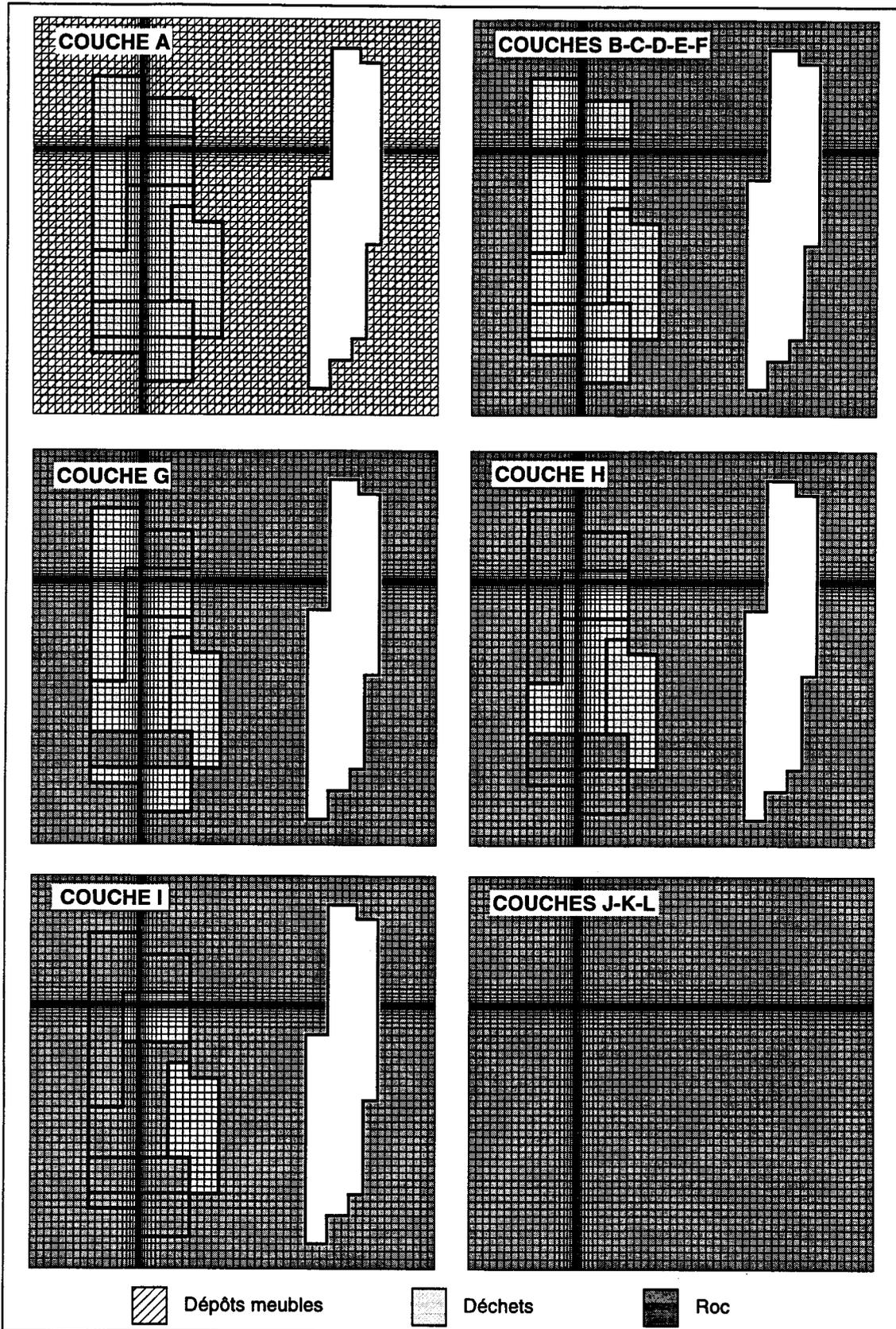


FIGURE 8.15: Discrétisation de la topographie du fond du CTED.

du maillage n'est pas montrée. Pour les cellules situées à l'extérieur du CTED, nous considérons, dans l'ordre, une couche supérieure de dépôts meubles, suivie de plusieurs couches représentant le roc. En superficie, deux couches de roc de plus grande conductivité sont considérées. Ces couches représentent un roc plus fracturé en surface. Un même type de roc est considéré sous le CTED, en dessous des couches de déchets. Finalement, sur la figure 8.16, nous présentons également la différence entre la géométrie discrétisée et la géométrie originale du CTED et de la carrière Francon. Les différences sont négligeables pour la résolution et l'échelle considérée.

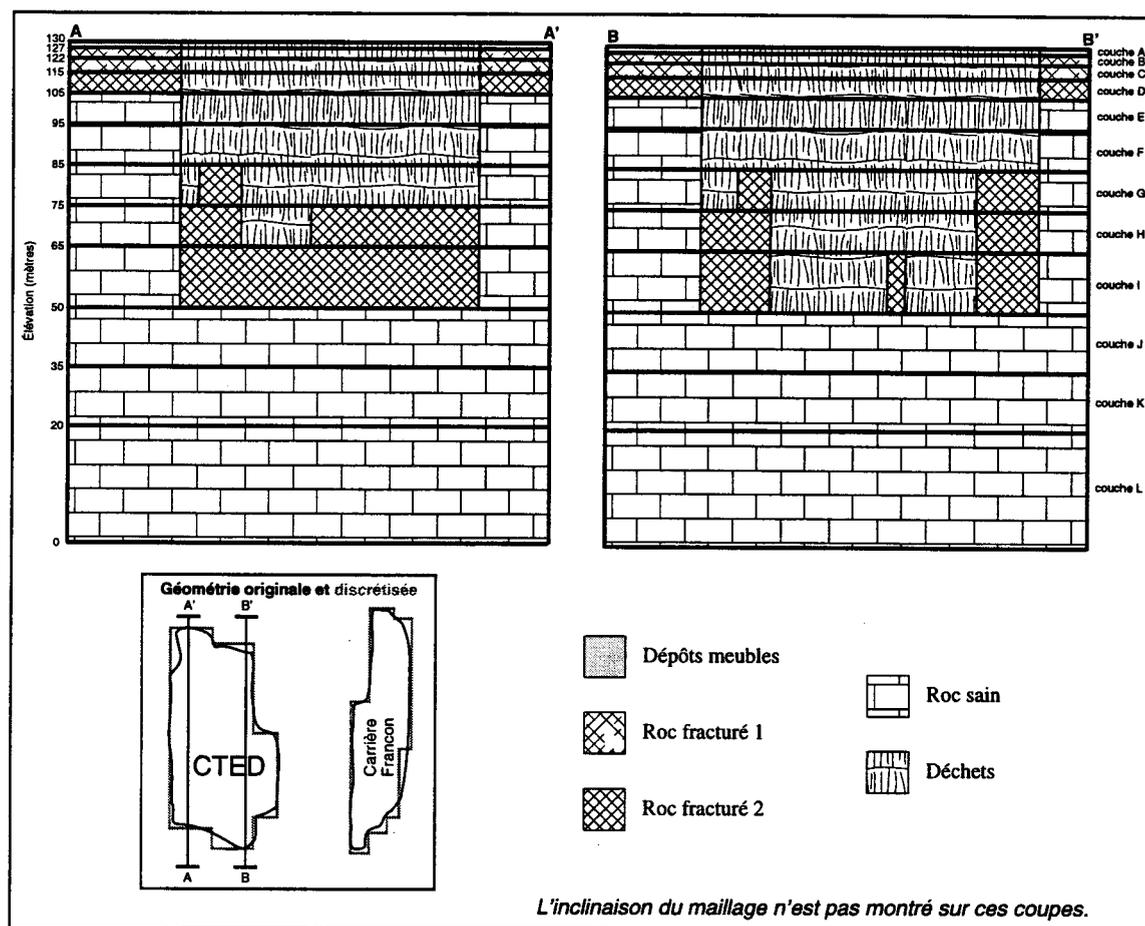


FIGURE 8.16: Coupe schématique montrant la discrétisation verticale au CTED.

8.2.2 Résultats de la calibration

Comme il a été mentionné au début de cette section, les résultats présentés dans cette partie sont pour un modèle local saturé. La calibration a été réalisée en se basant sur les niveaux des

puits de surveillance (PS) situés en périphérie du site. La figure 8.17 illustre une coupe montrant les niveaux piézométriques de surface et profonds mesurés dans ces puits. Nous observons que généralement le niveau de surface suit la topographie tandis que le niveau profond est très variable. Le niveau profond est caractéristique d'un milieu fracturé. Pour cette étude, seulement le niveau de surface est utilisé. Il est à remarquer que pour les puits PS-28 et PS-24, le niveau mesuré est supposé être celui profond mais ressemble d'avantage à un niveau de surface. Pour les phases futures de développement du modèle, il serait important de vérifier la piézométrie mesurée en périphérie du site afin de bien calibrer le modèle.

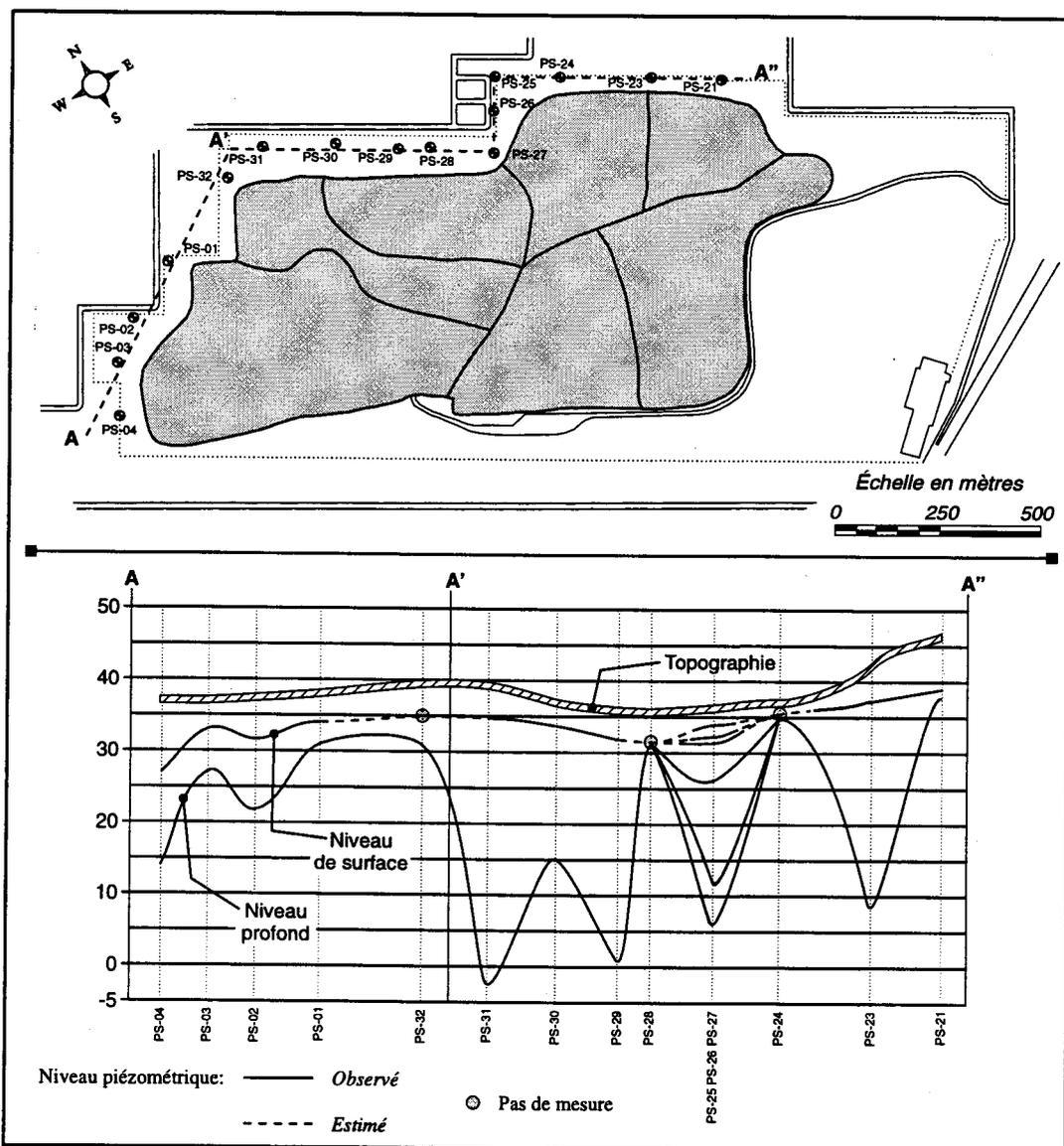


FIGURE 8.17: Coupe montrant les niveaux piézométriques de surface et profonds mesurés dans les puits de surveillance en périphérie du CTED.

Le tableau 8.9 présente les paramètres hydrologiques et hydrogéologiques calibrés pour le modèle local avec FRAC3DVS. Les principaux paramètres modifiés sont la conductivité hydraulique des déchets qui a été augmentée d'un facteur 10 et la conductivité hydraulique du roc qui a été diminuée d'un facteur 10. Toutefois, ces changements conservent les valeurs des conductivités hydrauliques calibrées dans la plage des valeurs probables présentées au chapitre 7. Nous avons également introduit deux valeurs intermédiaires de conductivité hydraulique du roc afin de simuler un roc plus fracturé en surface et sous le CTED. Ces valeurs se situent entre celles des dépôts meubles et du roc profond. Pour tous les matériaux considérés, sauf pour les déchets, un facteur d'anisotropie (K_H/K_V) de 5 a été introduit.

La recharge en périphérie du site a dû être diminuée à environ 70 mm/an tandis que la recharge au CTED a été fixée à 250 mm/an. En considérant les propriétés hydrauliques employées, la recharge ne pouvait être augmentée car le niveau piézométrique à la limite sud devenait beaucoup plus élevé que la surface du sol. La recharge et la conductivité hydraulique du roc sont les deux paramètres ayant le plus d'influence sur le système modélisé. Pour l'ensemble de ces paramètres, le taux de pompage au puits du CTED a été calibré à 2200 m³/j comparativement à un débit moyen observé de 2600 m³/j. Cependant, le niveau dans le puits est nettement supérieur à celui observé étant donné que l'on ne considère pas l'effet dans le modèle de désaturation autour du puits de pompage.

Le tableau 8.10 présente, à titre de référence, une série de paramètres numériques calculés par le modèle lors de la convergence. Le bilan de masse des flux est de l'ordre de 10⁻¹² et le résidu maximum de l'ordre 10⁻¹⁴. Le nombre d'itérations requis pour obtenir la convergence à partir d'une charge uniforme de 170 mètres est de 1093. Pour cette simulation, le temps requis est d'un peu plus de 9 minutes. Tout comme pour les simulations effectuées avec TOUGH2, la plate-forme utilisée est un IBM RS/6000 3CT avec 64 meg de mémoire vive. Il est intéressant de noter que pour un maillage 33 fois plus important que celui utilisé avec TOUGH2, la convergence est atteinte en un temps 7.3 fois plus rapide. Cependant, il faut comprendre que TOUGH2 solutionne un problème à saturation variable comparativement à un problème saturé pour FRAC3DVS. Cependant, la différence est quand même intéressante lorsqu'on désire concevoir des outils de prédiction et de contrôle efficaces et facilement utilisables.

TABLEAU 8.9: Paramètres calibrés pour le modèle local avec FRAC3DVS.
 [C/I: rapport valeur calibrée / valeur initiale]
 [Δ/I : rapport différence entre (valeur initiale - calibrée) / valeur initiale]

<i>Paramètre</i>		<i>Initiale</i>	<i>Calibrée</i>	<i>C/I</i>	Δ/I
Débit au puits de pompage	Q m ³ /j	2600	2200	0.85	0.15
Recharge au CTED	R ₁ mm/an	500	250	0.50	0.50
Recharge en périphérie	R ₂ mm/an	190	70	0.37	0.63
Conductivité des DM	K _H m/s	1.0E-05	1.0E-05	1.00	0.00
	K _V m/s	1.0E-05	2.0E-06	0.20	0.80
Facteur d'anisotropie			5		
Conductivité des déchets	K _H m/s	8.0E-06	8.0E-05	10.00	-9.00
	K _V m/s	8.0E-06	8.0E-05	10.00	-9.00
Facteur d'anisotropie			1		
Conductivité du roc	K _H m/s	1.0E-07	1.0E-08	0.10	0.90
	K _V m/s	1.0E-07	2.0E-09	0.02	0.98
Facteur d'anisotropie			5		
Conductivité du roc fracturé 1	K _H m/s		8.0E-06		
	K _V m/s		1.6E-06		
Facteur d'anisotropie			5		
Conductivité du roc fracturé 2	K _H m/s		6.0E-06		
	K _V m/s		1.2E-06		
Facteur d'anisotropie			5		

TABLEAU 8.10: Paramètres numériques avec FRAC3DVS.

Nombre d'itérations	1093
Temps CPU (s)	554.5
Charge initiale	170.0
Bilan (<i>inflow-outflow</i>)	-4.35E-12
Paramètres numériques	
<i>initial residual 2-norm</i>	2.34E-02
<i>initial residual max-norm</i>	2.11E-02
<i>final residual 2-norm</i>	5.31E-14
<i>residual 2-norm tolerance</i>	0.00E+00
<i>residual maximum norm</i>	1.65E-15
<i>residual max norm tolerance</i>	0.00E+00
<i>solution update max norm</i>	1.99E-12
<i>solution update tolerance</i>	1.00E-10
<i>update/solution ratio</i>	1.11E-14
<i>update/solution tolerance</i>	1.00E-10

La figure 8.18 illustre la position de la surface libre obtenue pour le modèle calibré. La condition limite de charge imposée en périphérie de la carrière Francon a été modifiée afin de mieux représenter les niveaux dans les puits. La charge initiale obtenue à partir du modèle en coupe réalisé avec TOUGH2 est d'environ +5 mètres comparativement à une charge calibrée de +15 mètres. Étant donné le manque d'observations disponibles, il est difficile de vérifier la validité de cette hypothèse. Il serait important de faire un relevé des différents niveaux de sortie d'eau à la paroi de la carrière Francon afin de déterminer la position réelle de la nappe d'eau à cet endroit.

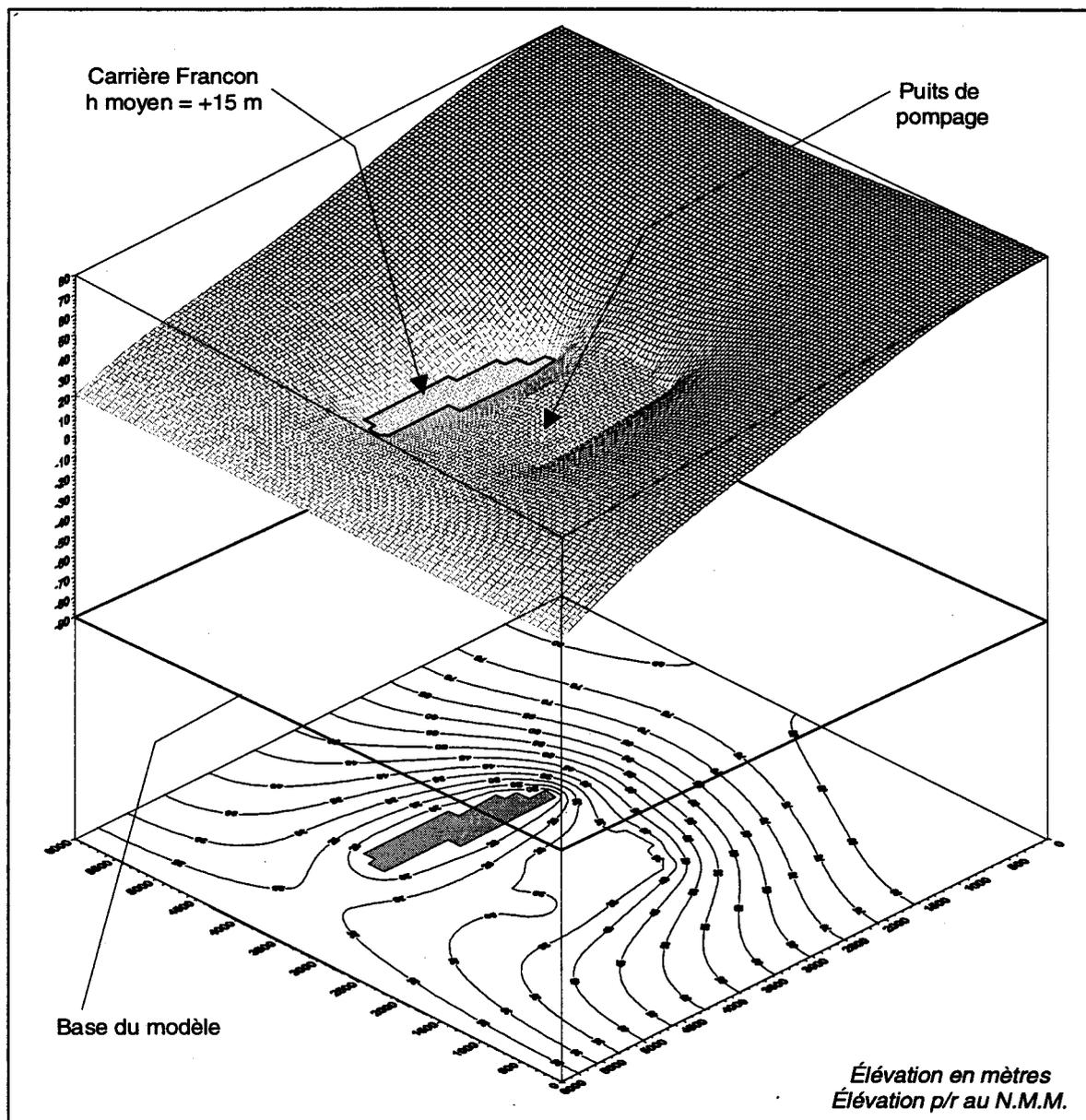


FIGURE 8.18: Piézométrie calibrée avec FRAC3DVS.

Les figures 8.19 et 8.20 illustrent la qualité de la calibration du modèle par rapport aux puits dans le roc. La figure 8.19 présente la même coupe que la figure 8.17 mais compare les niveaux piézométriques simulés et observés pour 15 puits. Le niveau simulé est généralement plus bas que le niveau observé et la forme des niveaux simulés est beaucoup moins variable que celle des niveaux observés. La figure 8.20 présente un graphique montrant la relation entre les niveaux piézométriques observés et simulés pour l'ensemble des puits situés en périphérie du site. La majorité des points se situe dans un intervalle de ± 5 mètres de la ligne de calibration parfaite, sauf pour deux puits (PS-07 et PS-11). Nous remarquons encore ici que les niveaux simulés sont généralement inférieurs aux niveaux observés.

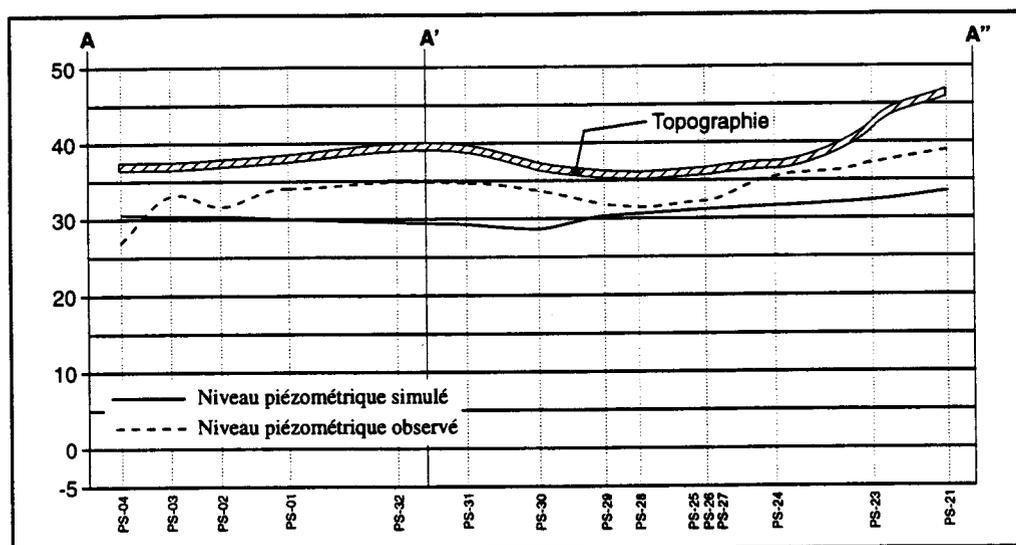


FIGURE 8.19: Comparaison entre le niveau piézométrique simulé et observé pour certains puits en périphérie du site (*même coupe que la figure 8.17*).

Le tableau 8.11 présente les valeurs des niveaux simulés et observés pour les puits de surveillance. L'erreur moyenne est de 0,60 mètres et l'écart-type de 6 mètres. La différence moyenne est de 2,5 mètres si l'on ne considère pas les deux puits dont la différence est élevée (PS-07 et PS-11). Comparativement aux autres puits, le niveau simulé dans ces deux puits est beaucoup plus élevé que celui observé. De plus, nous remarquons que ces puits sont situés du côté ouest du site et sont les seuls points de mesure de ce côté. Le tableau 8.12 présente les valeurs des niveaux simulés et observés pour les puits situés dans les déchets. La différence est généralement très élevée et l'erreur moyenne est de plus de 30 mètres. Nous remarquons que les différences entre les niveaux simulés et observés pour les puits 2B14 et 2B1 sont nettement inférieures aux autres puits. Ces puits sont situés près de la limite entre les déchets et le roc. L'erreur entre les niveaux

observés et simulés pour ces deux puits est du même ordre de grandeur que celle pour les puits au roc de cette zone.

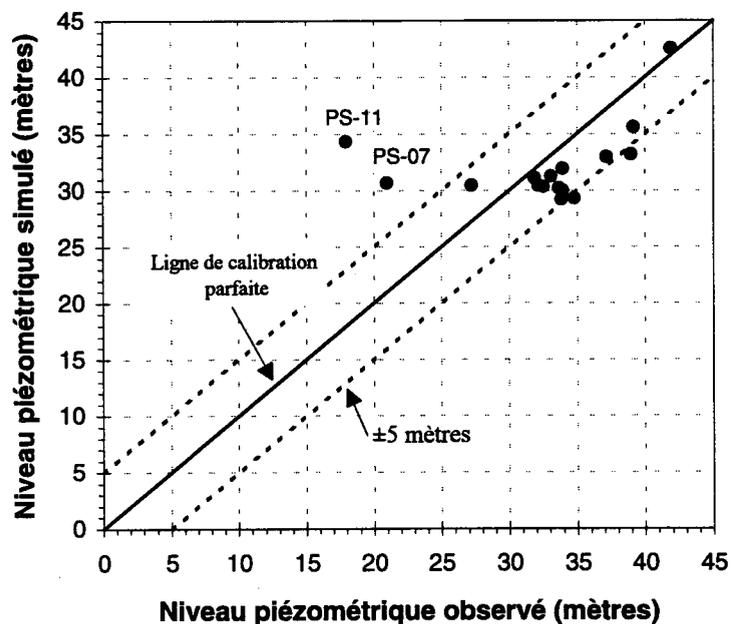


FIGURE 8.20: Calibration pour l'ensemble des puits de surveillance au roc.

TABLEAU 8.11: Différence entre les niveaux simulés et observés pour les puits de surveillance au roc.

Puits	Niveau piézométrique		Différence	Différence
	Observé	Simulé		
PS-01	33.94	30.01	3.93	3.93
PS-02	32.13	30.41	1.72	1.72
PS-03	33.64	30.27	3.37	3.37
PS-04	27.22	30.45	-3.23	-3.23
PS-07	21.01	30.71	-9.70	
PS-11	17.93	34.33	-16.40	
PS-18	41.91	42.55	-0.64	-0.64
PS-20	39.15	35.59	3.56	3.56
PS-21	38.93	33.21	5.72	5.72
PS-23	37.16	32.94	4.22	4.22
PS-25	33.94	31.90	2.04	2.04
PS-26	33.07	31.22	1.85	1.85
PS-27	31.88	31.18	0.70	0.70
PS-29	32.56	30.30	2.26	2.26
PS-30	33.86	29.21	4.65	4.65
PS-31	34.77	29.34	5.43	5.43
Erreur moyenne:			0.59	2.54
Écart-type:			5.92	2.44

TABLEAU 8.12: Différence entre les niveaux simulés et observés pour les puits dans les déchets.

<i>Puits</i>	<i>Niveau piézométrique</i>		<i>Différence</i>
	<i>Observé</i>	<i>Simulé</i>	
W-1	-24.98	29.25	-54.23
SP-1	-33.05	26.41	-59.46
W-3	-17.54	30.13	-47.67
W-4	-14.97	31.16	-46.13
W-5	7.67	32.99	-25.32
W-6	-0.50	32.58	-33.08
W-7	10.40	33.96	-23.56
2B14	28.06	32.79	-4.73
2B1	31.02	33.16	-2.14
1API0	16.97	34.19	-17.22
Erreur moyenne:		-31.36	
Écart-type:		20.17	

Cette différence importante entre les niveaux piézométriques observés et simulés dans les déchets peut être expliquée de deux façons. Premièrement, étant donné que l'on considère un milieu saturé et non pas à saturation variable, l'effet du puits dans les déchets est faible. De plus, étant donné le taux de recharge et la conductivité hydraulique élevée des déchets, le cône de rabattement produit par le puits de pompage est petit. Cette simplification peut entraîner une erreur de plusieurs mètres du niveau de la nappe dans les déchets. Deuxièmement, les niveaux mesurés dans les puits de biogaz ne représentent pas nécessairement le niveau moyen de la nappe dans les déchets. En effet, en considérant la conception des puits de biogaz qui servent de puits d'observation des niveaux d'eau, il est concevable qu'il existe des effets d'emmagasinement et d'écoulement préférentiel autour des puits de biogaz. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons conçu un modèle en coupe simulant deux puits de biogaz de 1 mètre de diamètre avec 3 mètres de gravier autour et une couche de gravier de 2 mètres à la base. Une charge constante est imposée à une extrémité et un puits de pompage est placé à l'autre extrémité. Le taux de pompage est tel que le gradient imposé est de 20 mètres, ce qui est représentatif du type de gradient présent entre certains piézomètres près du puits de pompage dans les déchets. Les conductivités hydrauliques utilisées et le maillage employé sont présentés à la figure 8.21a. Une recharge de 200 mm/an est appliquée. La figure 8.21b présente l'effet transitoire du pompage sur les niveaux mesurés dans les puits de biogaz. Une différence de plus de 10 mètres peut être observée entre le niveau dans les déchets et le niveau mesuré dans le puits. Un tel effet ne peut être représenté avec le type de

modèle utilisé et la résolution employée. Ces phénomènes devront être approfondis lors des développements futurs du modèle d'écoulement. Par exemple, il serait facilement envisageable d'utiliser une méthode géophysique simple comme le géoradar afin de déterminer la position de la surface libre. Suite à cette simulation, nous devons conclure que l'utilisation des puits de biogaz pour mesurer les niveaux d'eau n'est possiblement pas satisfaisante pour déterminer la position réelle de la nappe dans les déchets. Des infrastructures alternatives ou une méthode de correction devront être conçues afin de déterminer adéquatement la piézométrie dans les déchets.

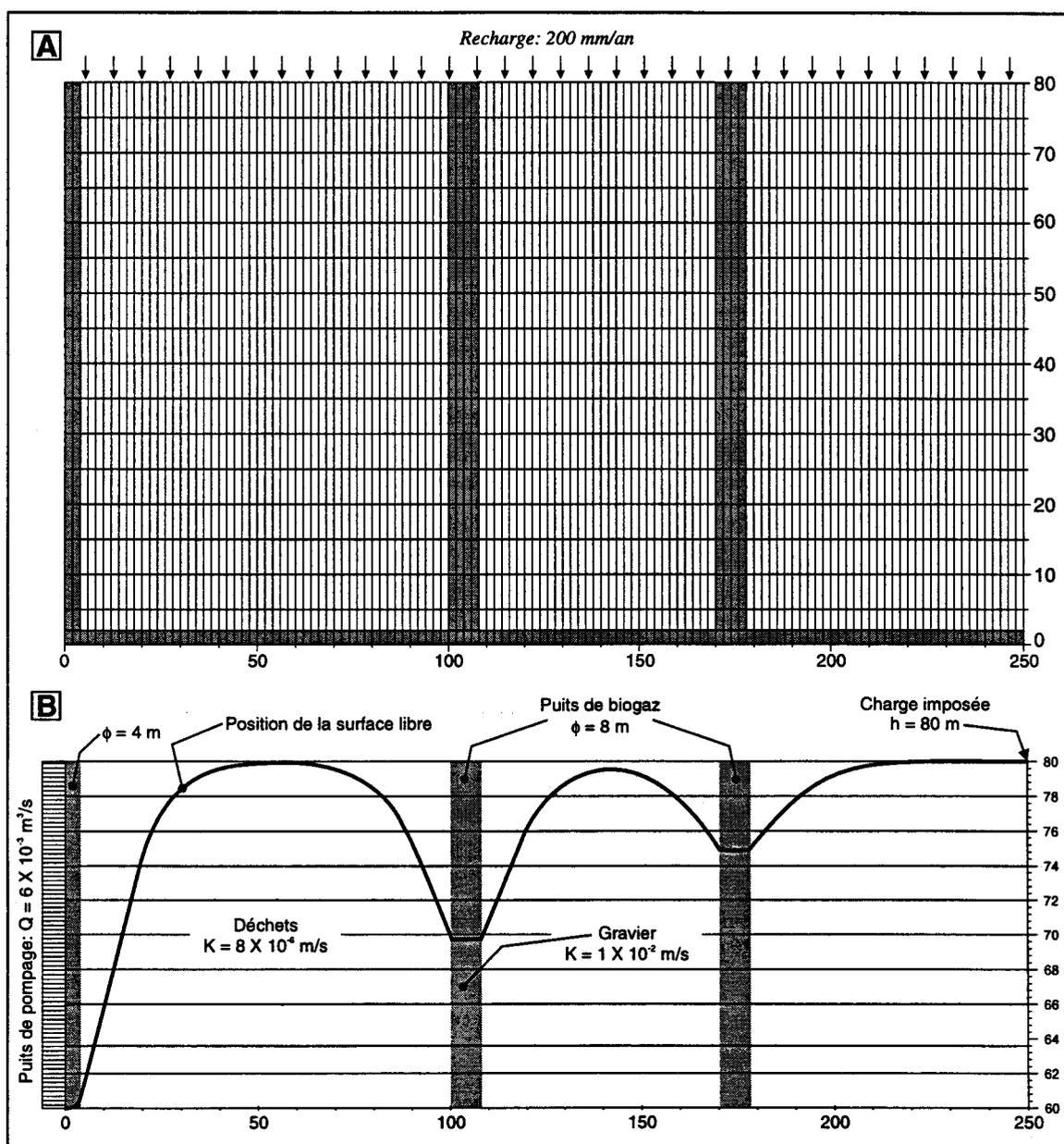


FIGURE 8.21: Modèle en coupe montrant l'effet transitoire du pompage dans les déchets sur les niveaux d'eau mesurés dans les puits de biogaz.

8.2.3 Lignes de courant

À partir des charges hydrauliques obtenues par modélisation avec FRAC3DVS, il est possible de représenter les directions d'écoulement à l'aide du logiciel graphique TECPLOT (*Amtec Engineering, inc., 1994*). La figure 8.22 présente les lignes de courant pour le modèle local saturé. Nous observons sur cette figure que l'effet combiné du puits de pompage au CTED et de la carrière Francon est très grand. La concentration des lignes de courant permet de déterminer les zones d'appel pour le puits et la carrière Francon. À l'aide de cette représentation, il est également possible de vérifier si les dimensions du domaine modélisé sont suffisantes. Suite à l'analyse des résultats, il est suggéré que les limites est et ouest soient éloignées afin de simuler l'écoulement régional loin de l'effet des carrières. Il est également suggéré de faire coïncider la limite nord avec la rivière des Prairies afin de mieux représenter le système aquifère et de ne pas fausser l'effet des pompages. Nous remarquons également sur cette figure que la zone d'appel du puits de pompage au CTED coïncide avec la bordure est du CTED. Cela implique qu'il est envisageable que des fuites se produisent vers l'extérieur du site étant donné les gradients hydrauliques simulés.

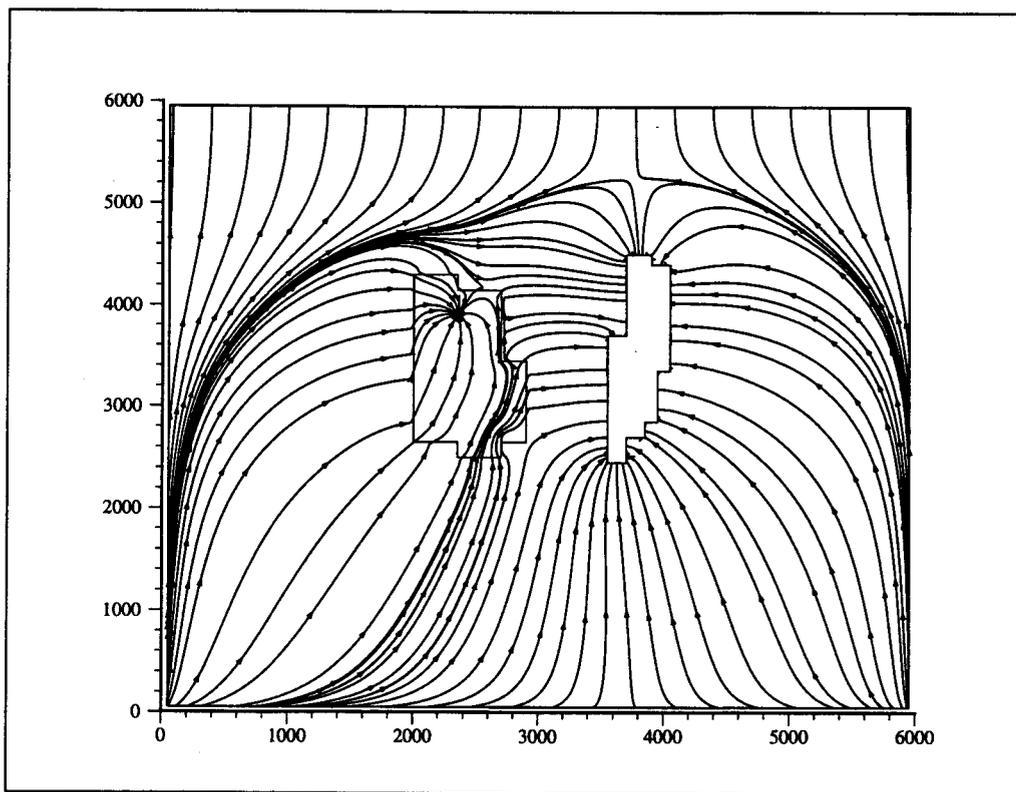


FIGURE 8.22: Lignes d'écoulement pour le modèle local (résultats de FRAC3DVS).

À l'aide d'une telle représentation, il est possible de déterminer la position de la ligne de partage des eaux entre le CTED et la carrière Francon. En simulant différents scénarios de contrôle hydraulique du lixiviat, il sera possible de vérifier leur effet sur la position de la ligne de partage des eaux. Le but des méthodes de contrôle du lixiviat est d'obtenir une ligne de partage des eaux qui se situe à l'extérieur du site, de telle sorte que toute fuite vers l'extérieur du site soit impossible. Cependant, pour réaliser ce type d'analyse, un modèle à saturation variable très bien calibré devra être disponible afin de tenir compte des variations des propriétés hydrauliques du roc générées par la présence de fractures (figure 8.17) et l'effet des déchets.

En analysant la figure 8.22, nous pouvons conclure que, si cette représentation est proche de l'écoulement réel, toute fuite vers l'extérieur du site du CTED se retrouve drainé à la carrière Francon. D'après les résultats de modélisation, l'effet drainant de Francon est tel que la majorité de l'écoulement se retrouve vers la carrière. L'effet de Francon peut servir de contrôle hydraulique pour la gestion du lixiviat. En effet, si une fuite de lixiviat se produit au CTED, la contamination sera dirigée vers Francon et le volume d'eau contenu entre le CTED et Francon servira de dilution et d'atténuation de la contamination. Cependant, dans un pareil cas, il serait alors nécessaire de déclarer la zone entre les deux carrières impropre à la consommation. Afin de déterminer l'efficacité d'une telle méthode, il serait alors souhaitable de vérifier la qualité de l'eau à sa sortie dans la paroi de la carrière Francon. Un tel scénario de contrôle n'a pas encore été proposé et serait peut être une avenue intéressante du point de vue économique tout en étant sécuritaire pour l'environnement.

8.2.4 Autres simulations

Plusieurs autres simulations ont été réalisées à l'aide de FRAC3DVS afin de vérifier la sensibilité du modèle au changement de certains paramètres. Par exemple, nous avons analysé l'effet de la topographie du fond du CTED. Au lieu de supposer une topographie variable, nous avons simulé une topographie uniforme. La figure 8.23 présente la piézométrie obtenue. La figure K.1, présentée à l'annexe K, montre, pour fins de comparaison, la piézométrie obtenue pour le cas de base présenté précédemment. Un total de 371 itérations ont été nécessaires pour faire converger ce modèle à partir d'une charge variable obtenue du modèle local. La durée de la simulation est de 3.1 minutes. Le bilan des flux de masse est de l'ordre de 10^{-13} .

Cette piézométrie est similaire à celle obtenue avec une topographie variable, sauf pour les contours près de la ligne de partage des eaux. Le niveau d'eau monte plus haut que la topographie du sol près de la limite sud. Ce comportement est possiblement dû au fait que la partie sous le CTED est remplacée par du roc de conductivité faible qui réduit donc le flux pouvant passer sous la carrière et fait augmenter le niveau près de la limite sud.

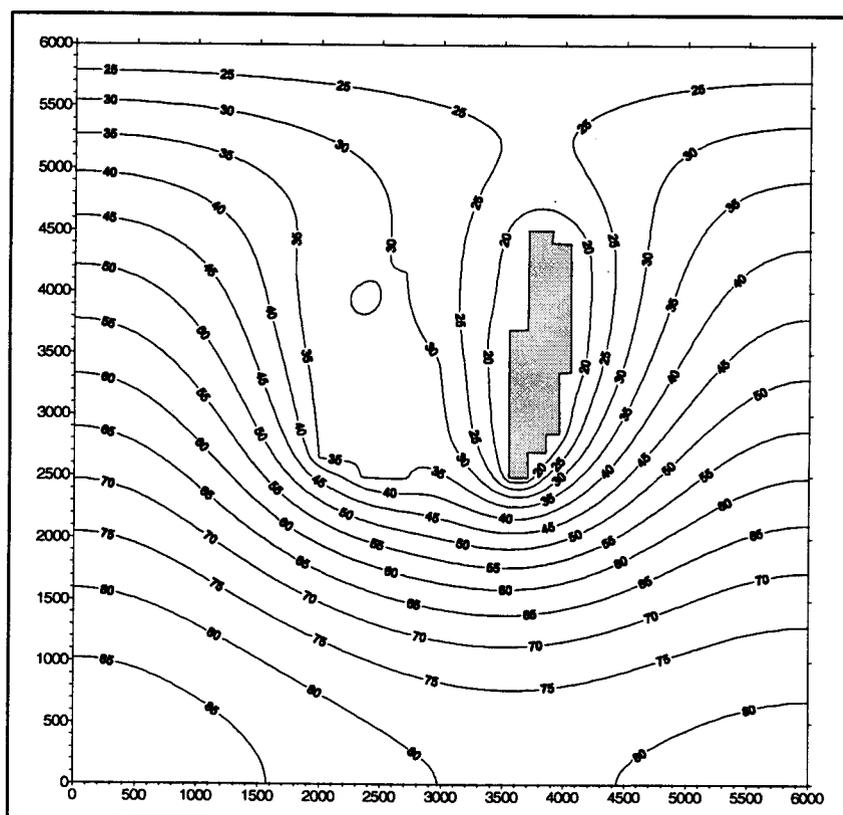


FIGURE 8.23: Piézométrie obtenue en négligeant la topographie variable du fond du CTED.

8.2.5 Simulation des zones fracturées

Un des buts de cette étude est de vérifier certaines hypothèses concernant l'étanchéité du site. Conceptuellement, cela se résume à vérifier l'effet des zones fracturées, donc plus perméables, sur l'écoulement local. Certaines de ces zones hautement fracturées se trouvent entre le CTED et la carrière Francon. Il est alors possible qu'il se produise des fuites de lixiviat vers l'extérieur du site. L'objectif général du projet est de simuler les différents scénarios proposés pour le contrôle hydraulique et la gestion du lixiviat au CTED (Lefebvre et al., 1995). Dans un premier temps,

cette étude présente un aperçu des résultats et analyses possibles afin de parvenir à cet objectif. Ultérieurement, le modèle d'écoulement sera amélioré et pourra alors être utilisé comme outil de gestion et de prédiction. Cette section présente les résultats obtenus pour trois cas simples de zones fracturées. Étant donné que peu d'informations sont présentement disponibles sur la fracturation, une bonne caractérisation du milieu fracturé sera nécessaire pour atteindre l'objectif général du projet de modélisation et d'optimisation.

La figure 8.24 présente de façon schématique les trois cas simulés. Le cas A est composé d'un seul plan fracturé situé à l'élévation -15 mètres. Cette élévation est choisie afin de simuler une zone plus perméable située en profondeur. Le plancher de l'excavation du CTED se situe à l'élévation 40 mètres. Le cas B est similaire au cas A sauf que deux plans fracturés sont simulés. L'élévation de ces plans est de -25 et -5 mètres. Finalement, le cas C utilise une série de *tubes* représentant des zones fracturées. L'élévation des tubes varie de -5 à -15 mètres, et 15 zones sont ainsi simulées. La capacité de FRAC3DVS pour représenter des fractures discrètement est employée afin de simuler ces plans fracturés. L'épaisseur des plans est fixée à 0,10 mètre et leur conductivité hydraulique est de 1×10^{-3} m/s. En fait, nous représentons ainsi des zones de plus grande perméabilité au travers du roc. Le même modèle conceptuel et les mêmes propriétés sont utilisés que pour le cas de base présenté à la section 8.2.2. La charge initiale est la piézométrie obtenue par la calibration du modèle de base.

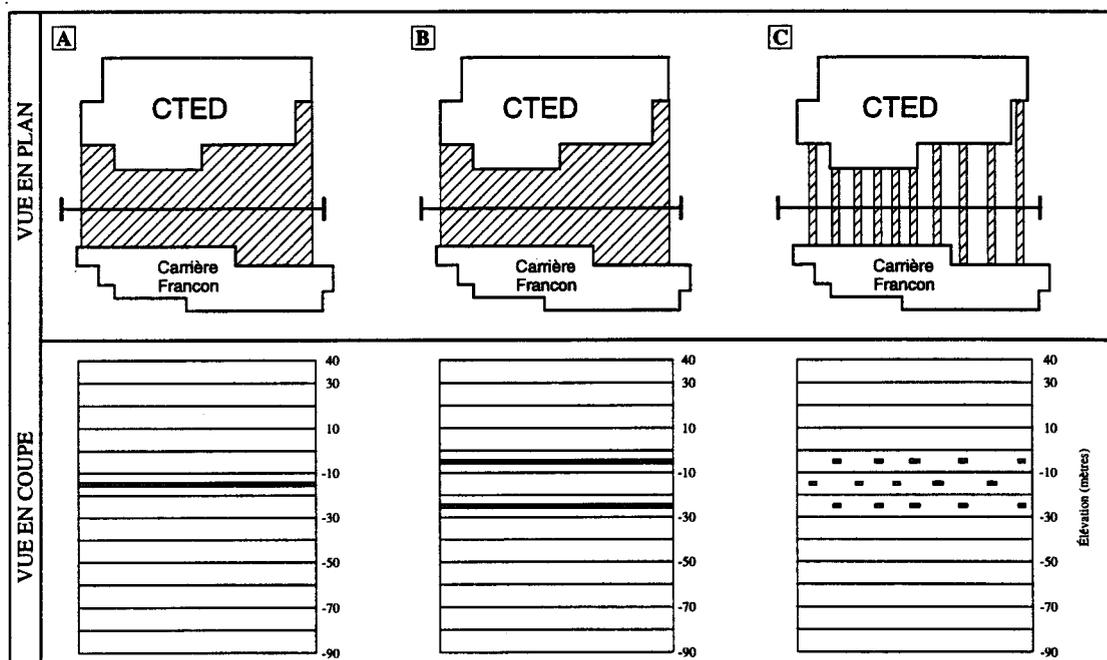


FIGURE 8.24: Vues en plan et en coupe montrant l'emplacement des zones plus perméables entre le CTED et la carrière Francon utilisées pour la simulation de l'effet potentiel de la fracturation.

Nous présentons à l'annexe K les résultats détaillés obtenus pour les trois cas. Les figures K.2, K.3 et K.4 illustrent la piézométrie obtenue en considérant les différentes zones fracturées. Le tableau 8.13 montre les temps requis pour obtenir la convergence et le nombre d'itérations nécessaire. Ces paramètres sont tous du même ordre de grandeur, peu importe le cas simulé.

TABLEAU 8.13: Temps de calcul et nombre d'itération pour les trois cas de fracturation.

<i>1 PLAN FRACTURE</i>		<i>2 PLANS FRACTURÉS</i>		<i>15 ZONES FRACTURÉES</i>	
Nombre d'itérations	389	Nombre d'itérations	340	Nombre d'itérations	373
Temps CPU (s)	197.5	Temps CPU (s)	172.7	Temps CPU (s)	189.4
Charge initiale	variable	Charge initiale	variable	Charge initiale	variable
Bilan (<i>inflow-outflow</i>)	-5.84E-13	Bilan (<i>inflow-outflow</i>)	-6.78E-11	Bilan (<i>inflow-outflow</i>)	-2.41E-12

Les piézométries simulées sont généralement similaires à celle obtenue pour le cas de référence (modélisation locale sans zones fracturées). Les principales différences se retrouvent autour du puits de pompage. Pour l'instant, il est difficile d'interpréter les différences entre les trois cas. Cependant, nous observons une baisse générale du niveau piézométrique autour du CTED d'environ 5 mètres. Le tableau 8.14 résume les niveaux mesurés et simulés pour les piézomètres en périphérie du site. L'erreur moyenne varie de 2,1 mètres pour le cas des 15 zones fracturées à 6,1 mètres pour le cas des deux plans fracturés, comparativement à une erreur moyenne de 0,6 mètre pour le cas de base.

La figure 8.25 montre les directions d'écoulement pour le cas des 15 tubes représentant des zones de plus grande perméabilité. Cette représentation des lignes de courant est un plan situé à une élévation au milieu du CTED et considère seulement les vitesses en *X* et *Y*. L'écoulement général est similaire à celui simulé pour le cas de base sauf entre le CTED et la carrière Francon. Dans cette zone, certaines lignes de courant se concentrent vers les tubes plus perméables. Ce comportement reflète bien le fait qu'il y a un écoulement préférentiel dans ces zones. Ce type de représentation sera utile pour la comparaison des différents scénarios de contrôle et de gestion du lixiviat.

TABLEAU 8.14: Différence entre les niveaux observés et simulés pour les trois cas de fracturation comparativement au cas de base.

Puits	Observé	CAS DE BASE		1 PLAN FRACTURE		2 PLANS FRACTURES		15 ZONES	
		Simulé	Différence	Simulé	Différence	Simulé	Différence	Simulé	Différence
PS-01	33.94	30.01	3.93	27.01	6.93	24.89	9.05	28.77	5.17
PS-02	32.13	30.41	1.72	27.48	4.65	25.42	6.71	29.18	2.95
PS-03	33.64	30.27	3.37	27.12	6.52	24.93	8.71	28.93	4.71
PS-04	27.22	30.45	-3.23	27.27	-0.05	25.09	2.13	29.07	-1.85
PS-07	21.01	30.71	-9.70	27.48	-6.47	25.25	-4.24	29.33	-8.32
PS-11	17.93	34.33	-16.40	30.37	-12.44	28.09	-10.16	32.25	-14.32
PS-18	41.91	42.55	-0.64	39.28	2.63	37.39	4.52	40.81	1.10
PS-20	39.15	35.59	3.56	32.06	7.09	29.97	9.18	33.75	5.40
PS-21	38.93	33.21	5.72	29.54	9.39	27.21	11.72	31.47	7.46
PS-23	37.16	32.94	4.22	29.30	7.86	26.95	10.21	31.22	5.94
PS-25	33.94	31.90	2.04	28.35	5.59	26.01	7.93	30.30	3.64
PS-26	33.07	31.22	1.85	27.88	5.19	25.66	7.41	29.73	3.34
PS-27	31.88	31.18	0.70	27.87	4.01	25.62	6.26	29.72	2.16
PS-29	32.56	30.30	2.26	27.19	5.37	25.01	7.55	28.99	3.57
PS-30	33.86	29.21	4.65	26.38	7.48	24.37	9.49	28.04	5.82
PS-31	34.77	29.34	5.43	26.47	8.30	24.41	10.36	28.17	6.60
Erreur moyenne:			0.59		3.88		6.05		2.09
Écart-type:			5.92		5.79		5.77		5.81

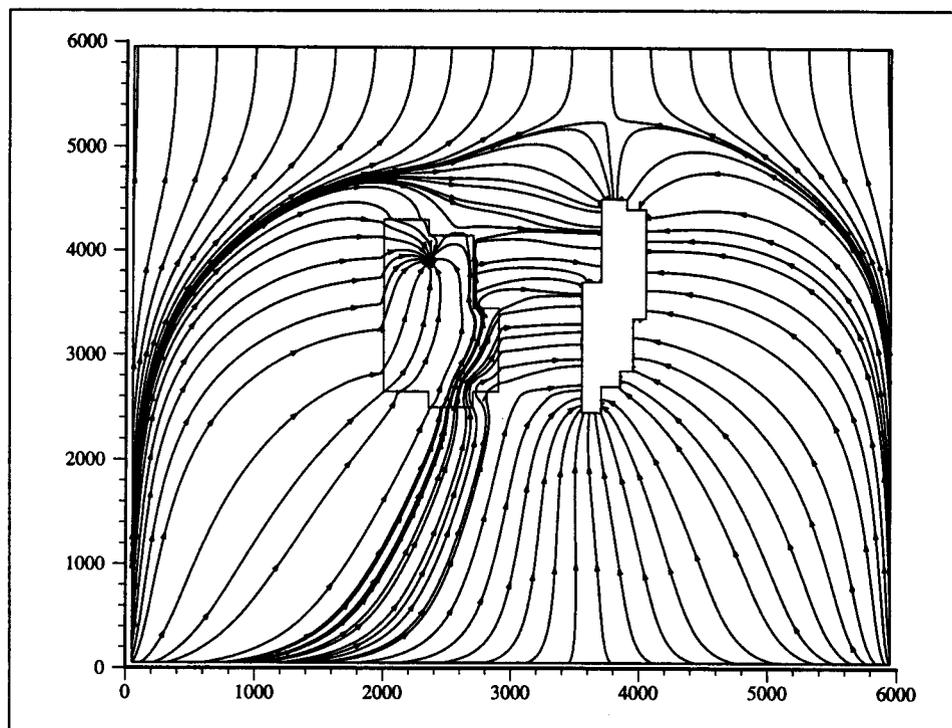


FIGURE 8.25: Lignes d'écoulement pour le cas des tubes de plus grande perméabilité (représentation en plan de l'écoulement – cas C de la figure 8.24).

Afin de quantifier l'effet des plans fracturés, nous proposons une méthode de calcul qui pourrait être appliquée. Nous présentons ici un exemple de représentation et d'analyse avec les résultats obtenus pour les trois cas de fracturation présentés précédemment. Cette méthode repose sur le calcul des flux passant à travers une section. Nous avons considéré trois sections situées respectivement à l'interface déchets-roc au CTED, à mi-chemin entre le CTED et la carrière Francon et finalement, à la paroi de Francon. L'emplacement de ces sections est présenté à la figure 8.26.

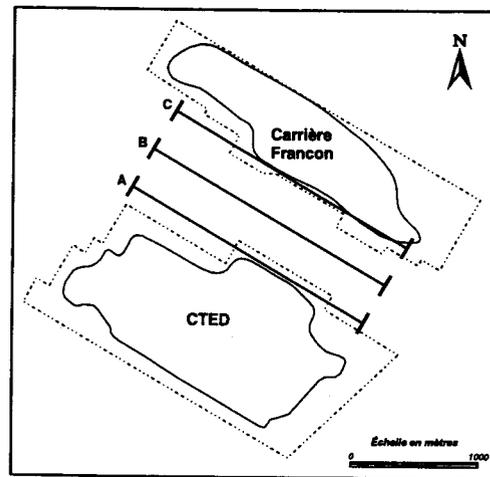


FIGURE 8.26: Emplacement des coupes.

Les figures K.5 à K.8 présentées à l'annexe K illustrent la vitesse de l'eau passant à travers les différentes sections pour les trois cas de fracturation et le cas de référence. Ces vitesses sont exprimées sous forme logarithmique et sont toutes dirigées vers la carrière Francon (*par exemple, une valeur de -10,0 correspond à une vitesse de 1×10^{-10} m/s vers Francon*). La direction d'écoulement vers Francon est reliée au fait que la charge dans les déchets est plus haute que celle imposée à Francon. En fait, il devrait possiblement y avoir une ligne de partage des eaux entre le CTED et Francon dans les couches superficielles.

Les sections présentées à l'annexe K correspondent au roc situé en dessous de l'élévation +30 mètres. La figure K.5 présente la distribution de la vitesse pour le cas de base. Nous observons sur la section près du CTED (*figure K.5a*) une vitesse plus élevée dans la partie éloignée du puits de pompage. Sur les autres figures, il est possible de comparer l'effet des différents types de fracturation sur la distribution des vitesses. Encore ici, l'interprétation de ces sections est difficile mais il est clair que l'effet des différentes zones fracturées peut être représenté par cette

méthode. Nous sommes en mesure de représenter les flux sortant ou entrant au CTED. Dans ce cas-ci, les vitesses sont toutes orientées vers la carrière Francon étant donné la piézométrie simulée. Lorsque le modèle d'écoulement sera amélioré, il sera possible de vérifier l'effet des scénarios de contrôle du lixiviat sur les flux passant à travers différentes sections situées entre le CTED et Francon.

Le tableau 8.15 présente les valeurs des vitesses et flux moyens obtenus pour les différentes sections. Ce tableau compare les valeurs des vitesses moyennes obtenues à partir des résultats de modélisation et des vitesses obtenues par interpolation. Le krigeage des vitesses a été utilisé pour interpoler celles-ci sur un maillage régulier ne tenant pas compte de l'inclinaison des couches et du maillage original. La différence entre les deux méthodes est négligeable. Nous avons également calculé un flux moyen passant à travers la section en considérant une porosité de 5%. Les valeurs des flux calculés par l'une ou l'autre des méthodes sont équivalentes. Il est important de comprendre que les flux calculés sont directement liés à la différence de charge entre la carrière Francon et le CTED. Dans notre cas, l'écoulement vers le CTED entre ce dernier et Francon n'est pas représenté par le modèle. Une fois le modèle d'écoulement calibré adéquatement, il sera possible de quantifier les flux entrant et sortant du CTED et de les comparer avec les calculs faits par Rouillard et Bodineau (1995) et Blais (1995).

TABLEAU 8.15: Calcul des vitesses moyennes et flux moyen pour chaque section.

	<i>Coupe</i>	Valeurs simulées		Valeurs interpolées	
		<i>Vitesse moy.</i>	<i>Flux moy.</i>	<i>Vitesse moy.</i>	<i>Flux moy.</i>
		<i>m/s</i>	<i>m³/s</i>	<i>m/s</i>	<i>m³/s</i>
<i>Cas de base</i>	CTED	1.435E-10	3.218E-05	1.439E-10	3.367E-05
	Milieu	2.090E-10	4.687E-05	2.185E-10	5.113E-05
	Francon	2.617E-10	5.869E-05	2.659E-10	6.222E-05
<i>1 plan fracturé</i>	CTED	1.354E-10	3.037E-05	1.378E-10	3.224E-05
	Milieu	1.646E-10	3.690E-05	1.712E-10	4.007E-05
	Francon	1.743E-10	3.910E-05	1.759E-10	4.116E-05
<i>2 plans fracturés</i>	CTED	1.134E-10	2.542E-05	1.161E-10	2.716E-05
	Milieu	1.354E-10	3.036E-05	1.413E-10	3.307E-05
	Francon	1.385E-10	3.105E-05	1.392E-10	3.257E-05
<i>Zones fracturées</i>	CTED	1.497E-10	3.357E-05	1.530E-10	3.580E-05
	Milieu	1.846E-10	4.140E-05	1.921E-10	4.495E-05
	Francon	2.033E-10	4.558E-05	2.029E-10	4.748E-05

8.3 DISCUSSION

Suite aux résultats du modèle régional présentés dans la première partie de notre étude, il a été possible de déterminer les dimensions et la localisation du domaine modélisé pour le modèle d'écoulement local au CTED. En plus des conditions limites déterminées à partir du modèle régional, les conditions de saturation et de charge à la paroi de la carrière Francon ont été simulées à l'aide d'un modèle en coupe. Ce modèle, développé avec TOUGH2, permet la représentation des processus d'écoulement en bordure de la carrière. Afin de mieux calibrer le modèle, il est proposé de faire un relevé des sorties d'eau et des zones fracturées à la face de la carrière. Le relevé des sources d'eau permettrait de vérifier l'élévation de la nappe en bordure de la carrière. Certaines mesures piézométriques pourraient également aider à la caractérisation des niveaux d'eau en périphérie de Francon. La définition des conditions d'écoulement à Francon est importante car cette dernière contrôle la majorité de l'écoulement local autour du CTED.

À l'aide de ces conditions limites, nous avons développé un modèle tridimensionnel local avec TOUGH2. Étant donné la complexité et la robustesse numérique de ce modèle, les ressources informatiques requises sont énormes. Dans le cadre de cette étude, un modèle de résolution moyenne a été utilisé pour représenter l'écoulement local. À l'aide de ce modèle, il est possible de représenter les patrons généraux d'écoulement et les conditions de saturation variable dans les déchets. Plusieurs développements sont encore nécessaires afin d'utiliser TOUGH2 pour représenter les processus d'écoulement locaux. Les principaux points à améliorer sont la représentation des conditions limites en périphérie de Francon et à la limite sud ainsi que l'utilisation d'un maillage de plus haute résolution. Pour réaliser cette dernière amélioration, des ressources informatiques plus puissantes devront être utilisées.

Afin de palier à la faible résolution utilisée avec TOUGH2, nous avons utilisé un autre modèle. FRAC3DVS est utilisé afin de représenter les processus locaux d'écoulement avec une plus grande résolution. À l'aide de ce modèle, il n'a pas été possible de représenter les conditions de saturation variable à cause de certains problèmes de convergence numérique liés à la plus faible robustesse de la solution numérique employée. Cependant, FRAC3DVS a été utilisé pour des conditions saturées et il a été possible d'obtenir une bonne calibration des puits situés dans le roc en périphérie du CTED. De plus, il a été possible de représenter les directions d'écoulement et d'analyser certaines hypothèses concernant l'étanchéité du site. La simulation de zones perméables

représentant l'effet potentiel des zones fracturées explore les avenues possibles pour la description plus complète des processus affectant l'écoulement.

Suite à ces résultats, nous devons conclure que l'utilisation d'un modèle à saturation variable est primordiale afin de représenter tous les processus d'écoulement présent au CTED. L'effet de désaturation provoqué par le puits de pompage dans les déchets et par le pompage à Francon sont des facteurs importants dans les processus d'échange entre la carrière Francon et la partie nord du CTED. Des mesures piézométriques prises à plusieurs périodes de l'année et une caractérisation des propriétés hydrogéologiques plus exhaustive est nécessaire afin de mieux simuler l'écoulement local. De plus, le milieu fracturé devra être caractérisé de façon plus complète afin de pouvoir représenter adéquatement l'écoulement et les échanges locaux.

CHAPITRE 9

CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Dans ce chapitre, nous reprenons les principales conclusions et recommandations formulées aux chapitres 5 et 8. De plus, nous proposons les avenues possibles pour la représentation des différents processus d'écoulement au CTED et nous identifions les données de caractérisation manquantes, nécessaires afin de mieux simuler les conditions physiques retrouvées au CTED.

Suite à la modélisation régionale de l'écoulement, nous possédons maintenant un outil capable de prédire raisonnablement le niveau de la nappe pour l'ensemble de l'île de Montréal. Le modèle régional a également permis de déterminer un bilan détaillé de l'hydrologie de l'île. Ce bilan sert à déterminer la distribution des précipitations, du ruissellement et de l'évapotranspiration sur l'île de Montréal. Les précipitations moyennes sont de l'ordre de 1000 mm/an; le ruissellement moyen est de l'ordre de 550 mm/an et l'évapotranspiration moyenne d'environ 600 mm/an. Le coefficient de ruissellement est déterminé à l'aide d'une relation empirique que nous avons développé. Le coefficient de ruissellement est relié à la densité de population par une équation empirique et, à l'aide de cette relation, nous obtenons un coefficient de ruissellement moyen de 55%. L'évapotranspiration est corrigée pour tenir compte de la nature hétérogène du sol urbain à l'aide d'un facteur de correction déterminé à partir d'une relation entre la superficie imperméable et la densité de population. Le facteur de correction moyen est de l'ordre de 45% et

l'évapotranspiration corrigée moyenne correspondante est de 270 mm/an. Une étude des différentes formes de pompage présentes sur l'île a également été réalisée et intégrée à ce bilan. Les pompages considérés sont ceux des principales carrières actives sur l'île, le métro de la STCUM, les puits industriels, commerciaux ainsi que résidentiels. Une lame d'eau équivalente de 148 mm/an a été considérée comme étant la quantité d'eau prélevée par les différentes sources de pompage. Nous pouvons alors, à l'aide de la distribution de ces paramètres, déterminer une distribution de la recharge nette sur l'aquifère. Une valeur moyenne de 190 mm/an est considérée comme étant caractéristique de la recharge des aquifères sur l'île de Montréal.

Ce type de bilan et de calcul pourrait facilement être implanté dans un système d'information géographique (SIG). Une telle approche permettrait une meilleure représentation et une manipulation plus facile des différents paramètres. À l'aide des distributions des différents paramètres, le bilan hydrologique pour une sous-région de l'île pourrait alors être aisément calculé. De plus, à l'aide d'un tel outil, il serait facilement possible de voir rapidement l'effet d'un paramètre sur la distribution de la recharge ou d'observer la relation entre les grandes infrastructures urbaines et la distribution de la recharge. L'utilisation de SIG peut également servir à raffiner la définition de la relation entre le coefficient de ruissellement et la densité de population et à déterminer les zones de ruissellement. Finalement, l'utilisation d'images satellites pourrait aider à la définition des zones plus ou moins propices pour le ruissellement ou l'évapotranspiration. Beaucoup de développement et d'attention peuvent encore être accordés à la définition de la distribution de la recharge sur l'île de Montréal. Ce paramètre est l'un des plus sensibles pour la calibration du modèle numérique d'écoulement régional.

Le manque de données sur la distribution de la conductivité hydraulique demeure le point faible du modèle. Cependant, une attention particulière a été apportée à l'assignation de ce paramètre. La convergence du modèle numérique est sensible aux conductivités hydrauliques déterminées. Les conductivités hydrauliques de la couche 2 et 3 semblent les plus sensibles tandis que la couche 1 semble trop hétérogène pour que l'on puisse déterminer une tendance. Une mesure possible afin de réduire la complexité des distributions des conductivités hydrauliques serait de regrouper les valeurs de K pour la couche 1 en plusieurs groupes de géométries définies. Cette simplification devrait tenir compte de la distribution des dépôts meubles mais également de leur succession verticale. Une amélioration est souhaitée dans la définition des stratigraphies et dans la caractérisation de propriétés hydrogéologiques des dépôts meubles afin de mieux représenter le

milieu physique constituant les premiers mètres de l'île. Cette couche est importante car elle contient généralement l'eau souterraine et est la plus propice aux contaminations.

Une autre limitation du modèle régional provient de l'utilisation d'une représentation discrète et transformée du niveau piézométrique dérivée de Bériault et Simard (1978). Le niveau de référence n'est pas jugé précis. Même si nous supposons que les niveaux sont demeurés sensiblement les mêmes, nous pouvons mettre en doute l'exactitude des contours de base étant donné que l'on ne connaît même pas, par exemple, les points de contrôle ni les critères utilisés lors du traçage des courbes piézométriques. Par ailleurs, même à l'aide de la banque de données de la Ville de Montréal (Robillard, 1995), il n'a pas été possible de construire une carte piézométrique représentative. Cependant, l'utilisation de ces données pourrait servir à améliorer la définition de la stratigraphie régionale. Finalement, une meilleure caractérisation des niveaux d'eau du fleuve St-Laurent et de la rivière des Prairies ainsi que de l'interaction entre l'eau souterraine et l'eau de ces rivières serait souhaitable afin de mieux définir les conditions limites du modèle régional.

Suite à la calibration du modèle régional, il a été possible de représenter de façon généralement très bonne la piézométrie présente sur l'île. Il est évident que, pour la région du Mont-Royal, l'erreur associée est grande. Étant donné les informations disponibles et la résolution employée, nous ne pouvons pas arriver à une meilleure calibration sans renoncer au concept de régionalisation des propriétés hydrogéologiques. Avec ces résultats, il a également été possible de simuler les lignes d'écoulement de l'eau souterraine et de représenter les directions d'écoulement. Une meilleure connaissance des propriétés hydrauliques des différents matériaux permettrait une calibration et une caractérisation des flux sortant en périphérie de l'île en contribuant au débit du fleuve ou de la rivière.

Le modèle régional reproduit très bien les charges observées au CTED. Les zones possédant une forte erreur sont jugées assez loin de la zone détaillée (*modèle local*) et n'influencent pas les résultats. Si une modélisation locale pour un autre secteur de l'île était nécessaire, peu d'efforts seraient nécessaires pour recalibrer le modèle régional afin de minimiser l'erreur dans ce nouveau secteur. Cependant, la zone du Mont-Royal (centre-ville) sera toujours difficile à calibrer si nous gardons la même résolution du maillage. Pour une étude dans ce secteur, il faudrait augmenter la résolution autour du Mont-Royal afin de mieux représenter le fort gradient hydraulique présent dans ce secteur.

Pour augmenter l'objectivité introduite par rapport à la calibration par essais-erreurs, une autre approche aurait pu être utilisée. L'utilisation d'une méthode de solution inverse du système d'équations représentant l'écoulement aurait amélioré la calibration. Il existe actuellement plusieurs modèles capables de résoudre le problème inverse tel que formulé par *MODFLOW* (voir par exemple: Hill, 1990b; Olsthoorn, 1995). Encore là, la distribution de la conductivité hydraulique aurait alors été beaucoup plus variable et n'aurait pas représenté les valeurs moyennes régionales des différentes conductivités hydrauliques associées aux lithologies. Une telle approche aurait également nécessité plus de valeurs observées de la charge et une meilleure estimation de la distribution de la conductivité hydraulique afin de converger vers une calibration unique. Le problème majeur des solutions inverses demeure la non-unicité de la solution. Il faut donc utiliser une telle approche avec précaution.

Le modèle régional est employé afin de déterminer les conditions limites d'une étude plus locale pour un modèle d'écoulement plus détaillé et raffiné pour le site du *Centre de Tri et d'Élimination des Déchets de la Ville de Montréal* [CTED]. Cette méthode de modélisation par maillage télescopique (Ward et al., 1987) permet de déterminer exactement les différentes conditions limites à l'aide du modèle régional. Elle pourrait être appliquée à tout autre site présent sur l'île de Montréal. Cependant, il faut tenir compte que, pour les autres secteurs de l'île, l'erreur associée à la distribution de la charge hydraulique est grande comparativement à la région du CTED. Il faut donc utiliser les valeurs de charges hydrauliques avec précaution. Les lignes de courant et la ligne de partage des eaux peuvent être utilisées avec plus de confiance car elles ne varient pas énormément même si les charges étaient mieux calibrées. Or, pour déterminer les conditions de flux nul (limites imperméables), le modèle régional est très bien adapté.

Suite aux résultats du modèle régional, il est possible de déterminer les dimensions et la localisation du domaine modélisé pour représenter l'écoulement local au CTED. En plus des conditions limites déterminées à partir du modèle régional, les conditions de saturation et de charge à la paroi de la carrière Francon ont été simulées à l'aide d'un modèle en coupe. Ce modèle, développé avec TOUGH2, permet la représentation des processus d'écoulement en bordure de la carrière Francon. En plus de déterminer les conditions de pression et de saturation à la face de Francon, ce modèle sert à vérifier la sensibilité des divers paramètres utilisés pour caractériser l'écoulement à saturation variable et l'effet de différentes discrétisation spatiale sur les résultats.

Afin de mieux calibrer le modèle, il est proposé de faire un relevé des élévations des sorties d'eau et des zones fracturées à la face de la carrière. Le relevé des sources d'eau permettrait de vérifier l'élévation de la nappe en bordure de la carrière et de déterminer la validité du modèle simulé. Certaines mesures piézométriques pourraient également aider à la caractérisation des niveaux d'eau en périphérie de Francon. La définition des conditions d'écoulement à Francon est importante car ce site contrôle la majorité de l'écoulement local autour du CTED.

À l'aide de ces conditions limites, nous avons développé un modèle tridimensionnel local avec TOUGH2. Étant donné la complexité et la robustesse numérique de ce modèle, les ressources informatiques requises sont énormes. Dans le cadre de cette étude, un modèle de résolution moyenne a été utilisé pour représenter l'écoulement local. À l'aide de ce modèle, il est possible de représenter les patrons généraux d'écoulement et les conditions de saturation variable dans les déchets. Plusieurs développements sont encore nécessaires afin d'utiliser TOUGH2 pour représenter les processus d'écoulement locaux. Les principaux points à améliorer sont la représentation des conditions limites en périphérie de Francon et à la limite sud et l'utilisation d'un maillage de plus haute résolution. Pour réaliser cette dernière amélioration, des ressources informatiques plus puissantes devront être utilisées. Par exemple, un ordinateur de type IBM RS/6000 doté d'au moins 150 meg de mémoire vive est nécessaire. Toutefois, un ordinateur plus puissant et rapide serait également à considérer car, pour un tel maillage, le temps de calcul sera sûrement de plusieurs heures.

L'utilisation de TOUGH2 est souhaitée car ce modèle permet de simuler tous les processus d'écoulement présents au CTED. De plus, l'utilisation du concept de double porosité permettrait une représentation du milieu plus adéquate. Pour ce faire, une description et une caractérisation plus complète de la fracturation du roc sont nécessaires avant l'utilisation d'un concept plus poussé que celui de milieu poreux équivalent pour le roc (*de Marsily, 1986*). La caractérisation plus rigoureuse des propriétés capillaires du roc et des déchets est également nécessaire afin d'améliorer la calibration du modèle. L'utilisation de ITOUGH (*Finsterle, 1993; Finsterle, 1995*) pour la calibration automatique et l'optimisation des scénarios de contrôle et de gestion du lixiviat est également un facteur important dans le choix de TOUGH2 comme modèle d'écoulement servant à représenter les processus locaux. Ces développements sont prévus pour des phases futures du projet mais doivent se baser sur une bonne définition du modèle conceptuel et une représentation réaliste des processus d'écoulement. Pour l'instant, ces conditions ne sont pas rencontrées.

Afin de palier à la faible résolution utilisée avec TOUGH2, nous avons utilisé un autre modèle d'écoulement à saturation variable. FRAC3DVS est utilisé afin de représenter les processus locaux d'écoulement avec une plus grande résolution afin de vérifier certaines hypothèses concernant l'étanchéité du site. Ce modèle permet également la représentation du milieu poreux par une série de fractures discrètes ou par un milieu fracturé aléatoire. Malheureusement, à l'aide de ce modèle, il n'a pas été possible de représenter les conditions de saturation variable à cause de certains problèmes de convergence numérique reliés à la plus faible robustesse de la solution numérique employée. Malgré le fait que FRAC3DVS a déjà été utilisé à plusieurs reprises pour simuler avec succès l'écoulement à saturation variable (*Therrien et Sudicky, 1995*), une combinaison de plusieurs facteurs rend la convergence difficile, voire même impossible. Il est important de noter que FRAC3DVS sera modifié sous peu afin de tenir compte de la charge et de la saturation lors de la solution numérique. Cette modification devrait aider à la convergence et l'utilité de FRAC3DVS pour l'ensemble du projet pourra alors être réévaluée.

Dans le cadre de cette étude, FRAC3DVS a été utilisé pour des conditions saturées et il a été possible d'obtenir une bonne calibration des puits situés dans le roc, en périphérie du CTED. Cependant, nous observons une différence importante entre les niveaux piézométriques observés et simulés dans les déchets. Cette différence peut être expliquée de deux façons. Premièrement, étant donné que l'on considère un milieu saturé et non pas à saturation variable, l'effet du puits dans les déchets est faible. De plus, étant donné le taux de recharge et la conductivité hydraulique élevée des déchets, le cône de rabattement produit par le puits de pompage est petit. Cette simplification peut entraîner une erreur de plusieurs mètres du niveau de la nappe dans les déchets. Deuxièmement, les niveaux mesurés dans les puits de biogaz ne représentent pas nécessairement le niveau moyen de la nappe dans les déchets. En effet, en considérant la conception des puits de biogaz qui servent de puits d'observation des niveaux d'eau, il est concevable qu'il existe des effets d'emménagement et d'écoulement préférentiel autour des puits de biogaz. Afin de vérifier cette hypothèse, nous avons conçu un modèle en coupe simulant trois puits de biogaz de 1 mètre de diamètre espacés de 75 mètres en moyenne. Une différence de plus de 10 mètres peut être observée entre le niveau dans les déchets et le niveau mesuré dans le puits. Un tel effet ne peut être représenté avec le type de modèle utilisé et la résolution employée. Ces phénomènes devront être approfondis lors des développements futurs du modèle d'écoulement. Par exemple, il serait facilement envisageable d'utiliser une méthode géophysique simple comme le géoradar afin de

déterminer la position de la surface libre. Suite à cette simulation, nous devons conclure que l'utilisation des puits de biogaz pour mesurer les niveaux d'eau n'est possiblement pas satisfaisante pour déterminer la position réelle de la nappe dans les déchets. Des infrastructures alternatives ou une méthode de correction devront être conçues afin de déterminer adéquatement la piézométrie dans les déchets.

À partir des charges hydrauliques obtenues par modélisation avec FRAC3DVS, il a été possible de représenter les directions d'écoulement. Nous observons que l'effet combiné du puits de pompage au CTED et de la carrière Francon est très grand. La concentration des lignes de courant permet de déterminer les zones d'appel pour le puits et la carrière Francon. À l'aide de cette représentation, il est également possible de vérifier si les dimensions du domaine modélisé sont suffisantes. Suite à l'analyse des résultats, il est suggéré que les limites est et ouest soient éloignées afin de simuler l'écoulement régional loin de l'effet des carrières. Il est également suggéré de faire coïncider la limite nord avec la rivière des Prairies afin de mieux représenter le système aquifère et de ne pas fausser l'effet des pompages. Nous remarquons également que la zone d'appel du puits de pompage au CTED coïncide avec la bordure est du CTED. Cela implique qu'il est envisageable que des fuites se produisent vers l'extérieur du site étant donné les gradients hydrauliques simulés.

À l'aide d'une telle représentation, il est possible de déterminer la position de la ligne de partage des eaux entre le CTED et la carrière Francon. En simulant différents scénarios de contrôle hydraulique du lixiviat, il sera possible de vérifier leur effet sur la position de la ligne de partage des eaux. Le but des méthodes de contrôle du lixiviat est d'obtenir une ligne de partage des eaux qui se situe à l'extérieur du site, de telle sorte que toute fuite vers l'extérieur du site soit impossible. Cependant, pour réaliser ce type d'analyse, un modèle à saturation variable très bien calibré devra être disponible afin de tenir compte des variations des propriétés hydrauliques du roc générées par la présence de fractures et l'effet des déchets.

Suite à l'analyse des résultats, nous pouvons conclure que, si cette représentation est proche de l'écoulement réel, toute fuite vers l'extérieur du site du CTED se retrouve drainée à la carrière Francon. D'après les résultats de modélisation, l'effet drainant de Francon est tel que la majorité de l'écoulement se retrouve vers la carrière. L'effet de Francon peut servir de contrôle hydraulique pour la gestion du lixiviat. En effet, si une fuite de lixiviat se produit au CTED, la contamination sera dirigée vers Francon et le volume d'eau contenu entre le CTED et Francon

servira de dilution et d'atténuation de la contamination. Cependant, dans un pareil cas, il serait alors nécessaire de déclarer la zone entre les deux carrières impropre à la consommation. Afin de déterminer l'efficacité d'une telle méthode, il serait alors souhaitable de vérifier la qualité de l'eau à sa sortie dans la paroi de la carrière Francon. Un tel scénario de contrôle n'a pas encore été proposé et serait peut être une avenue intéressante du point de vue économique tout en étant sécuritaire pour l'environnement.

La simulation de zones perméables, représentant l'effet potentiel des zones fracturées, explore les avenues possibles pour la description complète des processus affectant l'écoulement. Il a été possible de démontrer l'effet des zones plus perméables sur les lignes d'écoulement. Les lignes de courant semblent se concentrer dans les tubes de plus grande perméabilité et se diriger vers Francon sous l'effet du gradient simulé. Pour les différents cas de milieu fracturé, le traçage des lignes de courant permet également de délimiter les zones d'appel pour le puits de pompage au CTED et pour la carrière Francon ce qui sera utile pour la comparaison et la validation des différents scénarios de contrôle et de gestion du lixiviat. Encore une fois, une bonne caractérisation du roc fracturé est nécessaire afin de développer un modèle conceptuel valable pour le modèle local au CTED.

Le principal avantage de FRAC3DVS est la rapidité avec laquelle la convergence est atteinte comparativement à TOUGH2. Cependant, tout comme pour TOUGH2, il n'existe pas de pré-processeur pour la génération du maillage et la définition des zones de propriétés différentes, ce qui rend la définition du modèle conceptuel plus longue et difficile. Actuellement, un pré-processeur plus performant pour FRAC3DVS est en développement à l'université de Waterloo (*communication personnelle de René Therrien*) et un pré-processeur capable de générer les maillages requis pour TOUGH2 est également en développement présentement (*communication personnelle de René Lefebvre*). Pour l'instant, l'utilisation d'un utilitaire comme GMS (*Engineering Computer Graphics Laboratory, 1995*) ou Argus Meshmaker (*Argus Interware, 1996*) serait nécessaire afin de mieux définir le modèle conceptuel local. L'utilisation de FRAC3DVS pour la suite du projet de modélisation requiert que la modification apportée pour la solution numérique puisse permettre la convergence du modèle à saturation variable. Par la suite, des outils de calibration et d'optimisation devront être développés pour permettre d'obtenir le même type de résultats qu'avec TOUGH2. L'utilisation d'un programme comme PEST (*Watermark Computing, 1994*) peut servir pour la calibration. Cependant, un module d'optimisation devra être

développé pour obtenir un outil de gestion et de contrôle du lixiviat avec FRAC3DVS. Pour toutes ces raisons, il est suggéré d'utiliser TOUGH2 pour les développements futurs de la modélisation locale de l'écoulement au CTED.

En conclusion et en résumé, le développement d'un modèle régional d'écoulement de l'eau souterraine a permis de définir un contexte représentatif pour la modélisation locale du CTED. Sans cette approche, les limites du domaine modélisé auraient dû être estimées arbitrairement et la représentativité de ce modèle aurait été diminuée. De plus, le modèle régional a permis de déterminer une série de valeurs possibles de la conductivité hydraulique des différents dépôts et lithologies de l'île de Montréal. Il a également permis de définir précisément le cadre hydrologique de l'île. Nous pouvons maintenant représenter l'infiltration nette d'eau et ainsi quantifier la recharge de l'aquifère principal de l'île. Il est évident qu'un développement plus approfondi serait nécessaire afin de représenter parfaitement le système aquifère de l'île de Montréal. Cependant, pour les besoins de la présente étude, le modèle régional tel que développé est largement suffisant.

Suite aux résultats de la modélisation locale, nous devons conclure que l'utilisation d'un modèle à saturation variable est primordiale afin de représenter tous les processus d'écoulement présents au CTED. Toutefois, avec un modèle saturé, nous sommes en mesure de représenter les patrons généraux d'écoulement et d'obtenir une bonne calibration des niveaux dans les puits en périphérie du site. De plus, il est possible de représenter les directions d'écoulement et d'analyser certaines hypothèses concernant l'étanchéité du site. La simulation de zones perméables représentant les zones fracturées complète la description des processus affectant l'écoulement. Ce facteur est important dans les processus d'échange avec la carrière Francon et le milieu fracturé devra être caractérisé de façon plus complète afin de pouvoir représenter adéquatement l'écoulement local.

Finalement, ce travail de modélisation permet de définir les outils de modélisation nécessaires et de déterminer le type de caractérisation nécessaire afin de décrire adéquatement le milieu physique. Étant donné la complexité du domaine modélisé, les simplifications nécessaires sont nombreuses et ont toutes une influence plus ou moins importante sur les processus d'écoulement représentés. Les compromis entre la résolution, la discrétisation, la caractérisation des propriétés hydrologiques et hydrogéologiques, le temps de calcul et la calibration sont difficiles à faire et requièrent une analyse complète du problème de modélisation. La présente étude ouvre

ainsi la voie à une série de réflexions et de travaux futurs de modélisation qui conduiront à une représentation plus exacte et réaliste des processus d'écoulement. Par la suite, ce modèle d'écoulement servira de base à l'élaboration d'un outil de gestion et de contrôle hydraulique du lixiviat au CTED.

CHAPITRE 10

BIBLIOGRAPHIE

- Ahmed, S., R.M. Khanbilvardi, J. Fillos et P.J. Gleason, 1992. « Two-dimensional leachate estimation through landfills ». J. of Hydraulic Engineering, vol. 118, no. 2, p. 306-321.
- American Society for Testing and Materials, 1993. « Standard guide for application of a ground-water flow model to site-specific problem ». Designation D 5447-93, 6 p.
- American Society for Testing and Materials, 1994a. « Standard guide for defining boundary conditions in ground-water flow modeling ». Designation D 5609-94, 4 p.
- American Society for Testing and Materials, 1994b. « Standard guide for comparing ground-water flow model simulations to site-specific information ». Designation D 5490-93, 7 p.
- American Society for Testing and Materials, 1994c. « Standard guide for conducting a sensitivity analysis for a ground-water flow model application ». Designation D 5611-94, 5 p.
- American Society for Testing and Materials, 1995a. « Standard guide for defining initial conditions in ground-water flow modeling ». Designation D 5610-94, 2 p.
- American Society for Testing and Materials, 1995b. « Standard guide for documenting a ground-water flow model application ». Designation D 5718-95, 4 p.
- Amtec Engineering inc., 1994. Tecplot – Interactive data visualization for scientists and engineers: Version 6, user's manual. Bellevue, WA, États-Unis. Pagination multiple.
- Andersen, P.F., C.R. Faust et J.W. Mercer, 1984. « Analysis of conceptual desings for remedial mesures at Lipari Landfill, New Jersey ». Groundwater, vol. 22, no. 2, p. 176-190.

- Anderson M.P., D.S. Ward, E.G. Lappala et T.A. Prickett, 1992. « Computer models for subsurface water ». Chap. In Handbook of hydrology, chap. 22. D. Maidment (éd), McGraw-Hill.
- Anderson, M.P. et W.W. Woessner, 1992. Applied groundwater modeling - Simulation of flow and advective transport. San Diego: Academic Press, 381 p.
- Argus Interware, 1996. Argus MeshMaker, finite element & finite difference numerical pre and post processor: version 2.5 - User's guide. Jericho, NY, 305 p.
- Axelsson, O. et G. Lindskog, 1986. « On the rate of convergence of the preconditioned conjugate gradient method ». Numer. Math., vol. 48, no. 5, p. 499-523.
- Bagchi, A., 1990. Desing, construction, and monitoring of sanitary landfill. New York: John Wiley & Sons, 284 p.
- Behie, G.A. et P.A. Forsyth, 1984. « Incomplete factorization methods for fully implicit simulation of enhanced oil recovery ». SIAM J. Sci. Stat. Comput., vol. 5, no. 3, p. 543-561.
- Benhouhou, Y. et J.E. Simundic, 1993. « Ville de Montréal, Centre de tri et d'élimination des déchets, Puits de surveillance et suivi environnemental des eaux souterraines, Essais d'injection d'eau sous pression ». Rapport 1 (1293), Enviroconseil, pour Les Constructions R.R.N. Inc., Décembre 1993, 6 p. et annexes.
- Bériault, A., 1977. « Relevé des carrières de l'île de Montréal ». Rapport de recherche, Québec, Université du Québec à Montréal.
- Bériault, A. et G. Simard, 1978. « Carte hydrogéologique de l'île de Montréal et des îles Perrot et Bizard ». Québec: Ministère de l'Énergie et des Ressources (Service des eaux souterraines), CARTE O-43.
- Blais, C., 1995. « Caractérisation de l'écoulement au Centre de Tri et d'Élimination des Déchets de la Ville de Montréal ». *En préparation*. Mémoire de maîtrise, Québec, Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-géoressources).
- Blaney, H.F. et W.D. Criddle, 1950. « Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data ». U.S. Dept. Agr. Div. Irrigation and Water Conserv., SCS TP-96.
- Bodineau, R., 1994. « Étude comparative des alternatives de captage ». Rapport de Dupont Desmeules / Optec Énergie Services, Groupe AXOR Inc., pour la Ville de Montréal, Août 1994, 30 p.
- Bonn, B. et S. Rounds, 1990. DREAM: Analytical groundwater flow programs. Chelsea: Lewis Publishers Inc., 109 p.
- Boyer, L., A. Bensoussan, M. Durand, R. Hugh Grice et J. Bérard, 1985. « Geology of Montreal, Province of Quebec, Canada ». Bulletin of the Association of Engineering Geologists, vol. XXII, no. 4, p. 330-394.

- Brace, W.F., 1980. « Permeability of crystalline and argillaceous rocks ». Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., vol. 17, p. 241-251.
- Broyd, T.W., R.C. Hall et R.W. Paige, 1989. « The prediction of contamination potential in coastal aquifers from proposed shallow disposal sites for low-level radioactive wastes ». In G. Jousma et al. (éd.) Groundwater contamination: use of models in decision making, Kluwer Academic Publishers, p. 479-487.
- Burden, R.L. et J.D. Faires, 1989. Numerical analysis. 4e édition. PWS-Kent Publ. Co., 729 p.
- Campbell, D.J.V., 1983. « Understanding water balance in landfill sites ». Waste Management, no 73, p. 594-600.
- Carrera, J., S.P. Neuman, 1986a. « Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 1. Maximum likelihood method incorporating prior information ». Water Resources Research, vol. 22, no. 2, p. 199-210.
- Carrera, J., S.P. Neuman, 1986b. « Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 2. Uniqueness, stability and solution algorithms ». Water Resources Research, vol. 22, no. 2, p. 211-227.
- Carrera, J., S.P. Neuman, 1986c. « Estimation of aquifer parameters under transient and steady state conditions: 3. Application to synthetic and field data ». Water Resources Research, vol. 22, no. 2, p. 228-242.
- Carrera, J., A. Medina, J. Heredia, L. Vives, J. Ward et G. Walters, 1989. « Parameter estimation in groundwater modelling: From theory to application ». In G. Jousma et al. (éd.). Groundwater contamination: Use of model in decision-making. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, p. 151-169.
- Carsel, R.F. et R.S. Parrish, 1988. « Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics ». Water Resources Research, vol. 24, no. 5, p. 755-769.
- Chiang, W.-H. et W. Kinzelbach, 1993. Processing Modflow – Pre- and postprocessors for simulation of flow and contaminants transport in groundwater systems with MODFLOW, MODPATH and MT3D - Version 3. Heidelberg.
- Christensen, T.H., R. Cossu et R. Stegmann, 1989. Sanitary landfilling: Process, technology and environmental impact. London: Academic Press, 592 p.
- Clark, T.H., 1972. Région de Montréal. Québec: Rapport Géologique no. 152 - Ministère des Richesses Naturelles, 244 p.
- Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement (CCME), 1994. Manuel d'évaluation de la subsurface des lieux contaminés. Rapport CCEM-EPC-NCSR-48F, 328 p.
- Constructions R.R.N. Inc. (Les), 1993. Dessins des puits tel que construit – Rapport de forage. Centre de tri et d'élimination des déchets (CTED), Puits de surveillance et suivi environnemental des eaux souterraines.

- Cooley, R.L., 1971. « A finite difference method for unsteady flow in variably saturated porous media: Application to a single pumping well ». Water Resources Research, vol. 7, no. 6, p. 1607-1625.
- Dake, L.P., 1978. Fundamentals of reservoir engineering. Developments in petroleum science, 8. New York: Elsevier Scientific Publishing Company, 443 p.
- d'Astous, A.Y., W.W. Ruland, J.R. Bruce, J.A. Cherry et R.W. Gillham, 1989. « Fracture effects in the shallow groundwater zone in weathered Sarnia-area clay ». Can. Geotech. J., no. 26, p. 43-56.
- Domenico, P.A. et F.W. Schwartz, 1990. Physical and chemical hydrogeology. New York: John Wiley & Sons, 824 p.
- Duff, I.S., 1977. « A set of FORTRAN subroutines for sparse unsymmetric linear equations ». AERE Harwell report R 8730.
- Durand, M., 1979. Compte-rendu de « Les venues d'eau souterraine dans les tunnels à Montréal ». In Proposition d'une communication, résumé: Séminaire de recherche sur les tunnels et les ouvrages souterrains, p. 16-17. Montréal: Société Canadienne de Géotechnique.
- Engineering Computer Graphics Laboratory, 1995. GMS – Department of Defense Groundwater Modeling System: Demonstration guide. Brigham Young University, Utah, 40 p. et annexes.
- Environmental Protection Agency (EPA), 1993. A manual of instructional problems for the U.S.G.S. MODFLOW model. par P.F. Andersen, DYNAMAC contract 68-C8-0058, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, U.S. Environmental Protection Agency, rapport EPA-600-R-93-010.
- Farquhar, G.J., 1989. « Leachate: production and characterization ». Can. J. Civ. Eng., no. 16, p. 317-325.
- Fenn, D.G., K.J. Hanley et T.V. DeGeare, 1975. « Use of water balance method for predicting leachate generation from solid waste disposal sites ». U.S. Environmental Protection Agency, rapport SW-168.
- Ferland, M., 1969. « Évapotranspiration potentielle au Québec ». Ministère des Richesses Naturelles (Service de la Météorologie), p. 601-619.
- Fetter, C.W., 1992. Contaminant hydrology. New York: Macmillan Publishing Company, 458 p.
- Findikakis, A.N. et J.O. Leckie, 1979. « Numerical simulation of gas flow in sanitary landfills ». J. of Environmental Engineering, ASCE, vol. 115, no. 5, p. 927-945.
- Finsterle, S., 1993. « ITOUGH2 user's guide – Version 2.2 ». Lawrence Berkeley Laboratory LBL-34581, 102 p.
- Finsterle, S. et K. Pruess, 1995. « Solving the estimation-identification problem in two-phase flow modeling ». Water Resources Research, vol. 31, no. 4, p. 913-924.

- Fletcher, R., 1976. « Conjugate gradient methods for indefinite systems ». In Numerical Analysis, New York: Springer-Verlag.
- Forsyth, P.A., 1991. « A control volume finite element approach to NAPL groundwater contamination ». SIAM J. Sci. Stat. Comput., vol. 12, no. 5, p. 1029-1057.
- Forsyth, P.A., Y.S. Wu et K. Pruess, 1995. « Robust numerical methods for saturated-unsaturated flow with dry initial conditions in heterogeneous media ». *En préparation*, 19 pages.
- Fortin, G. et H. Thibault, 1994. « Évaluation du lieu d'enfouissement sanitaire du CTED dans le cadre du programme PAERLES ». Rapport d'évaluation, Ministère de l'Environnement, Direction régionale de Montréal et de Lanaudière, no. dossier 7522-06-01-0020000, 25 p. et annexes.
- Franz, T.J. et R.K. Rowe, 1993. « Simulation of groundwater flow and contaminant transport at a landfill site using model ». International journal for numerical and analytical methods in geomechanics, vol. 17, p. 435-455.
- Freeze, J.A., 1964. « Ground water resources of the Lachine-Saint-Jean area, Quebec (South of the St. Lawrence River), 31H/5 (part of) and 31 H/6 W½ ». Ottawa: Commission Géologique du Canada, Bulletin 112, 19 p.
- Freeze, R.A. et J.A. Cherry, 1979. Groundwater. New Jersey: Prentice-Hall, 604 p.
- Gélinas, P. et R. Lefebvre, 1992. « Hydrogéologie ». Note de cours. Québec, Université Laval.
- Géophysique GPR international Inc., 1990. « Programme d'exploration géotechnique, géophysique et hydrogéologie en périphérie du centre de tri et d'élimination des déchets ». Rapport M-89001, pour la Ville de Montréal, Mai 1990, 143 p. et annexes.
- Gluck, W.R. et R.H. McCuen, 1975. « Estimating land use characteristics for hydrologic models ». Water Resources Research, vol. 11, no. 1, p. 177-179.
- Gouvernement du Canada, 1982. Normales climatiques au Canada - Rayonnement solaire: 1951-1980, Volume 1. Ottawa: Service de l'environnement atmosphérique, 57 p.
- Gouvernement du Canada, 1992. Sommaire chronologique des niveaux d'eau - Québec (jusqu'à 1990). Ottawa: Direction générale des eaux intérieures (Division des relevés hydrologiques du Canada), 231 p.
- Grice, R.H. et M.D. Eggboro, 1978. « Groundwater of the island of Montréal, Canada ». Water Resources Bulletin, vol. 14, no. 6, p. 1466-1480.
- Groupe conseil Entraco Inc. Communication personnelle, Rapport no. 2-02-360.
- Haitjema, H.M., 1992. « Modeling regional ground-water flow in Fulton county, Indiana: using the analytical element method ». Groundwater, vol. 30, no. 5, p. 660-666.
- Hall, M.J., 1984. Urban hydrology. London: Elsevier Applied Science Pub., 299 p.

- Hamel, P., 1995. « Évaluation et optimisation des options de gestion du lixiviat au Centre de Tri et d'Élimination des Déchets de la Ville de Montréal ». *En préparation*. Mémoire de maîtrise, Québec, Institut National de la Recherche Scientifique (INRS-géoressources).
- Hill, M.C., 1990a. Preconditioned conjugate-gradient 2 (PCG2), a computer program for solving ground-water flow equations. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations, Rapport 90-4048, 43 p.
- Hill, M.C., 1990b. MODFLOWP: A computer program for estimating parameters of a transient, three-dimensional ground-water flow model using nonlinear regression. U.S. Geological Survey, Open-file Report, 317 p.
- Hinton, M.J., S.L. Schiff et M.C. English, 1993. « Physical properties governing groundwater flow in a glacial till catchment ». Journal of Hydrology, no. 142, p. 229-249.
- Hirschfelder, J.O., C.F. Curtiss, R.B. Bird, 1954. Molecular theory of gases and liquids. New York: John Wiley & Sons.
- Hode-Keyser, J., 1965. « The geology of Montreal ». In Proceeding of the Sixth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Montréal, Québec, p. 114-132.
- Hofmann, H.J., 1972. Stratigraphie de la région de Montréal: Excursion B-03. Québec: 24th International Geological Congress (Montréal), 32 p.
- Holmes, R., 1980. « The water balance method of estimating leachate production from landfill sites ». Solid Wastes, vol. 70, no. 1, p. 20-33.
- Huyakorn, P.S. et G.F. Pinder, 1983. Computational methods in subsurface flow. New York: Academic Press, 473 p.
- Huyakorn, P.S., S.D. Thomas et B.M. Thompson, 1984. « Techniques for making finite elements competitive in modeling flow in variably saturated porous media ». Water Resources Research, vol. 20, no. 8, p. 1099-1115.
- International Formulation Committee, 1967. « A formulation of the thermodynamic properties of ordinary water substance ». IFC secretariat, Düsseldorf, Allemagne.
- Jones, L., T. Lemar et C.-T. Tsai, 1992. « Results of two pumping tests in Wisconsin age weathered till in Iowa ». Ground Water, vol 30, no. 4, p. 529-538.
- Jones, L., 1993. « A comparaison of pumping and slug tests for estimating the hydraulic conductivity of unweathered Wisconsinian age till in Iowa ». Ground Water, vol 31, no. 6, p. 896-904.
- Journel, A.G. et CH.J. Huijbregts, 1991. Mining geostatistics. 5e édition. San Diego: Academic Press, 600 p.
- Keller, C.K., G. Van Der Kamp et J.A. Cherry, 1986. « Fracture permeability and groundwater flow in clayey till near Saskatoon, Saskatchewan ». Can. Geotech. J., no. 23, p. 229-240.

- Keller, C.K., G. Van Der Kamp et J.A. Cherry, 1988. « Hydrogeology of two saskatchewan tills, I. Fractures, bulk permeability, and spatial variability of downward flow ». Journal of Hydrology, no. 101, p. 97-121.
- Khanbilvardi, R.M., J. Fillos et S. Ahmed, 1987. « Leachate estimation in landfill sites ». In Pollution, risk assessment, and remediation in groundwater systems, third annual groundwater meeting (New York, sept. 16-18), p. 321-336.
- Konan, G.K., 1984. « Étude des infiltrations d'eau dans le métro de Montréal ». Mémoire de maîtrise, Montréal, École Polytechnique, Département de Génie Minéral, 232 p.
- Kovacs, G., 1986. « Role of regional groundwater models in environmentally sound water management ». In Conjunctive water use, IAHS Publ. no. 156, p. 405-413.
- Kramer, S.R. et H.M. Haitjema, 1989. « Regional modelling of fractured rock aquifers ». In G. Jousma et al. (éd) Groundwater contamination: use of models in decision-making, Kluwer Academic Publishers, p. 467-476.
- Kropinski, M.C.A., 1990. « Numerical techniques for saturated-unsaturated groundwater flow ». Mémoire de maîtrise, Université de Waterloo.
- Kuiper, L.K., 1987. Computer program for solving ground-water flow equations by the preconditioned conjugate gradient method. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations, Rapport 87-4091, 34 p.
- Lauzon, J-M., 1992. « Modélisation bidimensionnelle de l'écoulement de l'eau et du transport des contaminants organiques au site d'entreposage de pneus de St-Amable ». Mémoire de maîtrise, Québec, Université Laval, 136 p.
- Lazaro, T.R., 1990. Urban hydrology – A multidisciplinary perspective. Édition révisée. Lancaster: Technomic Publishing Co., 243 p.
- Lefebvre, R., 1994. « Caractérisation et modélisation numérique du drainage minier acide dans les haldes de stériles ». Thèse de doctorat, Québec, Université Laval, 375 p.
- Lefebvre, R., O. Tavchandjian, R. Therrien, P. Gélinas et J. Gagnon, 1994. « Gestion et contrôle du lixiviat et des biogaz dans les sites d'enfouissement en milieu fracturé ». Proposition spontanée au programme FDTE, Projet de recherche exploratoire en environnement. *Version préliminaire*, 77 p. et annexes.
- Lefebvre, R., 1995. « Écoulement multiphase immiscible – Introduction aux notions fondamentales ». Note de cours. Québec, INRS-Géoressources, mars 1995, 38 p.
- Lefebvre, R., O. Tavchandjian, R. Therrien, P. Gélinas, D. Isabel et D. Drouin, 1995. « Outils de gestion du lixiviat et des biogaz pour les sites d'enfouissement sanitaire ». Proposition au programme de partenariat technologique du CRSNG, 13 octobre 1995
- Leroueil, S., F. Tavenas et J.-P. Le Bihan, 1983. « Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada ». Can. Geotech. J., no. 20, p. 681-705.

- Lind, B.B., 1989. « The influence of pore distribution on the hydraulic conductivity of some swedish tills ». Journal of Hydrology, no. 112, p. 41-53.
- Llamas, J., 1993. Hydrologie générale, Principes et applications. 2e édition. Québec: gaëtan morin éditeur, 527 p.
- Locat, J., G. Lefebvre et G. Ballivy, 1984. « Mineralogy, chemistry, and physical properties interrelationships of some sensitive clays from western Canada ». Can. Geotech. J., no. 21, p. 530-540.
- Loomis, A.G., 1928. « Solubilities of gases in water » In E.W. Washburn (éd.), International Critical Tables, vol. III, New York: McGraw-Hill, p. 255-257.
- Lu, J. C.S., B. Eichenberger, R.J. Stearns, 1985. Leachate from municipal landfills – production and management. New Jersey: Noyes Publications, 453 p.
- Maidment, D.R., 1992 (éd.). Handbook of hydrology. New York: McGraw Hill, 1200 p.
- Marsily, G., de, 1986. Quantitative hydrogeology. London: Academic Press, 440 p.
- Maslia, M.L., M.M. Aral et M.F. Houlihan, 1992. « Evaluation of groundwater flow regime at a landfill with liner system ». J. environ. sci. health, vol. A27, no. 7, p. 1793-1816.
- McDonald, M.G. et A.W. Harbaugh, 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. USGS: Techniques of Water-Resources Investigations 06-A1, 576 p.
- McDonald, M.G., A.W. Harbaugh, B.R. Orr et D.J. Ackerman, 1991. A method of converting no-flow cells to variable-head cells for the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey, Open file Report 91-536, 99 p.
- McRay, D.C. et R.J. Morris, 1985. Analyse des données sur le rayonnement solaire pour le Canada 1967-1976, Volume 2. Québec. Ottawa: Service de l'environnement atmosphérique.
- McKay, L.D., R.W. Gillham et J.A. Cherry, 1993. « Field experiments in a fractured clay till: 1. Hydraulic conductivity and fracture aperture ». Water Resources Research, vol. 29, no. 4, p. 1149-1162.
- Merritt, F.S. (éd.), 1983. Standard handbook for civil engineers. 3e édition. New York: McGraw-Hill, 1650 p.
- Ministère de l'Environnement, 1984a. Répertoire hydrologique - Direction des inventaires: 1983. Québec: Direction générale des inventaires et de la recherche (Envirodoc 830380), 115 p.
- Ministère de l'Environnement, 1984b. Annuaire des puits et forages. Québec: Services des eaux souterraines, 3 vol., 702 p.
- Ministère des Transports, 1994. « Banque de données des forages géotechniques ». Données non-publiées. Québec: Direction des Sols et des Matériaux (Service des Sols et Chaussées).

- Molson, J.W.H., 1988. « Three-dimensional numerical simulation of groundwater flow and contaminant transport at the Borden landfill ». Mémoire de maîtrise, Ontario, Université de Waterloo, 169 p.
- Moridis, G. et K. Pruess, 1995. « Flow and transport simulations using T2CG1, A package of conjugate gradient solvers for the TOUGH2 family of codes ». Lawrence Berkeley Laboratory, LBL-36235, UC-400, 118 p.
- Mualem, Y.A., 1976. « A new model for predicting the hydraulic conductivity for unsaturated porous media ». Water Resources Research, vol. 12, no. 3, p. 513-522.
- Nadeau, N., 1977. « Les stations du métro ». L'ingénieur, vol. 63, no. 319, p. 25-31.
- Narasimhan, T.N. et P.A. Witherspoon, 1976. « An integrated finite difference method for analysing fluid flow in porous media ». Water Resources Research, vol. 12, no. 1, p. 57-64.
- Nastev, M., 1995. « Modeling of landfill gas generation and its migration in wastes and in geological formations ». Research study proposal for Ph. D. degree, Québec, Université Laval, 73 p.
- Nawalany, M., 1990. « Regional versus local computations of groundwater flow ». In Eighth international conference on computational methods in water resources (Venise, 11 au 15 juin, 1990). Padua, Italie, Université de Padova, p. 45-55.
- Neuman, S.P., 1973. « Saturated-unsaturated seepage by finite elements ». ASCE J. Hydraul. Div., 99(HY12), p. 2233-2251.
- Olsthoorn, T.N., 1995. « Effective parameter optimization for ground-water model calibration ». Groundwater, vol. 33, no. 1, p. 42-48.
- Oweis, I.S., 1986. « Criteria for geotechnical construction of sanitary landfills ». In International Symposium on Environmental Geotechnology, Allentown, PA, p. 206-222.
- Oweis, I.S., D.A. Smith, R.B. Ellwood et D.S. Greene, 1990. « Hydraulic characteristics of municipal refuse ». J. of Geotechnical Engineering, vol. 116, no. 4, p. 539-553.
- Parker, J.C., 1989. « Multiphase flow and transport in porous media ». Reviews in Geophys., vol. 27, no. 3, p. 311-328.
- Penman, H.L., 1948. « Natural evaporation from open water bare soil and grass ». Proceeding Royal Society London Series A, no. 193, p. 120-145.
- Phillips, D.W. et D. Aston, 1980. Données sur le rayonnement solaire au Canada, normales, résumés, tableaux et autres données spécialisées. Ottawa: Service de l'environnement atmosphérique.
- Pollock, D.W., 1989. Documentation of computer programs to compute and display pathlines using results from the U.S. Geological survey modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Geological Survey, Open-file Report 89-381, 188 p.

- Poulin, M., 1979. « Étude hydrogéologique au site d'enfouissement sanitaire de la carrière Miron, Montréal, Québec ». Rapport 350, projet Ffg 79002, Foratek International Inc., pour la Compagnie Miron Ltée, Juin 1979, 25 p. et annexes.
- Powe, N.N., 1969. Le climat de Montréal. Ottawa: Ministère des Transports, Études climatologiques no 15, 51 p.
- Prest, V.K. et J. Hode-Keyser, 1982. Caractéristiques géologiques et géotechniques des dépôts meubles de l'île de Montréal et des environs, Québec: Ottawa: Étude 75-27 - Commission Géologique du Canada, 29 p.
- Pruess, K., 1987. « TOUGH user's guide ». Lawrence Berkeley Laboratory LBL-20700, 78 p.
- Pruess, K., 1991. « TOUGH2 - A general purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat transfer ». Lawrence Berkeley Laboratory LBL - 29400, 102 p.
- Pruess, K. (éd.), 1995. « Proceedings of the TOUGH workshop '95 ». Lawrence Berkeley Laboratory, 20-22 mars 1995. LBL-37200, CONF-9503110, UC-1240, 366 p.
- Rawls, W.J., 1981. « Soil water characteristics ». Transaction of the American Society of Agriculture Engineers, paper 81-2510.
- Rawls, W.J., D.L. Brakensiek et K.E. Saxton, 1982. « Estimating soil water retention properties from soil properties ». Journal of the Irrigation and Drainage Division, vol. 108, no. IR2, p. 166-171.
- Remson, I., G.M. Hornberger et F.J. Molz, 1971. Numerical methods in subsurface hydrology. New York, Wiley-Interscience, 389 p.
- Robillard, M., 1995. « Gestion des données géotechniques de Montréal: développement d'un système à référence spatiale ». Mémoire de maîtrise, Québec, UQAM, 70 p.
- Rouillard, R. et Bodineau, R., 1995. « Rapport sur l'analyse des débits – Système de collecte et de traitement des eaux de ruissellement et de lixivation du CTED ». Rapport de Dupont Desmeules / Optec Énergie Services, Groupe AXOR Inc., pour la Ville de Montréal, janvier 1995, 53 p. et annexes.
- Rowe, R.K. et J.R. Booker, 1991. « Modelling of two-dimensional contaminant migration in a layered and fractured zone beneath landfills ». Can. Geotech. J., vol. 28, p. 338-352.
- Saad, Y., 1985. « Pratical use of polynomial preconditioning for the conjugate gradient method ». SIAM J. sci. statitic. compu., vol. 6, no. 4, p. 865-881.
- Saad, Y. et M.H. Schultz, 1986. « GMRES: A generalized minimal residual algorithm for solving nonsymmetric linear systems ». J. Sci. Stat. Comput., vol. 7, no. 3, p. 856-869.
- Schroeder, P.R., R.L. Peyton, B.M. McEnroe et J.W. Sjostrom, 1988. The Hydrologic Evaluation of Landfill Performance (HELP) model – Volume III: User's guide for version 2. US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS. Project officer: R. Landreth, Landfill Pollution Control Division, Harzardous Waste Engineering Research Laboratory.

- Seager, M.K., 1988. « A SLAP for the masses ». Rapport UCRL-100195, Lawrence Livermore National Laboratory, Californie.
- Simunek, J., T. Vogel et M.T. van Genuchten, 1992. « The SWMS-2D code for simulating water flow and solute transport in two-dimensional variably saturated media, Version 1.1 ». Res. Rep. 126, U.S. Salinity Lab. Agric. Res. Serv., U.S. Dept. of Agric., Riverside Calif.
- Smedt, F., de et J. Bronders, 1989. « Study of groundwater pollution around waste disposal sites with simulation model ». In G. Jousma et al. (éd) Groundwater contamination: use of models in decision making, Kluwer Academic Publishers, p. 619-627.
- Sonneveld, P., 1989. « CGS, a fast Lanczos-type solver for nonsymmetric linear systems ». J. Sci. Stat. Comput., vol. 10, no. 1, p. 36-52.
- Stankowski, S.J., 1972. « Population density as an indirect indicator of urban and suburban land-surface modifications ». U. S. Geological Survey Professional Paper, 800-B, p. B219-B224.
- Statistique Canada, 1992. Profil des secteurs de recensement de Montréal, Partie A – Recensement de 1991. Ottawa: Industrie, Science et Technologie, no catalogue 95-329, 493 p.
- Sun, N.-Z. et W.W.-G. Yeh, 1990a. « Coupled inverse problems in groundwater modeling. 1. Sensitivity analysis and parameter identification ». Water Resources Research, vol. 26, no. 10, p. 2507-2525.
- Sun, N.-Z. et W.W.-G. Yeh, 1990b. « Coupled inverse problems in groundwater modeling. 2. Identifiability and experimental design ». Water Resources Research, vol. 26, no. 10, p. 2527-2540.
- Teutsch, G. et B. Hofmann, 1990. « The delineation of groundwater protection zones using forced gradient tracer tests: a model validation case study ». In ModelCARE 90: Calibration and reliability in groundwater modelling, IAHS Publ. no. 195, p. 351-360.
- Therrien, R., 1992. « Three-dimensional analysis of variably-saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media ». Thèse de doctorat, Ontario, Université de Waterloo, 130 p.
- Therrien, R., E.A. Sudicky et R.G. McLaren, 1994. « User's guide for FRAC3DVS: An efficient, saturated-unsaturated groundwater flow and chain-decay solute transport in porous or discretely fractured porous formations ».
- Therrien, R. et E.A. Sudicky, 1995. « Three-dimensional analysis of variably-saturated flow and solute transport in discretely-fractured porous media ». En révision pour Journal of Contaminant Hydrology, juillet 1995, 68 p.
- Thornthwaite, C.W., 1948. « An approach toward a rational classification of climate ». The Geographical Review, vol. 38, no. 1, p. 55-94.
- Todd, D.K., 1980. Groundwater hydrology. 2e édition. New York: John Wiley & Sons, 535 p.

- Tousignant, D., 1989. « Étude des relations entre la nappe phréatique et les ouvrages souterrains en milieu urbain et analyse des venues d'eau observées en tunnel sur l'île de Montréal ». Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec à Montréal, Département des Sciences de la Terre, 162 p.
- Townley, L.R., 1990. AQUIFEM-N: a multi-layered finite element aquifer flow model, user's manual and description. CSIRO Division of Water Resources, Perth, Western Australia.
- Tremblay, J.J., 1962. « Vaudreuil map-area, Quebec. Part I: Ground-water resources of the east half ». Ottawa: Commission Géologique du Canada, étude 61-20, 18 p.
- Tremblay, F., 1983. « Miron: étude hydrogéologique de la zone 3 au site d'enfouissement sanitaire, Montréal, Québec ». Rapport 602, projet FFG 83032, Foratek International Inc., pour la Compagnie Miron Inc., Décembre 1983, 15 p. et annexes.
- Turc, L., 1961. « Évaluation des besoins en eau d'irrigation. Évapotranspiration potentielle ». Annales d'agronomie, vol. 12, no. 1, p. 13-49.
- United States Department of Agriculture (USDA), 1972. « Hydrology » Chap In National Engineering Handbook, Washington: Soil Conservative Service, U.S. Government Printing Office.
- van Genuchten, M.T., 1980. « A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils ». Soil Sci. Soc. Am. J., vol. 44, no. 5, p. 892-898.
- Verge, M.-J., 1987. « Étude hydrogéologique, Carrière Miron ». Dossier 54896, Hydrogéologie Canada Inc. (Lavalin), pour la Compagnie Miron Inc., Décembre 1987, 19 p. et annexes.
- Ville de Montréal, 1979. Étude géotechnique, Quartier Rivière des Prairies. Montréal: Service des Travaux Publics, module technique, laboratoire de contrôle et recherche (rapport no. 78F-25A), 20 p et 4 cartes.
- Ville de Montréal, 1984. Étude géotechnique, Partie du secteur Centre-Ville. Montréal: Service des Travaux Publics, module technique, laboratoire de contrôle et recherche (rapport no. 80F-86), 17 p et 8 cartes.
- Ville de Montréal, 1985. Étude géologique, Quartier Pointe-aux-Trembles. Montréal: Service des Travaux Publics, module technique, laboratoire de contrôle et recherche, 12 cartes.
- Ville de Montréal, 1990a. Plan directeur d'aménagement et de développement de l'arrondissement Centre (projet). Québec: Service de l'habitation et du développement urbain, Bureau du plan d'urbanisme, 112 p.
- Ville de Montréal, 1990b. Synthèse des enjeux d'aménagement et de développement: arrondissement Ahuntsic – Cartierville. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 28 p.
- Ville de Montréal, 1990c. Synthèse des enjeux d'aménagement et de développement: arrondissement Côte-des-Neiges – Notre-Dame-de-Grâce. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 28 p.

- Ville de Montréal, 1990d. Synthèse des enjeux d'aménagement et de développement: arrondissement Mercier – Hochelaga-Maisonneuve. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 28 p.
- Ville de Montréal, 1990e. Synthèse des enjeux d'aménagement et de développement: arrondissement Plateau Mont-Royal – Centre-Sud. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 28 p.
- Ville de Montréal, 1990f. Synthèse des enjeux d'aménagement et de développement: arrondissement Rivières des Prairies – Pointes-aux-Trembles. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 28 p.
- Ville de Montréal, 1990g. Synthèse des enjeux d'aménagement et de développement: arrondissement Rosemont – Petite Patrie. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 28 p.
- Ville de Montréal, 1990h. Synthèse des enjeux d'aménagement et de développement: arrondissement Sud-Ouest. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 28 p.
- Ville de Montréal, 1990i. Synthèse des enjeux d'aménagement et de développement: arrondissement Villeray – St-Michel. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 28 p.
- Ville de Montréal, 1991. Le défi déchets - un défi d'avenir. Énoncé d'orientation, Montréal.
- Ville de Montréal, 1992a. Plan d'urbanisme: Plan directeur de l'arrondissement Ahuntsic – Cartierville. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 65 p.
- Ville de Montréal, 1992b. Plan d'urbanisme: Plan directeur de l'arrondissement Côte-des-Neiges – Notre-Dame-de-Grâce. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 73 p.
- Ville de Montréal, 1992c. Plan d'urbanisme: Plan directeur de l'arrondissement Mercier – Hochelaga-Maisonneuve. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 55 p.
- Ville de Montréal, 1992d. Plan d'urbanisme: Plan directeur de l'arrondissement Plateau Mont-Royal – Centre-Sud. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 66 p.
- Ville de Montréal, 1992e. Plan d'urbanisme: Plan directeur de l'arrondissement Rivières des Prairies – Pointes-aux-Trembles. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 69 p.
- Ville de Montréal, 1992f. Plan d'urbanisme: Plan directeur de l'arrondissement Rosemont – Petite Patrie. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 60 p.

- Ville de Montréal, 1992g. Plan d'urbanisme: Plan directeur de l'arrondissement Sud-Ouest. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 65 p.
- Ville de Montréal, 1992h. Plan d'urbanisme: Plan directeur de l'arrondissement Villeray – St-Michel. Québec: Service de l'habitation et du développement urbain (Bureau du plan d'urbanisme), 59 p.
- Ward, D.S., D.R. Buss, J.W. Mercer et S.S. Hughes, 1987. « Evaluation of a groundwater corrective action at the Chem-Dyne hazardous waste site using a telescopic mesh refinement modeling approach ». Water Resources Research, vol. 23, no. 4, p. 603-617.
- Wardlaw, N.C. et M. McKellar, 1981. « Mercury porosimetry and interpretation of pore geometry in sedimentary rocks and artificial models ». Powder Technology, no. 29, p. 127-143.
- Watermark Computing, 1994. PEST, a model-independent parameter optimiser.
- Weinstein, H.C., H.L. Stone et T.V. Kwan, 1969. « Iterative procedure for solution of systems of parabolic and elliptic equations in three dimensions: INDUS ». Engineering Chemistry Fundamentals, vol. 8, no. 2, p. 281-287.
- Woessner, W.W. et M.P. Anderson, 1990. « Setting calibration targets and assessing model calibration – room for improvement: an example from North America ». In ModelCARE 90: Calibration and reliability in groundwater modelling, IAHS Publ. no. 195, p. 279-288.
- Wright, P. et J. Sarrailh, 1983. « Essais d'injection d'eau dans le rocher, Carrière Miron Inc., Zone 3, Montréal, Québec ». Dossier N-745(44173), Compagnie Nationale de Forage et Sondage (Lavalin), Novembre 1983, 6 p.
- Yeh, G.T., 1987. 3D-FEMWATER: a three-dimensional finite element model of water flow through saturated-unsaturated media. Oak Ridge National Laboratory, Publication no. 2904, 314 p.
- Yuretich, R., W. Leonard et S. Pohanka, 1989. « Hydrogeologic factors affecting acid neutralization in Cadwell Creek watershed, West central Massachusetts ». Water Resources Research, vol. 25, no. 4, p. 644-654.

ANNEXE A

ÉTUDE PIÉZOMÉTRIQUE

A.1 PIÉZOMÉTRIE

Robillard (1995) a monté une banque de donnée regroupant tous les forages géotechniques effectués sur l'île de Montréal. Cette banque de données contient plus de 38 000 entrées. Pour chaque entrée, plusieurs paramètres sont enregistrés tels que la localisation (*coordonnée MTM*), la description lithologique, la profondeur au roc, l'élévation de la surface, la profondeur du niveau d'eau, la date de forage ou de mesure, etc. Cette banque de données est présentement accessible à partir d'une plate-forme Macintosh. Cependant, il est possible d'extraire de l'information, de la sauvegarder sous format ASCII et de la traiter par la suite avec n'importe quel logiciel. Dans le cas présent, nous avons utilisé les données de topographie, de profondeur du niveau d'eau et la date de mesure de ce niveau.

Le fichier brut de données contenait plus de 14 800 entrées. Cependant, plusieurs forages (plus de 5 700) avaient été mesurés plus d'une fois et chaque mesure constituait une entrée distincte dans le fichier. À l'aide de ces mesures multiples, nous pensions être capable de vérifier l'hypothèse de la stabilité de la nappe dans le temps. Malheureusement, l'écart maximum entre deux mesures étant de moins d'un an, nous ne pouvions faire l'analyse souhaitée. Parmi les 5 700 mesures doubles, plus de 75% avait été effectuées dans un intervalle de temps inférieur à un mois. Pour ces mesures, la différence moyenne absolue entre les charges mesurées est de 0,72 mètre avec un écart type de 1,23 mètre. La moyenne arithmétique est de 0,13 mètre. Les fluctuations entre la première mesure et la deuxième sont jugées normales et reliées simplement au stress causé par la construction du forage.

Pour les mesures dont l'intervalle de temps est supérieur à un mois ($n=1\ 261$), nous représentons la distribution de l'écart entre les mesures (*en mètres*) en fonction de l'intervalle de temps (*figure A.1*). Nous représentons également, sur ce graphique, la moyenne pour chaque intervalle. Globalement, l'écart moyen absolu entre deux mesures est de 0,91 mètre avec un écart type de 1,54 mètre. La moyenne arithmétique est de 0,17 mètre. Le tableau A.1 présente les résultats statistiques pour chaque intervalle. Les différences observées à plus long terme sont similaires à celles observées pour un intervalle inférieur à un mois. Cependant, en l'absence de mesures dispersées dans le temps (plusieurs années), il est difficile de conclure quant à la stabilité de la nappe.

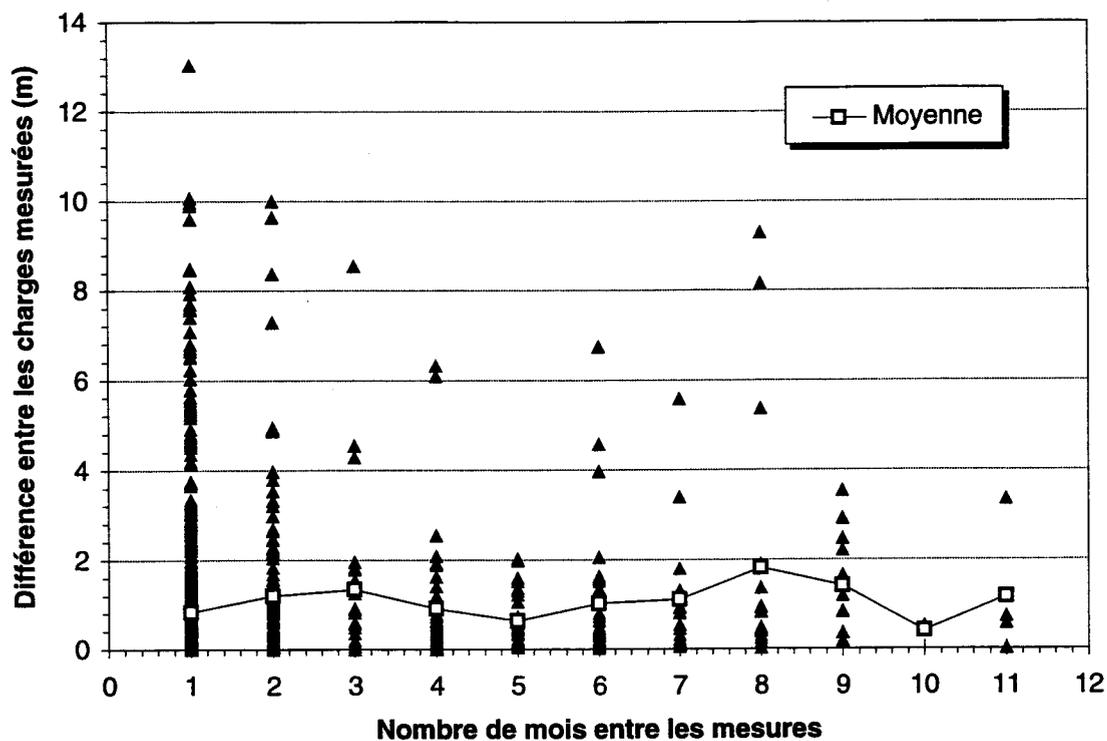


FIGURE A.1: Distribution de la différence entre deux mesures en fonction de intervalle de temps entre ces mesures.

TABLEAU A.1: Moyenne des écarts pour les points de mesures multiples (> 1 mois de différence).

Nb. mois	Moyenne (mètres)	Écart-Type (mètres)	Nb. mesures
1	0.84	1.52	887
2	1.2	1.73	131
3	1.34	1.87	26
4	0.9	1.26	51
5	0.63	0.57	32
6	1.02	1.45	33
7	1.11	1.38	18
8	1.81	2.8	18
9	1.41	1.03	15
10	-	-	1
11	1.17	1.49	4

Nous avons vérifié, pour les mesures dont l'écart est supérieur à un mètre (n=268), leur localisation spatiale afin de voir si leur distribution est aléatoire ou non. La figure A.2 montre la répartition des forages dont l'écart entre deux mesures est supérieur à un mètre et l'intervalle de

temps supérieur à un an. Suite à l'analyse sommaire de ces données, nous pouvons conclure qu'il n'y a aucune corrélation entre la localisation et l'écart et que les fluctuations sont aléatoires.

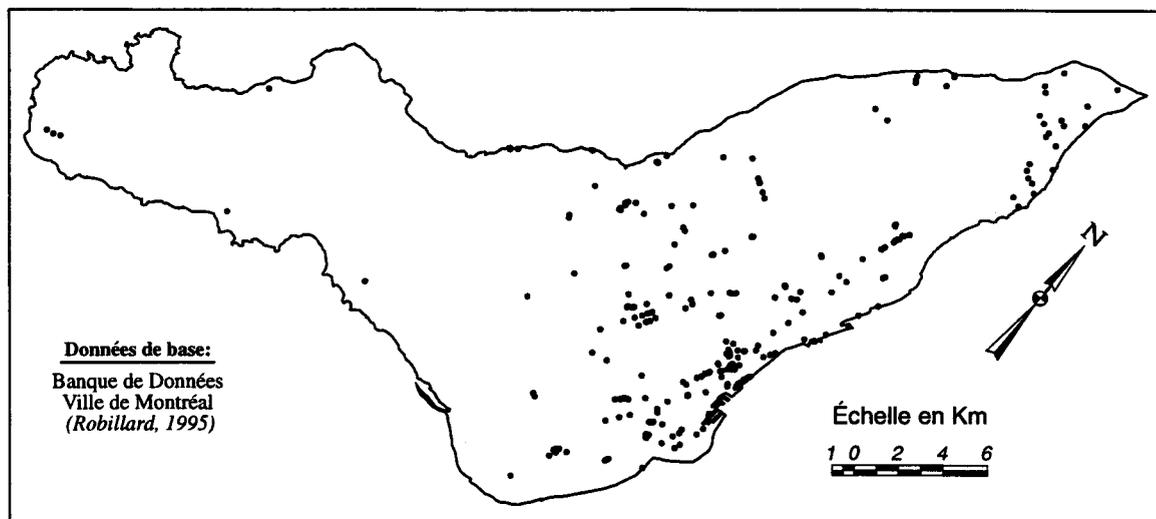


FIGURE A.2: Localisation des forages où plusieurs mesures ont été prises et dont la différence des niveaux est supérieure à un mètre (n=268).

Les figures A.3, A.4 et A.5 montrent l'emplacement des points de mesure pour trois périodes: avant 1970; 1970-1980 et 1980-1989. Les données ont été divisées ainsi afin de vérifier l'évolution du niveau de la nappe dans le temps à l'aide de la carte piézométrique moyenne pour chaque période. Ces cartes sont réalisées à l'aide des mesures correspondant à chaque période. Les forages avec des mesures multiples ont été traités en prenant le niveau le plus récent comme mesure représentatives.

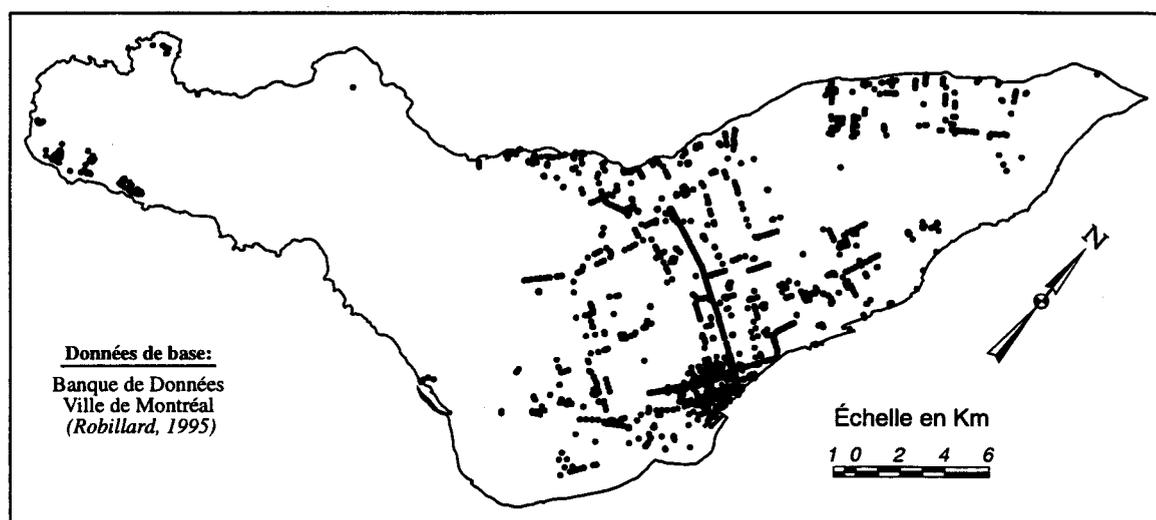


FIGURE A.3: Localisation des forages pour la période avant 1970 (n=2 150).

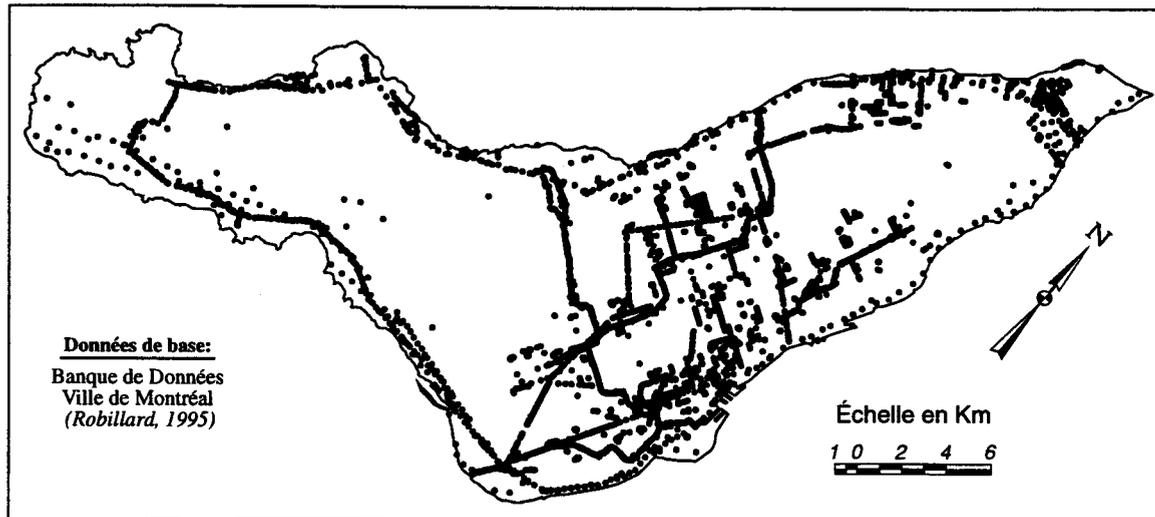


FIGURE A.4: Localisation des forages pour la période 1970-1980 (n=4 363).

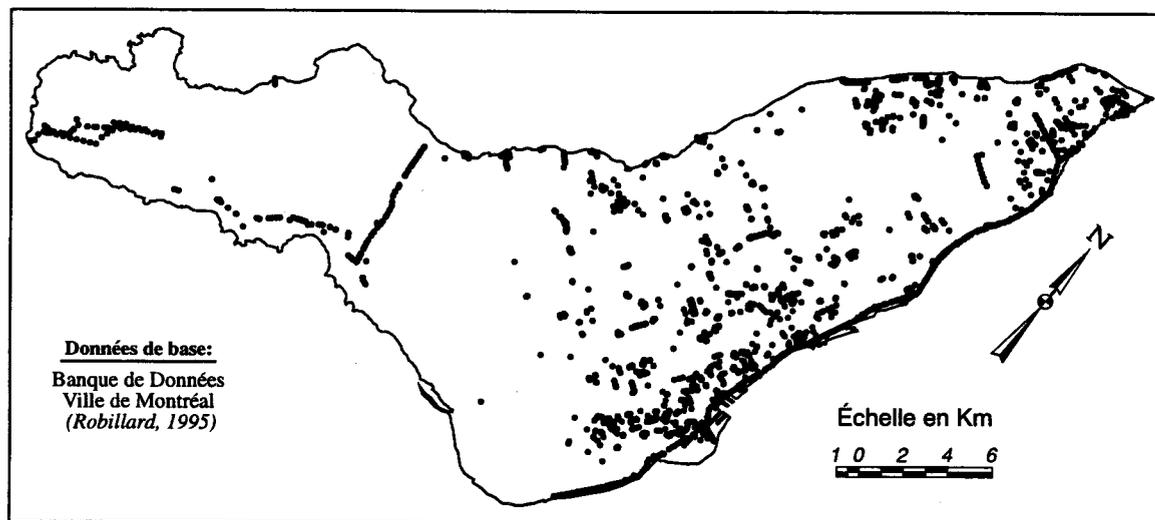


FIGURE A.5: Localisation des forages pour la période 1980-1989 (n=2 111).

La figure A.6 présente une carte montrant l'emplacement de tous les forages (n=8624) de la banque de données de la Ville de Montréal. Sur l'ensemble des cartes, nous observons facilement les grands ouvrages géotechniques sur l'île de Montréal: métro, aqueduc, autoroute, etc.

À partir de ces données ponctuelles, nous avons construit une carte piézométrique pour les périodes 1970-80, 1980-89 et pour l'ensemble des données. Les résultats sont présentés aux figures A.7 à A.9. Pour réaliser ces cartes, nous avons extrapolé les données ponctuelles pour un maillage régulier à l'aide du krigeage. Étant donné la distribution non-uniforme des données de

bases, les résultats sont, dans certain cas, discutables. Par exemple, pour la période 1980-1989, dans la partie ouest de l'île, les courbes piézométriques sont inexistantes étant donné l'absence de données. Pour le type de distribution de données que nous avons, des méthodes d'interpolation plus poussées seraient requises. Cependant, ces travaux dépassent le cadre de la présente étude.

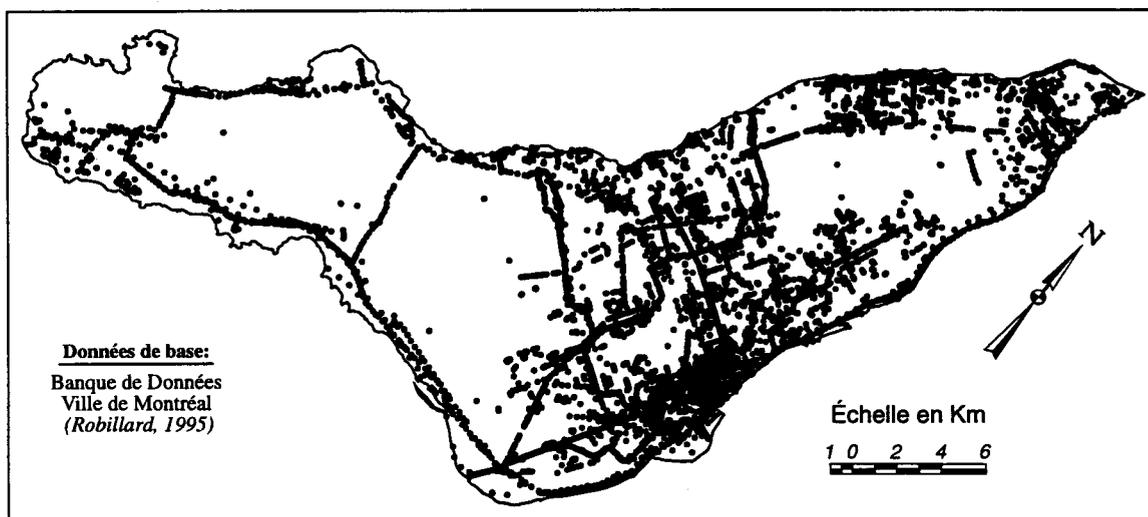


FIGURE A.6: Localisation de tous les forages [période 1933-1989] (n=8 624).

Sur ces différentes figures, nous présentons la comparaison entre les niveaux piézométriques obtenus à partir de la banque de données de la Ville de Montréal et ceux de Bériault et Simard (1978) [figure 4.8]. Globalement, nous observons plusieurs différences entre ces deux cartes. Par contre, pour la période de 1970-1980, la correspondance est bonne pour certain secteur; de même, dans le cas de l'ensemble des données. Cependant, il faut faire attention à l'interprétation de ces cartes car elles ne sont pas composées d'une série de mesures prise à un temps t mais plutôt d'un ensemble de mesures effectués sur un intervalle de temps Δt . Cette dernière approche n'est pas nécessairement valide pour la construction d'une carte piézométrique représentative. Une telle carte représente, au mieux, une moyenne de l'élévation du niveau de la nappe.

La figure A.10 illustre la comparaison entre la carte krigée pour la période 1970-1980 et celle pour la période 1980-1989. Il est difficile de voir si la position de la nappe a changé dans le temps ou si elle est restée stable. Une étude plus poussée des données et une meilleure interpolation permettrait peut-être de vérifier cette hypothèse.

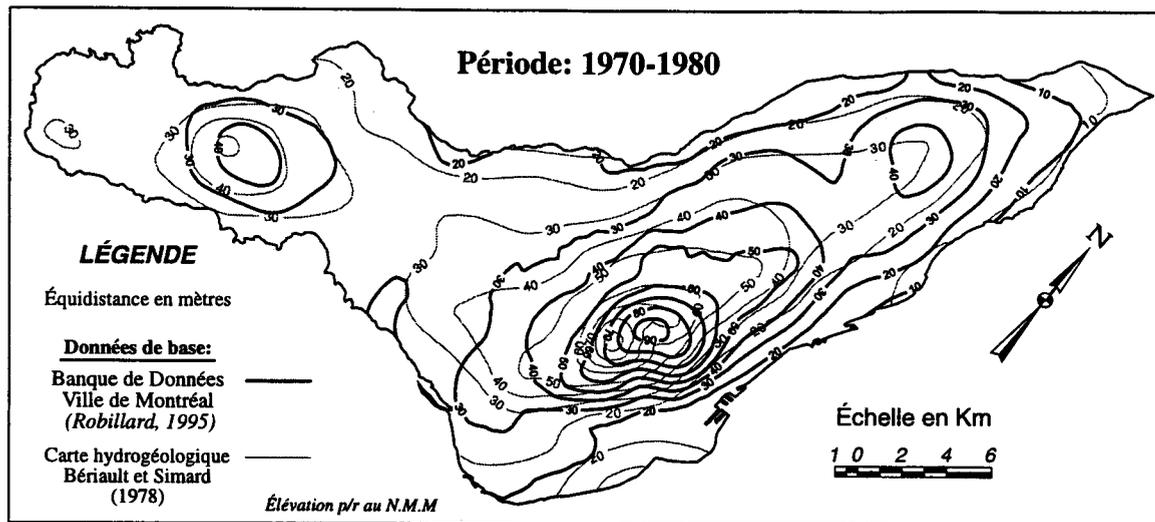


FIGURE A.7: Piézométrie krigée pour la période 1970-1980 (n=4 363).

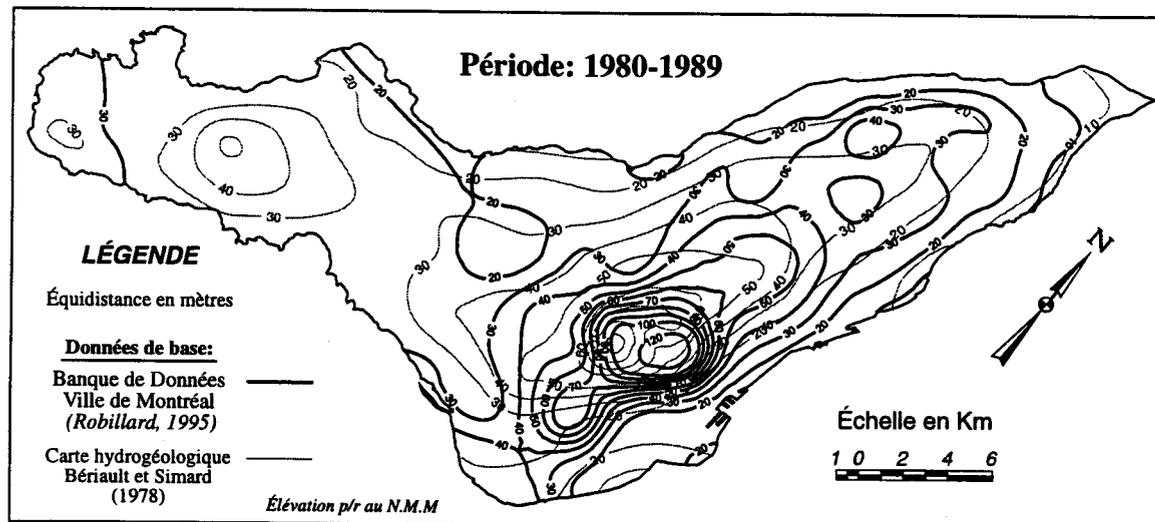


FIGURE A.8: Piézométrie krigée pour la période 1980-1989 (n=2 111).

Pour toutes les raisons mentionnées plus haut, nous avons décidé de garder comme piézométrie de référence celle de Bériault et Simard (1978). Pour utiliser et intégrer toutes ces nouvelles données, une étude plus approfondie et des techniques d'interpolation appropriées seraient nécessaires. Une des seules conclusions que nous pouvons facilement tirer à partir de ces données est la profondeur moyenne de la nappe. Elle est estimée à 4,14 mètres (n=8624). Dans le cas présent, les cartes piézométriques obtenues par krigeage représentent simplement l'intégration d'une série de mesures prises dans le temps.

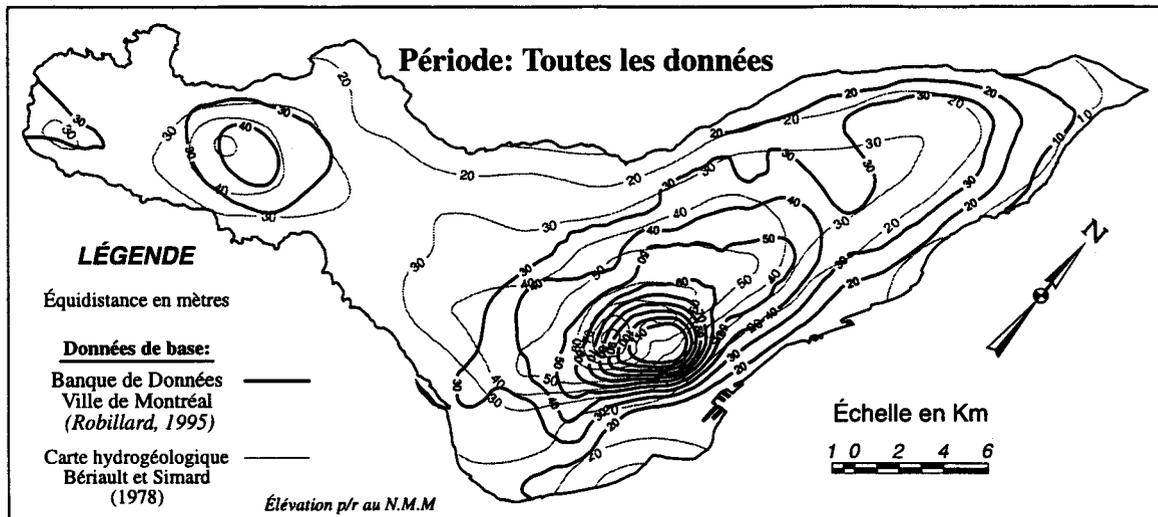


FIGURE A.9: Piézométrie krigée pour toutes les données (n=8 624).

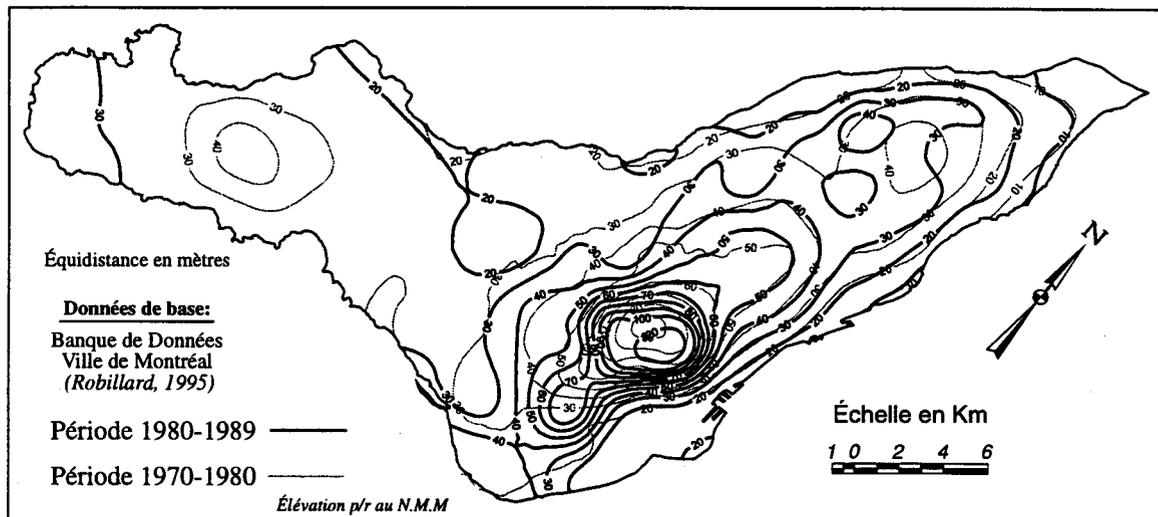


FIGURE A.10: Comparaison entre la piézométrie krigée pour la période 1970-1980 et celle pour le période 1980-1989.

A.2 TOPOGRAPHIE

Nous avons tenté de calculer une carte topographique avec les données disponibles. Dans ce cas, les résultats sont plus probants. La figure A.11 montre la différence entre la topographie ainsi calculée et la piézométrie obtenue à partir de la numérisation des cartes topographiques à l'échelle 1:20 000. Encore ici, les difficultés reliées à la technique d'interpolation utilisée sont responsables des résultats obtenus.

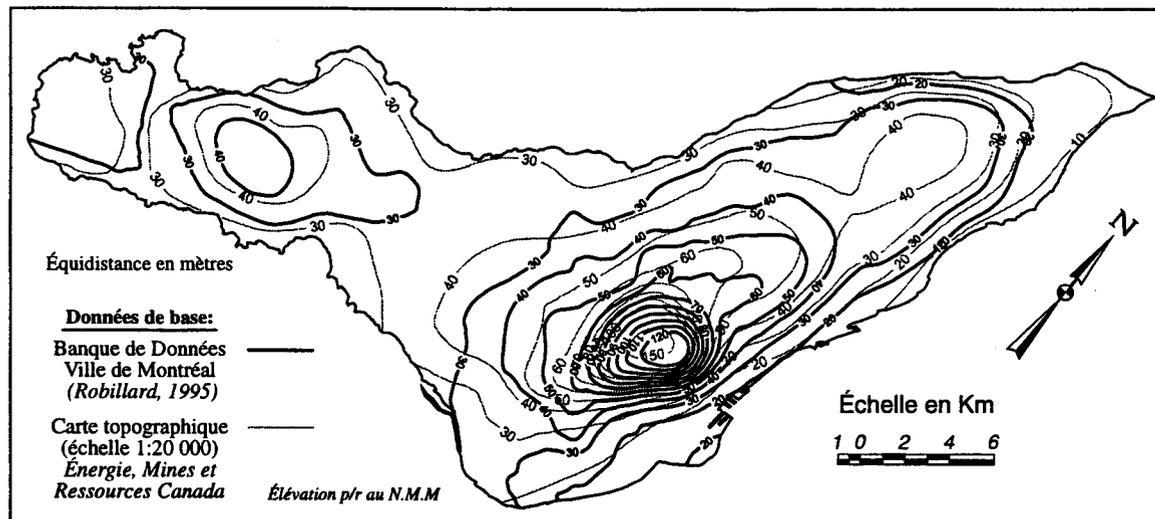


FIGURE A.11: Topographie krigée à partir de toutes les données (n=8624).

En résumé, il n'a pas été possible de tirer des conclusions sur le niveau piézométrique à partir de la banque de données de la Ville de Montréal. Ceci est principalement dû à la distribution spatiale et temporelle de ces données et aux techniques d'interpolation utilisées. Des travaux plus poussés sont nécessaires afin de tirer le maximum de ces données.

ANNEXE B

DONNÉES CLIMATIQUES – ÎLE DE MONTRÉAL

PÉRIODE 1974-1993

TABLEAU B.1: Données climatiques: Station International

PARAMÈTRE: Précipitation -PLUIE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1974	26.8	19.0	43.8	81.3	106.0	66.8	145.6	34.8	46.9	27.9	73.3	38.1
1975	6.2	14.3	61.6	28.1	73.5	87.1	155.0	88.1	227.9	90.6	86.0	25.2
1976	19.4	39.7	48.3	37.0	115.0	84.8	104.8	80.9	109.4	115.7	24.3	17.6
1977	5.0	2.4	61.9	54.8	24.4	106.8	72.9	81.9	144.6	112.9	61.3	11.3
1978	35.8	-	57.3	58.0	41.8	89.0	50.5	96.9	37.1	88.0	43.2	4.8
1979	30.4	-	51.4	95.9	87.0	33.5	38.4	99.2	130.7	85.0	67.9	56.2
1980	20.0	-	25.1	94.9	46.5	44.2	182.6	66.4	139.6	67.9	58.5	31.6
1981	0.8	87.0	14.0	68.0	83.2	107.0	85.4	144.2	97.3	101.6	65.0	1.4
1982	20.8	1.6	43.2	40.1	15.2	78.8	63.6	169.6	94.2	26.5	96.9	59.4
1983	28.8	48.0	36.2	119.9	136.9	39.6	67.4	32.8	76.9	85.3	115.8	75.7
1984	5.4	31.3	16.5	75.2	117.9	100.2	60.1	112.4	28.8	49.0	76.2	22.7
1985	0.0	42.2	47.4	30.9	41.6	96.2	67.2	78.3	71.1	86.6	58.1	22.2
1986	35.8	12.2	22.5	48.8	82.4	115.8	93.6	131.6	117.4	57.0	34.9	63.2
1987	0.0	0.0	20.6	34.2	55.0	129.0	131.0	54.6	108.2	56.9	86.3	12.8
1988	13.6	8.4	15.4	79.0	50.2	72.0	31.2	159.0	41.8	65.4	92.6	8.2
1989	16.2	8.0	21.0	49.0	83.0	84.4	30.0	119.2	57.4	118.8	137.6	15.0
1990	32.0	43.0	30.0	84.1	79.2	68.8	132.4	84.4	79.2	118.8	70.9	106.5
1991	15.6	17.8	48.8	117.4	91.2	34.8	85.4	111.6	69.6	70.7	22.0	19.4
1992	64.0	14.2	58.7	17.0	56.4	76.4	137.2	70.0	108.2	78.6	89.9	19.4
1993	76.6	0.0	1.4	115.0	86.7	93.4	90.2	43.6	122.6	122.4	79.6	22.2
MOYENNE	22.66	22.89	36.26	66.43	73.66	80.43	91.23	92.98	95.45	81.28	72.02	31.65

PARAMÈTRE: Précipitation -NEIGE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1974	38.8	22.2	50.4	16.1							15.0	53.1
1975	55.8	33.0	22.1	32.9							34.6	75.2
1976	81.6	69.4	41.4	14.8	4.8						20.6	31.3
1977	57.7	44.9	25.8	12.4							29.3	61.1
1978	68.1	-	46.4	7.7	1.2						32.5	71.9
1979	82.7	21.7	5.0	20.2						10.4	3.2	8.1
1980	11.2	18.4	36.8	3.8							19.7	47.9
1981	23.5	23.9	22.7	1.8						1.6	17.2	56.0
1982	51.5	32.4	51.8	0.6							4.6	11.0
1983	32.5	20.8	17.8	40.2	0.4						80.5	80.1
1984	26.0	36.2	19.7	1.0							8.9	75.6
1985	50.8	23.4	51.3	24.2							16.7	47.1
1986	69.2	30.6	38.0	0.6							36.1	41.0
1987	68.2	36.9	26.7	2.0							29.4	38.0
1988	14.0	70.4	14.8	0.0						22.4	25.2	27.8
1989	48.8	22.8	42.2	3.6						5.8	36.6	33.2
1990	54.0	42.6	5.2	16.0							16.4	41.0
1991	65.4	33.8	37.7	0.0							7.5	47.7
1992	30.9	80.2	16.0	24.2						0.4	13.1	8.0
1993	39.2	66.4	69.2	37.2						0.8	23.0	45.0
MOYENNE	48.50	38.42	32.05	12.97	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00	2.07	23.51	45.01

TABLEAU B.1: Données climatiques: Station International (suite)

PARAMÈTRE: Précipitation -TOTALE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1974	65.6	41.2	94.2	97.4	106.0	66.8	145.6	34.8	46.9	27.9	88.3	91.2
1975	62.0	47.3	83.7	61.0	73.5	87.1	155.0	88.1	227.9	90.6	120.6	100.4
1976	101.0	109.1	89.7	51.8	119.8	84.8	104.8	80.9	109.4	115.7	44.9	48.9
1977	62.7	47.3	87.7	67.2	24.4	106.8	72.9	81.9	144.6	112.9	90.6	72.4
1978	103.9	-	103.7	65.7	43.0	89.0	50.5	96.9	37.1	88.0	75.7	76.7
1979	113.1	-	56.4	116.1	87.0	33.5	38.4	99.2	130.7	95.4	71.1	64.3
1980	31.2	-	61.9	98.7	46.5	44.2	182.6	66.4	139.6	67.9	78.2	79.5
1981	24.3	110.9	36.7	69.8	83.2	107.0	85.4	144.2	97.3	103.2	82.2	57.4
1982	72.3	34.0	95.0	40.7	15.2	78.8	63.6	169.6	94.2	26.5	101.5	70.4
1983	61.3	68.8	54.0	160.1	137.3	39.6	67.4	32.8	76.9	85.3	196.3	155.8
1984	31.4	67.5	36.2	76.2	117.9	100.2	60.1	112.4	28.8	49.0	85.1	98.3
1985	50.8	65.6	98.7	55.1	41.6	96.2	67.2	78.3	71.1	86.6	74.8	69.3
1986	105.0	42.8	60.5	49.4	82.4	115.8	93.6	131.6	117.4	57.0	71.0	104.2
1987	68.2	36.9	47.3	36.2	55.0	129.0	131.0	54.6	108.2	56.9	115.7	50.8
1988	27.6	78.8	30.2	79.0	50.2	72.0	31.2	159.0	41.8	87.8	117.8	36.0
1989	65.0	30.8	63.2	52.6	83.0	84.4	30.0	119.2	57.4	124.6	174.2	48.2
1990	86.0	85.6	35.2	100.1	79.2	68.8	132.4	84.4	79.2	118.8	87.3	147.5
1991	81.0	51.6	86.5	117.4	91.2	34.8	85.4	111.6	69.6	70.7	29.5	67.1
1992	94.9	94.4	74.7	41.2	56.4	76.4	137.2	70.0	108.2	79.0	103.0	27.4
1993	115.8	66.4	70.6	152.2	86.7	93.4	90.2	43.6	122.6	123.2	102.6	67.2
MOYENNE	71.155	63.471	68.305	79.395	73.975	80.43	91.225	92.975	95.445	83.35	95.52	76.65

PARAMÈTRE: Température (°C)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1974	-9.6	-10.0	-4.1	5.0	10.1	18.0	20.1	19.3	13.0	5.1	0.9	-3.5
1975	-8.2	-7.9	-4.0	3.0	16.2	18.7	22.4	20.2	14.0	8.9	3.9	-9.1
1976	-14.2	-6.5	-3.3	7.0	12.1	19.3	19.3	18.4	13.7	5.9	-0.1	-11.0
1977	-13.0	-7.7	1.1	5.9	14.3	16.8	19.8	18.4	13.5	7.5	2.7	-7.2
1978	-11.6	-12.0	-4.9	3.4	15.3	17.2	20.6	19.6	12.0	7.3	0.6	-7.3
1979	-9.3	-14.0	0.4	6.1	13.6	17.9	21.6	18.4	14.0	7.8	3.4	-4.8
1980	-8.5	-9.6	-2.3	6.9	13.1	16.1	19.9	20.3	13.2	5.8	-0.6	-12.2
1981	-15.0	-1.7	-0.6	6.6	13.0	18.2	20.9	19.1	13.8	5.9	1.8	-4.0
1982	-15.1	-9.5	-2.9	3.9	15.0	16.8	20.9	17.2	14.7	8.7	3.4	-2.8
1983	-8.0	-5.9	-0.2	5.2	11.1	18.7	21.4	20.8	17.1	8.6	1.9	-8.2
1984	-12.2	-3.6	-6.4	7.1	11.5	18.4	21.3	21.1	18.2	9.4	2.0	-4.0
1985	-13.0	-7.2	-2.1	5.0	13.3	16.3	20.5	19.3	16.1	9.0	1.2	-8.1
1986	-9.4	-10.1	-1.7	8.8	13.8	16.0	19.6	18.4	13.3	8.0	0.3	-4.6
1987	-9.0	-11.3	0.0	9.4	13.0	18.6	21.6	18.7	15.0	7.7	1.0	-3.3
1988	-8.0	-7.7	-2.6	6.7	14.9	17.2	22.5	20.5	14.3	6.2	3.2	-7.7
1989	-7.3	-8.8	-4.5	4.8	14.6	18.9	21.7	19.4	15.6	9.5	-0.6	-15.6
1990	-3.7	-6.9	-1.1	6.5	11.6	18.1	21.1	20.6	14.1	8.6	2.5	-4.2
1991	-10.4	-5.5	-7.0	7.9	15.0	19.0	22.2	20.7	13.5	9.5	2.5	-7.3
1992	-11.0	-9.7	-5.2	4.9	13.2	17.7	18.5	18.7	14.6	6.5	1.5	-4.2
1993	-8.8	-14.1	-4.0	5.9	13.1	17.6	21.5	20.9	14.1	6.5	1.3	-5.6
MOYENNE	-10.27	-8.49	-2.77	6.00	13.39	17.78	20.87	19.50	14.39	7.62	1.64	-6.74

TABLEAU B.2: Données climatiques: Station Jardin Botanique

PARAMÈTRE: Précipitation -PLUIE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973	41.2	43.2	93.9	62.4	121.9	106.7	68.4	79.9	100.6	76.4	60.3	79.5
1974	48.6	26.9	57.3	97.5	136.2	65.6	155.8	28.8	75.6	45.1	64.0	42.6
1975	18.7	28.3	76.6	33.5	80.6	76.6	185.6	56.7	209.3	86.2	88.8	49.0
1976	48.0	74.4	80.9	60.7	141.9	87.8	122.3	85.5	107.2	107.0	27.1	21.6
1977	0.0	8.9	72.4	60.8	26.5	115.1	49.0	74.0	158.9	123.6	61.7	17.5
1978	73.9	0.0	60.0	51.8	41.6	127.7	68.7	114.8	51.7	83.3	55.6	27.2
1979	22.3	9.5	61.2	103.6	106.8	72.0	67.2	110.6	148.2	88.1	80.9	59.7
1980	22.0	-	-	109.8	56.6	46.4	179.3	99.0	152.7	77.4	60.2	30.2
1981	0.0	113.4	23.0	73.2	114.4	146.2	97.4	189.7	86.8	95.1	75.2	4.6
1982	38.0	158.4	53.6	51.5	15.8	97.5	44.0	185.8	114.5	44.2	97.8	54.6
1983	30.6	65.0	44.6	144.6	157.6	25.6	106.0	31.8	68.4	105.4	177.8	63.2
1984	10.6	34.6	15.8	88.0	124.0	112.2	72.2	124.9	23.9	56.7	84.7	13.2
1985	0.0	41.2	54.4	77.6	39.8	116.0	71.0	85.6	93.0	105.9	82.2	28.6
1986	36.0	-	-	56.0	111.1	100.2	132.0	120.8	137.2	64.6	47.6	62.8
1987	0.0	0.0	23.4	40.6	97.8	153.3	132.9	64.2	121.3	70.6	91.1	6.6
1988	9.0	4.2	18.2	85.6	50.8	83.0	38.4	149.8	44.0	76.2	111.4	6.1
1989	26.9	12.5	16.3	56.2	108.2	93.5	47.3	79.5	78.7	36.1	-	-
1990												
1991												
1992												
1993												
MOYENNE	25.05	41.37	50.11	73.73	90.09	95.61	96.32	98.91	104.24	78.94	79.15	35.44

PARAMÈTRE: Précipitation -NEIGE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973	36.0	37.2	19.0	27.3							7.2	92.0
1974	44.4	20.8	63.5	15.2							21.4	68.1
1975	61.1	28.1	22.8	38.6							44.2	63.1
1976	76.7	57.8	45.1	4.7	2.5					5.1	21.2	38.5
1977	70.7	48.8	24.3	14.2							23.9	81.5
1978	97.2	19.3	56.0	0.0							37.6	82.2
1979	81.2	14.7	3.0	17.3						5.8	1.5	12.4
1980	12.6	-	-	0.0							10.8	54.6
1981	22.3	12.4	9.8	0.0							9.1	57.2
1982	42.4	17.6	38.8	0.0							0.2	9.5
1983	23.6	20.6	12.4	18.0							26.2	70.5
1984	28.7	27.4	18.6	0.0							3.8	61.6
1985	26.2	13.0	48.4	4.1							13.4	47.2
1986	67.4	14.0	0.0	0.0							35.8	30.5
1987	81.6	27.6	24.7	0.2							27.0	45.4
1988	15.2	61.4	7.2	0.0						8.4	6.2	18.1
1989	54.5	21.4	30.2	0.0							-	-
1990												
1991												
1992												
1993												
MOYENNE	49.52	27.63	26.49	8.21	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	1.14	18.09	52.03

TABLEAU B.2: Données climatiques: Station Jardin Botanique (suite)

PARAMÈTRE: Précipitation -TOTALE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973	77.2	80.4	112.9	89.7	121.9	106.7	68.4	79.9	100.6	76.4	67.5	171.5
1974	93.0	47.7	120.8	112.7	136.2	65.6	155.8	28.8	75.6	45.1	85.4	110.7
1975	79.8	56.4	99.4	72.1	80.6	76.6	185.6	56.7	209.3	86.2	133.0	112.1
1976	124.7	132.2	126.0	65.4	144.4	87.8	122.3	85.5	107.2	112.1	48.3	60.1
1977	70.7	57.7	96.7	75.0	26.5	115.1	49.0	74.0	158.9	123.6	85.6	99.0
1978	171.1	19.3	116.0	51.8	41.6	127.7	68.7	114.8	51.7	83.3	93.2	109.4
1979	103.5	24.2	64.2	120.9	106.8	72.0	67.2	110.6	148.2	93.9	82.4	72.1
1980	34.6	-	-	109.8	56.6	46.4	179.3	99.0	152.7	77.4	71.0	84.8
1981	22.3	125.8	32.8	73.2	114.4	146.2	97.4	189.7	86.8	95.1	84.3	61.8
1982	80.4	176.0	92.4	51.5	15.8	97.5	44.0	185.8	114.5	44.2	98.0	64.1
1983	54.2	85.6	57.0	162.6	157.6	25.6	106.0	31.8	68.4	105.4	204.0	133.7
1984	39.3	62.0	34.4	88.0	124.0	112.2	72.2	124.9	23.9	56.7	88.5	74.8
1985	26.2	54.2	102.8	81.7	39.8	116.0	71.0	85.6	93.0	105.9	95.6	75.8
1986	103.4	-	-	56.0	111.1	100.2	132.0	120.8	137.2	64.6	83.4	93.3
1987	81.6	27.6	48.1	40.8	97.8	153.3	132.9	64.2	121.3	70.6	118.1	52.0
1988	24.2	65.6	25.4	85.6	50.8	83.0	38.4	149.8	44.0	84.6	117.6	24.2
1989	81.4	33.9	46.5	56.2	108.2	93.5	47.3	79.5	78.7	36.1		
1990												
1991												
1992												
1993												
MOYENNE	74.56	69.91	78.36	81.94	90.24	95.61	96.32	98.91	104.24	80.07	97.24	87.46

PARAMÈTRE: Température (°C)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973	-7.2	-9.0	-2.1	6.5	12.1	19.4	22.5	22.4	14.5	10.0	1.2	-4.6
1974	-8.8	-9.5	-3.3	5.8	10.6	18.7	21.1	20.6	14.3	6.3	1.7	-2.6
1975	-7.1	-7.1	-2.8	3.7	16.7	19.6	23.3	21.0	14.6	9.7	4.2	-7.9
1976	-13.1	-5.8	-2.4	5.6	12.4	20.5	20.5	19.6	14.0	6.6	0.2	-10.8
1977	-12.1	-7.1	1.5	6.7	15.4	17.8	21.2	19.4	14.2	8.3	3.2	-6.9
1978	-10.8	-10.8	3.8	4.5	16.2	18.5	22.1	20.4	13.2	8.2	1.2	-6.6
1979	-8.3	-13.6	1.4	6.9	14.4	19.0	23.0	19.2	14.7	8.5	4.0	-4.1
1980	-7.6	-11.0	6.0	7.3	13.8	17.8	20.8	21.1	14.5	6.5	0.1	-11.2
1981	-13.8	-1.1	0.3	7.6	13.9	19.3	21.9	19.8	14.6	6.8	1.9	-3.2
1982	-15.1	-8.7	-2.3	4.8	15.6	17.6	21.7	18.3	15.3	9.5	3.8	-2.8
1983	-7.4	-5.9	-0.6	5.5	11.5	20.0	22.5	21.6	17.7	8.5	1.8	-7.5
1984	-11.6	-3.3	-5.9	7.2	11.8	19.8	21.1	22.0	14.3	10.0	2.5	-3.6
1985	-12.7	-6.6	-2.1	5.9	13.9	17.2	21.4	19.9	16.6	9.8	0.7	-7.6
1986	-8.8	-11.5	2.0	9.3	14.2	17.0	20.5	19.2	14.2	8.7	0.6	-4.8
1987	-8.7	-10.1	0.1	9.5	13.8	19.4	22.5	19.3	15.3	7.7	0.8	-3.0
1988	-7.5	-7.2	-2.4	6.9	15.4	18.3	23.2	21.0	15.1	7.0	3.2	-6.9
1989	-7.1	-8.5	-4.2	3.6	15.3	19.6	22.8	20.2	16.5	9.0		
1990												
1991												
1992												
1993												
MOYENNE	-9.86	-8.05	-0.76	6.31	13.94	18.79	21.89	20.29	14.92	8.30	1.94	-5.88

TABLEAU B.3: Données climatiques: Station Brébeuf

PARAMÈTRE: Précipitation -PLUIE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973						132.2	73.8	83.6	96.7	81.2	62.0	97.2
1974	46.5	27.5	45.0	87.6	123.2	62.1	113.5	37.8	60.2	43.1	67.8	45.6
1975	23.4	33.7	72.6	36.5	85.2	100.9	158.7	47.1	208.9	99.1	93.7	41.8
1976	43.9	42.5	85.9	67.7	126.8	93.1	115.2	76.4	106.6	132.3	26.0	20.8
1977	0.0	2.3	62.6	75.9	28.7	141.9	88.9	81.8	-	-	-	-
1978	0.0	0.0	31.5	60.6	57.4	130.3	43.7	130.0	44.7	91.2	63.3	20.4
1979	-	-	57.7	121.0	118.0	47.8	46.3	103.9	145.0	74.8	77.4	53.6
1980	21.8	0.0	23.8	93.1	51.8	42.6	195.1	75.4	162.4	62.9	59.9	28.4
1981	-	79.7	13.6	68.8	100.3	145.5	94.8	192.3	93.2	104.1	52.5	4.5
1982	20.2	0.0	44.5	45.7	22.6	94.8	67.4	157.1	103.2	40.9	94.3	59.2
1983	24.3	55.4	35.2	108.9	155.4	29.4	91.8	27.2	81.8	26.4	130.6	8.0
1984	5.8	30.8	3.1	94.4	137.8	104.2	66.5	107.8	26.0	46.0	90.5	17.8
1985	0.0	36.7	49.3	33.0	20.6							
1986												
1987												
1988												
1989												
1990												
1991												
1992												
1993												
MOYENNE	18.59	28.05	43.73	74.43	85.65	93.73	96.31	93.37	102.61	72.91	74.36	36.12

PARAMÈTRE: Précipitation -NEIGE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973											2.6	55.7
1974	29.4	11.3	46.2	11.6						0.1	18.7	54.9
1975	47.6	25.0	18.0	32.8							36.0	68.0
1976	50.4	57.2	44.1	4.5	1.3					4.4	20.3	43.0
1977	52.9	40.0	20.1	5.4							-	-
1978	93.3	24.9	61.4	0.0							36.1	78.5
1979	-	-	1.5	14.2							2.5	8.7
1980	18.0	27.9	45.5	0.0							17.9	47.2
1981	16.9	10.3	31.2	6.0							27.4	64.2
1982	65.3	26.6	45.0	3.2							12.5	11.8
1983	32.9	24.7	15.0	55.9							39.8	73.2
1984	30.3	44.8	16.8	0.0							3.2	69.7
1985	49.0	29.7	48.0	16.0								
1986												
1987												
1988												
1989												
1990												
1991												
1992												
1993												
MOYENNE	44.18	29.31	32.73	12.47	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.38	19.73	52.26

TABLEAU B.3: Données climatiques: Station Brébeuf (suite)

PARAMÈTRE: Précipitation -TOTALE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973						132.2	73.8	83.6	96.7	81.2	64.6	152.9
1974	75.9	38.8	91.2	99.2	123.2	62.1	113.5	37.8	60.2	43.2	86.5	100.5
1975	71.0	58.7	90.6	69.3	85.2	100.9	158.7	47.1	208.9	99.1	129.7	109.8
1976	94.3	99.7	130.0	72.2	128.1	93.1	115.2	76.4	106.6	136.7	46.3	63.8
1977	52.9	42.3	82.7	81.3	28.7	141.9	88.9	81.8	-	-	-	-
1978	93.3	24.9	92.9	60.6	57.4	130.3	43.7	130.0	44.7	91.2	99.4	98.9
1979	-	-	59.2	135.2	118.0	47.8	46.3	103.9	145.0	74.8	79.9	62.3
1980	39.8	27.9	69.3	93.1	51.8	42.6	195.1	75.4	162.4	62.9	77.8	75.6
1981	-	90.0	44.8	74.8	100.3	145.5	94.8	192.3	93.2	104.1	79.9	68.7
1982	85.5	26.6	89.5	48.9	22.6	94.8	67.4	157.1	103.2	40.9	106.8	71.0
1983	57.2	80.1	50.2	164.8	155.4	29.4	91.8	27.2	81.8	26.4	170.4	81.2
1984	36.1	75.6	19.9	94.4	137.8	104.2	66.5	107.8	26.0	46.0	93.7	87.5
1985	49.0	66.4	97.3	49.0	20.6							
1986												
1987												
1988												
1989												
1990												
1991												
1992												
1993												
MOYENNE	65.50	57.36	76.47	86.90	85.76	93.73	96.31	93.37	102.61	73.32	94.09	88.38

PARAMÈTRE: Température (°C)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973						19.8	22.9	22.5	13.9	10.0	1.3	-4.5
1974	-8.5	-9.6	-3.5	5.8	10.5	18.6	21.1	20.6	14.4	6.5	1.8	-2.7
1975	-7.0	-6.6	-3.1	3.8	17.0	19.6	23.3	21.2	14.1	9.4	4.6	-8.0
1976	-12.6	-5.5	-1.9	7.4	12.2	20.2	20.2	19.4	14.0	6.2	0.1	-11.0
1977	-12.4	-7.3	2.0	6.8	15.7	17.6	20.9	19.4	-	-	-	-
1978	-11.5	-11.1	-3.9	4.1	15.8	18.0	22.0	20.9	14.1	8.0	1.7	-5.3
1979	-8.7	-12.9	1.3	6.2	13.9	18.6	22.3	18.9	14.8	8.6	4.8	-3.7
1980	-7.8	-8.3	-1.6	7.2	14.5	17.4	21.1	21.4	14.4	6.5	-0.1	-10.7
1981	-13.3	-1.1	0.4	7.4	13.8	18.7	22.2	20.3	13.8	6.1	1.9	-3.2
1982	-14.1	-8.2	-1.9	4.5	15.5	17.1	21.2	17.3	14.8	9.7	3.6	-2.2
1983	-7.1	-5.5	-0.3	5.3	11.1	20.2	22.7	21.6	18.3	9.3	2.6	-7.1
1984	-10.3	-2.6	-5.6	7.5	11.3	19.6	21.5	21.9	14.1	10.0	2.7	-3.7
1985	-12.2	-6.2	-1.5	5.5	11.6							
1986												
1987												
1988												
1989												
1990												
1991												
1992												
1993												
MOYENNE	-10.46	-7.08	-1.63	5.96	13.58	18.78	21.78	20.45	14.61	8.21	2.27	-5.65

TABLEAU B.4: Données climatiques: Station Lafontaine**PARAMÈTRE:** Précipitation -PLUIE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973						108.8	71.4	128.2	103.1	86.3	70.2	68.5
1974	46.5	27.9	100.1	93.3	136.7	51.2	194.0	52.6	77.2	47.8	65.6	43.0
1975	14.3	31.6	63.6	27.1	76.9	95.1	158.3	57.0	172.6	87.0	88.0	42.5
1976	19.7	4.3	74.4	59.6	143.5	75.6	87.4	78.1	114.4	116.3	37.1	22.5
1977	0.0	8.1	94.6	59.2	26.9	117.6	62.8	71.9	157.7	103.0	65.2	13.2
1978	28.7	0.0	24.6	48.0	49.7	141.9	46.1	122.4	55.8	91.3	65.4	19.3
1979	0.0	0.0	42.8	36.9	139.2	46.3	56.4	130.4	143.4	66.5	75.4	107.7
1980	-	6.0	-	64.4	35.0	31.7	119.0	88.7	172.0	64.0	47.8	-
1981	-	-	-	70.4	118.4	131.5	97.8	191.4	84.8	104.6	81.0	3.4
1982	34.7	0.0	48.7	41.9	15.3	95.5	61.2	156.4	110.1	27.1	105.8	73.0
1983	32.2	77.0	57.9	160.0	160.0	34.8	134.1	28.2	74.9	93.0	87.9	111.2
1984	10.0	30.8	31.4	89.0	134.4	107.6	73.6	132.6	32.8	49.0	87.8	26.2
1985	7.8	48.3	54.0	46.0	43.0	111.0	71.0	86.0	97.6	107.4	75.2	24.8
1986	38.6	20.2	26.2	50.8	102.6	108.4	126.6	120.4	135.2	63.0	40.2	71.6
1987	0.8	0.0	25.1	48.8	87.2	126.8	140.6	52.8	116.8	69.6	58.6	8.6
1988	9.4	17.8	9.8	91.0	51.6	75.0	55.0	165.8	52.8	77.2	58.6	10.2
1989	9.4	10.8	21.4	55.2	112.6	95.8	55.7	83.4	68.8	118.8	154.0	17.4
1990	31.2	31.0	18.8	101.4	93.2	104.8	134.0	109.0	96.8	130.2	87.0	99.4
1991	17.0	17.0	84.4	139.4	106.2	38.2	87.0	87.0	81.0	88.6	25.4	28.0
1992	68.6	11.0	61.8	32.8	54.2							
1993												
MOYENNE	21.70	18.99	49.39	69.22	88.77	89.35	96.42	102.23	102.52	83.72	72.43	43.92

PARAMÈTRE: Précipitation -NEIGE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973											5.4	97.7
1974	33.5	22.1	86.7	28.8						0.1	18.5	68.2
1975	74.0	24.0	28.1	53.0							45.6	63.5
1976	80.1	70.1	34.3	3.8	0.8					4.6	22.8	58.7
1977	95.6	45.2	20.5	4.8							23.7	76.0
1978	90.2	25.2	40.6	0.0							23.7	68.2
1979	63.4	21.6	0.0	11.2							0.0	3.5
1980	1.5	8.0	5.0	0.0							3.0	-
1981	-	8.0	0.0	0.0							0.0	78.9
1982	47.3	22.2	31.5	3.9							0.8	10.0
1983	43.2	23.2	12.6	4.0							26.4	68.0
1984	43.2	35.6	22.4	0.0							7.2	73.8
1985	46.8	30.6	57.4	12.8							12.8	55.5
1986	83.8	32.4	34.6	1.4							31.6	31.2
1987	84.4	38.0	24.0	0.0						0.6	23.1	45.2
1988	13.8	71.0	9.0	0.0						2.8	36.0	26.0
1989	54.6	22.2	56.2	4.8						6.8	31.4	35.8
1990	62.2	61.4	17.2	6.2							17.0	36.2
1991	67.0	29.0	20.4	0.0							7.6	72.0
1992	28.6	76.6	11.6	12.6								
1993												
MOYENNE	56.29	35.07	26.95	7.75	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.78	17.72	53.80

TABLEAU B.4: Données climatiques: Station Lafontaine (suite)

PARAMÈTRE: Précipitation -TOTALE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973						108.8	71.4	128.2	103.1	86.3	75.6	166.2
1974	80.0	50.0	186.8	122.1	136.7	51.2	194.0	52.6	77.2	47.9	84.1	111.2
1975	88.3	55.6	91.7	80.1	76.9	95.1	158.3	57.0	172.6	87.0	133.6	106.0
1976	99.8	74.4	108.7	63.4	144.3	75.6	87.4	78.1	114.4	120.9	59.9	81.2
1977	95.6	53.3	115.1	64.0	26.9	117.6	62.8	71.9	157.7	103.0	88.9	89.2
1978	118.9	25.2	65.2	48.0	49.7	141.9	46.1	122.4	55.8	91.3	89.1	87.5
1979	63.4	21.6	42.8	48.1	139.2	46.3	56.4	130.4	143.4	66.5	75.4	111.2
1980	-	14.0	-	64.4	35.0	31.7	119.0	88.7	172.0	64.0	50.8	-
1981	-	-	-	70.4	118.4	131.5	97.8	191.4	84.8	104.6	81.0	82.3
1982	82.0	22.2	80.2	45.8	15.3	95.5	61.2	156.4	110.1	27.1	106.6	83.0
1983	75.4	100.2	70.5	164.0	160.0	34.8	134.1	28.2	74.9	93.0	114.3	179.2
1984	53.2	66.4	53.8	89.0	134.4	107.6	73.6	132.6	32.8	49.0	95.0	100.0
1985	54.6	78.9	111.4	58.8	43.0	111.0	71.0	86.0	97.6	107.4	88.0	80.3
1986	122.4	52.6	60.8	52.2	102.6	108.4	126.6	120.4	135.2	63.0	71.8	102.8
1987	85.2	38.0	49.1	48.8	87.2	126.8	140.6	52.8	116.8	70.2	81.7	53.8
1988	23.2	88.8	18.8	91.0	51.6	75.0	55.0	165.8	52.8	80.0	94.6	36.2
1989	64.0	33.0	77.6	60.0	112.6	95.8	55.7	83.4	68.8	125.6	185.4	53.2
1990	93.4	92.4	36.0	107.6	93.2	104.8	134.0	109.0	96.8	130.2	104.0	135.6
1991	84.0	46.0	104.8	139.4	106.2	38.2	87.0	87.0	81.0	88.6	33.0	100.0
1992	97.2	87.6	73.4	45.4	54.2							
1993												
MOYENNE	81.21	55.57	79.22	76.97	88.81	89.35	96.42	102.23	102.52	84.51	90.15	97.72

PARAMÈTRE: Température (°C)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973						20.3	23.1	23.3	15.2	10.6	2.0	-3.1
1974	-7.9	-8.7	-2.7	6.5	11.3	19.4	21.9	21.3	14.9	7.2	2.1	-2.0
1975	-6.4	-5.8	-2.4	4.5	17.6	20.5	24.0	22.7	14.7	10.2	5.2	-7.4
1976	-11.9	-5.0	-1.5	8.3	12.9	21.3	21.1	20.6	14.7	7.1	0.4	-10.1
1977	-11.6	-6.4	2.3	7.5	16.1	18.4	21.7	20.2	14.8	9.3	4.2	-5.7
1978	-10.2	-9.9	-3.3	5.2	16.7	19.0	22.5	21.2	14.3	8.5	2.1	-6.1
1979	-8.4	-13.0	-1.6	7.2	14.7	19.4	22.5	19.4	14.3	9.4	4.1	-3.6
1980	-8.0	-7.7	-2.8	5.7	14.9	17.7	22.3	22.2	14.5	7.0	1.0	-5.3
1981	-	5.1	0.5	8.4	14.3	19.6	22.2	19.4	14.6	7.1	2.6	-2.9
1982	-14.0	-8.2	-1.5	5.3	15.9	17.6	22.0	18.6	15.6	10.1	4.1	-2.3
1983	-7.0	-5.4	0.1	5.8	11.8	20.5	22.9	22.1	18.7	9.3	2.5	-6.7
1984	-10.5	-2.7	-5.1	7.8	12.2	20.1	22.3	22.2	15.0	10.4	3.1	-2.8
1985	-11.6	-5.9	-1.0	6.3	14.3	17.2	21.8	20.7	17.2	10.3	1.5	-6.8
1986	-8.3	-8.4	-0.1	9.5	14.1	16.9	20.6	19.4	14.4	9.1	1.2	-3.9
1987	-7.6	-8.6	1.1	9.6	14.1	19.7	22.8	20.2	15.9	8.6	1.7	-2.3
1988	-6.7	-6.8	-1.9	7.1	15.6	18.9	23.5	21.6	15.7	7.4	4.2	-6.3
1989	-6.2	-8.0	-3.2	5.6	15.4	19.8	23.1	21.0	17.2	10.2	0.6	-14.4
1990	-3.3	-6.6	-0.9	7.1	12.9	19.2	22.2	21.7	15.3	9.5	3.0	-3.6
1991	-9.1	-5.0	-0.5	8.4	16.0	20.5	22.6	21.8	15.0	10.5	3.1	-6.4
1992	-9.8	-7.8	-3.8	5.9	14.3							
1993												
MOYENNE	-8.81	-6.57	-1.49	6.93	14.48	19.26	22.37	21.03	15.37	9.04	2.56	-5.35

TABLEAU B.5: Données climatiques: Station McGill

PARAMÈTRE: Précipitation -PLUIE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973				89.2	130.5	108.0	83.1	110.3	106.0	85.5	61.0	94.0
1974	41.8	25.6	45.5	79.4	130.6	67.0	162.2	45.0	62.7	42.5	69.4	40.5
1975	15.1	17.9	76.1	35.5	80.6	79.4	154.5	49.3	186.3	-	87.3	-
1976	31.0	41.6	71.7	51.0	127.6	87.8	93.4	82.1	112.1	137.1	27.2	26.5
1977	0.0	2.6	66.9	58.6	26.8	133.3	91.8	85.1	156.7	126.9	58.9	14.0
1978	58.4	0.0	60.7	58.4	43.9	119.2	56.8	117.4	40.7	91.8	58.5	31.5
1979	26.3	6.6	53.9	99.2	136.5	43.6	61.2	112.8	149.9	68.9	75.2	63.8
1980	17.6	0.5	30.3	104.0	49.4	38.6	189.4	82.7	147.4	63.8	58.7	33.9
1981	0.8	92.0	17.8	67.4	108.6	148.0	121.4	186.8	87.7	110.4	57.4	3.2
1982	21.9	2.8	46.9	44.7	16.1	102.0	65.8	84.6	102.8	41.8	106.5	65.3
1983	31.5	29.4	46.8	119.2	160.5	30.8	124.1	30.1	82.9	90.0	154.2	90.1
1984	6.2	27.0	23.3	84.3	112.6	70.8	76.7	105.4	31.2	44.5	81.6	14.1
1985	4.4	38.7	26.0	35.4	40.8	104.5	70.4	88.4	95.8	94.5	68.2	23.8
1986	32.1	11.6	24.7	40.6	88.8	104.9	142.9	136.8	141.8	63.8	36.3	51.3
1987	0.0	0.0	23.7	42.4	81.4	130.2	153.7	62.2	124.7	57.9	94.4	12.2
1988	15.8	20.6	17.6	83.2	45.2	77.6	59.1	160.3	51.8	61.1	-	-
1989	-	9.6	34.3	49.0	99.7	93.4	50.9	83.2	67.5	110.7	57.1	15.5
1990	28.7	41.9	30.9	92.4	85.1	93.1	130.1	106.9	87.8	114.8	78.6	120.1
1991	-	-	-	-	106.9	36.9	83.8	90.5	85.8	76.1	32.4	19.1
1992	69.1	11.1	59.1	20.5	48.3	73.3	152.0	67.9	139.1	82.6	102.4	16.8
1993	89.8	0.0	1.4									
MOYENNE	27.25	19.97	39.87	66.02	86.00	87.12	106.17	94.39	103.04	82.35	71.86	40.87

PARAMÈTRE: Précipitation -NEIGE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973											11.8	87.3
1974	29.3	22.6	68.7	21.7							26.0	60.2
1975	69.5	36.5	28.9	36.8							0.0	40.6
1976	65.3	70.2	43.0	14.1	8.7					5.0	12.8	29.5
1977	43.6	44.1	24.1	9.5							22.4	73.4
1978	75.1	20.7	59.5	0.5	0.8						33.3	74.0
1979	66.8	15.6	4.1	18.0						12.8	4.9	7.6
1980	12.6	22.1	41.6	5.6							20.4	41.5
1981	16.7	34.7	16.5	1.5							33.4	68.2
1982	74.0	30.5	57.9	1.7							5.3	8.7
1983	29.6	39.7	21.7	38.6							72.1	104.1
1984	36.7	38.8	18.4	0.0							9.3	89.9
1985	43.9	29.9	60.6	25.3							14.4	51.5
1986	81.7	28.9	43.6	0.2							40.5	35.2
1987	59.4	30.9	25.1	1.1						1.0	36.4	47.6
1988	16.2	68.9	11.7	0.0						22.4	10.6	2.6
1989	8.4	21.6	53.2	3.2						6.4	1.6	43.7
1990	54.6	44.9	21.6	6.7							18.5	36.6
1991	-	-	-	-							3.9	70.2
1992	27.4	76.9	15.2	26.0						0.5	12.9	13.6
1993	39.3	71.7	73.7	0.0								
MOYENNE	44.74	39.43	36.27	11.08	0.50	0.00	0.00	0.00	0.00	2.53	19.53	49.30

TABLEAU B.5: Données climatiques: Station McGill (suite)

PARAMÈTRE: Précipitation -TOTALE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973				89.2	130.5	108.0	83.1	110.3	106.0	85.5	72.8	181.3
1974	71.1	48.2	114.2	101.1	130.6	67.0	162.2	45.0	62.7	42.5	95.4	100.7
1975	84.6	54.4	105.0	72.3	80.6	79.4	154.5	49.3	186.3	-	87.3	-
1976	96.3	111.8	114.7	65.1	136.3	87.8	93.4	82.1	112.1	142.1	40.0	56.0
1977	43.6	46.7	91.0	68.1	26.8	133.3	91.8	85.1	156.7	126.9	81.3	87.4
1978	133.5	20.7	120.2	58.9	44.7	119.2	56.8	117.4	40.7	91.8	91.8	105.5
1979	93.1	22.2	58.0	117.2	136.5	43.6	61.2	112.8	149.9	81.7	80.1	71.4
1980	30.2	22.6	71.9	109.6	49.4	38.6	189.4	82.7	147.4	63.8	79.1	75.4
1981	17.5	126.7	34.3	68.9	108.6	148.0	121.4	186.8	87.7	110.4	90.8	71.4
1982	95.9	33.3	104.8	46.4	16.1	102.0	65.8	84.6	102.8	41.8	111.8	74.0
1983	61.1	69.1	68.5	157.8	160.5	30.8	124.1	30.1	82.9	90.0	226.3	194.2
1984	42.9	65.8	41.7	84.3	112.6	70.8	76.7	105.4	31.2	44.5	90.9	104.0
1985	48.3	68.6	86.6	60.7	40.8	104.5	70.4	88.4	95.8	94.5	82.6	75.3
1986	113.8	40.5	68.3	40.8	88.8	104.9	142.9	136.8	141.8	63.8	76.8	86.5
1987	59.4	30.9	48.8	43.5	81.4	130.2	153.7	62.2	124.7	58.9	130.8	59.8
1988	32.0	89.5	29.3	83.2	45.2	77.6	59.1	160.3	51.8	83.5	-	-
1989	-	31.2	87.5	52.2	99.7	93.4	50.9	83.2	67.5	117.1	58.7	59.2
1990	83.3	86.8	52.5	99.1	85.1	93.1	130.1	106.9	87.8	114.8	97.1	156.7
1991	-	-	-	121.9	106.9	36.9	83.8	90.5	85.8	76.1	36.3	89.3
1992	96.5	88.0	74.3	46.5	48.3	73.3	152.0	67.9	139.1	83.1	115.3	30.4
1993	129.1	71.7	75.1									
MOYENNE	74.01	59.41	76.14	79.34	86.47	87.12	106.17	94.39	103.04	84.88	91.85	93.25

PARAMÈTRE: Température (°C)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973				7.4	13.1	20.6	23.5	23.1	15.7	10.7	1.9	-4.0
1974	-7.8	-8.6	-2.5	6.5	11.0	19.5	21.6	21.2	14.8	6.8	2.0	2.1
1975	-6.3	-5.6	-2.4	4.6	17.6	20.5	23.9	22.0	14.9	-	5.1	-
1976	-11.5	-4.9	-1.3	8.3	13.0	20.9	21.0	20.1	14.5	6.9	5.0	-10.1
1977	-14.4	-6.2	2.6	7.5	16.4	18.2	21.6	19.8	14.6	9.1	4.0	-5.9
1978	-10.3	-9.7	-3.1	5.2	16.7	18.7	22.2	20.8	13.8	8.2	2.1	-5.3
1979	-7.5	-11.9	-1.7	7.5	14.6	19.2	22.4	19.4	15.3	9.1	5.0	-3.4
1980	-7.3	-7.8	0.9	8.0	14.8	17.9	21.4	21.7	14.8	7.1	0.8	-9.7
1981	-12.4	-0.3	1.1	8.5	14.4	19.7	22.4	20.4	15.0	7.2	2.7	-2.9
1982	-14.3	-8.3	-1.7	5.1	16.1	18.0	22.4	18.5	15.7	10.1	4.1	-2.0
1983	-7.1	-5.4	0.2	6.3	-	20.5	23.0	21.1	18.4	9.3	2.7	-7.2
1984	-10.6	-2.8	-5.4	8.1	12.3	20.4	22.6	22.5	15.0	10.4	3.0	-3.4
1985	-12.6	-6.4	-1.4	6.2	14.4	17.2	21.6	20.6	17.1	10.2	1.6	-7.0
1986	-8.6	-8.5	-0.2	9.8	14.2	17.1	20.5	19.2	14.3	8.9	1.2	-3.8
1987	-7.2	-8.3	-1.5	10.2	14.4	19.9	22.7	20.5	15.9	8.8	2.0	-2.1
1988	-6.8	-6.4	-1.6	7.3	15.7	18.7	23.3	21.3	15.5	9.5	2.4	-3.6
1989	-5.1	-7.6	-2.9	5.7	15.4	19.8	22.7	20.6	16.6	10.2	0.7	-14.0
1990	-2.6	-5.6	-0.2	7.0	12.9	19.3	22.5	21.9	15.5	9.6	3.5	-3.1
1991	-	-	-	8.7	16.3	20.6	22.4	22.0	15.0	10.6	3.5	-5.8
1992	-9.6	-7.4	-4.0	6.0	-	-	-	19.9	16.1	7.7	2.6	-3.6
1993	-8.0	-11.9	-2.3									
MOYENNE	-8.95	-7.03	-1.44	7.20	14.63	19.30	22.30	20.83	15.43	8.97	2.80	-4.99

TABLEAU B.6: Données climatiques: Station Rivière des Prairies

PARAMÈTRE: Précipitation -PLUIE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1974	63.3	13.2	44.5	58.1	116.1	84.7	201.5	30.9	55.2	45.8	53.1	17.5
1975	4.1	6.0	58.6	26.0	30.1	63.6	118.1	60.3	189.3	83.6	86.5	53.3
1976	36.1	2.0	65.3	42.9	104.0	97.4	92.3	112.2	87.5	126.7	27.7	56.0
1977	0.0	-	22.9	27.8	27.7	123.6	63.0	86.4	132.2	119.7	54.9	15.8
1978	21.6	0.0	59.2	58.4	34.9	166.7	55.4	88.8	36.6	67.6	59.7	29.7
1979	21.5	0.0	53.6	96.8	102.1	33.1	85.8	165.5	143.5	87.9	82.4	-
1980	17.8	0.0	23.5	106.9	63.6	41.7	157.8	117.9	125.6	70.6	91.8	49.5
1981	0.0	80.8	19.6	63.6	92.1	157.2	63.7	148.4	100.0	85.0	80.7	3.4
1982	14.2	0.0	22.5	48.1	21.4	95.5	51.6	129.5	79.7	46.2	81.8	62.7
1983	41.7	37.5	35.7	207.7	165.1	54.7	92.2	36.1	66.6	95.4	184.2	57.0
1984	7.0	51.0	19.0	109.2	104.4	105.3	62.7	95.3	32.8	58.6	103.3	15.2
1985	0.0	19.0	53.0	62.8	30.4	119.4	116.1	72.2	101.1	127.8	77.0	28.0
1986	35.6	6.0	33.5	42.0	105.1	110.2	52.1	106.8	136.0	63.5	66.7	69.8
1987	0.0	0.0	24.4	36.1	97.2	163.6	119.6	41.2	123.2	72.5	66.4	14.0
1988	25.2	4.0	15.0	95.7	32.4	79.4	44.2	125.8	49.6	108.2	135.4	9.4
1989	16.0	2.0	25.2	54.4	97.4	67.2	55.8	87.6	66.0	109.4	146.4	14.0
1990	31.8	10.9	29.3	90.4	70.1	99.8	85.6	96.1	93.7	118.4	75.4	94.9
1991	1.2	11.9	-	112.9	87.7	32.7	88.4	-	66.7	74.8	-	-
1992	-	-	-	20.1	57.3	66.9	175.6	71.4	82.6	66.4	95.1	11.2
1993	-	0.0	0.0	140.8	102.5	84.9	114.4	97.6	122.8	94.3	84.4	19.5
MOYENNE	18.73	13.57	33.60	75.04	77.08	92.38	94.80	93.16	94.54	86.12	86.99	34.49

PARAMÈTRE: Précipitation -NEIGE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1974	32.4	26.1	31.5	3.5							18.0	46.9
1975	59.5	23.9	23.7	30.8							30.6	56.3
1976	76.9	69.5	49.1	0.7							15.4	48.8
1977	88.7	-	21.3	15.6							5.1	55.9
1978	65.4	15.2	3.6	0.0							13.0	60.7
1979	55.6	1.3	0.0	15.2							0.0	-
1980	1.1	8.4	29.5	0.0							27.8	56.3
1981	22.0	14.5	14.9	0.0							17.0	50.9
1982	60.0	25.8	40.0	0.0							4.3	8.4
1983	33.2	26.0	14.0	4.6							17.0	112.0
1984	51.0	26.0	29.0	0.0							5.5	65.7
1985	50.0	20.0	54.0	6.0							18.0	49.5
1986	68.0	22.0	21.0	0.0							37.0	52.2
1987	80.0	45.0	29.0	1.0							36.0	37.8
1988	18.0	78.0	8.0	0.0						3.0	5.5	24.3
1989	53.0	27.5	57.0	0.0							25.6	43.4
1990	47.4	24.2	6.0	8.0							1.0	26.4
1991	38.5	24.1	6.0	0.0							-	44.1
1992	26.0	58.4	5.7	2.0							1.1	5.3
1993	-	53.0	39.8	23.0						6.5	0.0	27.0
MOYENNE	48.77	30.99	24.16	5.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.48	14.63	45.89

TABLEAU B.6: Données climatiques: Station Rivière des Prairies (suite)

PARAMÈTRE: Précipitation -TOTALE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1974	95.7	39.3	76.0	61.6	116.1	84.7	201.5	30.9	55.2	45.8	71.1	64.4
1975	63.6	29.9	82.3	56.8	30.1	63.6	118.1	60.3	189.3	83.6	117.1	109.6
1976	113.0	71.5	114.4	43.6	104.0	97.4	92.3	112.2	87.5	126.7	43.1	104.8
1977	88.7	-	44.2	43.4	27.7	123.6	63.0	86.4	132.2	119.7	60.0	71.7
1978	87.0	15.2	62.8	58.4	34.9	166.7	55.4	88.8	36.6	67.6	72.7	90.4
1979	77.1	1.3	53.6	112.0	102.1	33.1	85.8	165.5	143.5	87.9	82.4	46.2
1980	18.9	8.4	53.0	106.9	63.6	41.7	157.8	117.9	125.6	70.6	119.6	105.8
1981	22.0	95.3	34.5	63.6	92.1	157.2	63.7	148.4	100.0	85.0	97.7	54.3
1982	74.2	25.8	62.5	48.1	21.4	95.5	51.6	129.5	79.7	46.2	86.1	71.1
1983	74.9	63.5	49.7	212.3	165.1	54.7	92.2	36.1	66.6	95.4	201.2	169.0
1984	58.0	77.0	48.0	109.2	104.4	105.3	62.7	95.3	32.8	58.6	108.8	80.9
1985	50.0	39.0	107.0	68.8	30.4	119.4	116.1	72.2	101.1	127.8	95.0	77.5
1986	103.6	28.0	54.5	42.0	105.1	110.2	52.1	106.8	136.0	63.5	103.7	122.0
1987	80.0	45.0	53.4	37.1	97.2	163.6	119.6	41.2	123.2	72.5	102.4	51.8
1988	43.2	82.0	23.0	95.7	32.4	79.4	44.2	125.8	49.6	111.2	140.9	33.7
1989	69.0	29.5	82.2	54.4	97.4	67.2	55.8	87.6	66.0	109.4	172.0	57.4
1990	79.2	35.1	35.3	98.4	70.1	99.8	85.6	96.1	93.7	118.4	76.4	121.3
1991	39.7	36.0	-	112.9	87.7	32.7	88.4	-	66.7	74.8	-	-
1992	-	-	-	22.1	57.3	66.9	175.6	71.4	82.6	66.4	96.2	16.5
1993	-	53.0	39.8	163.8	102.5	84.9	114.4	97.6	122.8	100.8	84.4	46.5
MOYENNE	68.77	43.04	59.79	80.56	77.08	92.38	94.80	93.16	94.54	86.60	101.62	78.68

PARAMÈTRE: Température (°C)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1974	-8.1	-10.8	-4.8	4.6	10.1	17.7	20.4	19.4	13.7	5.7	1.2	-3.9
1975	-8.3	-8.2	-4.2	2.9	14.2	19.0	22.7	20.1	14.0	9.0	3.8	-9.3
1976	-14.8	-7.3	-3.5	6.7	12.1	19.6	19.7	19.2	13.6	6.1	0.0	-11.7
1977	-13.1	-8.0	0.6	6.3	15.5	18.1	20.8	18.9	13.9	8.0	3.6	-7.3
1978	-11.4	-12.3	-5.0	4.0	15.5	18.1	21.4	20.2	12.6	7.9	0.5	-7.9
1979	-9.2	-14.0	0.8	7.3	14.5	18.3	22.1	18.9	14.4	8.4	3.9	-1.3
1980	-7.8	-8.2	-1.7	7.1	13.7	17.1	20.6	20.6	14.1	6.3	0.4	-11.4
1981	-14.8	-1.9	0.3	7.6	13.5	18.1	21.2	19.2	14.4	6.2	1.7	-3.7
1982	-16.0	-10.1	-3.8	4.2	14.5	17.0	21.0	17.5	14.7	9.1	3.2	-3.4
1983	-8.5	-6.6	-0.8	4.7	10.7	18.7	21.4	20.8	17.0	8.2	1.6	-9.3
1984	-12.8	-4.3	-7.4	6.3	11.5	18.6	21.2	21.5	13.6	8.9	1.9	-4.3
1985	-13.1	-7.3	-3.4	3.7	12.3	16.1	20.1	18.9	15.2	8.6	0.1	-9.0
1986	-11.1	-12.3	-2.9	7.5	12.8	15.5	19.0	17.7	12.6	7.5	-0.6	-6.3
1987	-10.8	-13.0	-2.3	8.0	12.2	18.1	21.0	18.2	14.0	6.8	-0.2	-4.3
1988	-9.7	-10.3	-4.5	-	-	17.0	21.7	20.0	14.6	6.8	3.0	-7.5
1989	-7.8	-9.3	-5.0	4.7	14.2	18.8	21.9	20.3	16.1	9.3	-0.4	-16.1
1990	-4.4	-7.7	-1.8	6.7	12.1	18.6	21.4	21.0	14.7	9.1	2.5	-4.5
1991	-10.5	-6.0	-1.1	7.6	15.4	20.0	21.5	21.2	13.7	9.8	2.6	-7.5
1992	-11.2	-10.3	-5.4	5.2	13.5	18.3	19.0	19.5	15.1	6.8	1.6	-4.5
1993	-9.8	-14.4	-4.3	5.5	13.8	18.5	22.0	21.4	14.8	6.5	1.1	-6.6
MOYENNE	-10.66	-9.12	-3.01	5.82	13.27	18.06	21.01	19.73	14.34	7.75	1.58	-6.99

TABLEAU B.7: Données climatiques: Station Ste-Anne-de-Bellevue

PARAMÈTRE: Précipitation -PLUIE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973								130.4	81.2	55.5	54.1	41.7
1974	45.7	10.7	47.5	89.3	97.2	71.1	142.4	56.2	52.9	42.4	71.1	39.4
1975	31.2	20.5	67.8	9.7	76.3	57.1	110.7	124.8	206.5	86.3	54.0	37.3
1976	0.0	54.3	64.4	47.9	117.1	97.8	84.0	99.5	132.7	114.0	22.1	12.8
1977	0.0	5.6	63.6	53.2	21.6	62.0	68.5	94.8	153.8	-	-	-
1978	33.0	0.0	100.6	60.0	38.4	97.4	36.5	103.6	40.7	84.3	50.0	7.4
1979	9.3	8.1	47.0	94.7	78.9	47.0	97.3	108.7	139.5	77.5	55.9	51.8
1980	15.7	0.0	16.3	93.4	52.2	46.7	162.3	73.4	153.8	67.5	33.2	36.9
1981	0.2	77.8	4.8	70.2	73.5	135.9	58.1	159.7	70.6	97.3	67.0	2.0
1982	23.9	0.0	37.7	34.8	24.8	115.3	81.0	137.9	85.3	31.9	97.0	48.2
1983	30.6	45.7	45.5	122.3	126.9	32.6	83.6	37.8	81.5	101.2	118.4	-
1984	0.0	26.9	17.2	73.5	106.0	99.7	64.9	141.3	29.4	53.1	78.2	35.1
1985	0.0	44.7	54.8	42.1	44.1	104.9	62.7	76.5	68.3	86.1	48.0	15.2
1986	30.3	12.7	15.9	44.8	74.6	121.9	134.1	130.5	121.2	66.0	33.1	67.0
1987	0.0	0.0	16.4	42.5	72.6	115.1	125.4	78.3	126.8	63.3	74.1	2.6
1988	15.2	11.6	7.2	82.0	44.2	78.2	33.4	113.2	58.0	74.2	83.2	15.8
1989	7.4	2.6	61.6	37.2	84.0	99.6	37.2	91.4	59.2	112.8	158.2	14.2
1990	37.0	29.4	22.2	86.1	78.8	115.3	104.4	102.1	88.2	102.4	57.7	69.0
1991	10.4	11.0	44.8	133.1	99.8	60.4	98.1	132.8	67.3	66.0	19.6	-
1992	69.6	9.8	48.2	14.9	68.3	80.4	142.9					
1993												
MOYENNE	18.92	19.55	41.24	64.83	72.59	86.23	90.92	104.89	95.63	76.77	65.27	31.03

PARAMÈTRE: Précipitation -NEIGE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973											5.1	32.4
1974	30.7	19.0	47.2	8.9							21.4	55.4
1975	30.0	26.9	19.4	27.4							39.1	50.3
1976	57.0	32.1	44.4	4.3						3.3	12.5	26.0
1977	33.2	41.8	24.3	6.4							-	-
1978	69.8	12.5	20.8	0.5	3.3						28.7	92.2
1979	87.1	17.5	3.8	9.4						6.6	3.6	8.6
1980	10.2	16.8	33.8	0.5							24.4	43.5
1981	17.7	27.6	20.2	2.5							14.7	55.3
1982	56.3	24.5	55.0	5.2							5.4	19.3
1983	28.6	23.5	11.0	35.6							40.7	-
1984	36.8	43.0	21.8	0.0							8.4	77.1
1985	52.2	16.8	53.9	27.7							12.5	32.4
1986	72.5	23.6	48.6	0.0							44.9	44.1
1987	69.5	31.0	42.2	0.0							31.4	51.7
1988	17.2	63.9	10.0	0.0						5.0	11.9	21.2
1989	60.4	31.8	6.2	0.0						3.6	45.0	21.8
1990	48.8	49.5	13.4	20.0							10.2	60.6
1991	50.2	25.1	17.9	0.0							7.2	0.0
1992	26.8	71.0	18.2	29.2								
1993												
MOYENNE	45.00	31.47	26.95	9.35	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.97	20.39	40.70

TABLEAU B.7: Données climatiques: Station Ste-Anne-de-Bellevue (suite)

PARAMÈTRE: Précipitation -TOTALE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973								130.4	81.2	55.5	59.2	74.1
1974	76.4	29.7	94.7	98.2	97.2	71.1	142.4	56.2	52.9	42.4	92.5	94.8
1975	61.2	47.4	87.2	37.1	76.3	57.1	110.7	124.8	206.5	86.3	93.1	87.6
1976	57.0	86.4	108.8	52.2	117.1	97.8	84.0	99.5	132.7	117.3	34.6	38.8
1977	33.2	47.4	87.9	59.6	21.6	62.0	68.5	94.8	153.8	-	-	-
1978	102.8	12.5	121.4	60.5	41.7	97.4	36.5	103.6	40.7	84.3	78.7	99.6
1979	96.4	25.6	50.8	104.1	78.9	47.0	97.3	108.7	139.5	84.1	59.5	60.4
1980	25.9	16.8	50.1	93.9	52.2	46.7	162.3	73.4	153.8	67.5	57.6	80.4
1981	17.9	105.4	25.0	72.7	73.5	135.9	58.1	159.7	70.6	97.3	81.7	57.3
1982	80.2	24.5	92.7	40.0	24.8	115.3	81.0	137.9	85.3	31.9	102.4	67.5
1983	59.2	69.2	56.5	157.9	126.9	32.6	83.6	37.8	81.5	101.2	159.1	-
1984	36.8	69.9	39.0	73.5	106.0	99.7	64.9	141.3	29.4	53.1	86.6	112.2
1985	52.2	61.5	108.7	69.8	44.1	104.9	62.7	76.5	68.3	86.1	60.5	47.6
1986	102.8	36.3	64.5	44.8	74.6	121.9	134.1	130.5	121.2	66.0	78.0	111.1
1987	69.5	31.0	58.6	42.5	72.6	115.1	125.4	78.3	126.8	63.3	105.5	54.3
1988	32.4	75.5	17.2	82.0	44.2	78.2	33.4	113.2	58.0	79.2	95.1	37.0
1989	67.8	34.4	67.8	37.2	84.0	99.6	37.2	91.4	59.2	116.4	203.2	36.0
1990	85.8	78.9	35.6	106.1	78.8	115.3	104.4	102.1	88.2	102.4	67.9	129.6
1991	60.6	36.1	62.7	133.1	99.8	60.4	98.1	132.8	67.3	66.0	26.8	-
1992	96.4	80.8	66.4	44.1	68.3	80.4	142.9					
1993												
MOYENNE	63.92	51.02	68.19	74.17	72.77	86.23	90.92	104.89	95.63	77.79	85.67	74.27

PARAMÈTRE: Température (°C)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1973								21.6	14.3	9.8	0.6	-3.3
1974	-10.1	-10.8	-4.4	4.9	9.2	18.0	20.6	19.8	13.8	6.0	1.3	-3.1
1975	-7.9	-7.9	-3.8	2.7	16.9	19.3	22.6	21.0	14.1	9.6	4.2	-8.3
1976	-14.2	-5.5	-2.9	7.2	12.3	19.9	19.8	18.9	13.6	6.3	0.1	-10.9
1977	-13.0	-8.9	1.3	6.6	15.1	16.8	20.8	18.8	13.8	-	-	-
1978	-12.0	-12.6	-4.9	3.3	15.1	17.6	21.0	19.9	12.5	7.3	0.6	-7.2
1979	-9.7	-14.3	0.4	6.6	13.5	17.9	21.3	18.6	14.1	8.0	3.5	-4.3
1980	-8.2	-9.3	-2.8	7.2	13.3	16.9	20.9	21.3	14.2	6.4	-0.2	-11.4
1981	-14.6	-2.3	-0.2	7.6	13.3	18.3	21.1	19.4	14.7	6.0	1.9	-3.6
1982	-15.3	-10.2	-3.6	4.3	15.3	17.1	20.7	17.6	14.8	7.0	3.4	-2.8
1983	-8.1	-6.5	-0.6	5.2	11.0	18.8	21.8	21.0	17.7	8.8	2.4	-7.6
1984	-12.3	-4.1	-6.7	7.2	11.5	19.1	21.1	21.3	13.6	9.2	2.4	-4.1
1985	-13.5	-7.5	-2.2	5.4	13.3	16.2	20.6	19.3	16.2	9.5	0.9	-8.1
1986	-9.5	-10.3	-1.2	8.9	13.6	16.4	19.7	18.5	13.7	8.3	0.7	-4.2
1987	-8.8	-10.8	-0.4	9.2	13.2	18.7	21.8	18.6	15.0	7.5	0.9	-3.1
1988	-8.3	-8.1	-2.9	6.6	14.8	17.6	22.1	20.5	14.4	6.7	3.1	-6.7
1989	-7.6	-8.9	-4.5	4.7	14.4	18.2	22.7	19.5	16.0	9.4	0.1	-5.9
1990	-3.8	-6.1	-1.4	6.9	11.9	18.6	21.0	20.8	14.3	8.9	3.0	-4.0
1991	-10.3	-5.4	-0.8	8.3	15.2	19.4	21.2	20.7	13.6	9.8	2.9	-6.8
1992	-10.6	-9.3	-5.4	5.0	13.7	17.5	18.6					
1993												
MOYENNE	-10.41	-8.36	-2.47	6.20	13.51	18.02	21.02	19.85	14.44	8.03	1.77	-5.86

TABLEAU B.8: Données climatiques: Station Ste-Geneviève

PARAMÈTRE: Précipitation -PLUIE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1974	31.0	109.2	59.9	96.7	91.8	57.5	104.5	37.2	46.3	41.2	76.9	39.6
1975	10.9	27.6	58.5	-	83.3	59.2	128.1	51.9	206.1	78.0	64.4	33.4
1976	34.9	22.5	64.8	56.2	105.5	100.9	60.1	115.0	117.3	116.9	27.2	9.5
1977	0.0	12.0	65.1	63.5	19.8	84.0	57.7	86.6	134.8	94.7	64.6	12.7
1978	48.6	84.6	49.5	74.5	32.8	84.8	54.3	101.6	30.4	77.8	55.1	18.3
1979	32.1	7.1	46.5	114.5	78.0	41.2	65.6	93.3	149.7	100.2	73.8	55.2
1980	16.7	0.0	17.3	110.7	52.7	45.0	107.0	-	-	-	35.0	32.0
1981	0.2	114.0	23.4	71.2	69.2	125.2	71.0	157.5	71.4	85.2	78.0	2.6
1982	24.8	0.0	32.6	39.8	28.0	92.2	69.6	139.2	75.4	36.0	98.6	52.1
1983	45.6	48.6	50.0	151.6	140.0	38.0	88.0	34.0	60.4	103.8	148.4	53.4
1984	8.0	34.2	17.8	93.6	112.0	127.8	74.0	148.4	31.4	56.2	86.2	23.2
1985	0.0	50.6	53.6	48.8	46.4	102.4	86.0	84.6	71.6	85.6	59.5	17.2
1986	41.4	17.0	25.4	34.0	92.8	103.6	89.0	120.8	129.6	61.8	46.3	71.0
1987	0.0	0.0	22.6	40.6	72.6	129.2	159.6	70.4	135.6	59.0	93.8	19.4
1988	18.0	15.6	15.6	86.6	48.6	79.2	41.8	109.4	50.8	80.0	97.8	9.0
1989	20.4	6.8	19.6	44.7	80.8	106.8	33.6	105.2	60.8	120.9	139.6	17.0
1990	28.6	49.0	32.4	89.2	67.2	114.8	123.2	110.2	84.4	103.6	73.6	117.6
1991	6.0	19.6	44.8	128.0	90.1	43.8	100.8	127.9	81.4	80.0	28.4	16.8
1992	76.4	11.0	64.6	20.0	55.0	78.6	141.9	54.4	112.2	75.6	91.2	19.8
1993	84.0	0.0	0.0	129.2	77.6	87.6	98.6	53.0	155.9	111.2	78.6	26.4
MOYENNE	26.38	31.47	38.20	78.60	72.21	85.09	87.72	94.77	95.03	82.51	75.85	32.31

PARAMÈTRE: Précipitation -NEIGE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1974	22.8	8.2	46.8	8.8							15.4	61.7
1975	42.5	14.5	28.4	27.8	1.5						39.1	56.4
1976	58.4	47.7	31.0	7.0	2.0					0.4	11.2	26.0
1977	63.0	29.4	18.7	6.6							21.7	44.2
1978	48.5	9.4	55.8	0.0							32.5	55.2
1979	38.8	16.0	2.5	3.6						2.5	0.5	1.8
1980	10.6	10.1	40.4	0.0							1.8	44.4
1981	20.0	8.8	10.8	0.5							2.4	55.6
1982	43.8	34.5	40.5	0.0							0.6	10.0
1983	26.4	31.4	5.0	17.8							22.4	78.3
1984	40.6	35.8	17.8	0.0							5.2	58.6
1985	40.0	19.2	54.4	17.4							12.2	37.0
1986	51.0	22.0	22.6	0.0							33.0	29.8
1987	74.4	39.6	23.8	0.0							30.6	33.6
1988	12.6	65.8	12.8	0.0						5.0	6.6	24.4
1989	53.8	20.2	44.6	0.0						3.0	24.6	32.2
1990	44.8	26.0	7.0	18.0							11.6	46.8
1991	62.0	30.4	21.6	0.0							5.0	44.4
1992	24.0	71.2	13.8	19.0							1.6	8.6
1993	42.4	57.0	64.6	25.0						16.0	9.2	30.2
MOYENNE	41.02	29.86	28.15	7.58	0.18	0.00	0.00	0.00	0.00	1.35	14.36	38.96

TABLEAU B.8: Données climatiques: Station Ste-Geneviève (suite)

PARAMÈTRE: Précipitation -TOTALE (mm)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1974	53.8	117.4	106.7	105.5	91.8	57.5	104.5	37.2	46.3	41.2	92.3	101.3
1975	53.4	42.1	86.9	-	84.8	59.2	128.1	51.9	206.1	78.0	103.5	89.8
1976	93.3	70.2	95.8	63.2	107.5	100.9	60.1	115.0	117.3	117.3	38.4	35.5
1977	63.0	41.4	83.8	70.1	19.8	84.0	57.7	86.6	134.8	94.7	86.3	56.9
1978	97.1	94.0	105.3	74.5	32.8	84.8	54.3	101.6	30.4	77.8	87.6	73.5
1979	70.9	23.1	49.0	118.1	78.0	41.2	65.6	93.3	149.7	102.7	74.3	57.0
1980	27.3	10.1	57.7	110.7	52.7	45.0	107.0	-	-	-	36.8	76.4
1981	20.2	122.8	34.2	71.7	69.2	125.2	71.0	157.5	71.4	85.2	80.4	58.2
1982	68.6	34.5	73.1	39.8	28.0	92.2	69.6	139.2	75.4	36.0	99.2	62.1
1983	72.0	80.0	55.0	169.4	140.0	38.0	88.0	34.0	60.4	103.8	170.8	131.7
1984	48.6	70.0	35.6	93.6	112.0	127.8	74.0	148.4	31.4	56.2	91.4	81.8
1985	40.0	69.8	108.0	66.2	46.4	102.4	86.0	84.6	71.6	85.6	71.7	54.2
1986	92.4	39.0	48.0	34.0	92.8	103.6	89.0	120.8	129.6	61.8	79.3	100.8
1987	74.4	39.6	46.4	40.6	72.6	129.2	159.6	70.4	135.6	59.0	124.4	53.0
1988	30.6	81.4	28.4	86.6	48.6	79.2	41.8	109.4	50.8	85.0	104.4	33.4
1989	74.2	27.0	64.2	44.7	80.8	106.8	33.6	105.2	60.8	123.9	164.2	49.2
1990	73.4	75.0	39.4	107.2	67.2	114.8	123.2	110.2	84.4	103.6	85.2	164.4
1991	68.0	50.0	66.4	128.0	90.1	43.8	100.8	127.9	81.4	80.0	33.4	61.2
1992	100.4	82.2	78.4	39.0	55.0	78.6	141.9	54.4	112.2	75.6	92.8	28.4
1993	126.4	57.0	64.6	154.2	77.6	87.6	98.6	53.0	155.9	127.2	87.8	56.6
MOYENNE	67.40	61.33	66.35	85.11	72.39	85.09	87.72	94.77	95.03	83.93	90.21	71.27

PARAMÈTRE: Température (°C)

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.
1974	-9.4	-10.2	-4.1	4.9	10.4	18.4	20.8	20.0	14.0	6.1	1.5	-3.2
1975	-7.6	-7.5	-3.7	3.0	16.4	19.5	23.0	20.8	14.4	9.4	4.2	-8.9
1976	-14.6	-6.7	-3.1	6.9	12.0	19.9	19.9	19.3	14.0	6.5	0.1	-11.1
1977	-13.1	-8.0	1.2	6.3	14.9	17.6	21.0	19.0	13.9	8.2	3.1	-7.0
1978	-11.4	-12.3	-4.7	3.3	15.6	17.8	21.2	20.3	13.2	8.1	1.2	-7.1
1979	-9.0	-13.9	0.8	3.8	13.8	18.2	21.9	19.0	14.7	8.6	4.0	-4.2
1980	-8.0	-9.3	-2.5	7.2	13.2	16.8	20.6	22.8	-	-	-1.2	-11.9
1981	-14.9	-2.3	-0.4	7.5	13.3	18.5	21.3	19.2	14.2	6.1	1.9	-3.7
1982	-15.7	-10.1	-3.5	3.6	15.1	17.1	20.9	17.8	14.9	9.0	3.3	-3.0
1983	-8.1	-6.4	-0.8	5.0	11.1	18.9	21.8	20.8	17.4	8.6	1.8	-8.1
1984	-12.8	-3.9	-6.5	6.8	11.5	18.9	21.1	21.2	13.7	9.5	2.3	-3.9
1985	-13.4	-7.7	-2.6	5.1	13.3	16.5	20.6	19.4	16.1	9.6	1.0	-8.1
1986	-9.8	-10.3	-1.7	8.7	13.8	16.4	19.8	18.5	13.5	8.3	0.5	-4.8
1987	-9.4	-11.4	-0.9	9.4	13.2	13.8	21.8	19.0	15.0	7.6	1.0	-3.1
1988	-8.4	-7.8	-3.1	6.4	14.9	17.7	22.6	20.7	14.9	6.8	3.4	-6.8
1989	-7.9	-9.3	-4.7	4.6	14.5	19.0	22.1	19.9	15.9	9.2	0.2	-16.0
1990	-4.0	-7.3	-1.6	6.6	12.0	18.4	21.2	20.7	14.4	8.7	3.0	-4.1
1991	-10.5	-6.0	-1.1	7.4	15.1	19.5	21.4	20.7	13.9	9.7	2.8	-7.0
1992	-11.0	-9.9	-4.9	4.5	13.5	17.8	18.8	19.0	15.1	7.0	1.6	-4.3
1993	-9.4	-14.2	-4.1	5.3	13.4	17.9	21.8	21.3	14.7	7.2	1.6	-6.0
MOYENNE	-10.42	-8.73	-2.60	5.82	13.55	17.93	21.18	19.97	14.63	8.12	1.87	-6.62

ANNEXE C

COEFFICIENT DE RUISSELLEMENT

ET

SUPERFICIE IMPERMÉABLE

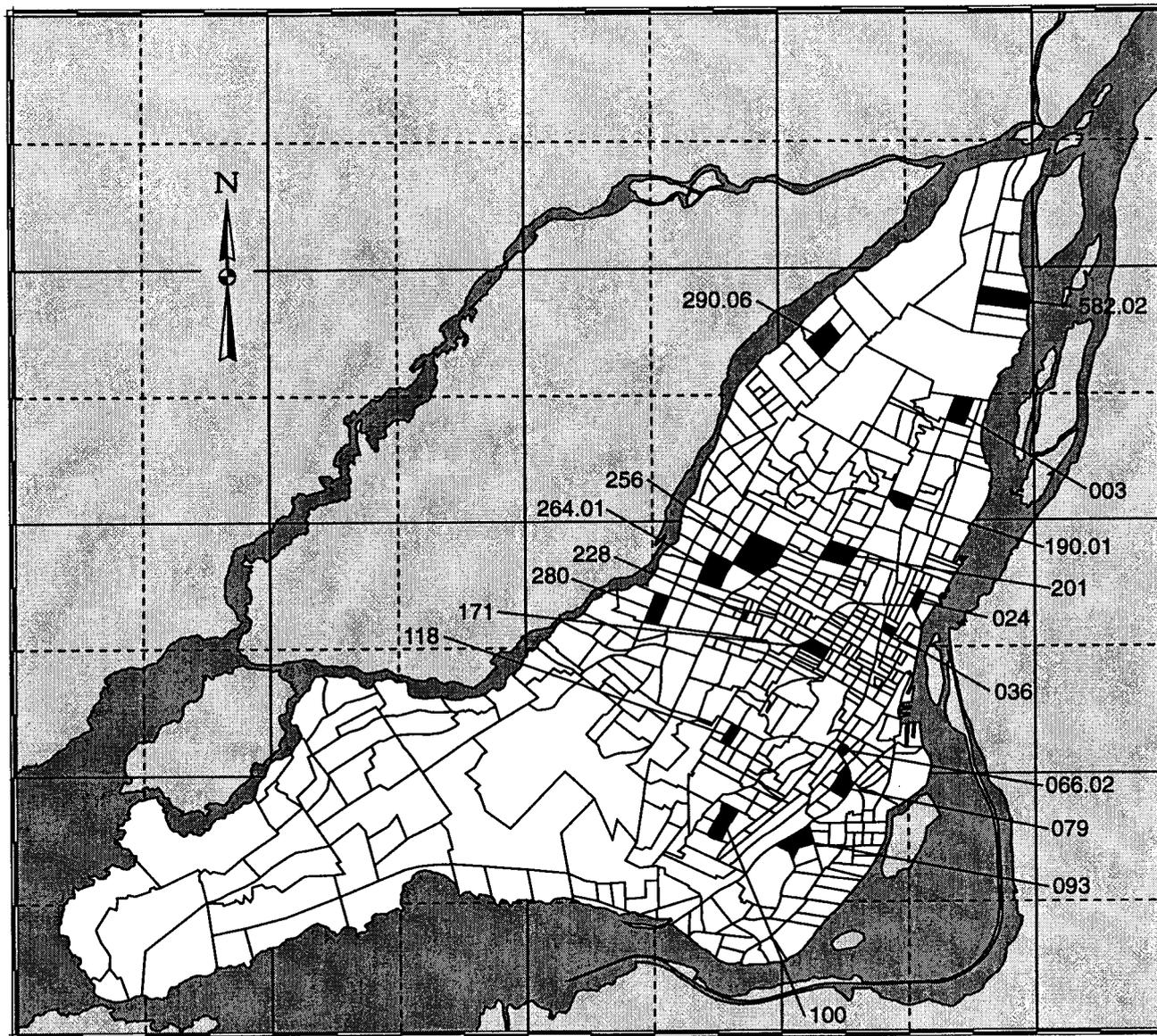


FIGURE C-1

Secteur choisi
pour déterminer
le coefficient de
ruissellement

LÉGENDE

Secteur pour le test



Secteur de
recensement
(1991)

*Modélisation
numérique de
l'écoulement
de l'eau souterraine
sur l'île de
Montréal (Québec)*

Échelle en Km



TABLEAU C.1: Secteur de recensement, population, superficie, superficie imperméable et coefficient de ruissellement (C_R)

<i>Secteur de Recensement</i>	<i>Population</i>	<i>Superficie (km²)</i>	<i>Densité de Population (pers./km²)</i>	<i>Superficie Imperméable (%)</i>	<i>C_R (%)</i>
1	2 555	0.36	7 097	55.99	56.58
2	2 865	0.36	7 958	58.49	58.24
3	6 570	0.73	9 000	61.21	60.02
4	3 210	0.44	7 295	56.59	56.98
5	3 435	0.40	8 588	60.17	59.34
6	4 525	0.61	7 418	56.95	57.22
7	6 020	1.97	3 056	39.20	44.36
8	3 150	0.42	7 500	57.19	57.38
9	4 010	4.36	920	21.16	26.95
10	1 625	0.74	2 196	33.51	39.57
11	5 855	1.30	4 504	46.55	49.98
12.01	4 250	0.36	11 806	67.36	63.96
12.02	2 765	0.21	13 167	69.88	65.54
13	4 585	1.04	4 409	46.13	49.67
14.01	5 160	0.91	5 670	51.23	53.32
14.02	0	0.80	-	0.00	
15	3 250	0.36	9 028	61.28	60.07
16	2 805	0.39	7 192	56.28	56.77
17	2 080	0.21	9 905	63.37	61.41
18	2 190	0.31	7 065	55.89	56.51
19	2 275	0.31	7 339	56.72	57.06
21	3 290	0.44	7 477	57.13	57.33
22	1 650	0.18	9 167	61.62	60.29
23	1 115	0.11	10 136	63.89	61.75
24	2 675	0.25	10 700	65.12	62.53
25	2 865	0.16	17 906	77.05	70.00
26	2 035	0.12	16 958	75.77	69.21
27	1 785	0.10	17 850	76.97	69.95
28	2 165	0.16	13 531	70.51	65.93
29	3 720	0.33	11 273	66.31	63.29
30	3 215	0.28	11 482	66.73	63.55
31	2 680	0.26	10 308	64.27	61.99
32	1 435	0.13	11 038	65.83	62.98
33	1 865	0.16	11 656	67.07	63.77
34	2 605	0.21	12 405	68.50	64.67
35	2 105	0.18	11 694	67.15	63.82
36	1 650	0.18	9 167	61.62	60.29
37	2 920	0.51	5 725	51.44	53.46
38	1 935	0.21	9 214	61.74	60.36
39	1 555	0.47	3 309	40.65	45.51
41	1 595	0.23	6 935	55.49	56.24
42	815	0.10	8 150	59.01	58.58
43	705	0.39	1 808	30.41	36.75
44	1 915	0.13	14 731	72.49	67.17
45	1 430	0.10	14 300	71.80	66.74
46	1 670	0.16	10 438	64.55	62.17

<i>Secteur de Recensement</i>	<i>Population</i>	<i>Superficie (km²)</i>	<i>Densité de Population (pers./km²)</i>	<i>Superficie Imperméable (%)</i>	<i>C_R (%)</i>
47	810	0.10	8 100	58.88	58.49
48	2 110	0.16	13 188	69.92	65.56
49	1 315	0.18	7 306	56.62	57.00
50	1 235	0.08	15 438	73.58	67.85
51	1 210	0.21	5 762	51.57	53.56
52	1 825	0.13	14 038	71.37	66.47
53	905	0.10	9 050	61.34	60.10
54	1 050	0.08	13 125	69.81	65.49
55.01	1 725	0.65	2 654	36.70	42.31
55.02	430	1.32	326	11.20	11.90
56	1 075	0.26	4 135	44.87	48.74
57	910	0.78	1 167	24.15	30.40
58	845	0.16	5 281	49.77	52.29
59	930	0.18	5 167	49.32	51.97
60	1 600	0.10	16 000	74.41	68.36
61	445	0.18	2 472	35.49	41.29
62	260	0.78	333	11.37	12.23
63	435	0.30	1 450	27.14	33.55
64	1 025	0.36	2 847	37.94	43.33
65.01	5 215	0.13	40 115	95.68	81.69
65.02	2 435	0.10	24 350	84.24	74.45
66.01	2 290	0.18	12 722	69.09	65.04
66.02	1 905	0.13	14 654	72.36	67.09
67	1 775	0.15	11 833	67.42	63.99
68	1 725	0.19	9 079	61.41	60.15
69	1 465	0.66	2 220	33.68	39.72
70	360	0.59	610	16.64	21.00
71	0	0.38	-	0.00	
72	3 425	1.71	2 003	32.02	38.23
73	1 045	0.36	2 903	38.28	43.61
74	3 845	0.41	9 378	62.14	60.62
75	2 640	0.24	11 000	65.75	62.93
76	2 160	0.28	7 714	57.81	57.79
77	2 225	0.42	5 298	49.83	52.34
78	2 735	0.39	7 013	55.74	56.40
79	4 020	0.52	7 731	57.85	57.82
80	800	0.16	5 000	48.65	51.50
81	2 540	0.18	14 111	71.49	66.54
82	1 930	0.28	6 893	55.36	56.15
83	3 310	0.39	8 487	59.91	59.17
84	1 800	0.31	5 806	51.73	53.67
85	765	1.09	702	18.09	23.03
86	4 270	0.49	8 714	60.50	59.55
87	3 200	0.23	13 913	71.16	66.34
88	3 825	0.28	13 661	70.73	66.07
89	4 985	0.48	10 385	64.44	62.10
90	4 580	0.49	9 347	62.06	60.57
91	120	1.05	114	5.35	
92	6 615	0.52	12 721	69.08	65.04

<i>Secteur de Recensement</i>	<i>Population</i>	<i>Superficie (km²)</i>	<i>Densité de Population (pers./km²)</i>	<i>Superficie Imperméable (%)</i>	<i>C_R (%)</i>
93	3 375	0.65	5 192	49.42	52.05
94.01	5 770	0.95	6 074	52.67	54.32
94.02	0	1.95	-	0.00	
95	1 900	0.18	10 556	64.81	62.33
96	2 400	0.18	13 333	70.17	65.72
97.01	5 395	0.28	19 268	78.77	71.06
97.02	3 235	0.44	7 352	56.76	57.09
98	5 345	1.01	5 292	49.81	52.32
99	4 400	0.67	6 567	54.33	55.45
100	7 145	0.78	9 160	61.61	60.28
101.01	4 075	0.36	11 319	66.40	63.35
101.02	3 770	0.35	10 771	65.27	62.63
102	4 155	0.54	7 694	57.75	57.75
103	2 310	0.31	7 452	57.05	57.28
104	2 830	0.54	5 241	49.61	52.18
105	3 415	0.26	13 135	69.82	65.50
106	1 855	0.21	8 833	60.80	59.75
107	1 410	0.16	8 813	60.74	59.72
108	3 905	0.54	7 231	56.40	56.85
109	1 950	0.21	9 286	61.91	60.48
110	3 285	0.23	14 283	71.77	66.72
111	6 450	0.63	10 238	64.11	61.89
112.01	4 570	0.36	12 694	69.04	65.01
112.02	3 875	0.35	11 071	65.89	63.03
113	4 505	0.48	9 385	62.15	60.63
114	2 050	0.28	7 321	56.67	57.03
115.01	2 110	0.22	9 591	62.64	60.94
115.02	5 730	0.42	13 643	70.70	66.05
116	6 385	0.57	11 202	66.16	63.20
117	3 855	0.26	14 827	72.64	67.26
118	3 820	0.21	18 190	77.42	70.23
119	5 465	0.39	14 013	71.32	66.44
120	3 535	2.94	1 202	24.55	30.83
121	1 390	0.31	4 484	46.47	49.92
122	6 585	0.62	10 621	64.95	62.42
123	6 100	0.39	15 641	73.88	68.04
124	5 300	0.36	14 722	72.47	67.16
125	6 120	0.47	13 021	69.62	65.38
126	2 520	0.64	3 938	43.93	48.04
127.01	5 420	0.47	11 532	66.83	63.62
127.02	0	1.15	-	0.00	
128	3 685	3.11	1 185	24.35	30.62
129.01	3 910	0.26	15 038	72.97	67.47
129.02	3 675	0.34	10 809	65.35	62.68
130	3 135	0.13	24 115	84.02	74.31
131	3 435	0.10	34 350	92.18	79.44
132	5 220	0.23	22 696	82.60	73.43
133	2 560	0.16	16 000	74.41	68.36
134	805	0.10	8 050	58.74	58.40

<i>Secteur de Recensement</i>	<i>Population</i>	<i>Superficie (km²)</i>	<i>Densité de Population (pers./km²)</i>	<i>Superficie Imperméable (%)</i>	<i>C_R (%)</i>
135	1 725	0.10	17 250	76.17	69.46
136	2 910	0.18	16 167	74.66	68.52
137	1 305	0.17	7 676	57.70	57.72
138	2 135	0.23	9 283	61.91	60.47
139	2 760	0.23	12 000	67.74	64.19
140	1 520	0.13	11 692	67.14	63.82
141	1 555	0.10	15 550	73.75	67.95
142	1 520	0.10	15 200	73.22	67.62
143	2 265	0.18	12 583	68.83	64.88
144	3 205	0.18	17 806	76.92	69.92
145	0	0.38	-	0.00	
146	2 180	0.13	16 769	75.51	69.05
147	2 495	0.16	15 594	73.81	67.99
148	1 235	0.16	7 719	57.82	57.80
149	3 120	0.13	24 000	83.91	74.24
150	2 405	0.16	15 031	72.96	67.46
151	2 085	0.13	16 038	74.47	68.40
152	1 630	0.16	10 188	64.00	61.82
153	810	0.26	3 115	39.55	44.64
154	635	0.13	4 885	48.18	51.16
155	1 980	0.10	19 800	79.40	71.45
156	1 990	0.13	15 308	73.38	67.72
157	2 015	0.16	12 594	68.85	64.89
158	1 960	0.16	12 250	68.21	64.49
159	1 925	0.13	14 808	72.61	67.24
160	1 655	0.13	12 731	69.10	65.05
161	1 760	0.13	13 538	70.52	65.94
162	1 435	0.10	14 350	71.88	66.79
163	3 320	0.18	18 444	77.74	70.43
164	1 625	0.05	32 500	90.92	78.64
167	2 720	0.21	12 952	69.50	65.30
168	2 460	0.16	15 375	73.48	67.79
169	2 500	0.16	15 625	73.86	68.02
170	2 570	0.16	16 063	74.51	68.42
171	3 600	0.49	7 347	56.74	57.08
172	1 690	0.21	8 048	58.73	58.40
173	1 595	0.18	8 861	60.87	59.80
174	1 600	0.21	7 619	57.53	57.61
175	1 620	0.10	16 200	74.70	68.55
176	1 675	0.10	16 750	75.49	69.03
177	1 260	0.10	12 600	68.86	64.90
178	2 495	0.23	10 848	65.43	62.73
179	3 860	0.49	7 878	58.26	58.09
180	3 650	0.23	15 870	74.22	68.25
181	3 800	0.26	14 615	72.30	67.05
182	2 245	0.13	17 269	76.20	69.47
183	2 285	0.13	17 577	76.61	69.73
184	3 180	0.21	15 143	73.13	67.57
185	5 415	0.36	15 042	72.97	67.47

<i>Secteur de Recensement</i>	<i>Population</i>	<i>Superficie (km²)</i>	<i>Densité de Population (pers./km²)</i>	<i>Superficie Imperméable (%)</i>	<i>C_R (%)</i>
186	4 490	0.40	11 225	66.21	63.23
187.01	2 460	0.27	9 111	61.49	60.20
187.02	6 780	1.09	6 220	53.17	54.67
188.01	1 960	0.13	15 077	73.03	67.50
188.02	2 260	0.21	10 762	65.25	62.61
189	0	1.70	-	0.00	
190.01	3 365	0.55	6 118	52.83	54.43
190.02	3 610	0.92	3 924	43.86	47.99
191	6 215	1.58	3 934	43.91	48.02
192	2 315	0.70	3 307	40.64	45.51
193	2 045	0.25	8 180	59.09	58.64
194	5 290	1.20	4 408	46.13	49.67
195.01	4 090	0.49	8 347	59.54	58.93
195.02	5 620	0.62	9 065	61.37	60.13
195.03	5 360	0.86	6 233	53.22	54.69
196	3 910	0.35	11 171	66.10	63.16
197	4 965	0.54	9 194	61.69	60.33
198	4 840	0.67	7 224	56.38	56.83
199	2 350	0.21	11 190	66.14	63.18
200	4 060	0.28	14 500	72.12	66.94
201	6 130	0.91	6 736	54.87	55.82
202	4 310	0.60	7 183	56.25	56.75
203	2 870	0.23	12 478	68.64	64.76
204	2 860	0.23	12 435	68.56	64.71
205	2 185	0.18	12 139	68.00	64.36
206	2 845	0.23	12 370	68.44	64.63
207	3 495	0.23	15 196	73.21	67.62
208	2 645	0.21	12 595	68.85	64.90
209	5 995	0.57	10 518	64.73	62.28
210	3 370	0.16	21 063	80.85	72.35
211	2 295	0.16	14 344	71.87	66.78
212	2 485	0.18	13 806	70.98	66.23
213	2 685	0.18	14 917	72.78	67.35
214	2 605	0.29	8 983	61.17	59.99
215	2 120	0.23	9 217	61.75	60.37
216	2 325	0.28	8 304	59.42	58.85
217	2 895	0.16	18 094	77.29	70.15
218	3 190	0.23	13 870	71.09	66.29
219	2 435	0.24	10 146	63.91	61.76
220	5 770	0.36	16 028	74.45	68.39
221	6 500	0.26	25 000	84.86	74.84
222	3 930	0.18	21 833	81.69	72.87
223.01	0	0.16	-	0.00	
223.02	0	0.25	-	0.00	
224	6 055	0.34	17 809	76.92	69.92
225	1 430	0.60	2 383	34.87	40.76
226	3 205	0.23	13 935	71.19	66.36
227	1 625	0.13	12 500	68.68	64.79
228	1 680	0.13	12 923	69.45	65.27

<i>Secteur de Recensement</i>	<i>Population</i>	<i>Superficie (km²)</i>	<i>Densité de Population (pers./km²)</i>	<i>Superficie Imperméable (%)</i>	<i>C_R (%)</i>
229	0	0.47	-	0.00	
230	2 110	0.13	16 231	74.75	68.57
231	2 030	0.10	20 300	79.99	71.82
232	2 900	0.41	7 073	55.92	56.53
232	0	0.34	-	0.00	
233	2 090	0.10	20 900	80.67	72.24
234	2 130	0.16	13 313	70.13	65.70
235	2 085	0.26	8 019	58.66	58.35
236	3 270	0.21	15 571	73.78	67.97
237	3 270	0.21	15 571	73.78	67.97
238	2 405	0.16	15 031	72.96	67.46
239	4 530	0.52	8 712	60.49	59.55
240	2 880	0.28	10 286	64.22	61.96
241	3 000	0.20	15 000	72.91	67.43
242	6 425	0.38	16 908	75.70	69.17
243	4 050	0.26	15 577	73.79	67.98
244	2 305	0.16	14 406	71.97	66.84
245	2 830	0.21	13 476	70.42	65.88
247	2 300	0.18	12 778	69.19	65.10
249	4 460	0.53	8 415	59.72	59.05
250	3 925	0.46	8 533	60.03	59.25
251.01	3 540	0.41	8 634	60.29	59.42
251.02	2 555	0.29	8 810	60.74	59.71
252	5 055	0.34	14 868	72.70	67.30
253	2 820	0.40	7 050	55.85	56.48
254	3 730	0.64	5 828	51.81	53.72
256	3 970	1.84	2 158	33.22	39.31
257	4 670	1.29	3 620	42.33	46.82
258	4 335	0.26	16 673	75.38	68.96
259	6 270	0.23	27 261	86.87	76.09
260	2 365	0.49	4 827	47.94	50.99
261	2 925	0.57	5 132	49.18	51.88
262	4 840	0.80	6 050	52.59	54.26
263	3 890	0.78	4 987	48.60	51.46
264.01	5 970	0.95	6 284	53.39	54.81
264.02	4 555	1.12	4 067	44.55	48.50
265	4 630	0.47	9 851	63.24	61.33
266	3 325	0.75	4 433	46.24	49.76
267	6 230	1.11	5 613	51.02	53.18
268.01	5 125	0.80	6 406	53.80	55.09
268.02	3 315	0.40	8 288	59.38	58.83
268.03	0	1.32	-	0.00	
269	3 925	0.78	5 032	48.78	51.59
270	4 065	0.67	6 067	52.65	54.30
271	3 185	0.49	6 500	54.11	55.30
272	3 675	0.47	7 819	58.10	57.98
273	4 435	0.52	8 529	60.02	59.24
274	3 190	0.60	5 317	49.90	52.39
275	4 240	0.70	6 057	52.61	54.28

<i>Secteur de Recensement</i>	<i>Population</i>	<i>Superficie (km²)</i>	<i>Densité de Population (pers./km²)</i>	<i>Superficie Imperméable (%)</i>	<i>C_R (%)</i>
276	4 925	0.73	6 747	54.90	55.84
277	4 210	0.59	7 136	56.11	56.66
278	4 415	0.58	7 612	57.51	57.59
279	4 085	1.01	4 045	44.45	48.42
280	4 280	0.60	7 133	56.10	56.65
281	3 615	0.74	4 885	48.18	51.16
282	6 235	1.34	4 653	47.20	50.46
283.01	3 890	0.55	7 073	55.92	56.53
283.02	3 180	0.47	6 766	54.96	55.89
284	3 440	0.64	5 375	50.13	52.55
285	6 785	1.48	4 584	46.91	50.24
286	4 845	0.80	6 056	52.61	54.28
287.01	5 480	0.55	9 964	63.50	61.50
287.02	4 145	1.08	3 838	43.44	47.66
288	1 355	1.86	728	18.49	23.57
290.01	1 840	1.22	1 508	27.70	34.12
290.02	6 010	1.22	4 926	48.35	51.28
290.03	3 575	0.45	7 944	58.45	58.21
290.04	5 550	3.66	1 516	27.78	34.20
290.05	5 120	1.31	3 908	43.79	47.93
290.06	6 340	0.92	6 891	55.36	56.15
290.07	2 325	0.60	3 875	43.62	47.80
290.08	4 455	1.01	4 411	46.14	49.68
290.09	5 430	0.89	6 101	52.77	54.39
291	6 420	11.28	569	15.95	19.99
300	2 400	0.44	5 455	50.43	52.76
301	4 925	0.39	12 628	68.91	64.93
302	3 155	0.21	15 024	72.94	67.45
303	2 170	0.18	12 056	67.85	64.26
304	2 645	0.26	10 173	63.97	61.80
305	3 530	0.28	12 607	68.88	64.91
306	3 385	0.18	18 806	78.20	70.71
307	3 575	0.18	19 861	79.48	71.50
308	3 105	0.16	19 406	78.93	71.16
309	1 305	0.16	8 156	59.03	58.59
310	3 610	0.41	8 805	60.73	59.70
311	4 345	0.28	15 518	73.70	67.92
312	3 415	0.28	12 196	68.11	64.43
313	3 435	0.31	11 081	65.91	63.04
314	2 730	0.28	9 750	63.01	61.18
315	785	0.78	1 006	22.26	28.26
316	2 100	0.54	3 889	43.69	47.86
320	4 845	0.62	7 815	58.09	57.97
321	3 050	0.39	7 821	58.11	57.99
322.01	8 095	1.09	7 427	56.98	57.24
322.02	3 910	0.96	4 073	44.58	48.53
323	3 090	0.65	4 754	47.63	50.77
324.01	4 650	0.78	5 962	52.28	54.05
324.02	3 100	0.70	4 429	46.22	49.74

<i>Secteur de Recensement</i>	<i>Population</i>	<i>Superficie (km²)</i>	<i>Densité de Population (pers./km²)</i>	<i>Superficie Imperméable (%)</i>	<i>C_R (%)</i>
325.01	4 040	0.47	8 596	60.19	59.36
325.02	6 205	0.41	15 134	73.12	67.56
325.03	3 955	0.60	6 592	54.41	55.51
325.04	6 610	1.99	3 322	40.72	45.57
326.01	3 185	2.37	1 344	26.06	32.45
326.02	3 710	1.19	3 118	39.56	44.65
326.03	4 915	1.26	3 901	43.75	47.90
327	4 870	1.27	3 835	43.42	47.65
328	2 060	0.98	2 102	32.79	38.93
329	3 510	0.70	5 014	48.71	51.54
330	4 965	2.15	2 309	34.34	40.30
340	5 180	1.63	3 178	39.91	44.93
350	2 325	0.54	4 306	45.67	49.33
351	4 945	0.44	11 239	66.24	63.24
352	2 820	0.47	6 000	52.42	54.14
353	3 010	0.39	7 718	57.82	57.79
354	3 490	0.80	4 363	45.92	49.52
355	1 435	0.31	4 629	47.10	50.38
356	2 210	1.01	2 188	33.45	39.52
360	2 505	1.37	1 828	30.59	36.91
361	1 555	0.13	11 962	67.67	64.15
362	2 635	0.47	5 606	51.00	53.16
363	4 765	0.36	13 236	70.00	65.62
365	2 570	0.26	9 885	63.32	61.38
366	2 670	0.34	7 853	58.20	58.05
367	3 850	0.52	7 404	56.91	57.19
370	7 215	1.96	3 681	42.64	47.06
380	4 165	0.88	4 733	47.54	50.70
381	5 225	0.57	9 167	61.62	60.29
382.01	3 860	0.65	5 938	52.20	53.99
382.02	4 450	1.45	3 069	39.28	44.42
383.01	3 690	1.92	1 922	31.36	37.64
383.02	7 035	1.47	4 786	47.77	50.86
390	1 400	1.27	1 102	23.41	29.58
391	1 955	0.36	5 431	50.34	52.70
392	1 390	0.44	3 159	39.80	44.84
393	5 435	1.19	4 567	46.83	50.19
394	3 905	1.55	2 519	35.81	41.56
394	3 905	1.55	2 519	35.81	41.56
395.01	2 490	8.26	301	10.64	10.77
395.02	5 595	0.70	7 993	58.58	58.30
395.03	3 685	0.73	5 048	48.84	51.64
396	5 580	1.50	3 720	42.84	47.21
397	3 835	1.37	2 799	37.64	43.09
400	4 180	1.40	2 986	38.78	44.02
401	3 010	0.98	3 071	39.29	44.43
402	1 105	2.35	470	14.18	17.22
403	4 890	1.27	3 850	43.50	47.71
404	5 025	1.35	3 722	42.85	47.22

<i>Secteur de Recensement</i>	<i>Population</i>	<i>Superficie (km²)</i>	<i>Densité de Population (pers./km²)</i>	<i>Superficie Imperméable (%)</i>	<i>C_R (%)</i>
410.01	4 785	0.92	5 201	49.45	52.07
410.02	4 765	0.96	4 964	48.50	51.39
410.03	1 740	2.19	795	19.45	24.83
412	5 175	1.74	2 974	38.71	43.97
413	6 725	1.58	4 256	45.44	49.16
415.01	225	31.52	7	0.47	
415.02	8 630	0.42	20 548	80.27	71.99
416	7 805	2.05	3 807	43.28	47.55
417.01	3 685	0.50	7 370	56.81	57.13
417.02	3 290	0.67	4 910	48.29	51.24
418	4 975	1.40	3 554	41.98	46.55
419	4 480	0.39	11 487	66.74	63.56
420	4 425	0.91	4 863	48.09	51.10
421	11 705	1.06	11 042	65.83	62.99
430	5 370	1.97	2 726	37.17	42.70
430	5 370	1.97	2 726	37.17	42.70
431	5 080	2.10	2 419	35.12	40.97
432	3 250	1.37	2 372	34.79	40.69
433	3 540	15.20	233	8.93	7.03
433	3 540	15.20	233	8.93	7.03
450	7 150	3.76	1 902	31.20	37.48
451	6 290	3.32	1 895	31.14	37.43
452	6 245	3.25	1 922	31.36	37.63
453.01	5 160	1.92	2 688	36.92	42.50
453.02	2 800	6.94	403	12.87	15.00
460	5 600	3.39	1 652	29.04	35.44
461	3 000	1.86	1 613	28.69	35.09
462.01	5 395	2.41	2 239	33.82	39.85
462.02	5 625	2.90	1 940	31.51	37.77
470.01	6 755	3.67	1 841	30.69	37.01
470.02	7 500	3.92	1 913	31.29	37.57
470.03	3 245	2.27	1 430	26.93	33.34
480	3 850	6.03	638	17.10	21.66
490	2 385	0.51	4 676	47.30	50.53
491	1 645	9.71	169	7.14	2.42
500	960	7.41	130	5.87	
510	1 965	0.62	3 169	39.86	44.89
511	5 980	2.33	2 567	36.13	41.83
512.01	7 750	2.28	3 399	41.15	45.90
512.02	3 940	1.55	2 542	35.96	41.69
513	8 030	2.46	3 264	40.40	45.32
514.01	5 435	2.10	2 588	36.27	41.95
514.02	4 875	1.68	2 902	38.27	43.61
515	10 765	11.29	953	21.59	27.47
520.01	8 680	2.77	3 134	39.66	44.72
520.02	7 240	1.24	5 839	51.84	53.75
521.01	4 895	0.70	6 993	55.67	56.36
521.02	7 560	2.93	2 580	36.22	41.91
521.03	7 855	3.98	1 974	31.78	38.02

<i>Secteur de Recensement</i>	<i>Population</i>	<i>Superficie (km²)</i>	<i>Densité de Population (pers./km²)</i>	<i>Superficie Imperméable (%)</i>	<i>C_R (%)</i>
522.01	4 180	1.21	3 455	41.45	46.14
522.02	3 790	1.09	3 477	41.57	46.23
523	2 720	0.73	3 726	42.87	47.23
530	5 880	2.23	2 637	36.59	42.22
540	3 200	1.24	2 581	36.22	41.91
570	3 765	12.38	304	10.70	10.90
580.01	3 510	0.95	3 695	42.71	47.11
580.02	275	0.57	482	14.41	17.59
580.03	4 375	1.55	2 823	37.78	43.21
581.01	6 020	1.34	4 493	46.50	49.95
581.02	3 890	0.63	6 175	53.02	54.56
582.01	7 270	1.17	6 214	53.15	54.65
582.02	6 590	1.29	5 109	49.09	51.81
583	3 615	0.78	4 635	47.12	50.40
584	7 590	3.10	2 448	35.32	41.15
585.01	905	3.24	279	10.11	9.67
585.02	3 500	4.32	810	19.67	25.11
590.01	2 725	0.52	5 240	49.61	52.18
590.01	5 170	1.50	3 447	41.41	46.10
590.02	3 205	0.31	10 339	64.34	62.03
591.02	4 050	0.67	6 045	52.57	54.25
592	6 875	0.98	7 015	55.74	56.41
593	5 815	1.53	3 801	43.25	47.52
594.01	3 000	0.37	8 108	58.90	58.51
594.02	6 365	7.76	820	19.82	25.29
600.01	4 085	0.70	5 836	51.83	53.74
600.02	3 535	0.44	8 034	58.70	58.38
600.03	4 925	0.70	7 036	55.81	56.45
601.01	3 250	0.31	10 484	64.65	62.24
601.02	2 890	0.41	7 049	55.85	56.48
602.01	2 840	0.62	4 581	46.89	50.23
602.02	2 100	0.73	2 877	38.12	43.48
603.01	3 845	0.54	7 120	56.06	56.63
603.02	3 915	0.62	6 315	53.49	54.88
603.03	3 575	0.34	10 515	64.72	62.28
604.01	3 415	0.93	3 672	42.60	47.02
604.02	4 295	0.36	11 931	67.61	64.11
604.03	3 340	0.54	6 185	53.06	54.58
604.04	3 955	0.80	4 944	48.42	51.34
604.05	3 790	0.65	5 831	51.82	53.73
605.01	3 305	1.29	2 562	36.10	41.80
605.02	2 100	0.73	2 877	38.12	43.48
605.03	5 530	0.93	5 946	52.23	54.01
605.04	5 020	1.61	3 118	39.57	44.65
605.05	2 395	0.62	3 863	43.56	47.76
610.01	4 925	0.96	5 130	49.17	51.87
610.02	4 930	0.47	10 489	64.66	62.24
610.03	5 870	0.93	6 312	53.48	54.88
610.04	4 135	0.16	25 844	85.63	75.32

<i>Secteur de Recensement</i>	<i>Population</i>	<i>Superficie (km²)</i>	<i>Densité de Population (pers./km²)</i>	<i>Superficie Imperméable (%)</i>	<i>C_R (%)</i>
610.05	4 860	0.41	11 854	67.46	64.02
610.06	2 995	0.36	8 319	59.47	58.88
610.07	4 485	0.54	8 306	59.43	58.86
611.01	2 900	0.67	4 328	45.77	49.41
611.02	5 645	0.60	9 408	62.21	60.67
612	4 185	0.75	5 580	50.90	53.09
613	6 865	1.01	6 797	55.06	55.95
614	3 595	0.44	8 170	59.07	58.62
615	5 215	0.52	10 029	63.65	61.59
616	6 175	6.75	915	21.09	26.87
617.02	3 920	0.65	6 031	52.52	54.22
618	3 320	0.47	7 064	55.89	56.51
619	5 910	0.52	11 365	66.49	63.41
641	9 525	2.59	3 678	42.63	47.05

ANNEXE D

BANQUE DE DONNÉES DU MINISTÈRE DES TRANSPORTS

**TABLEAU D.1: Banque de données des forages géotechniques
du ministère des Transports (1994)**

<i>Coordonnées</i>		<i>Élévation</i>		<i>Profondeur</i>
<i>UTMX</i>	<i>UTMY</i>	<i>du sol (m)</i>	<i>de l'eau (m)</i>	<i>de l'eau (m)</i>
589200	5033800	46.0	45.5	0.5
593600	5033000	29.0	28.3	0.7
605760	5049900	20.9	15.0	5.9
607200	5037200	72.7	70.8	1.8
607600	5054300	12.6	9.3	3.3
607800	5034300	17.5	16.2	1.3
608600	5035000	17.3	15.1	2.2
609900	5035300	24.4	20.1	4.3
610900	5035500	19.0	17.4	1.6
611050	5035900	19.1	17.9	1.2
611200	5036100	19.6	18.1	1.5
612650	5052470	42.0	38.9	3.0
612880	5052810	40.8	38.4	2.4
613350	5041900	14.9	10.4	4.6
614100	5043850	16.4	7.3	9.1
614100	5049200	32.7	29.7	3.0
614280	5055200	35.8	33.5	2.2
614380	5044460	16.6	9.8	6.9
614630	5045100	14.8	5.7	9.1
Profondeur moyenne de la nappe (m) :				3.4

ANNEXE E

COUPES HYDRO-STRATIGRAPHIQUES DU

MODÈLE CONCEPTUEL

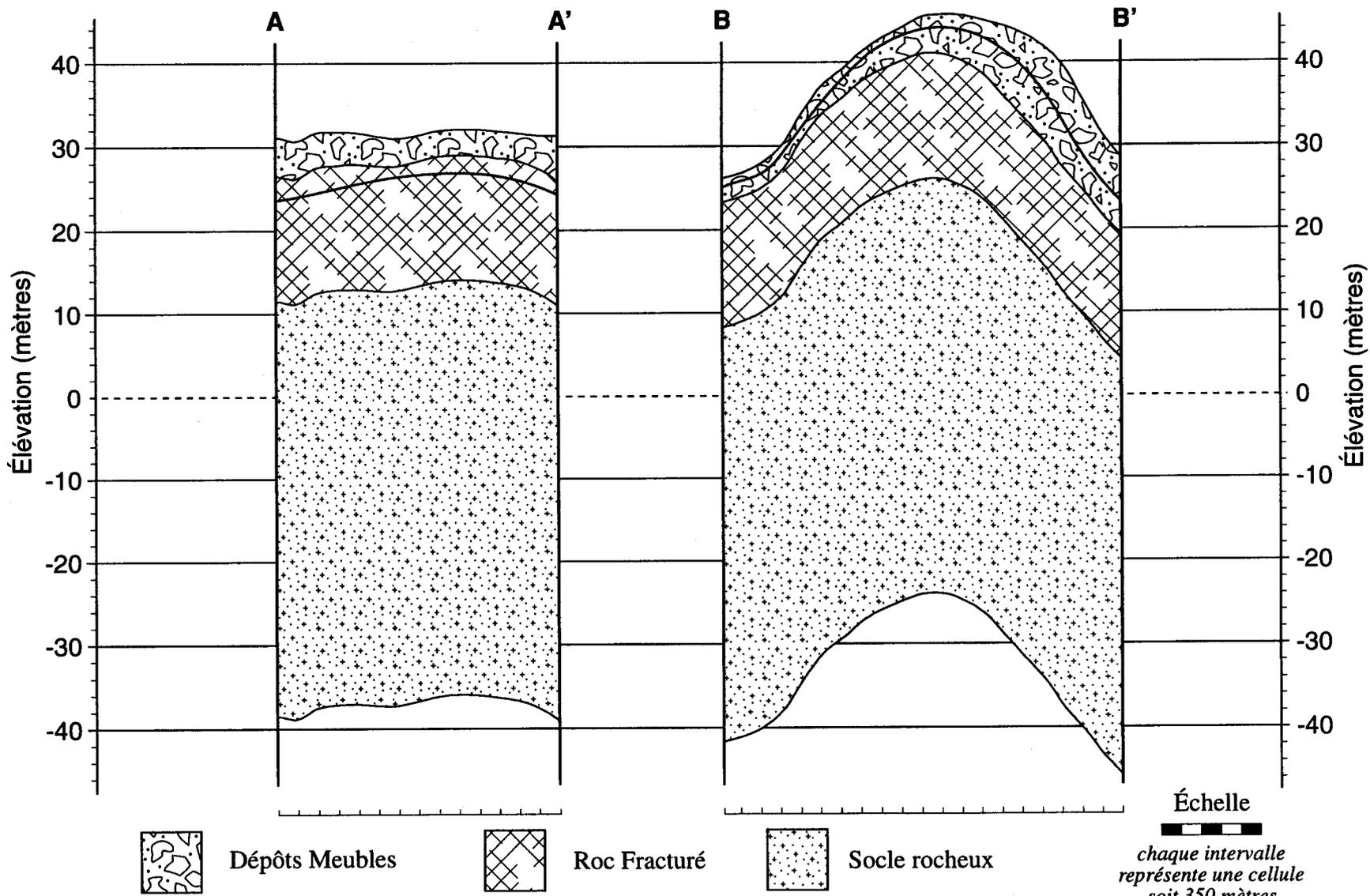


FIGURE E.1: Coupe hydro-stratigraphique du modèle conceptuel. (— = niveau de la surface libre)

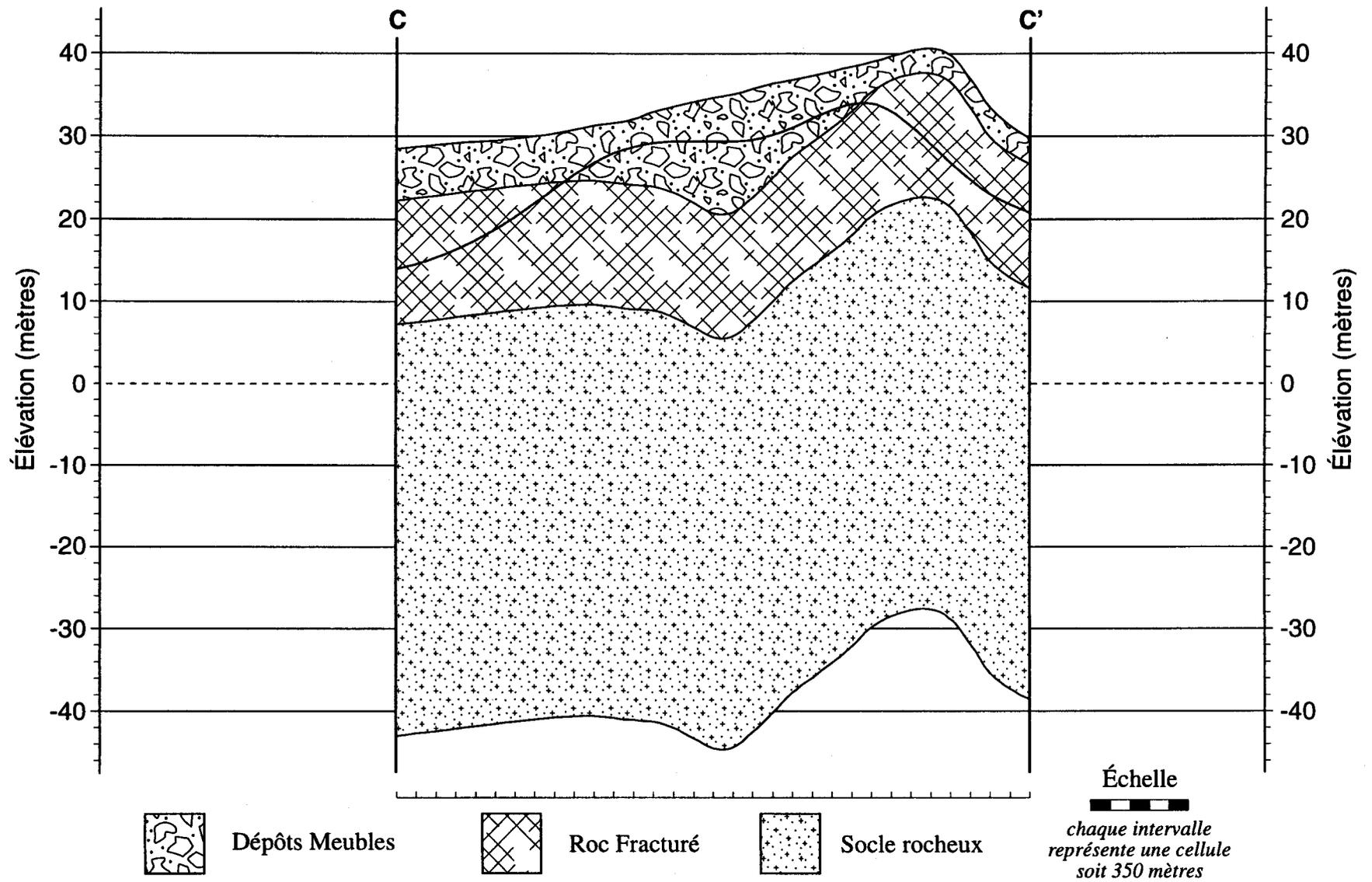


FIGURE E.2: Coupe hydro-stratigraphique du modèle conceptuel. (— = niveau de la surface libre)

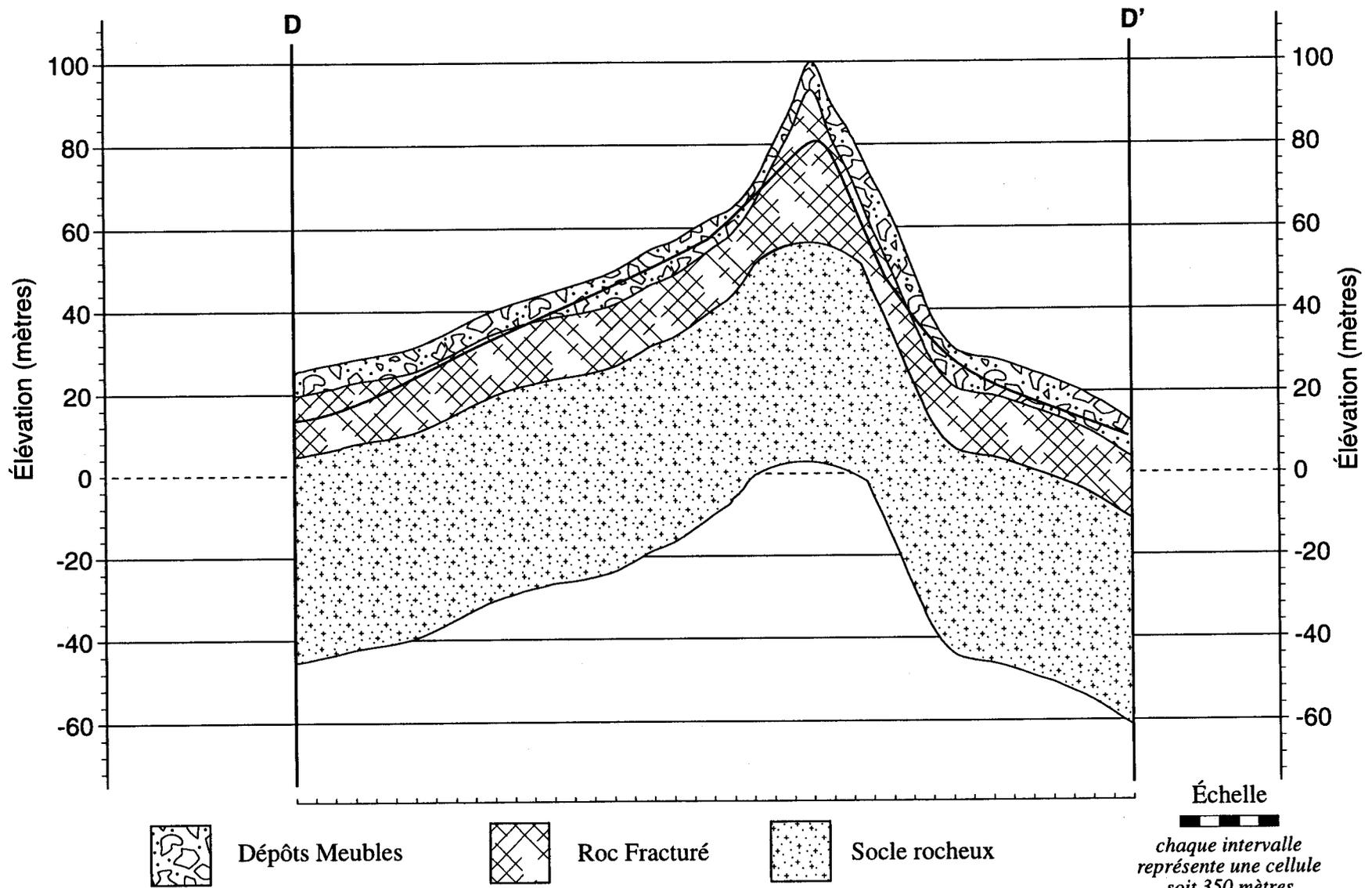


FIGURE E.3: Coupe hydro-stratigraphique du modèle conceptuel. (— = niveau de la surface libre)

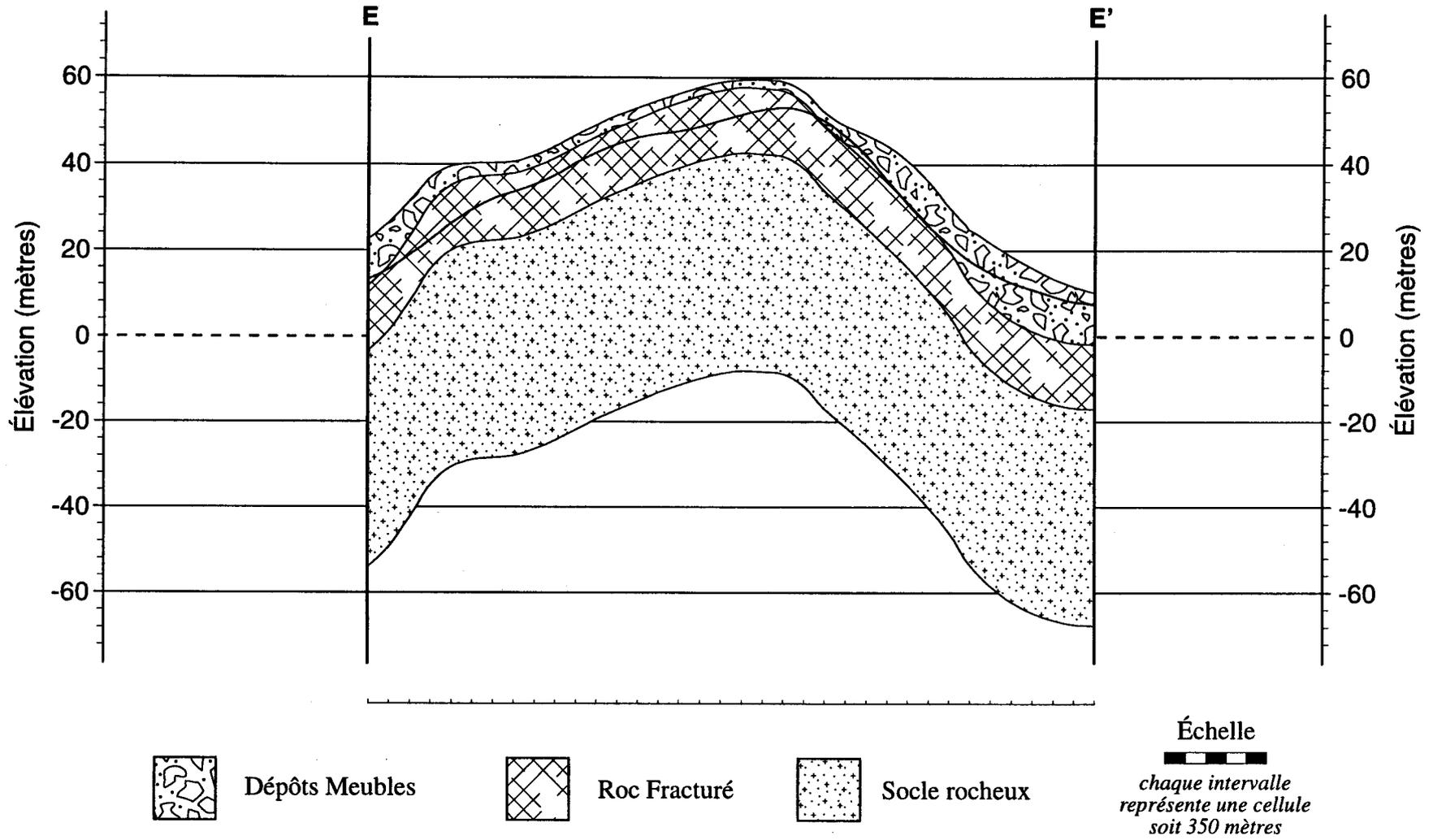


FIGURE E.4: Coupe hydro-stratigraphique du modèle conceptuel. (——— = niveau de la surface libre)

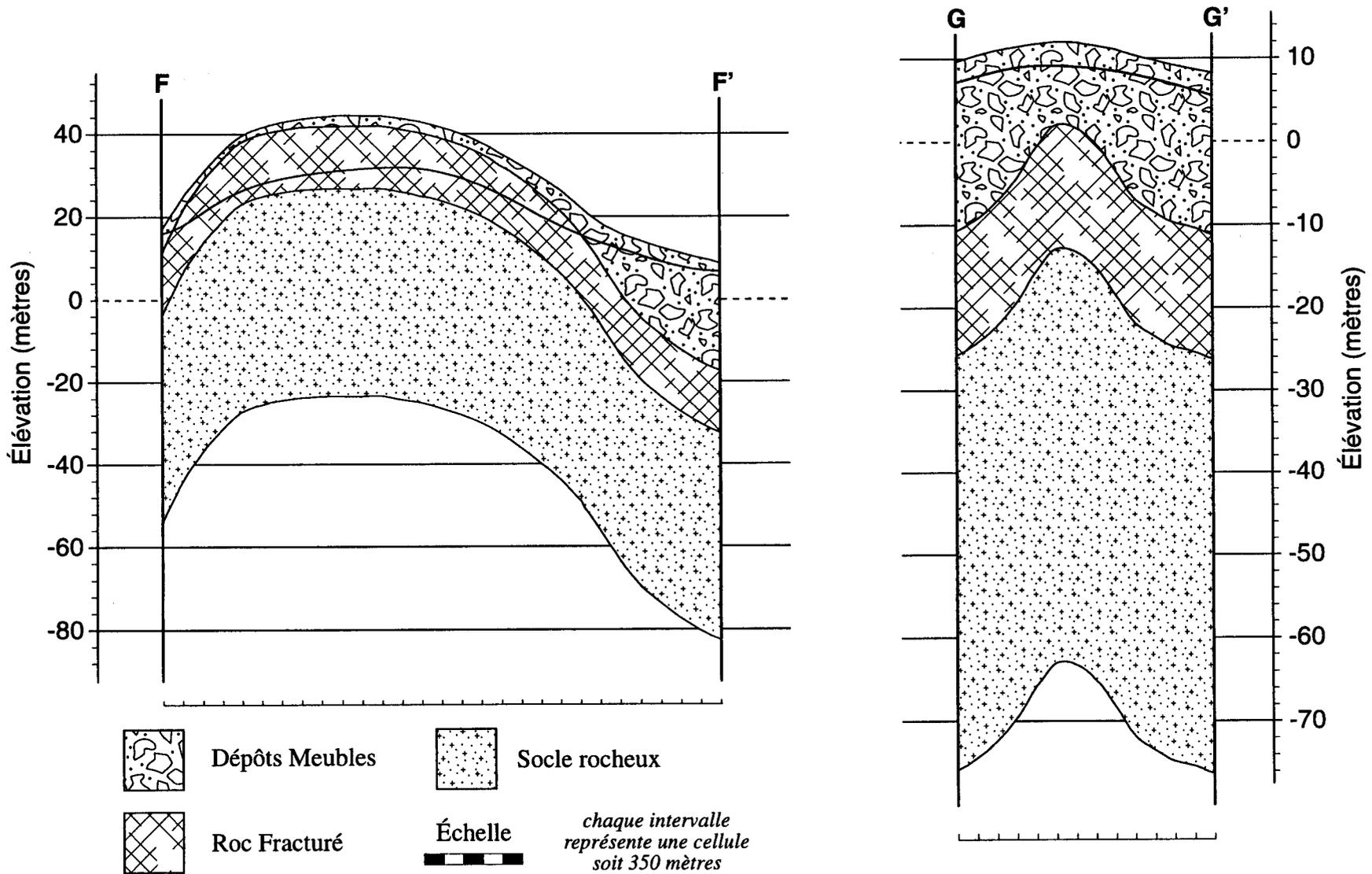


FIGURE E.5: Coupe hydro-stratigraphique du modèle conceptuel. (— = niveau de la surface libre)

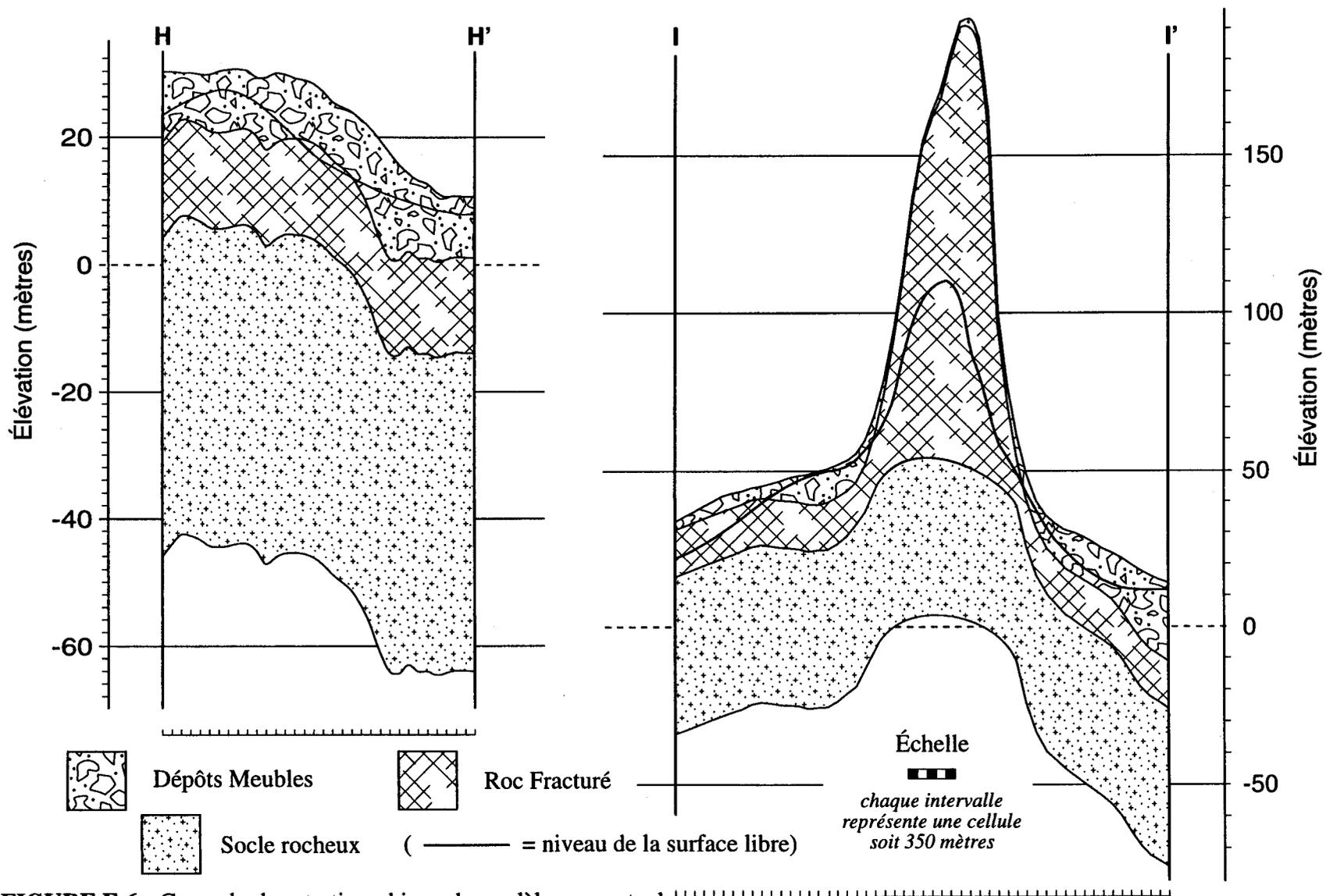


FIGURE E.6: Coupe hydro-stratigraphique du modèle conceptuel.

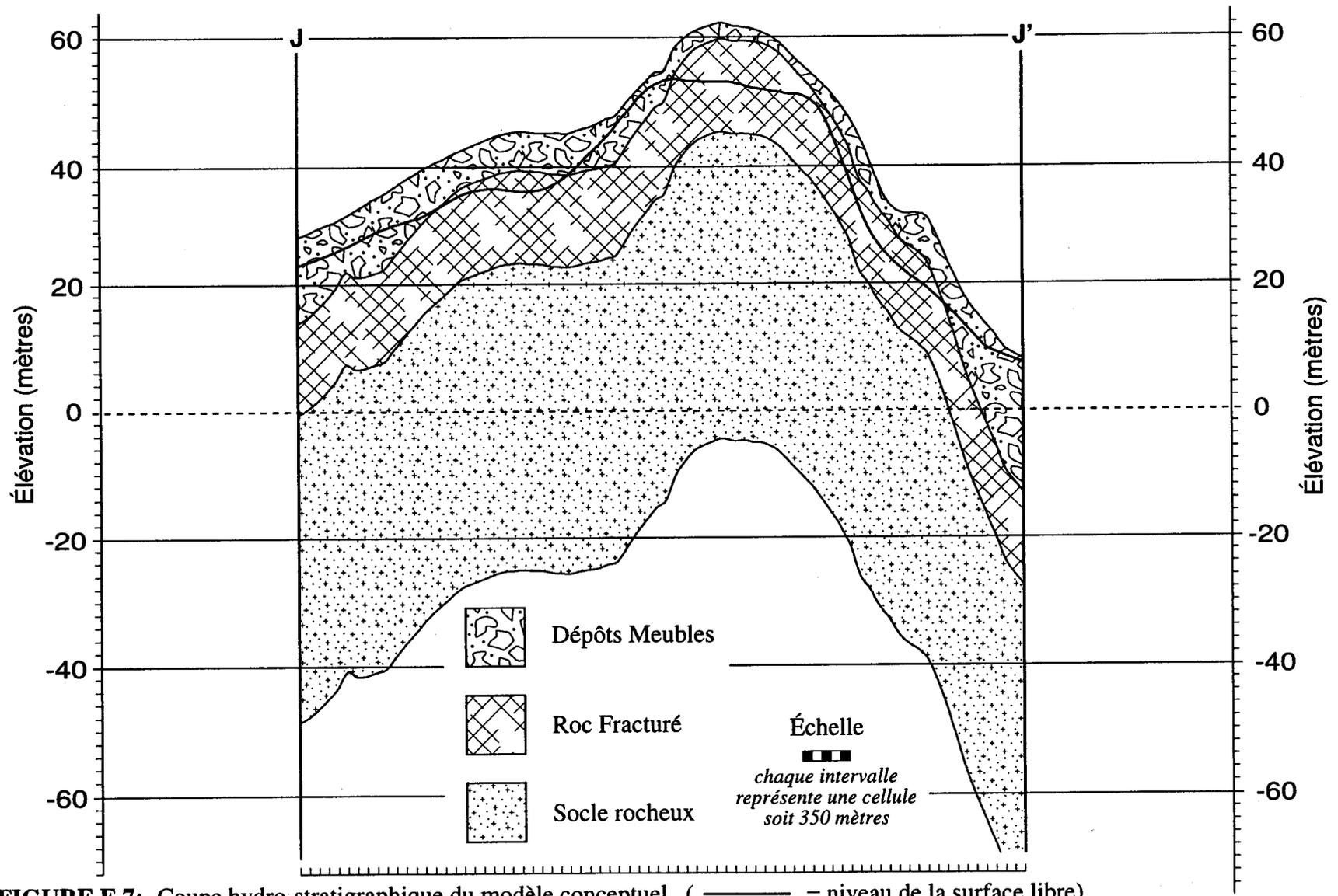


FIGURE E.7: Coupe hydro-stratigraphique du modèle conceptuel. (— = niveau de la surface libre)

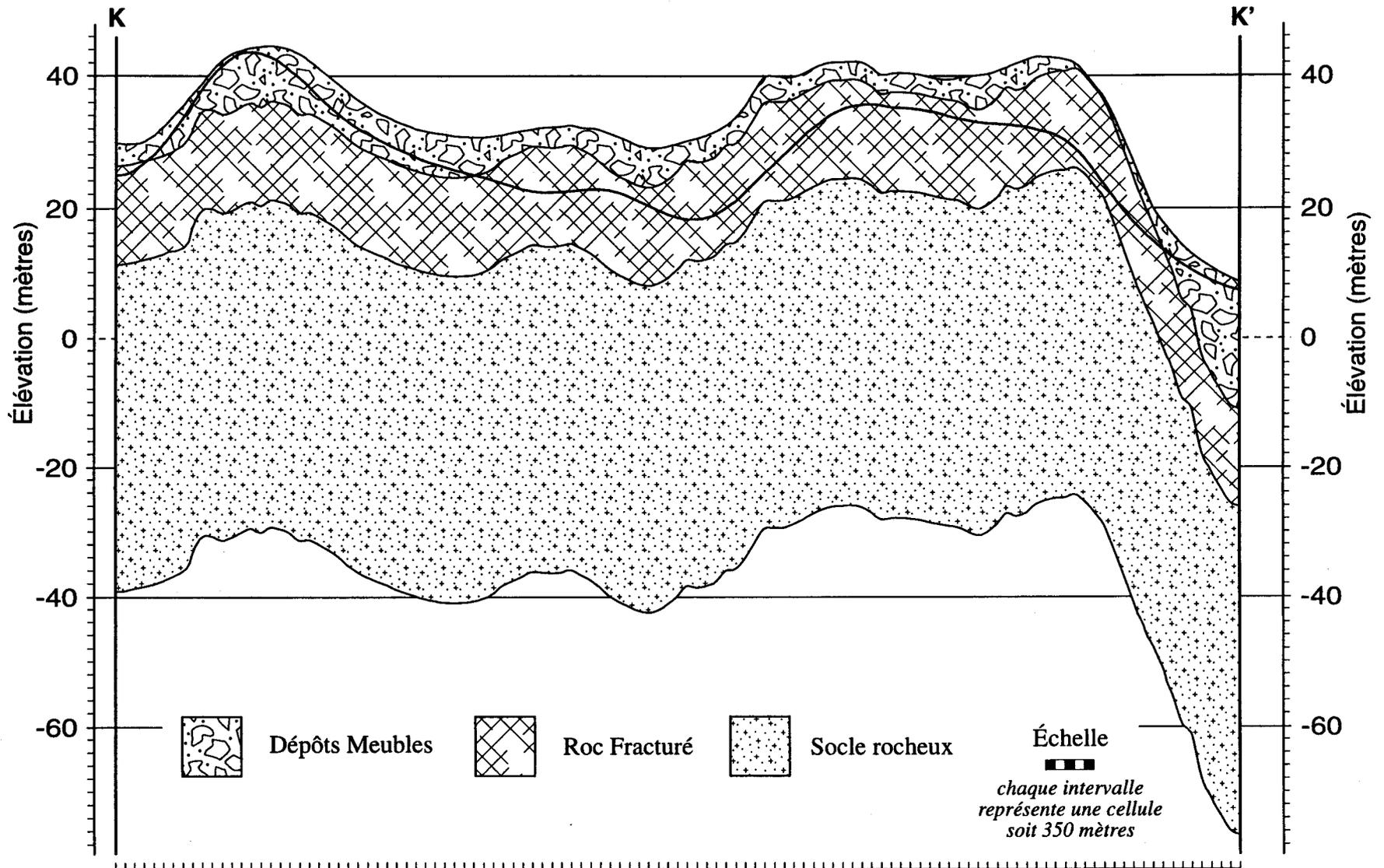


FIGURE E.8: Coupe hydro-stratigraphique du modèle conceptuel. (——— = niveau de la surface libre)

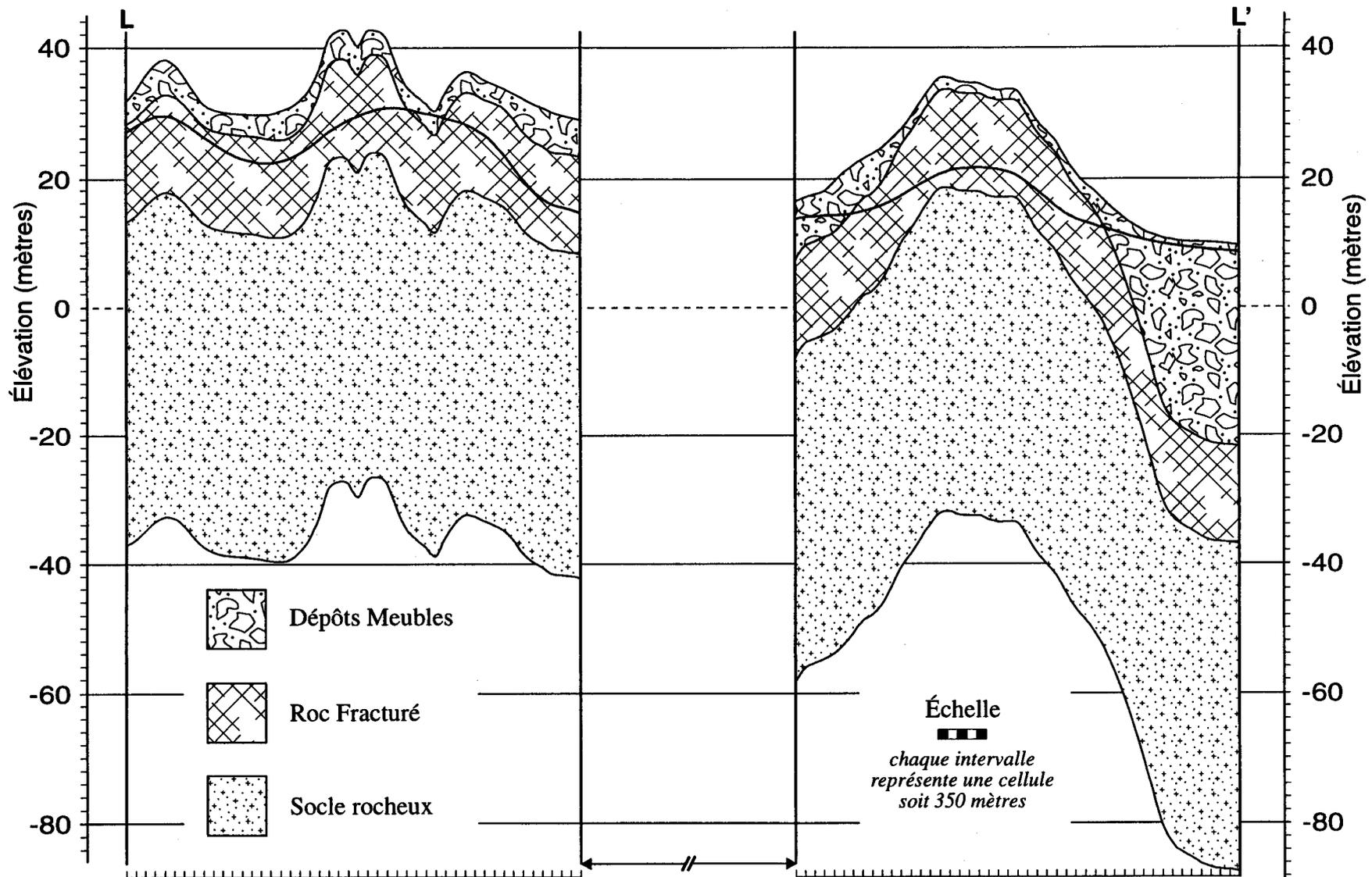


FIGURE E.9: Coupe hydro-stratigraphique du modèle conceptuel. (— = niveau de la surface libre)

ANNEXE F

DIFFÉRENCE ENTRE LA CHARGE SIMULÉE ET CELLE OBSERVÉE

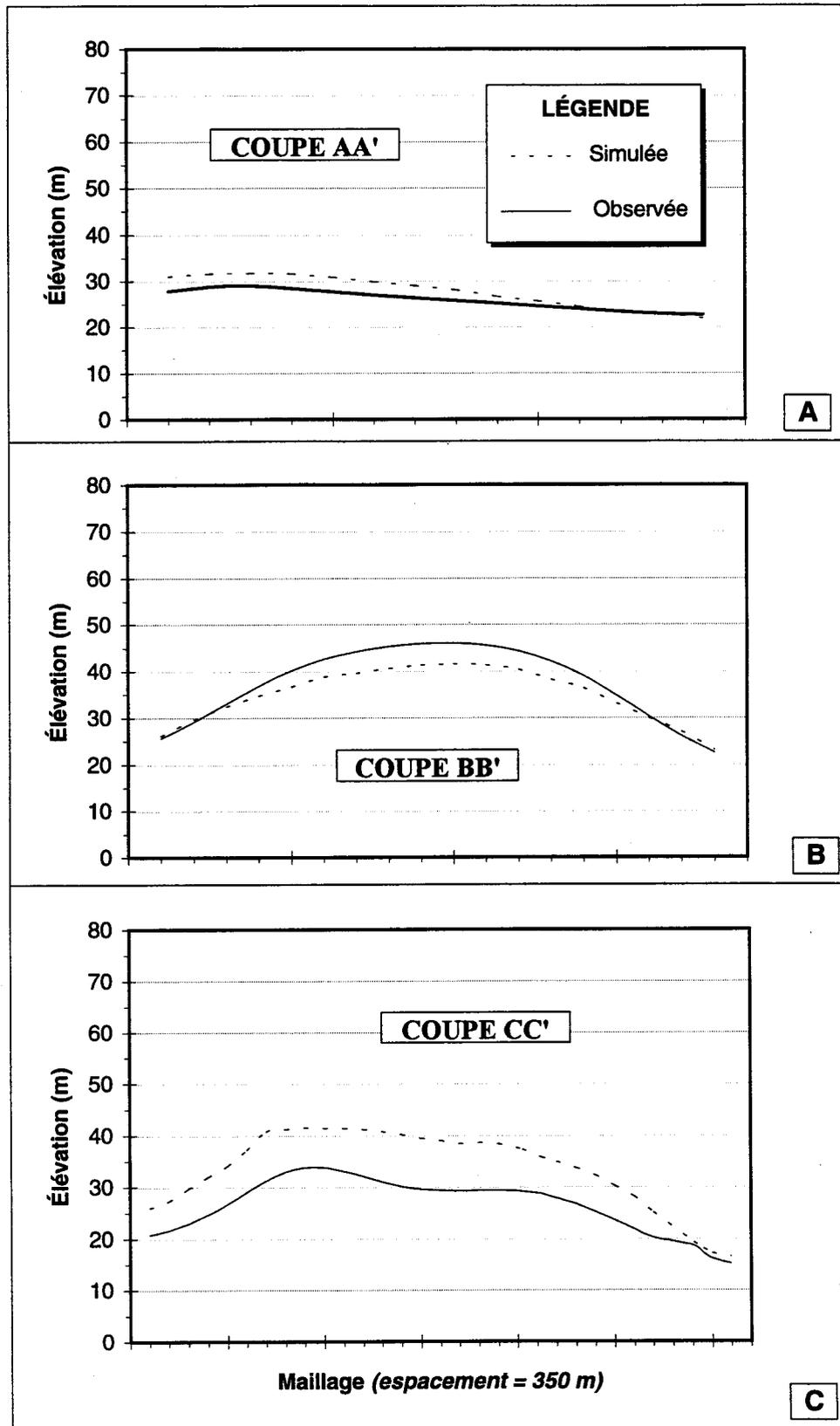


FIGURE F.1: Différence entre la charge hydraulique simulée et celle observée.

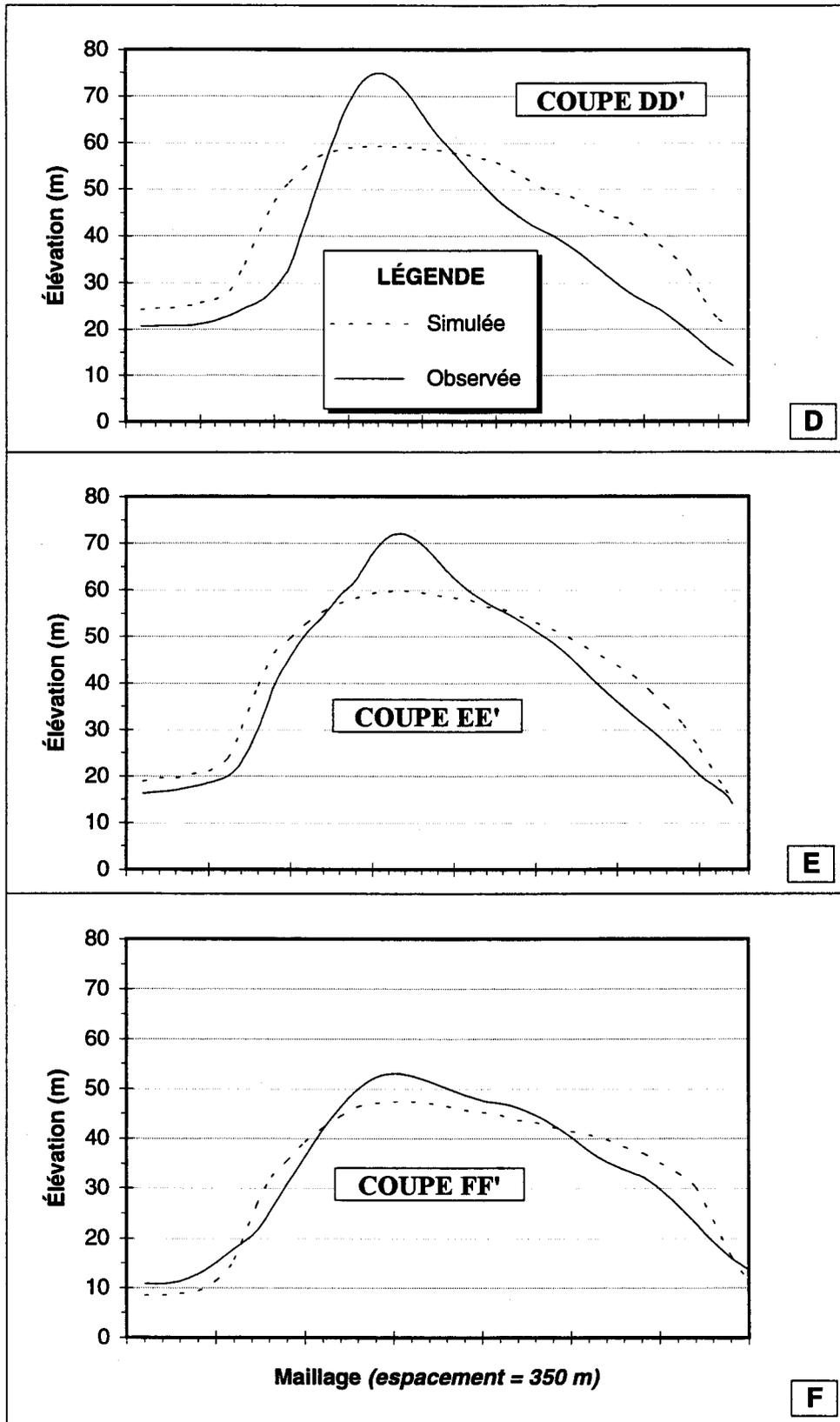


FIGURE F.1: SUITE

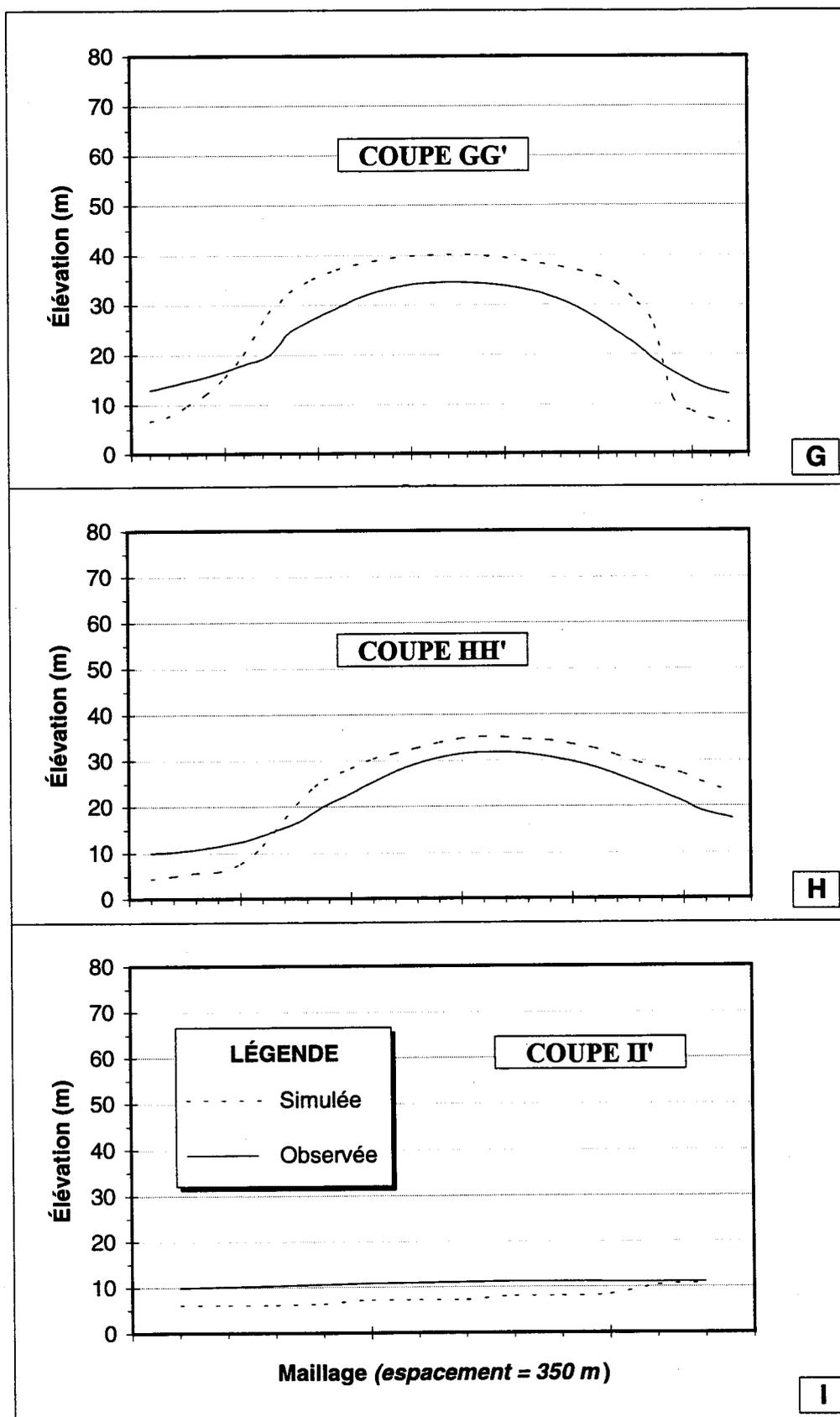


FIGURE F.1: SUITE

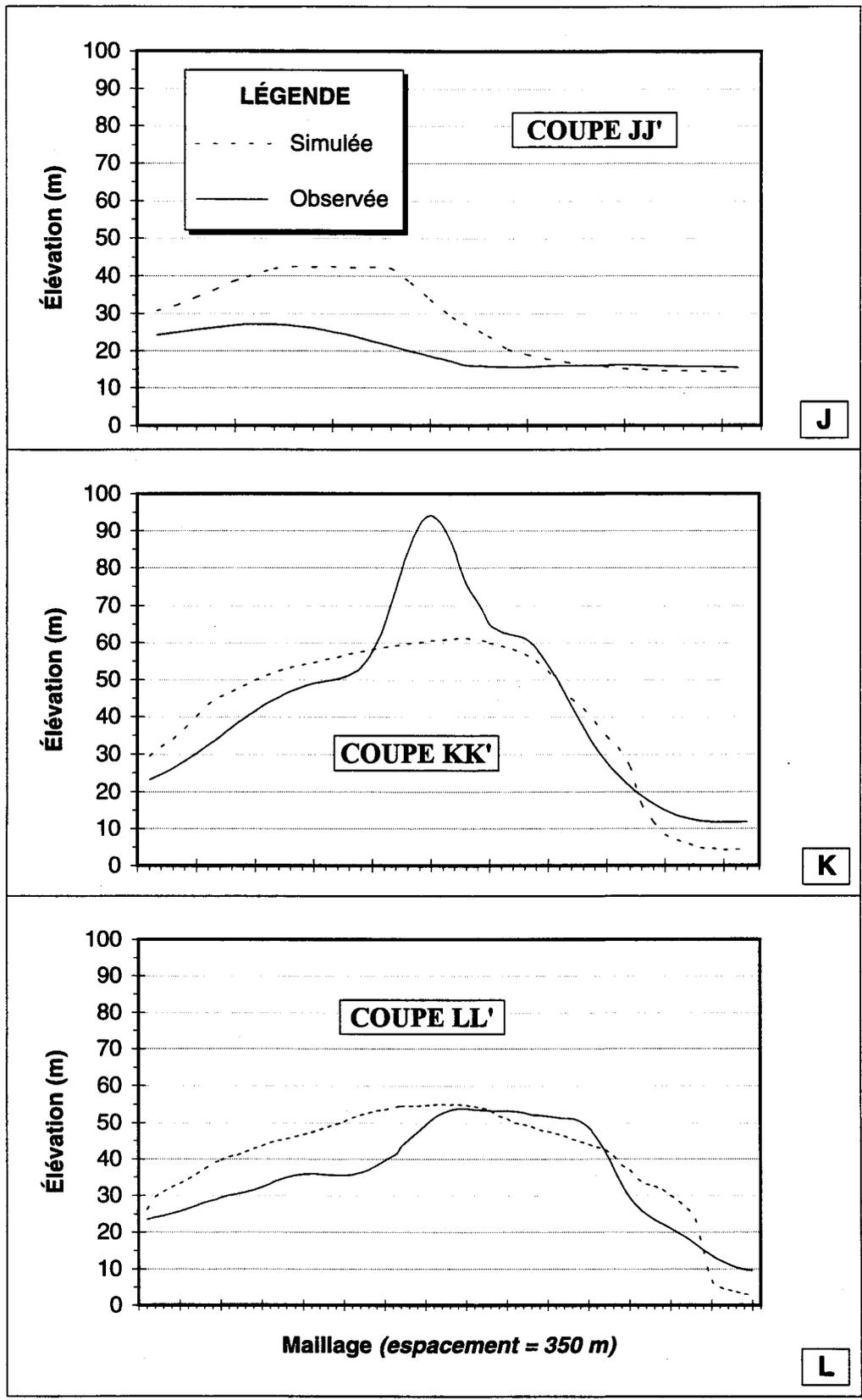


FIGURE F.1: SUITE

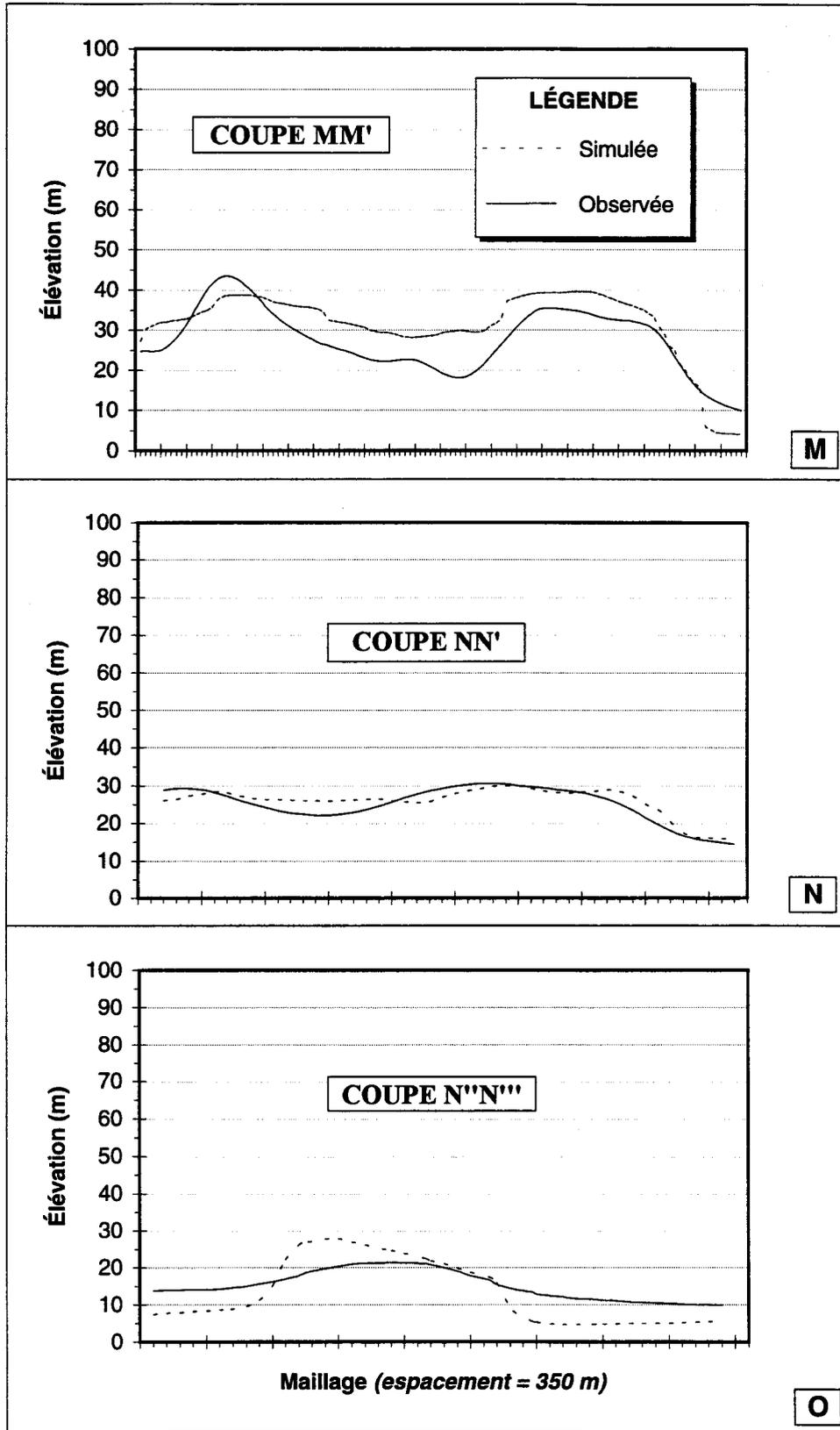


FIGURE F.1: SUITE

ANNEXE G

CONVERGENCE DE LA SOLUTION NUMÉRIQUE

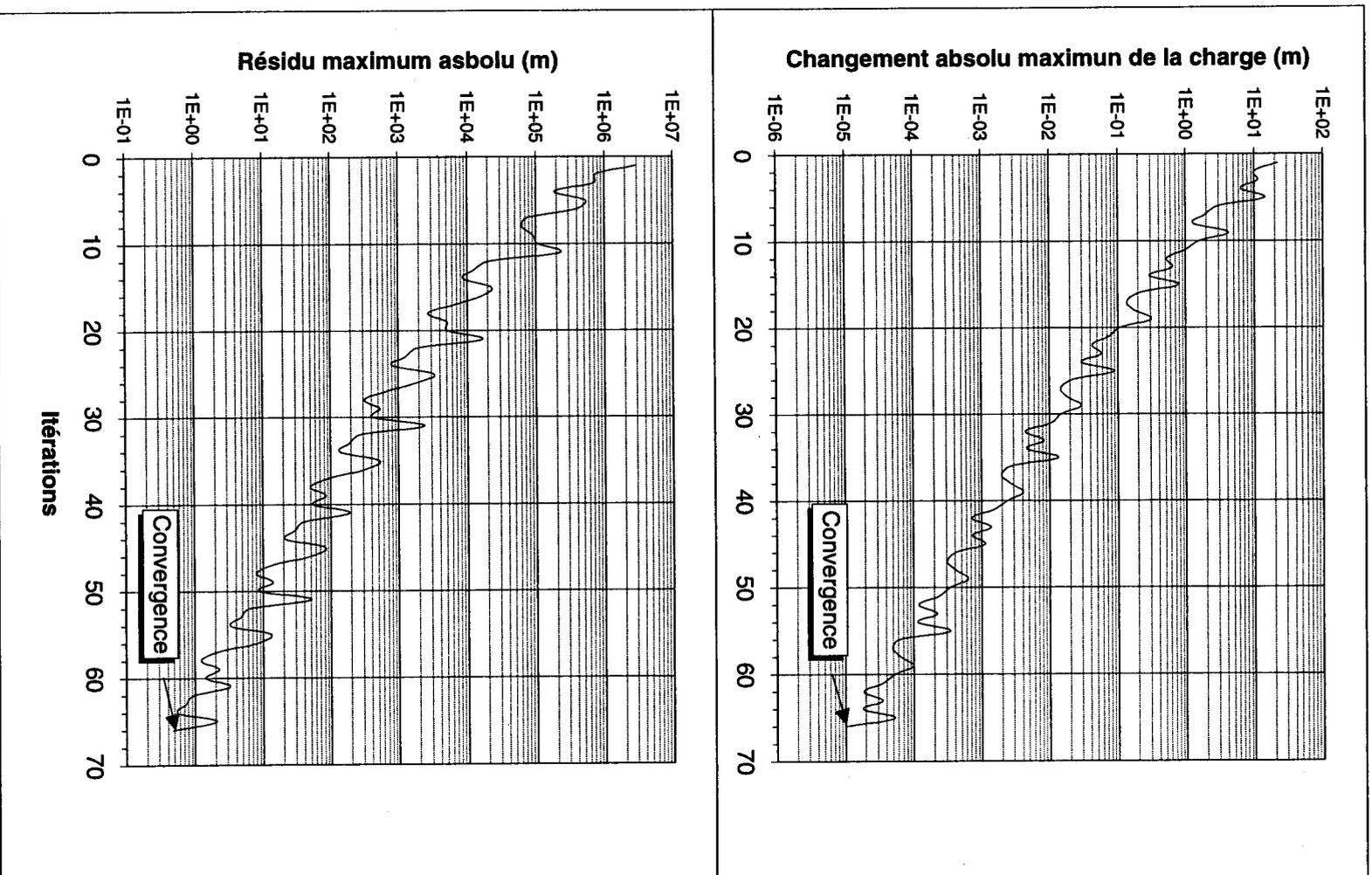


FIGURE G.1: Progression de la convergence - Méthode SIP.

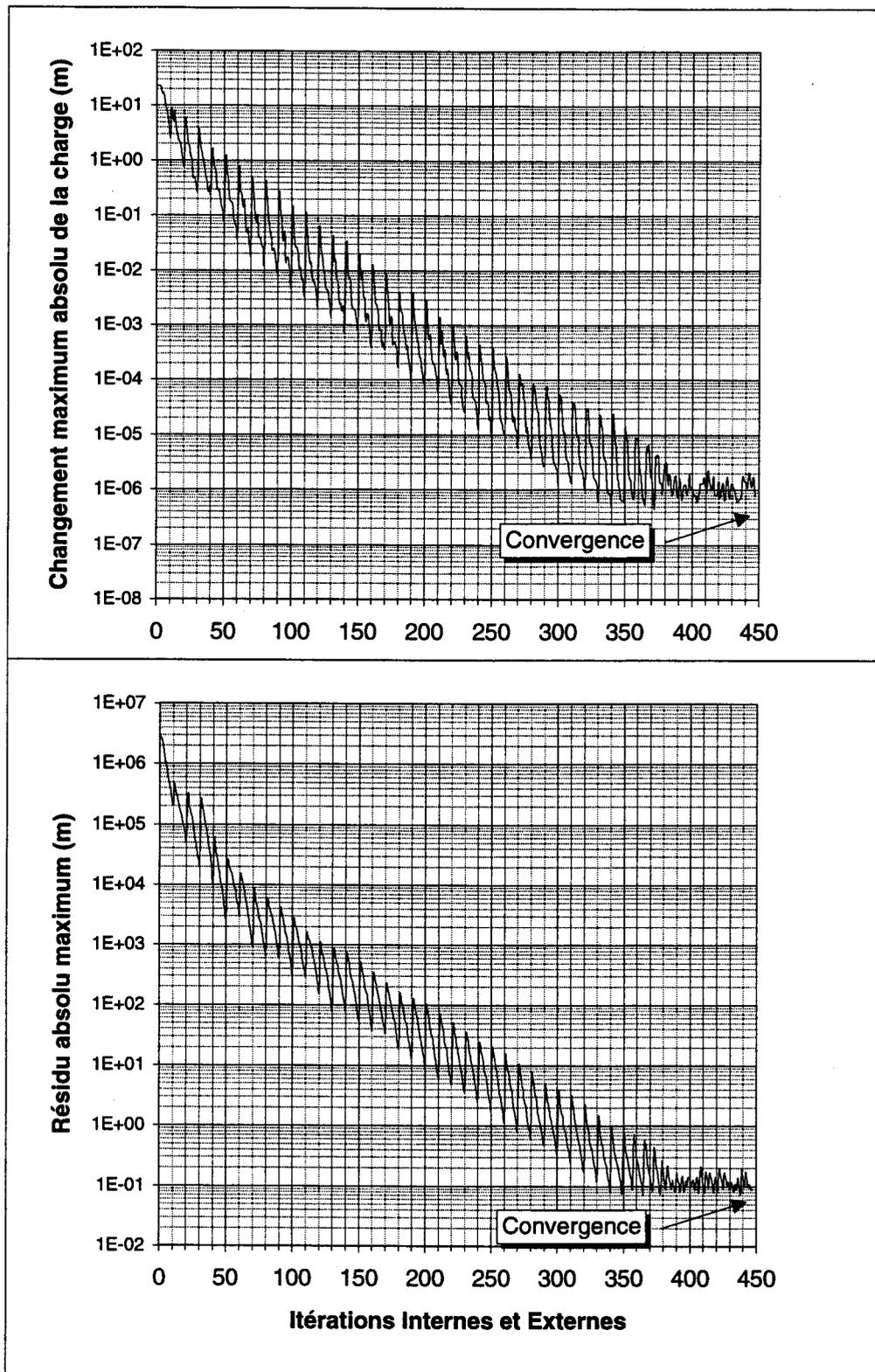


FIGURE G.2: Progression de la convergence - méthode PCG2
(*itérations internes et externes*).

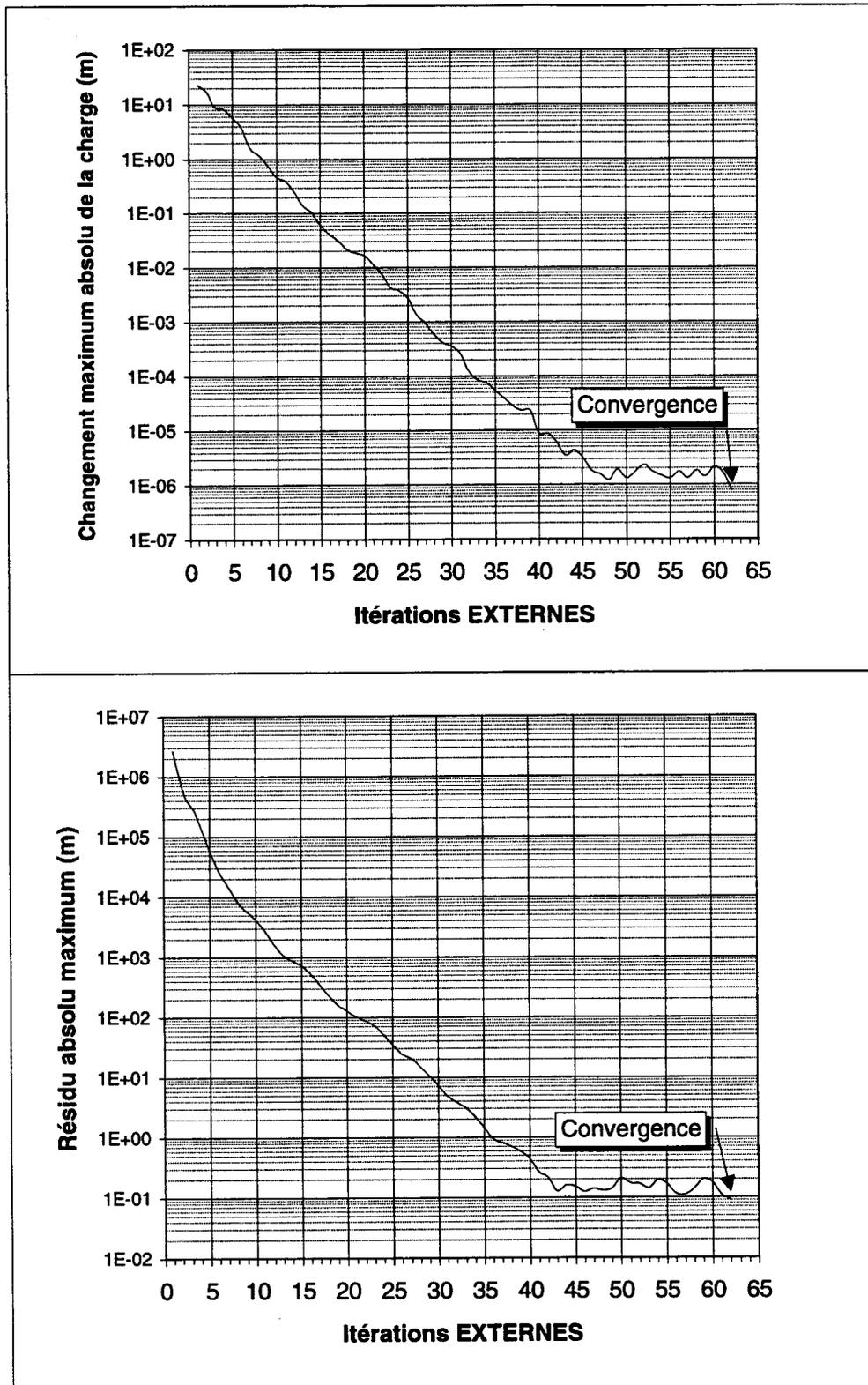


FIGURE G.3: Progression de la convergence - méthode PCG2
(*itérations externes seulement*).

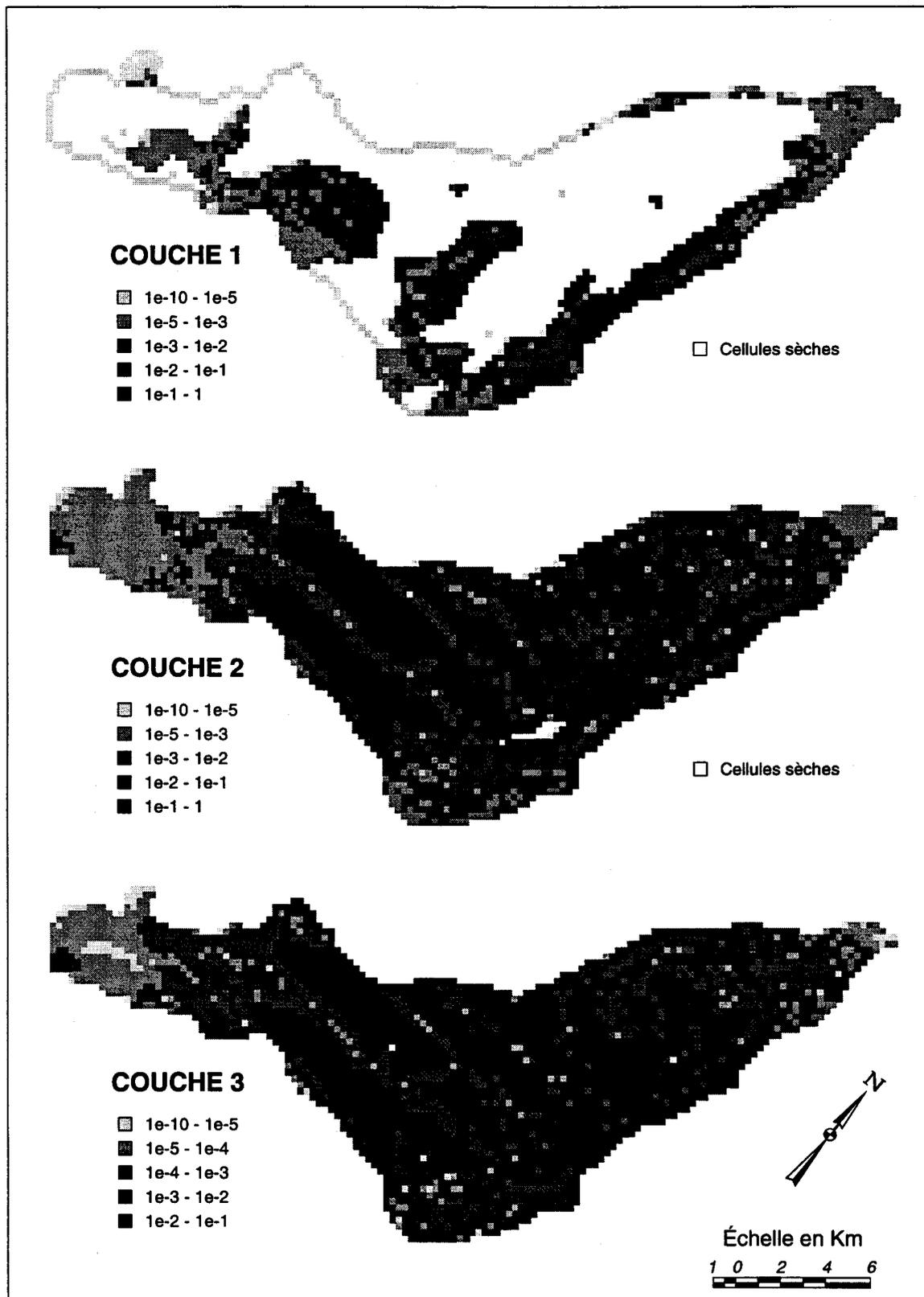


FIGURE G.4: Distribution du résidu pour chaque couche en utilisant la méthode SIP.

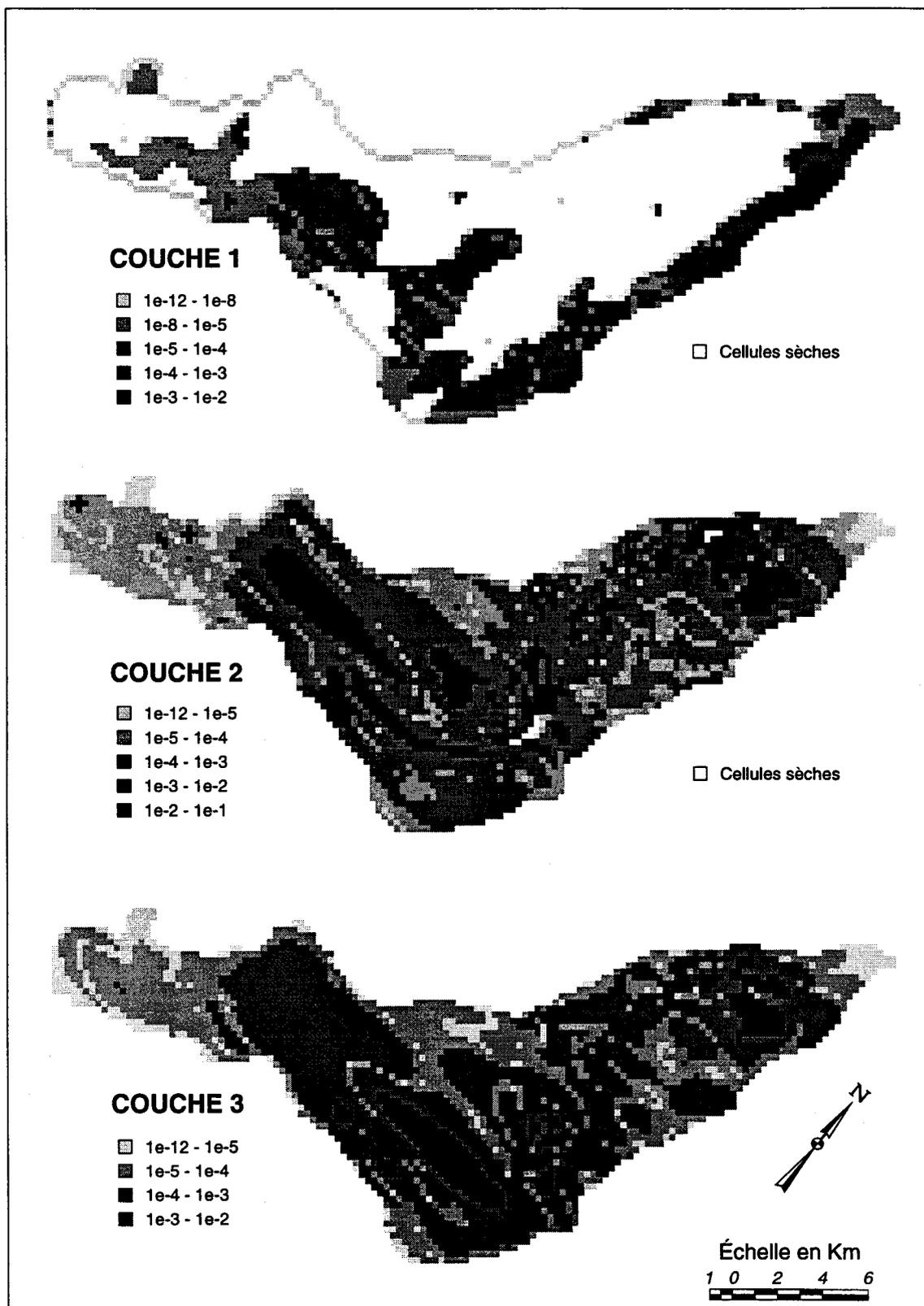


FIGURE G.5: Distribution du résidu pour chaque couche en utilisant la méthode PCG2.

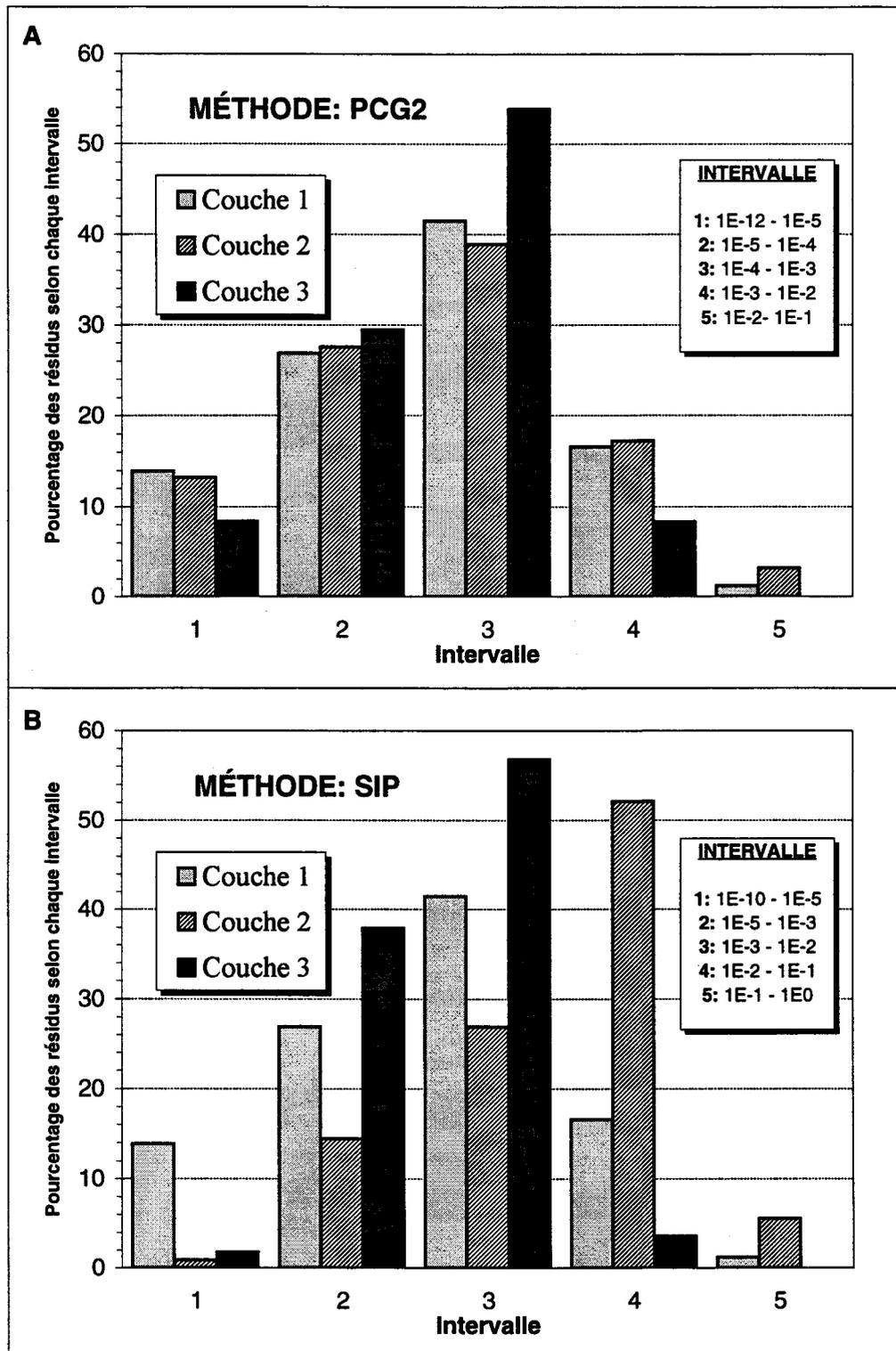


FIGURE G.6: Distribution du résidu en fonction des méthodes de solution numérique (A: PCG2 et B: SIP) et de la couche du modèle conceptuel.

ANNEXE H

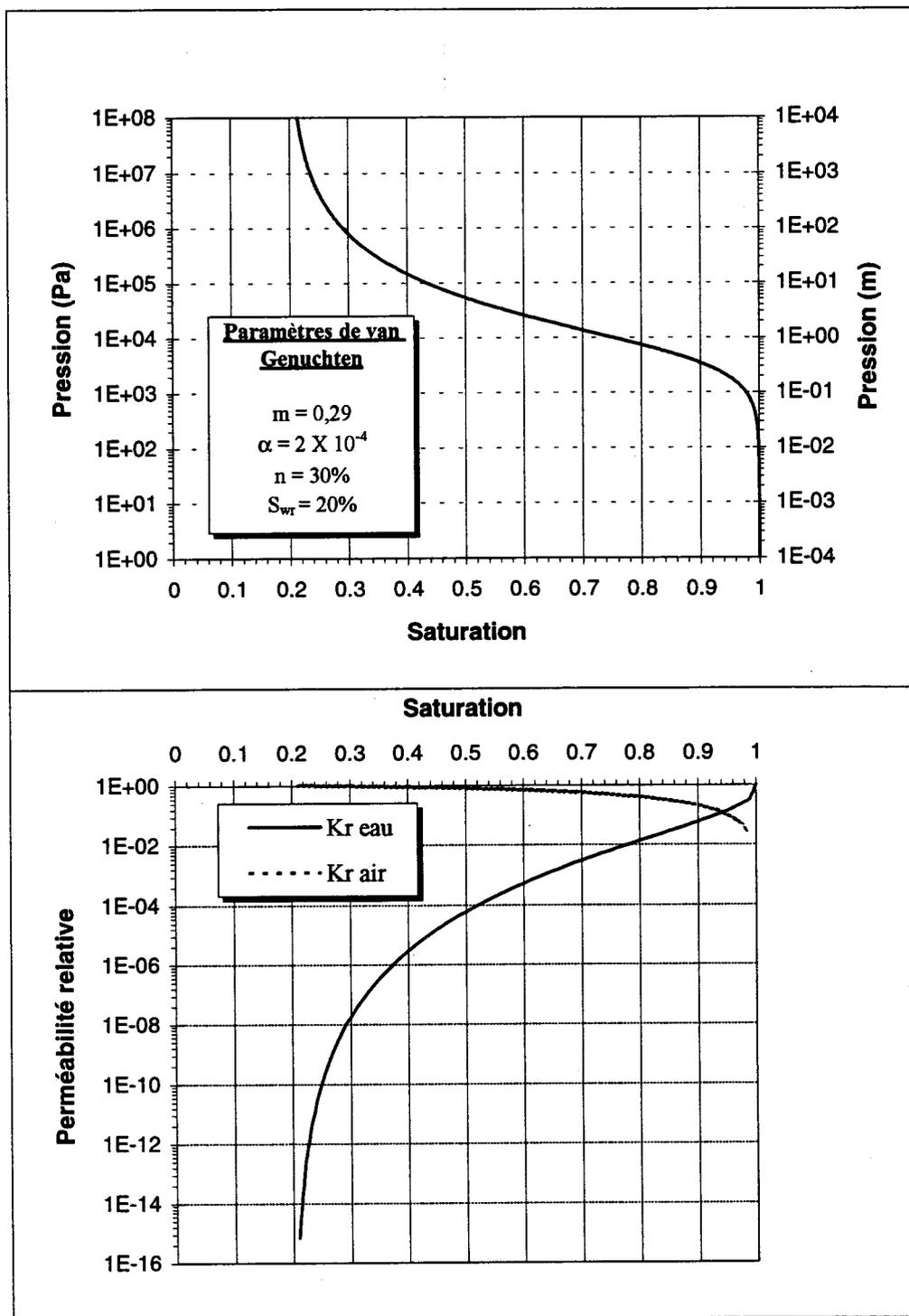
ÉPAISSEUR DES DÉPÔTS MEUBLES DANS LA RÉGION DU CTED

TABLEAU H.1: Épaisseur des dépôts meubles dans la région du CTED (GPR, 1990; RRN, 1993).

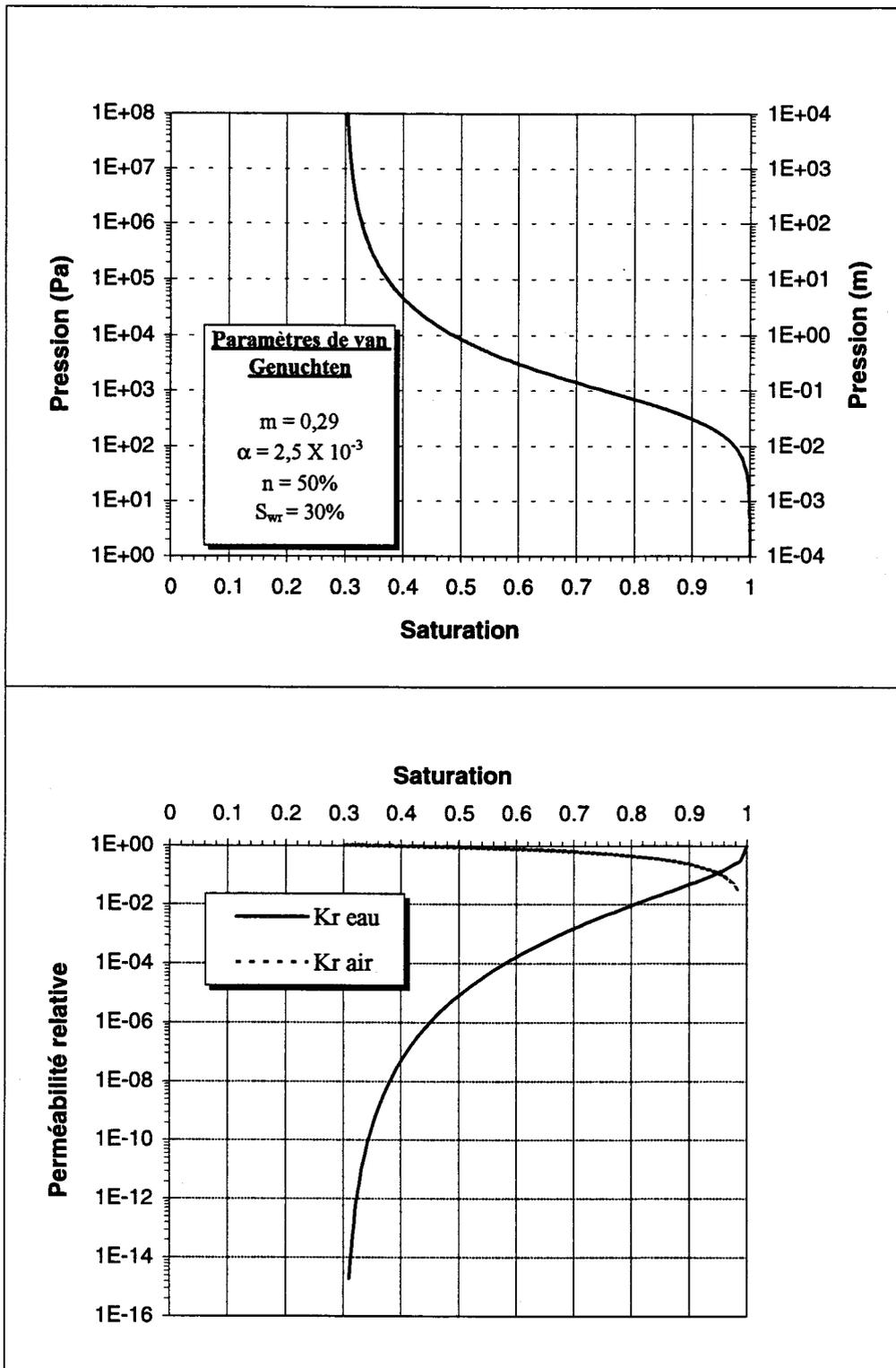
<i>PUTS</i>	<i>MTMX</i>	<i>MTMY</i>	<i>Topo.</i>	<i>Épais. DM</i>	<i>Élev. DM</i>
PS-01	294046.2	5047325.9	37.8	4.6	33.2
PS-02	293902.6	5047252.5	37.1	4.6	32.5
PS-03	293813.9	5047179.9	36.6	4.9	31.7
PS-04	293749.5	5097067.9	35.9	4.3	31.6
PS-07	294103.6	5046780.6	24.6	3.7	20.9
PS-08	294329.2	5046659.4	22.7	0.6	22.1
PS-11	294847.7	5046333.3	29.1	0.4	28.7
PS-18	295649.3	5046587.1	45.7	2.9	42.8
PS-20	295489.6	5046805.7	42.8	2.3	40.5
PS-21	295433.1	5046991.7	45.6	6.4	39.2
PS-23	295282.9	5047089.7	42.2	5.5	36.7
PS-24	295096.8	5047211.3	37.1	2.4	34.7
PS-25	294958.6	5047291.5	36.4	2.1	34.3
PS-26	294911.3	5047223.3	35.8	4.9	30.9
PS-27	294860.7	5047161.7	35.6	4.6	31.0
PS-28	294734.6	5047226.4	36.6	3.7	32.9
PS-29	294667.8	5047265.6	35.3	2.1	33.2
PS-30	294524.2	5047354.4	35.4	2.7	32.7
PS-31	294382.9	5047443.1	38.1	2.9	35.2
PS-32	294275.9	5047421.7	38.6	2.3	36.3
PS-33	294208.2	5047326.3	37.3	2.4	34.9
PC-01	297026.5	5046685.4	48.1	3.8	44.3
PC-02	294275.9	5047421.7	37.2	3.0	34.2
PC-03	293721.8	5047968.3	37.0	3.2	33.8
PC-04	294887.9	5047565.8	36.0	4.5	31.5
PC-05	292801.9	5046628.0	32.7	4.5	28.2
FG-1	295803.8	5046509.7	48.5	5.1	43.4
FG-2	295514.8	5046883.9	42.3	2.6	39.7
FG-3	295426.5	5046995.9	45.6	6.8	38.8
FG-5	295322.9	5047067.7	43.4	5.1	38.3
FG-7	295131.4	5047193.7	37.2	2.4	34.8
FG-9	294948.8	5047306.3	35.9	2.5	33.4
FG-10	294858.4	5047154.8	35.8	3.2	32.6
FG-11	294865.0	5047169.9	35.6	4.0	31.6
FG-12	294575.6	5047325.4	36.3	1.4	34.9
FG-13	294325.8	5047477.9	38.7	1.8	36.9
FG-14	294279.2	5047428.3	38.8	1.4	37.4
FG-15	294167.2	5047532.5	39.0	2.2	36.8
FG-17	293812.9	5047121.9	36.7	4.1	32.6
FG-19	293695.2	5046985.2	35.1	3.0	32.1
FG-20	294210.5	5046719.3	23.0	0.8	22.2
FG-21	294121.4	5046674.3	35.0	3.9	31.1
FG-22	294487.4	5046528.1	25.0	0.6	24.4
FG-24	294727.0	5046364.6	27.9	0.8	27.1
FG-25	294671.2	5046275.6	36.7	3.8	32.9
FG-26	295122.1	5046331.9	36.9	3.9	33.0
FG-27	294990.7	5046064.5	43.2	2.9	40.3
FG-28	295204.3	5046252.9	43.6	2.7	40.9
FG-29	295490.1	5046304.1	47.8	4.3	43.5
PZ-1	294159.6	5047527.7	39.0	3.0	36.0
PZ-2	294421.8	5047421.2	37.8	2.8	35.0
PZ-6	294985.8	5046181.5	34.0	1.5	32.5
FV-2	294812.7	5047180.4	36.0	3.1	32.9
FV-3	295116.9	5047199.4	37.1	2.6	34.5
FV-4	294741.4	5047225.4	36.2	3.1	33.1
FV-5	294679.3	5047261.8	35.4	1.9	33.5
FV-6	294777.5	5047202.3	36.1	3.2	32.9
FV-7	295395.9	5046976.5	46.2	6.3	39.9
FV-8	295929.5	5046510.3	48.9	3.7	45.2
MOYENNE:				3.22	
Écart-type:				1.45	

ANNEXE I

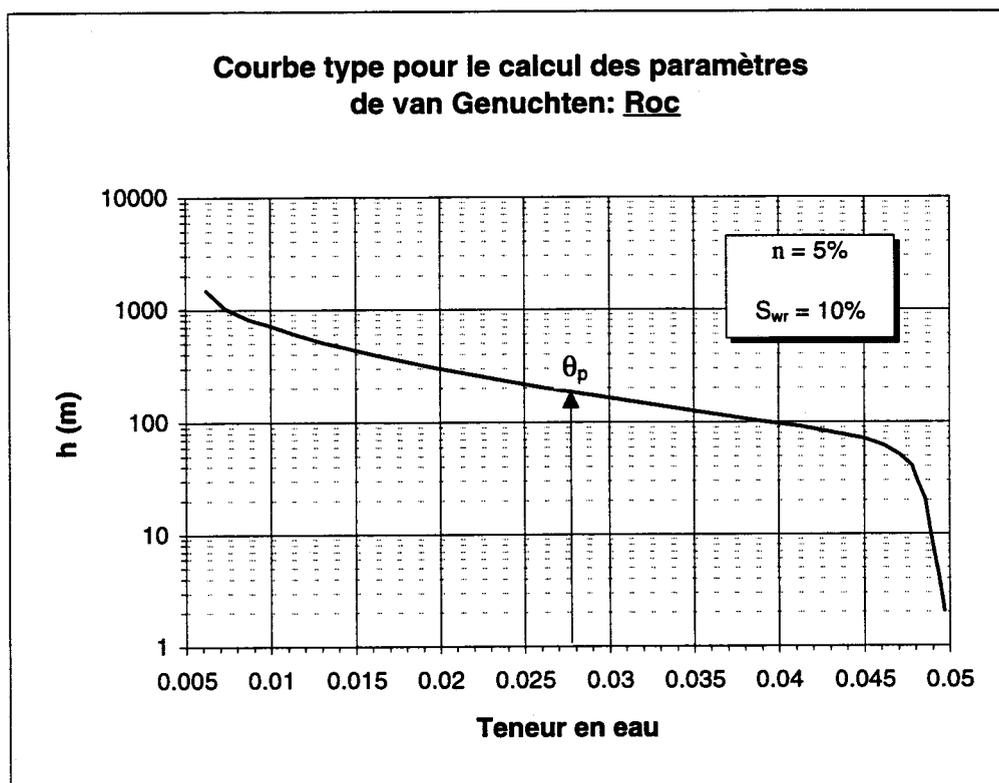
COURBES DE PRESSION CAPILLAIRE ET DE PERMÉABILITÉ RELATIVE
POUR LES DÉPÔTS MEUBLES, LES DÉCHETS ET LE ROC



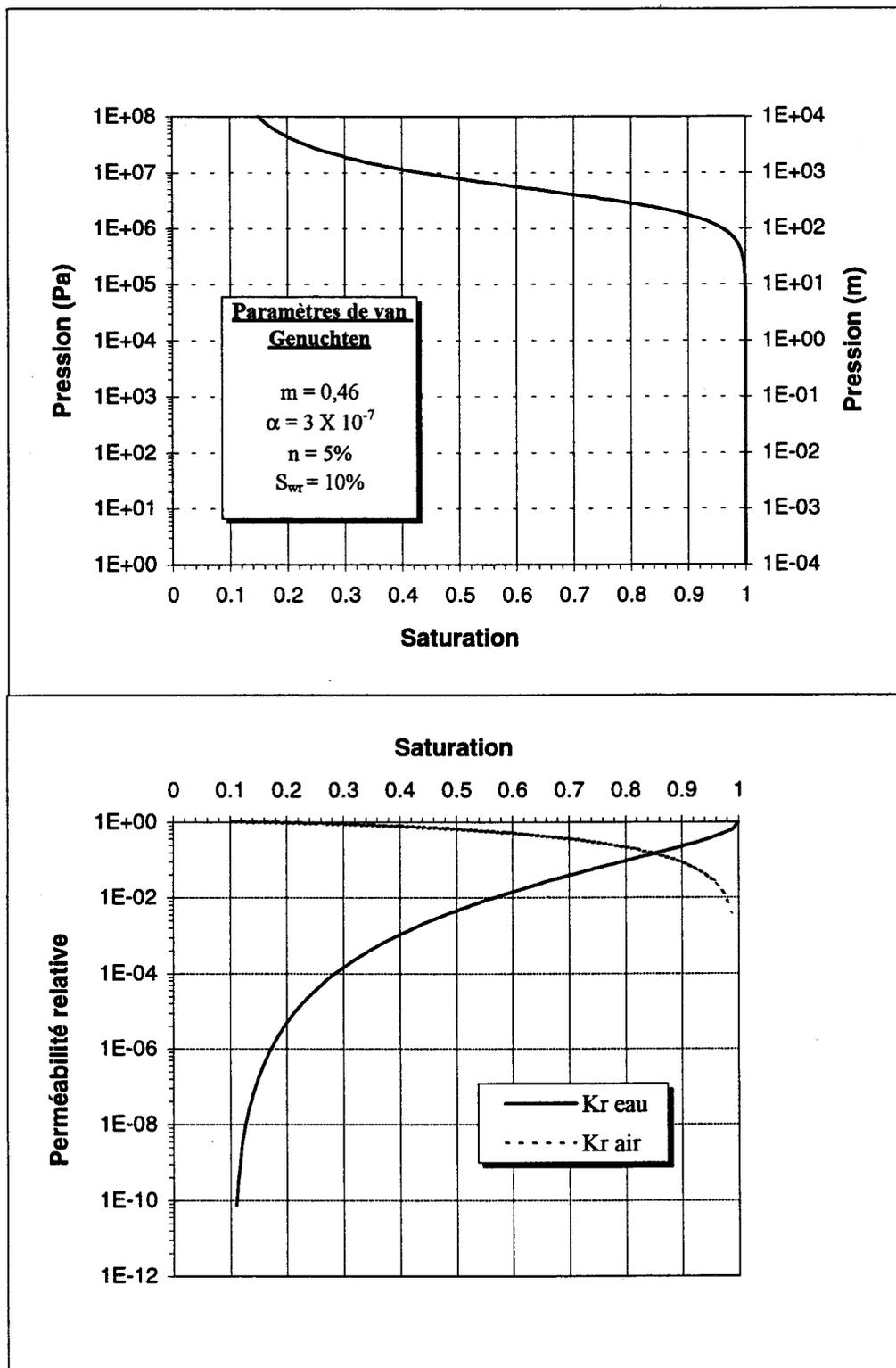
I.1: Courbes de pression capillaire et de perméabilité relative en fonction de la saturation pour les dépôts meubles.



I.2: Courbes de pression capillaire et de perméabilité relative en fonction de la saturation pour les déchets.



I.3: Courbes type de pression capillaire en fonction de la teneur en eau pour le roc.



I.4: Courbes de pression capillaire et de perméabilité relative en fonction de la saturation pour le roc.

ANNEXE J

EXEMPLE DE FICHIERS D'ENTRÉES DE MODFLOW, TOUGH2 ET FRAC3DVS

11	1(20G12.0)		0	Delta y		
3.50000E+02	3.50000E+02	3.50000E+02	3.50000E+02	3.50000E+02	3.50000E+02	3.50000E+02
3.50000E+02	3.50000E+02	3.50000E+02	3.50000E+02	3.50000E+02	3.50000E+02	3.50000E+02
3.50000E+02	3.50000E+02	3.50000E+02	3.50000E+02	3.50000E+02	3.50000E+02	3.50000E+02
3.50000E+02	3.50000E+02					
.						
.						
11	1(20G12.0)		1	hydraulic cond.	of layer 1	
5.73950E+02	5.68020E+02	5.54375E+02	5.39414E+02	5.35030E+02	5.44558E+02	5.44558E+02
5.60646E+02	5.77714E+02	5.81066E+02	5.66498E+02	5.46704E+02	5.46195E+02	5.46195E+02
5.78462E+02	6.20305E+02	6.64466E+02	6.88698E+02	6.79801E+02	6.33584E+02	6.33584E+02
5.79147E+02	5.37157E+02					
5.11295E+02	4.93920E+02	4.79332E+02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	4.86441E+02	5.05072E+02	5.27986E+02	5.55786E+02	5.83179E+02	5.83179E+02
6.06009E+02	6.20202E+02	6.26871E+02	6.25647E+02	6.22375E+02	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	0.00000E+00					
5.65000E+02	5.60000E+02	5.56236E+02	5.35352E+02	5.08649E+02	4.79755E+02	4.79755E+02
4.61885E+02	4.58951E+02	4.60059E+02	4.61887E+02	4.65279E+02	4.67974E+02	4.67974E+02
4.64471E+02	4.51109E+02	4.30409E+02	4.06801E+02	3.84146E+02	3.72650E+02	3.72650E+02
3.73054E+02	3.89913E+02					
.						
.						
11	1(20G12.0)		1	layer bottom,	layer : 1	
0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
1.32320E+02	1.34779E+02	1.36714E+02	1.37470E+02	1.37888E+02	1.38454E+02	1.38454E+02
1.39335E+02	1.40184E+02	1.41067E+02	1.41426E+02	1.41990E+02	1.42080E+02	1.42080E+02
1.41698E+02	1.40732E+02					
1.40104E+02	1.39331E+02	1.38930E+02	1.38544E+02	1.39023E+02	1.40775E+02	1.40775E+02
1.43324E+02	1.46940E+02	1.50216E+02	1.58504E+02	1.69267E+02	1.83161E+02	1.83161E+02
1.97005E+02	2.12329E+02	2.24870E+02	2.34992E+02	2.47551E+02	2.59837E+02	2.59837E+02
2.52184E+02	2.29251E+02					
1.86617E+02	1.78128E+02	1.63539E+02	1.55481E+02	1.48566E+02	1.44736E+02	1.44736E+02
1.39406E+02	1.35350E+02	1.33083E+02	1.31063E+02	1.29646E+02	1.29107E+02	1.29107E+02
1.32269E+02	1.24966E+02	1.19216E+02	1.14334E+02	1.11175E+02	1.05467E+02	1.05467E+02
1.01033E+02	9.71756E+01					
.						
.						
11	1(20G12.0)		1	vertical leakance:	layer 1	
1.10445E+00	1.06988E+00	9.57524E-01	8.68674E-01	7.83675E-01	7.70698E-01	7.70698E-01
7.94834E-01	7.89672E-01	7.45433E-01	6.90980E-01	6.72854E-01	7.09060E-01	7.09060E-01
6.87900E-01	7.15072E-01	7.40162E-01	7.63474E-01	7.98037E-01	8.40183E-01	8.40183E-01
8.93712E-01	9.42806E-01					
1.00353E+00	1.03603E+00	1.04947E+00	1.06385E+00	1.05479E+00	1.01107E+00	1.01107E+00
9.63324E-01	9.32356E-01	9.03268E-01	8.87078E-01	8.81192E-01	9.19988E-01	9.19988E-01
9.94717E-01	1.13913E+00	1.33708E+00	1.61179E+00	1.90328E+00	2.08539E+00	2.08539E+00
2.17465E+00	2.25153E+00					
2.25676E+00	2.16242E+00	1.90457E+00	1.53761E+00	1.28727E+00	1.18857E+00	1.18857E+00
1.14798E+00	1.20401E+00	1.25975E+00	1.30867E+00	1.31428E+00	1.29613E+00	1.29613E+00
1.22367E+00	1.18246E+00	1.12622E+00	1.05477E+00	1.02647E+00	1.15720E+00	1.15720E+00
1.31180E+00	1.42778E+00					
.						
.						
11	1(20G12.0)		1	hydraulic cond.	of layer 2	
0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02
5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02
5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02
5.40000E+02	5.40000E+02					
5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02
5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02
5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02
1.00000E+02	1.00000E+02					

5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02
5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02
5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	5.40000E+02	1.60000E+03	1.60000E+03
1.60000E+03	1.60000E+03				

	11	1(20G12.0)		1	layer bottom, layer : 2
1.14892E+02	1.13636E+02	1.12692E+02	1.11751E+02	1.10780E+02	1.10105E+02
1.09546E+02	1.09118E+02	1.08714E+02	1.08551E+02	1.08479E+02	1.08355E+02
1.07998E+02	1.07666E+02	1.07069E+02	1.06380E+02	1.06285E+02	1.06962E+02
1.08160E+02	1.09491E+02				
1.10494E+02	1.10858E+02	1.10893E+02	1.10907E+02	1.10779E+02	1.09220E+02
1.07713E+02	1.06391E+02	1.05170E+02	1.04432E+02	1.03895E+02	1.03441E+02
1.03212E+02	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	0.00000E+00				
1.02743E+02	1.06087E+02	1.09745E+02	1.13878E+02	1.19375E+02	1.17979E+02
1.18281E+02	1.19675E+02	1.20946E+02	1.20288E+02	1.19312E+02	1.18738E+02
1.18651E+02	1.18581E+02	1.18607E+02	1.18358E+02	1.18237E+02	1.18236E+02
1.18238E+02	1.17997E+02				

	11	1(20G12.0)		1	vertical leakance: layer 2
3.78947E-01	3.78951E-01	3.78950E-01	3.78951E-01	3.78947E-01	3.78947E-01
3.78951E-01	3.78947E-01	3.78947E-01	3.78947E-01	3.78944E-01	3.78950E-01
3.78950E-01	3.78949E-01	3.78949E-01	3.78949E-01	3.78945E-01	3.78945E-01
3.78949E-01	3.78947E-01				
3.78950E-01	3.78944E-01	3.78948E-01	3.78947E-01	3.78947E-01	3.78948E-01
3.78945E-01	3.78945E-01	3.78949E-01	3.78949E-01	3.76236E-01	3.76240E-01
3.76240E-01	3.76237E-01	3.76235E-01	3.76239E-01	3.76238E-01	3.76235E-01
3.76239E-01	3.76236E-01				
3.76238E-01	3.76235E-01	3.76240E-01	3.76240E-01	3.76238E-01	3.76239E-01
3.76237E-01	3.76238E-01	3.76239E-01	3.76239E-01	3.76236E-01	3.76238E-01
3.78950E-01	3.78950E-01	3.78947E-01	3.78949E-01	3.78947E-01	3.78948E-01

	11	1(20G12.0)		1	layer top, layer : 2
1.22604E+02	1.22746E+02	1.23038E+02	1.23514E+02	1.23688E+02	1.23854E+02
1.23870E+02	1.23703E+02	1.23547E+02	1.24004E+02	1.24797E+02	1.25824E+02
1.27190E+02	1.28028E+02	1.29089E+02	1.30252E+02	1.31332E+02	1.31526E+02
1.31682E+02	1.31741E+02				
1.31810E+02	1.31576E+02	1.31491E+02	1.29790E+02	1.28496E+02	1.27602E+02
1.26981E+02	1.26505E+02	1.26452E+02	1.27140E+02	1.28083E+02	1.28918E+02
1.29329E+02	1.30965E+02	1.31772E+02	1.31890E+02	1.31942E+02	1.33066E+02
1.34383E+02	1.35322E+02				
1.35667E+02	1.37297E+02	1.38066E+02	1.37923E+02	1.36897E+02	1.40389E+02
1.43066E+02	1.45238E+02	1.47005E+02	1.46438E+02	1.45768E+02	1.44948E+02
1.44164E+02	1.43193E+02	1.42443E+02	1.41400E+02	1.40283E+02	1.38682E+02
1.37099E+02	1.35816E+02				

	11	1(20G12.0)		1	hydraulic cond. of layer 3
1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01
1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01
1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01
1.00000E+01	1.00000E+01				
1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01
1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01
1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01
1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01
1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01	1.00000E+01
0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00	0.00000E+00
0.00000E+00	0.00000E+00				

```

      11          1(20G12.0)          1 layer bottom, layer : 3
5.85239E+01  5.58110E+01  5.33984E+01  5.16565E+01  4.96450E+01  4.71413E+01
4.36775E+01  3.97866E+01  3.54004E+01  3.06203E+01  2.50637E+01  2.01350E+01
1.75620E+01  1.62786E+01  1.53353E+01  1.45148E+01  1.38740E+01  1.36074E+01
1.35052E+01  1.34683E+01
6.36889E+01  6.44988E+01  6.57246E+01  6.71695E+01  6.80840E+01  6.75357E+01
6.62242E+01  6.48686E+01  6.37568E+01  6.26676E+01  6.20779E+01  6.18518E+01
6.19505E+01  6.19321E+01  6.18652E+01  6.14287E+01  6.14877E+01  6.21854E+01
6.39853E+01  6.70945E+01
7.20002E+01  8.12113E+01  7.83148E+01  7.68044E+01  7.63030E+01  7.75229E+01
7.90156E+01  8.17142E+01  7.32052E+01  6.89241E+01  6.70795E+01  6.62177E+01
6.62868E+01  6.75464E+01  6.94666E+01  7.16749E+01  7.01436E+01  6.87329E+01
6.75854E+01  6.65600E+01

```

```

      11          1(20G12.0)          1 layer top, layer : 3
1.13938E+02  1.13039E+02  1.12097E+02  1.11434E+02  1.10844E+02  1.10316E+02
1.09865E+02  1.09512E+02  1.09265E+02  1.09333E+02  1.09545E+02  1.09986E+02
1.10754E+02  1.12325E+02  1.11564E+02  1.11395E+02  1.13095E+02  1.11762E+02
1.12124E+02  1.12921E+02
1.13289E+02  1.12935E+02  1.12256E+02  1.11125E+02  1.09499E+02  1.09100E+02
1.08439E+02  1.07796E+02  1.07454E+02  1.07529E+02  1.08017E+02  1.08782E+02
1.09561E+02  1.09939E+02  1.10410E+02  1.11171E+02  1.12052E+02  1.13050E+02
1.14495E+02  1.17134E+02
1.22038E+02  1.19899E+02  1.19930E+02  1.20857E+02  1.21999E+02  1.22717E+02
1.23095E+02  1.23001E+02  1.22282E+02  1.22936E+02  1.22845E+02  1.22056E+02
1.21344E+02  1.21284E+02  1.21288E+02  1.21334E+02  1.21020E+02  1.20834E+02
1.20648E+02  1.20432E+02

```

FICHER RCH.DAT [423 lignes]

```

3          50          1
      1          0
      18          1(20G12.0)          1 Recharge
1.53174E-01  1.56889E-01  1.58942E-01  1.55618E-01  1.49753E-01  1.58159E-01
1.60896E-01  1.62363E-01  1.64709E-01  1.64220E-01  1.64122E-01  1.84454E-01
2.04200E-01  2.05861E-01  2.06644E-01  2.06741E-01  2.06546E-01  2.06057E-01
2.05568E-01  2.04884E-01
2.04102E-01  2.03711E-01  2.03222E-01  0.00000E+00  0.00000E+00  0.00000E+00
0.00000E+00  1.99703E-01  1.99312E-01  1.98433E-01  1.96868E-01  1.96771E-01
1.95402E-01  1.96868E-01  1.97748E-01  1.98041E-01  1.98335E-01  0.00000E+00
0.00000E+00  0.00000E+00
1.75950E-01  1.76732E-01  1.76830E-01  1.76634E-01  1.76439E-01  1.76439E-01
1.76439E-01  1.76439E-01  1.76634E-01  1.76928E-01  1.77318E-01  1.77710E-01
1.78003E-01  1.78492E-01  1.78980E-01  1.79274E-01  1.79567E-01  1.79664E-01
1.79567E-01  1.78785E-01
1.77318E-01  1.74386E-01  1.71356E-01  1.67739E-01  1.65002E-01  1.63340E-01
1.61776E-01  1.60310E-01  1.59137E-01  1.58551E-01  1.59039E-01  1.59528E-01
1.59724E-01  1.59919E-01  1.60701E-01  1.61581E-01  1.62167E-01  1.60017E-01
1.57280E-01  1.54152E-01

```

FICHER OC.DAT [3 lignes]

4	5	51	52				
	0	1	1	1	PERIOD: 1	TIME STEP: 1	
	0	0	1	1			

FICHER PCG2.DAT [2 lignes]

100	10	1					
1.00E-03	1.00E-02	1.00E+00	1	1	0	0	

EXEMPLE DE FICHER D'ENTREE POUR TOUGH2 [3600 cellules – 13 915 lignes]

MODELE EN COUPE: Modele 3D CTED et FRANCON: verifier proprietes capillaires

ROCKS	1	2	3	4	5	6	7	8
DEPOT	2	2680.0	0.30	1.5E-12	1.5E-12	3.0E-13	3.0	830
	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0			
7		0.29	0.20	1.0				
7		0.29	0.20	0.0002	1.0E7	1.0		
CALCA	2	2710.0	0.05	1.5E-14	1.5E-14	5.0E-15	3.0	830
	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0			
7		0.46	0.10	1.0				
7		0.46	0.10	3.0E-7	1.0E7	1.0		
WASTE	2	560.0	0.50	6.0E-13	6.0E-13	6.0E-13	3.0	830
	0.0	0.0	3.0	0.0	0.0			
7		0.29	0.30	1.0				
7		0.29	0.30	2.5E-3	1.0E7	1.0		

PARAM	1	2	3	4	5	6	7	8
8 22000	2000100000100000000270003000				2.13E-5	1.8	1.0	
	0.0	3.1536E+8	1.0			9.81	3.0	1.0
	1.0E-5	1.0	0.1	1.0	1.0	1.0E-8		
		101325.		10.0100		5.		

MULTI	1	2	3	4	5	6	7	8
2	2	2	6					

ELEME	1	2	3	4	5	6	7	8
A01 1	1	.1200E+06	.0000E+00		.1000E+03	.1000E+03	.1285E+03	
A01 2	1	.1200E+06	.0000E+00		.3000E+03	.1000E+03	.1285E+03	
A01 3	1	.1200E+06	.0000E+00		.5000E+03	.1000E+03	.1285E+03	
A01 4	1	.1200E+06	.0000E+00		.7000E+03	.1000E+03	.1285E+03	
A01 5	1	.1200E+06	.0000E+00		.9000E+03	.1000E+03	.1285E+03	
A01 6	1	.1200E+06	.0000E+00		.1100E+04	.1000E+03	.1285E+03	
A01 7	1	.1200E+06	.0000E+00		.1300E+04	.1000E+03	.1285E+03	
A01 8	1	.1200E+06	.0000E+00		.1500E+04	.1000E+03	.1285E+03	
A01 9	1	.1200E+06	.0000E+00		.1700E+04	.1000E+03	.1285E+03	
A0110	1	.1200E+06	.0000E+00		.1900E+04	.1000E+03	.1285E+03	

A3021	1	.1200E+06	.0000E+00		.4100E+04	.5900E+04	.1285E+03	
A3022	1	.1200E+06	.0000E+00		.4300E+04	.5900E+04	.1285E+03	
A3023	1	.1200E+06	.0000E+00		.4500E+04	.5900E+04	.1285E+03	
A3024	1	.1200E+06	.0000E+00		.4700E+04	.5900E+04	.1285E+03	
A3025	1	.1200E+06	.0000E+00		.4900E+04	.5900E+04	.1285E+03	
A3026	1	.1200E+06	.0000E+00		.5100E+04	.5900E+04	.1285E+03	
A3027	1	.1200E+06	.0000E+00		.5300E+04	.5900E+04	.1285E+03	
A3028	1	.1200E+06	.0000E+00		.5500E+04	.5900E+04	.1285E+03	
A3029	1	.1200E+06	.0000E+00		.5700E+04	.5900E+04	.1285E+03	
A3030	1	.1200E+06	.0000E+00		.5900E+04	.5900E+04	.1285E+03	
B01 1	2	.1080E+07	.0000E+00		.1000E+03	.1000E+03	.1135E+03	
B01 2	2	.1080E+07	.0000E+00		.3000E+03	.1000E+03	.1135E+03	
B01 3	2	.1080E+07	.0000E+00		.5000E+03	.1000E+03	.1135E+03	
B01 4	2	.1080E+07	.0000E+00		.7000E+03	.1000E+03	.1135E+03	
B01 5	2	.1080E+07	.0000E+00		.9000E+03	.1000E+03	.1135E+03	
B01 6	2	.1080E+07	.0000E+00		.1100E+04	.1000E+03	.1135E+03	
B01 7	2	.1080E+07	.0000E+00		.1300E+04	.1000E+03	.1135E+03	
B01 8	2	.1080E+07	.0000E+00		.1500E+04	.1000E+03	.1135E+03	
B01 9	2	.1080E+07	.0000E+00		.1700E+04	.1000E+03	.1135E+03	
B0110	2	.1080E+07	.0000E+00		.1900E+04	.1000E+03	.1135E+03	

B3020	2	.1080E+07	.0000E+00		.3900E+04	.5900E+04	.1135E+03	
B3021	2	.1080E+07	.0000E+00		.4100E+04	.5900E+04	.1135E+03	
B3022	2	.1080E+07	.0000E+00		.4300E+04	.5900E+04	.1135E+03	
B3023	2	.1080E+07	.0000E+00		.4500E+04	.5900E+04	.1135E+03	
B3024	2	.1080E+07	.0000E+00		.4700E+04	.5900E+04	.1135E+03	
B3025	2	.1080E+07	.0000E+00		.4900E+04	.5900E+04	.1135E+03	
B3026	2	.1080E+07	.0000E+00		.5100E+04	.5900E+04	.1135E+03	
B3027	2	.1080E+07	.0000E+00		.5300E+04	.5900E+04	.1135E+03	
B3028	2	.1080E+07	.0000E+00		.5500E+04	.5900E+04	.1135E+03	
B3029	2	.1080E+07	.0000E+00		.5700E+04	.5900E+04	.1135E+03	
B3030	2	.1080E+07	.0000E+00		.5900E+04	.5900E+04	.1135E+03	

A2010R2010 5 1 1 0 MASS 1.26E-01 21118.7
 A2110R2110 5 1 1 0 MASS 1.26E-01 21118.7

INCON---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8
 A0101 29 1
 1.1604e5 1.614553094E-5 5.
 A0201 29 1
 1.1604e5 1.614553094E-5 5.
 A0301 29 1
 1.1604e5 1.614553094E-5 5.
 A0401 29 1
 1.1604e5 1.614553094E-5 5.
 A0501 29 1
 1.1604e5 1.614553094E-5 5.
 .
 .
 B0101 29 1
 2.6319e5 1.614553094E-5 5.
 B0201 29 1
 2.6319e5 1.614553094E-5 5.
 B0301 29 1
 2.6319e5 1.614553094E-5 5.
 B0401 29 1
 2.6319e5 1.614553094E-5 5.
 B0501 29 1
 2.6319e5 1.614553094E-5 5.
 .
 .
 C0101 29 1
 6.4088e5 1.614553094E-5 5.
 C0201 29 1
 6.4088e5 1.614553094E-5 5.
 C0301 29 1
 6.4088e5 1.614553094E-5 5.
 C0401 29 1
 6.4088e5 1.614553094E-5 5.
 C0501 29 1
 6.4088e5 1.614553094E-5 5.
 .
 .
 D0101 29 1
 1.1314e6 1.614553094E-5 5.
 D0201 29 1
 1.1314e6 1.614553094E-5 5.
 D0301 29 1
 1.1314e6 1.614553094E-5 5.
 D0401 29 1
 1.1314e6 1.614553094E-5 5.
 D0501 29 1
 1.1314e6 1.614553094E-5 5.
 .
 .
 CL101 29 1
 1.1604e5 1.614553094E-5 5.
 CL201 29 1
 2.6319e5 1.614553094E-5 5.
 CL301 29 1
 6.4088e5 1.614553094E-5 5.
 CL401 29 1
 1.1314e6 1.614553094E-5 5.
 F1318 8.3708e5 1.614553094E-5 5.
 F1319 8.3708e5 1.614553094E-5 5.
 F1320 8.3708e5 1.614553094E-5 5.
 F1418 8.3708e5 1.614553094E-5 5.
 F1419 8.3708e5 1.614553094E-5 5.

F1420	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F1518	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F1519	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F1520	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F1618	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F1619	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F1620	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F1718	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F1719	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F1720	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F1818	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F1819	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F1820	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F1918	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F1919	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F1920	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F2018	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F2019	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F2020	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F2118	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F2119	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F2120	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F2218	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F2219	8.3708e5	1.614553094E-5	5.
F2220	8.3708e5	1.614553094E-5	5.

START
ENDCY

---1---*---2---*---3---*---4---*---5---*---6---*---7---*---8

EXEMPLE DE FICHER D'ENTRÉE POUR FRAC3DVS [118800 cellules – 230 lignes]

```

*** Group 1:Title ***
CTED - grid 6000 m x 6000 m x 130 m *** CAS DE BASE ***
*** Group 2:Simulation control param ***
.false. ; true if random grid generation
.true. ; true if finite difference for blocks or prisms
.true. ; true if fluid mass balance is computed
.true. ; true if medium saturated
.true. ; true if problem is defined with hydraulic head
.true. ; true if hydraulic head is outputted
.false. ; true if transport is simulated
.true. ; true if simulation is performed
.false. ; true if the y-axis is in the vertical direction
.true. ; true if 3D block elements are used
.false.
*** Group 3:Output control parameters ***
0,1,0,1,0,1,1, ; KPM SH, KP HEAD, KP CONC, KP VEL, KP SAT, KW RITH, KP MASB
.false. ; true if the above also echoes to unit 66 (ASCII)
*** Group 4:Grid data ***
.true. ; true if generate grid from coordinates
101, ; NX
100, ; NY
13, ; NZ
.true. ; true if the spacing is variable
0.0, 100.0, 200.0, 300.0, 400.0, 500.0, 600.0, 700.0, 800.0, 900.0,
1000.0, 1100.0, 1200.0, 1300.0, 1400.0, 1500.0, 1575.0, 1650.0, 1700.0,
1750.0, 1800.0, 1850.0, 1900.0, 1950.0, 2000.0, 2050.0, 2100.0, 2150.0,
2200.0, 2235.0, 2265.0, 2290.0, 2310.0, 2325.0, 2335.0, 2342.0, 2347.0,
2350.0, 2353.0, 2358.0, 2365.0, 2375.0, 2390.0, 2410.0, 2435.0, 2465.0,
2500.0, 2550.0, 2600.0, 2650.0, 2700.0, 2750.0, 2800.0, 2850.0, 2900.0,
2950.0, 3000.0, 3050.0, 3100.0, 3150.0, 3200.0, 3250.0, 3300.0, 3350.0,
3400.0, 3450.0, 3500.0, 3550.0, 3600.0, 3650.0, 3700.0, 3750.0, 3800.0,
3850.0, 3900.0, 3950.0, 4000.0, 4050.0, 4100.0, 4150.0, 4200.0, 4250.0,
4300.0, 4350.0, 4425.0, 4500.0, 4600.0, 4700.0, 4800.0, 4900.0, 5000.0,
5100.0, 5200.0, 5300.0, 5400.0, 5500.0, 5600.0, 5700.0, 5800.0, 5900.0,
6000.0,
0.0, 100.0, 200.0, 300.0, 400.0, 500.0, 600.0, 700.0, 800.0, 900.0,
1000.0, 1100.0, 1200.0, 1300.0, 1400.0, 1500.0, 1600.0, 1700.0, 1800.0,
1900.0, 2000.0, 2075.0, 2150.0, 2200.0, 2250.0, 2300.0, 2350.0, 2400.0,
2450.0, 2500.0, 2550.0, 2600.0, 2650.0, 2700.0, 2750.0, 2800.0, 2850.0,
2900.0, 2950.0, 3000.0, 3050.0, 3100.0, 3150.0, 3200.0, 3250.0, 3300.0,
3350.0, 3400.0, 3450.0, 3500.0, 3550.0, 3600.0, 3650.0, 3700.0, 3750.0,
3785.0, 3815.0, 3840.0, 3860.0, 3875.0, 3885.0, 3892.0, 3897.0, 3900.0,
3903.0, 3908.0, 3915.0, 3925.0, 3940.0, 3960.0, 3985.0, 4015.0, 4050.0,
4100.0, 4150.0, 4200.0, 4250.0, 4300.0, 4350.0, 4400.0, 4450.0, 4500.0,
4550.0, 4600.0, 4650.0, 4700.0, 4750.0, 4825.0, 4900.0, 5000.0, 5100.0,
5200.0, 5300.0, 5400.0, 5500.0, 5600.0, 5700.0, 5800.0, 5900.0, 6000.0,
0.0, 20.0, 35.0, 50.0, 65.0, 75.0, 85.0, 95.0, 105.0, 115.0, 122.0,
127.0, 130.0,
*** Group 5:Physical parameters ***
.false. ; true if random hydraulic conductivities are inputted
.true. ; true if use coordinates to define property zones
16, ; number of zones
0.0, 6000.0, 0.0, 6000.0, 127.0, 130.0, DEPOT MEUBLES
1.0d-5, 1.0d-5, 2.0d-6, 0.0, 0.3, KX, KY, KZ, SS, POR
0.0, 6000.0, 0.0, 6000.0, 115.0, 127.0, ROC FRACTURE 1
8.0d-6, 8.0d-6, 1.6d-6, 0.0, 0.05, KX, KY, KZ, SS, POR
0.0, 6000.0, 0.0, 6000.0, 105.0, 115.0, ROC FRACTURE 2

```

```

6.0d-6, 6.0d-6, 1.2d-6, 0.0, 0.05, KX,KY,KZ,SS,POR
0.0, 6000.0, 0.0, 6000.0, 0.0, 105.0, ROC
1.0d-8, 1.0d-8, 2.0d-9, 0.0, 0.05, KX,KY,KZ,SS,POR
2000.0, 2350.0, 2650.0, 4300.0, 50.0, 130.0, DECHETS
8.0d-5, 8.0d-5, 8.0d-5, 0.0, 0.5, KX,KY,KZ,SS,POR
2350.0, 2700.0, 2500.0, 4150.0, 50.0, 130.0, DECHETS
8.0d-5, 8.0d-5, 8.0d-5, 0.0, 0.5, KX,KY,KZ,SS,POR
2700.0, 2900.0, 2750.0, 3450.0, 50.0, 130.0, DECHETS
8.0d-5, 8.0d-5, 8.0d-5, 0.0, 0.5, KX,KY,KZ,SS,POR
2000.0, 2700.0, 2750.0, 3000.0, 50.0, 85.0, ROC sous CTED
6.0d-6, 6.0d-6, 1.2d-6, 0.0, 0.05, KX,KY,KZ,SS,POR
2350.0, 2700.0, 3960.0, 4150.0, 50.0, 85.0, ROC sous CTED
6.0d-6, 6.0d-6, 1.2d-6, 0.0, 0.05, KX,KY,KZ,SS,POR
2350.0, 2700.0, 2500.0, 2750.0, 50.0, 75.0, ROC sous CTED
6.0d-6, 6.0d-6, 1.2d-6, 0.0, 0.05, KX,KY,KZ,SS,POR
2000.0, 2350.0, 2650.0, 2750.0, 50.0, 75.0, ROC sous CTED
6.0d-6, 6.0d-6, 1.2d-6, 0.0, 0.05, KX,KY,KZ,SS,POR
2000.0, 2265.0, 3300.0, 3960.0, 50.0, 75.0, ROC sous CTED
6.0d-6, 6.0d-6, 1.2d-6, 0.0, 0.05, KX,KY,KZ,SS,POR
2000.0, 2350.0, 3960.0, 4300.0, 50.0, 75.0, ROC sous CTED
6.0d-6, 6.0d-6, 1.2d-6, 0.0, 0.05, KX,KY,KZ,SS,POR
2000.0, 2550.0, 3000.0, 3300.0, 50.0, 65.0, ROC sous CTED
6.0d-6, 6.0d-6, 1.2d-6, 0.0, 0.05, KX,KY,KZ,SS,POR
2265.0, 2550.0, 3000.0, 3650.0, 50.0, 65.0, ROC sous CTED
6.0d-6, 6.0d-6, 1.2d-6, 0.0, 0.05, KX,KY,KZ,SS,POR
2550.0, 2700.0, 3550.0, 3650.0, 50.0, 65.0, ROC sous CTED
6.0d-6, 6.0d-6, 1.2d-6, 0.0, 0.05, KX,KY,KZ,SS,POR
*** Group 6: initial conditions ***
.true. ; krestar
*** Group 7:Output times ***
.true. ; true if flow is steady-state
*** Group 8:Solver data ***
.false. ; true GMRES, false CGSTAB
1.0d-10,0.0d0, 0.0d0 ; solver tolerance, residual tolerance
1, ; true if solver information is outputted
.false. ; true if 2nd-order factorization
*** Group 9:Newton-Raphson parameters, only if variably-saturated***
*** Group 10:Dirichlet nodes ***
.true. ; true if dirichlet nodes
.true. ; true if use coordinates to define property zones
15, ; number of zones
0.0, 6000.0, 6000.0, 6000.0, 0.0, 130.0, CL h=20
1, ; number of time interval for 1st-type b.c.
.false. ; function for heads
110.0, 0.0, 10000.0 ; prescribed head, time-on, time-off
3550.0, 3550.0, 2500.0, 3700.0, 50.0, 130.0, FRANCON
1, ; number of time interval for 1st-type b.c.
.false. ; function for heads
105.0, 0.0, 10000.0 ; prescribed head, time-on, time-off
3550.0, 3700.0, 3700.0, 3700.0, 50.0, 130.0, FRANCON
1, ; number of time interval for 1st-type b.c.
.false. ; function for heads
105.0, 0.0, 10000.0 ; prescribed head, time-on, time-off
3700.0, 3700.0, 3700.0, 4500.0, 50.0, 130.0, FRANCON
1, ; number of time interval for 1st-type b.c.
.false. ; function for heads
105.0, 0.0, 10000.0 ; prescribed head, time-on, time-off
3700.0, 3900.0, 4500.0, 4500.0, 50.0, 130.0, FRANCON
1, ; number of time interval for 1st-type b.c.
.false. ; function for heads

```

```

105.0, 0.0, 10000.0      ; prescribed head, time-on, time-off
3900.0, 3900.0, 4400.0, 4500.0, 50.0, 130.0,
1,                        ; number of time interval for 1st-type b.c.
.false.                  ; function for heads
105.0, 0.0, 10000.0      ; prescribed head, time-on, time-off
3900.0, 4050.0, 4400.0, 4400.0, 50.0, 130.0,
1,                        ; number of time interval for 1st-type b.c.
.false.                  ; function for heads
105.0, 0.0, 10000.0      ; prescribed head, time-on, time-off
4050.0, 4050.0, 3350.0, 4400.0, 50.0, 130.0,
1,                        ; number of time interval for 1st-type b.c.
.false.                  ; function for heads
105.0, 0.0, 10000.0      ; prescribed head, time-on, time-off
3950.0, 4050.0, 3350.0, 3350.0, 50.0, 130.0,
1,                        ; number of time interval for 1st-type b.c.
.false.                  ; function for heads
105.0, 0.0, 10000.0      ; prescribed head, time-on, time-off
3950.0, 3950.0, 2850.0, 3350.0, 50.0, 130.0,
1,                        ; number of time interval for 1st-type b.c.
.false.                  ; function for heads
105.0, 0.0, 10000.0      ; prescribed head, time-on, time-off
3850.0, 3950.0, 2850.0, 2850.0, 50.0, 130.0,
1,                        ; number of time interval for 1st-type b.c.
.false.                  ; function for heads
105.0, 0.0, 10000.0      ; prescribed head, time-on, time-off
3850.0, 3850.0, 2700.0, 2850.0, 50.0, 130.0,
1,                        ; number of time interval for 1st-type b.c.
.false.                  ; function for heads
105.0, 0.0, 10000.0      ; prescribed head, time-on, time-off
3700.0, 3850.0, 2700.0, 2700.0, 50.0, 130.0,
1,                        ; number of time interval for 1st-type b.c.
.false.                  ; function for heads
105.0, 0.0, 10000.0      ; prescribed head, time-on, time-off
3700.0, 3700.0, 2500.0, 2700.0, 50.0, 130.0,
1,                        ; number of time interval for 1st-type b.c.
.false.                  ; function for heads
105.0, 0.0, 10000.0      ; prescribed head, time-on, time-off
3550.0, 3700.0, 2500.0, 2500.0, 50.0, 130.0,
1,                        ; number of time interval for 1st-type b.c.
.false.                  ; function for heads
105.0, 0.0, 10000.0      ; prescribed head, time-on, time-off
*** Group 11: Second-type b.c. ***
.true.                   ; true if 2nd-type b.c.
.true.                   ; true if use coordinates to define property zones
11,                      ; number of zones
0.0, 2000.0, 0.0, 6000.0, 130.0, 130.0,
6, 2.1d-9,
2000.0, 2350.0, 0.0, 2650.0, 130.0, 130.0,
6, 2.1d-9,
2350.0, 2700.0, 0.0, 2500.0, 130.0, 130.0,
6, 2.1d-9,
2700.0, 2900.0, 0.0, 2750.0, 130.0, 130.0,
6, 2.1d-9,
2000.0, 2350.0, 4300.0, 6000.0, 130.0, 130.0,
6, 2.1d-9,
2350.0, 2700.0, 4150.0, 6000.0, 130.0, 130.0,
6, 2.1d-9,
2700.0, 2900.0, 3450.0, 6000.0, 130.0, 130.0,
6, 2.1d-9,
2900.0, 6000.0, 0.0, 6000.0, 130.0, 130.0,

```

```

6, 2.1d-9,
2000.0, 2350.0, 2650.0, 4300.0, 130.0, 130.0,
6, 8.0d-9,
2350.0, 2700.0, 2500.0, 4150.0, 130.0, 130.0,
6, 8.0d-9,
2700.0, 2900.0, 2750.0, 3450.0, 130.0, 130.0,
6, 8.0d-9,
*** Group 12:Seepage face
.false.           ; true if seepage face
*** Group 13:Source/sink ***
.true.           ; true if inj/with wells
1,
.true.
-2.5d-2,         ; flowrate
1.0, 0.0, 8.2d5, 0.0,
2350.0, 2350.0, 3900.0, 3900.0, 50.0, 130.0,
*** Group 13b:Tile drain ***
.false.          ; true if tile drain
*** Group 14:Observ well ***
.true.          ; true if observ wells
.true.
31,
2410.0, 2410.0, 4250.0, 4250.0, 127.0, 130.0,
2290.0, 2290.0, 4350.0, 4350.0, 127.0, 130.0,
2150.0, 2150.0, 4300.0, 4300.0, 127.0, 130.0,
2050.0, 2050.0, 4300.0, 4300.0, 127.0, 130.0,
2000.0, 2000.0, 3815.0, 3815.0, 127.0, 130.0,
2000.0, 2000.0, 2900.0, 2900.0, 127.0, 130.0,
2700.0, 2700.0, 2300.0, 2300.0, 127.0, 130.0,
2800.0, 2800.0, 2550.0, 2550.0, 127.0, 130.0,
2900.0, 2900.0, 2750.0, 2750.0, 127.0, 130.0,
2900.0, 2900.0, 2950.0, 2950.0, 127.0, 130.0,
2900.0, 2900.0, 3450.0, 3450.0, 127.0, 130.0,
2850.0, 2850.0, 3500.0, 3500.0, 127.0, 130.0,
2750.0, 2750.0, 3550.0, 3550.0, 127.0, 130.0,
2750.0, 2750.0, 3700.0, 3700.0, 127.0, 130.0,
2800.0, 2800.0, 3900.0, 3900.0, 127.0, 130.0,
2750.0, 2750.0, 4100.0, 4100.0, 127.0, 130.0,
2410.0, 2410.0, 3885.0, 3885.0, 127.0, 130.0,
2350.0, 2350.0, 3900.0, 3900.0, 127.0, 130.0,
2150.0, 2150.0, 3900.0, 3900.0, 127.0, 130.0,
2235.0, 2235.0, 3600.0, 3600.0, 127.0, 130.0,
2700.0, 2700.0, 3000.0, 3000.0, 127.0, 130.0,
2350.0, 2350.0, 3250.0, 3250.0, 127.0, 130.0,
2310.0, 2310.0, 2850.0, 2850.0, 127.0, 130.0,
2850.0, 2850.0, 3050.0, 3050.0, 127.0, 130.0,
2850.0, 2850.0, 2850.0, 2850.0, 127.0, 130.0,
2265.0, 2265.0, 2800.0, 2800.0, 127.0, 130.0,
*** Group15:Fracture data ***
.false.          ; true if fractures
*** Group16:Output of fluid fluxes ***
.false.          ; true if fluid mass fluxes

```

DECHETS
 DECHETS
 DECHETS
 SP_1
 PS-01-S
 PS-02-S
 PS-03-S
 PS-04-S
 PS-07-S
 PS-11-S
 PS-18-S
 PS-20-S
 PS-21-S
 PS-23-S
 PS-25-S
 PS-26-S
 PS-27-S
 PS-29-S
 PS-30-S
 PS-31-S
 W-1
 SP-1
 W-3
 W-4
 W-5
 W-6
 W-7
 2B14
 2B1
 1AP10

ANNEXE K

RÉSULTATS DE LA MODÉLISATION DES ZONES FRACTURÉES

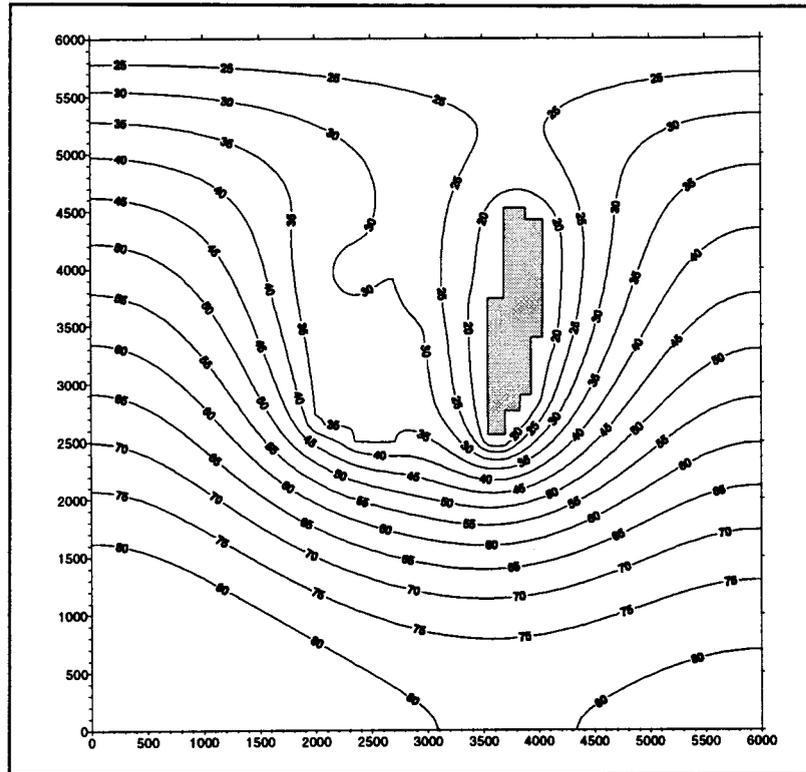


FIGURE K.1: Piézométrie obtenue pour le cas de référence
(cas de base simulé avec *FRAC3DVS*).

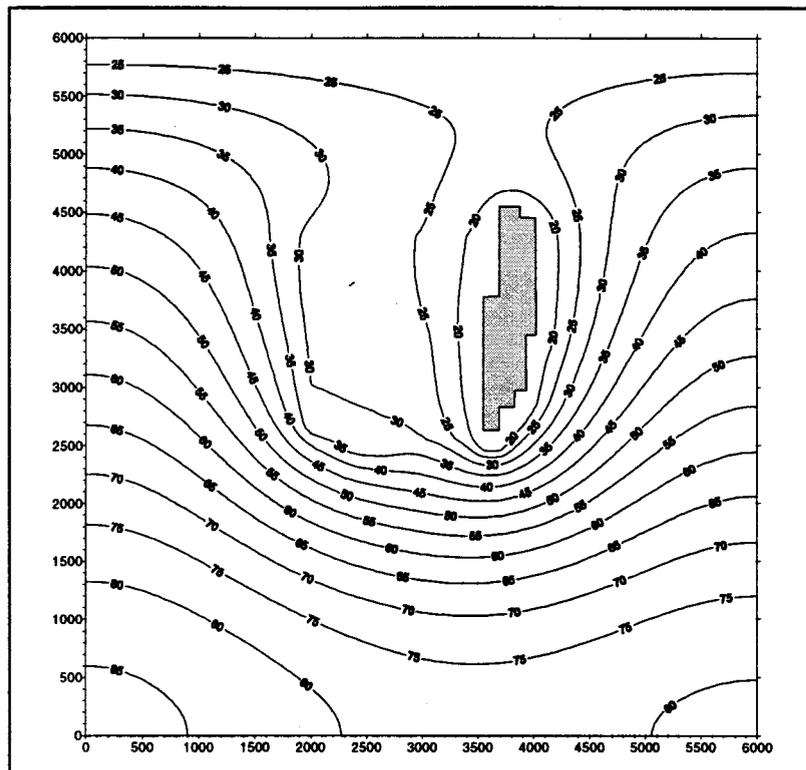


FIGURE K.2 Piézométrie obtenue en considérant un plan fracturé (cas A).

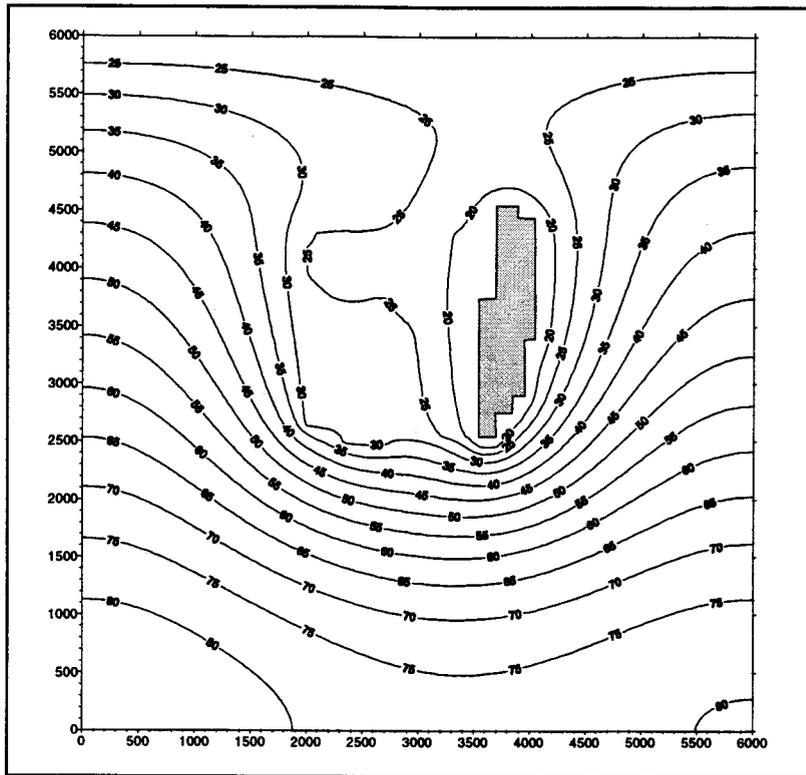


FIGURE K.3 Piézométrie obtenue en considérant deux plans fracturés (*cas B*).

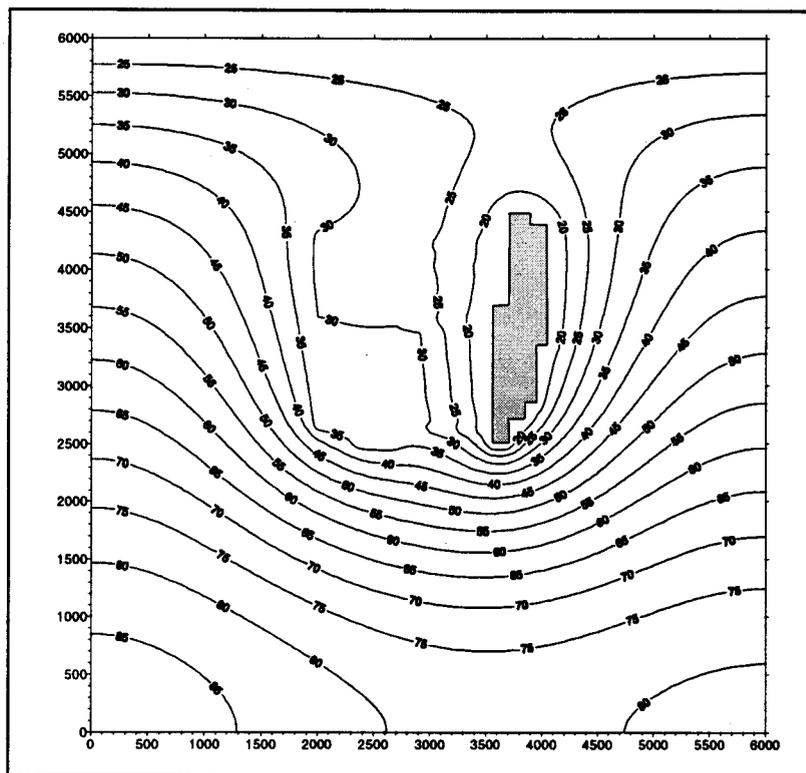


FIGURE K.4 Piézométrie obtenue en considérant plusieurs zones fracturées (*cas C*).

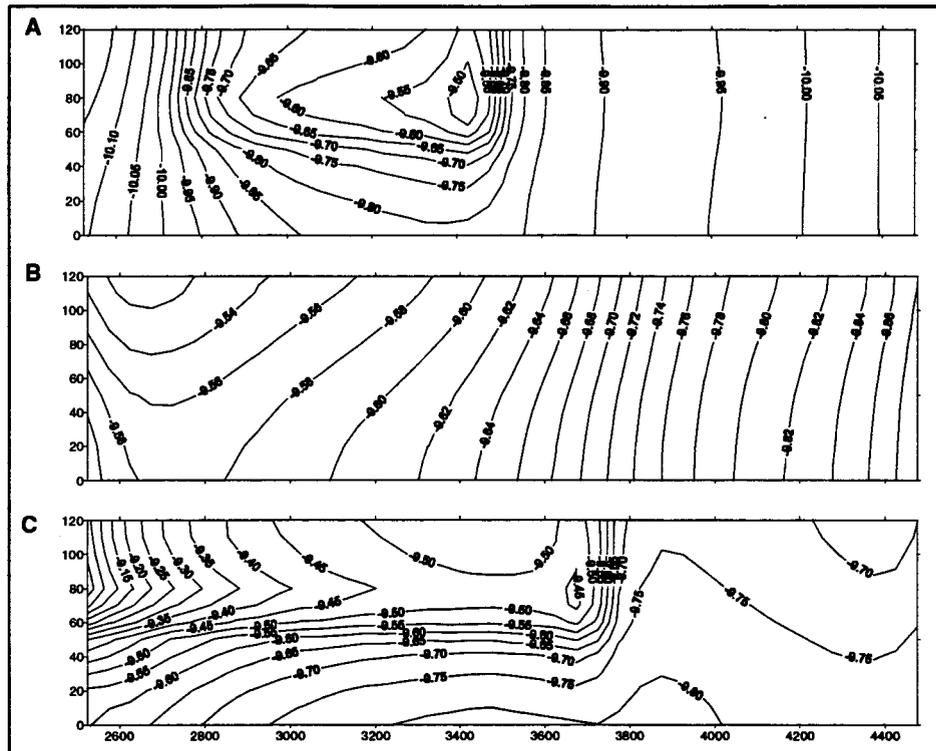


FIGURE K.5: Carte isocontour des vitesses passant à travers les sections A-B-C pour le cas de référence [logarithme de la vitesse].

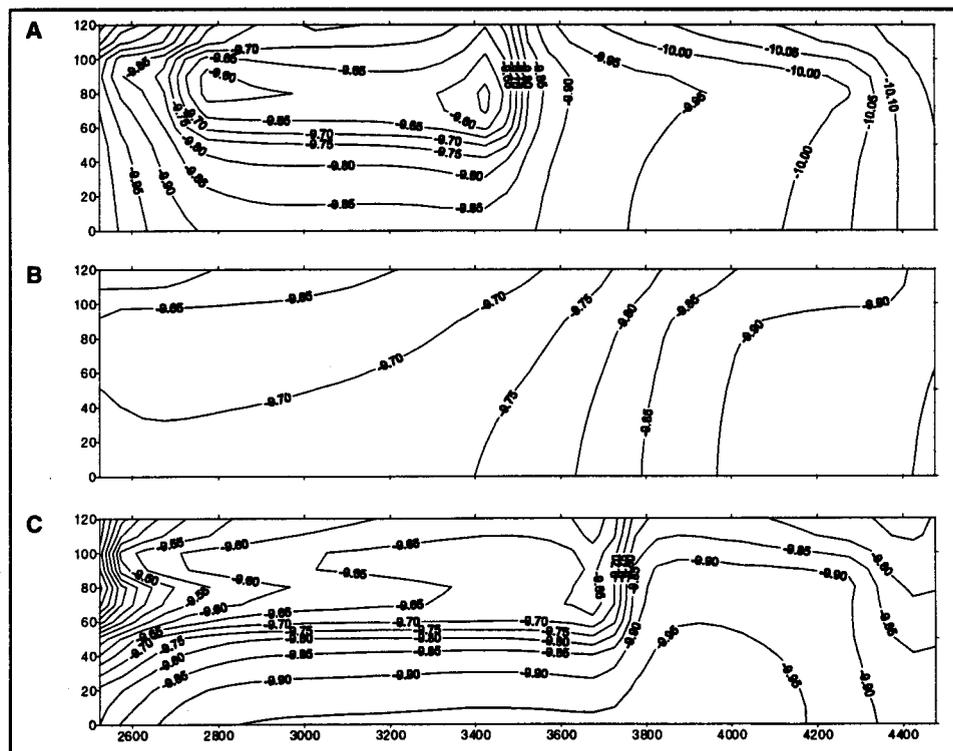


FIGURE K.6: Carte isocontour des vitesses passant à travers les sections A-B-C pour le cas d'un plan fracturé (cas A) [logarithme de la vitesse].

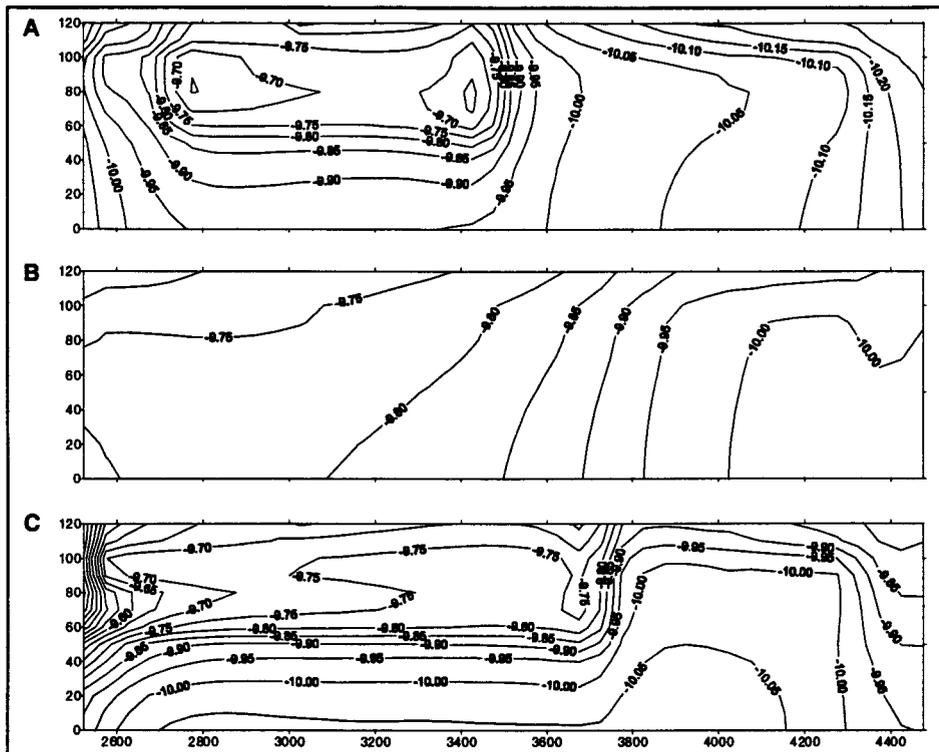


FIGURE K.7: Carte isocontour des vitesses passant à travers les sections A-B-C pour le cas de deux plans fracturés (cas B) [logarithme de la vitesse].

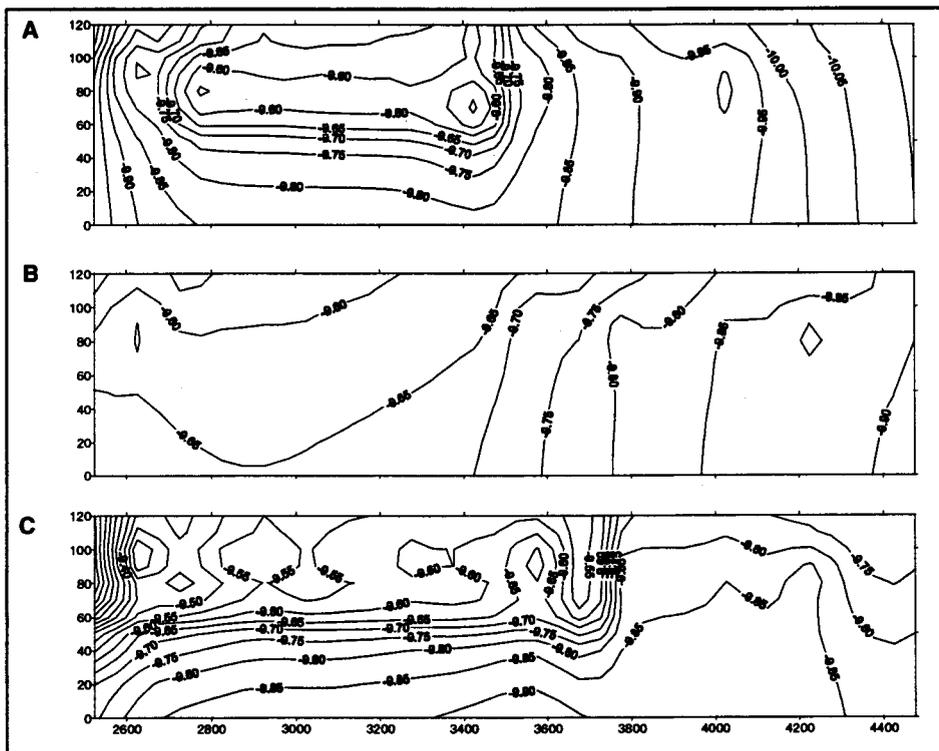


FIGURE K.8: Carte isocontour des vitesses passant à travers les sections A-B-C pour le cas de plusieurs zones fracturées (cas C) [logarithme de la vitesse].