

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

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

par

Philippe Tremblay

**ÉTUDE HYDROGÉOLOGIQUE
DE L'AQUIFÈRE DE SAINT-HONORÉ
AVEC EMPHASE SUR SON BILAN HYDRIQUE**

mai 2005



Mise en garde/Advice

Afin de rendre accessible au plus grand nombre le résultat des travaux de recherche menés par ses étudiants gradués et dans l'esprit des règles qui régissent le dépôt et la diffusion des mémoires et thèses produits dans cette Institution, l'Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) est fière de rendre accessible une version complète et gratuite de cette œuvre.

Motivated by a desire to make the results of its graduate students' research accessible to all, and in accordance with the rules governing the acceptance and diffusion of dissertations and theses in this Institution, the Université du Québec à Chicoutimi (UQAC) is proud to make a complete version of this work available at no cost to the reader.

L'auteur conserve néanmoins la propriété du droit d'auteur qui protège ce mémoire ou cette thèse. Ni le mémoire ou la thèse ni des extraits substantiels de ceux-ci ne peuvent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

The author retains ownership of the copyright of this dissertation or thesis. Neither the dissertation or thesis, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

RÉSUMÉ

L'aquifère de Saint-Honoré consiste en une structure paléodeltaïque qui prend la forme d'un plateau sablonneux reposant soit directement sur le socle précambrien ou sur une mince couche de till ou d'argile. Considérant les extractions actuelles et planifiées des eaux souterraines par les divers exploitants, il s'avère nécessaire d'évaluer la capacité d'exploitation de l'aquifère pour en éviter une surexploitation. Mine Niobec a mis en oeuvre un programme de suivi de l'aquifère durant trois années, d'octobre 2001 à septembre 2004, consistant en des mesures périodiques de niveau d'eau dans dix-sept piézomètres, de niveau d'eau de quatre lacs, de débit de quatorze ruisseaux et de paramètres de la qualité de l'eau dans quatre piézomètres.

Les diagrammes d'évolution du niveau d'eau dans les piézomètres présentent une baisse générale, au cours des deux premières années du suivi. Depuis juillet 2003, il semble que le niveau d'eau se soit stabilisé, et puis qu'une remontée se soit amorcée au cours de la dernière moitié de l'année 2004. Depuis l'année 2000, la baisse totale observée à ce jour, atteint 3 m près des puits de Mine Niobec et diminue progressivement à environ 1 m (± 0.5 m) à une distance radiale de 1500 m. Une estimation du bilan hydrique utilisant les données du suivi et la géomatique a été réalisée sur une portion de l'aquifère recouvrant une superficie d'environ 41.6 km². À partir des données du suivi de trois années consécutives, l'évapotranspiration réelle (*ET*) est estimée à 398.0, 428.6 et 325.6 mm, pour des précipitations totales (*P*) respectives de 812.7, 814.3 et 892.2 mm. Par contre, cette évaluation du bilan hydrique de l'aquifère est affectée par une grande incertitude; c'est le cas notamment de l'évapotranspiration, de la quantité d'eau emmagasinée, du ruissellement et de la quantité d'eau sortie aux cours d'eau exutoires. En première approximation, la différence entre *P* et *ET* est considérée la recharge de l'aquifère; le ruissellement en surface est considéré comme négligeable sur le plateau sablonneux.

Un modèle de simulation numérique de l'écoulement dans l'aquifère de Saint-Honoré a été développé afin d'intégrer dans un modèle conceptuel l'ensemble des informations disponibles. Le modèle numérique a été calé en régime d'écoulement permanent, sur le niveau d'eau de trente et un piézomètres, puis en régime transitoire sur le niveau d'eau de treize piézomètres et sur le débit annuel de dix cours d'eau exutoires pour une période correspondant aux trois années du bilan. Les simulations numériques corroborent adéquatement l'évaluation du bilan hydrique ainsi que les niveaux mesurés pendant les trois années du suivi. Le modèle de simulation est utilisé pour analyser trois scénarios d'exploitation de l'aquifère sous diverses conditions de recharge. Ces scénarios sont qualifiés d'optimiste, de connu et de pessimiste.

REMERCIEMENTS

Ce projet a été financé par Mine Niobec. L'auteur a reçu une bourse d'étude du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et une autre de la Fondation de l'Université du Québec à Chicoutimi (FUQAC). Les Laboratoires SL ont collecté les données de suivi de l'aquifère. Des informations supplémentaires ont été fournies par la municipalité de Saint-Honoré et par Ville de Saguenay. Les fichiers numériques du secteur à l'étude nous ont été prêtés par la municipalité régionale de comté (MRC) du Fjord-du-Saguenay. Plusieurs personnes ont contribué à ce rapport par des échanges d'idées, notamment Eddy Dénommé de Mine Niobec, Lisa Gauthier et Martin Lamontagne du Ministère de l'Environnement du Québec, Donald Tremblay et Michael Verreault de la firme Les Laboratoires SL, Denis W. Roy, Denis Côté et Pierre Cousineau de l'Université du Québec à Chicoutimi. Finalement, je tiens à remercier Alain Rouleau, le directeur de ce mémoire, pour son aide apportée et ses précieux conseils.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIÈRES	iv
LISTE DES FIGURES	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES ANNEXES	xii
1. INTRODUCTION	1
1.1 PROBLÉMATIQUE	1
1.2 DÉMARCHES ANTÉRIEURES	4
1.3 MÉTHODOLOGIE	5
2. DESCRIPTION DE L'AQUIFÈRE ET DE LA RÉGION À L'ÉTUDE..	9
2.1 SOURCES D'INFORMATION	9
2.1.1 INFORMATIONS CARTOGRAPHIQUES	10
2.1.2 ÉTUDES HYDROGÉOLOGIQUES ET GÉOTECHNIQUES	10
2.2 GÉOLOGIE DU TERRITOIRE ET VULNÉRABILITÉ DE L'AQUIFÈRE.....	11
2.2.1 TOPOGRAPHIE	11
2.2.2 NATURE DU SOCLE ROCHEUX	12
2.2.3 NATURE ET ARCHITECTURE INTERNE DES DÉPÔTS MEUBLES	13
2.2.4 MODÈLE GÉNÉTIQUE DE MISE EN PLACE DES DÉPÔTS MEUBLES ...	14
2.2.5 VULNÉRABILITÉ DE L'AQUIFÈRE	15
2.3 UTILISATION DU TERRITOIRE	16
3. LEVÉS HYDROGÉOLOGIQUES RÉCENTS	28
3.1 LE PLAN DE SUIVI	28
3.2 PIÉZOMÉTRIE	29

3.2.1	DIAGRAMMES D'ÉVOLUTION DU NIVEAU D'EAU	29
3.2.2	CAPTEURS DE PRESSION EN CONTINU	33
3.2.3	CARTE PIÉZOMÉTRIQUE	35
3.3	DÉBIT DE COURS D'EAU	36
3.4	FILTRATION AU LAC DOCTEUR	37
3.5	ANALYSES CHIMIQUES	38
4.	BILAN HYDRIQUE DE L'AQUIFÈRE	71
4.1	MODÈLE CONCEPTUEL	71
4.1.1	LIMITE DE LA PORTION CONSIDÉRÉE DE L'AQUIFÈRE	72
4.1.2	REPRÉSENTATION DE LA RECHARGE ET DE LA DÉCHARGE	73
4.2	ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU BILAN	74
4.2.1	PRÉCIPITATION (RECHARGE)	74
4.2.2	DÉCHARGE	75
4.2.3	VARIATIONS D'EMMAGASINEMENT	80
4.3	BILAN HYDRIQUE	81
4.4	IMPORTANCE RELATIVE DE L'EXPLOITATION ET DE LA RECHARGE	83
5.	SIMULATION NUMÉRIQUE DE L'ÉCOULEMENT DES EAUX SOUTERRAINES	87
5.1	MODÈLE NUMÉRIQUE	87
5.1.1	MAILLAGE	89
5.1.2	REPRÉSENTATION DES PROPRIÉTÉS HYDROGÉOLOGIQUES	89
5.1.3	REPRÉSENTATION DE LA RECHARGE	90
5.1.4	REPRÉSENTATION DE LA DÉCHARGE	91
5.2	PROCESSUS DE CALAGE	92
5.2.1	RÉSULTATS DU CALAGE EN RÉGIME PERMANENT	95
5.2.2	RÉSULTATS DU CALAGE EN RÉGIME TRANSITOIRE	96
5.2.2.1	Régression linéaire	97
5.2.2.2	Chronographies	98
5.2.2.3	Bilan de masse de la simulation	99
5.2.2.4	Carte piézométrique	101

5.2.2.5	Magnitude et distribution spatiale des erreurs résiduelles.....	102
5.3	SIMULATIONS PRÉVISIONNELLES	102
5.3.1	PRÉSENTATION DES SCÉNARIOS	103
5.3.1.1	Premier scénario : optimiste	103
5.3.1.2	Deuxième scénario : connu	105
5.3.1.3	Troisième scénario : pessimiste	105
5.3.2	PRÉVISIONS DES SCÉNARIOS ENVISAGÉS	106
5.3.2.1	Variation du niveau d'eau	106
5.3.2.2	Exploitation par rapport à la recharge	108
5.4	LIMITATIONS DU MODÈLE NUMÉRIQUE	110
6.	DISCUSSION	128
6.1	HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES DU MODÈLE CONCEPTUEL.....	129
6.2	INCIDENCES DE L'AUGMENTATION DE L'EXPLOITATION DE L'AQUIFÈRE..	131
6.2.1	BAISSE DU NIVEAU D'EAU DANS LES TERRAINS	132
6.2.2	REDUCTION DE LA DECHARGE AUX COURS D'EAU EXUTOIRES	133
6.3	ÉVALUATION D'UN DEBIT DURABLE D'EXPLOITATION.....	134
6.3.1	ÉCARTS CLIMATIQUES	134
6.3.2	BAISSE ACCEPTABLE POUR LES USAGERS	135
6.3.3	RÉDUCTION ACCEPTABLE DU DÉBIT DE BASE DES COURS D'EAU EXUTOIRES.....	138
7.	CONCLUSION	141
	RÉFÉRENCES	147

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1- Schémas illustrant les conséquences de l'exploitation des eaux souterraines sur les composantes générales du bilan hydrique de l'aquifère (inspiré de Alley <i>et al.</i> , 1999).....	7
Figure 1.2- Localisation de la région à l'étude	8
Figure 2.1- Carte des dépôts meubles selon Lasalle et Tremblay (1978).....	19
Figure 2.2- Sondages réalisés dans le cadre d'études géotechniques et hydrogéologiques.....	20
Figure 2.3- Modèle numérique de la topographie de surface	21
Figure 2.4- Modèle numérique de la topographie du socle rocheux	22
Figure 2.5- Section stratigraphique AA'	23
Figure 2.6- Section stratigraphique BB'	24
Figure 2.7- Section stratigraphique CC', DD' et EE'	25
Figure 2.8- Modèle numérique de terrain de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean.....	26
Figure 2.9- Utilisation du territoire et contamination potentielle	27
Figure 3.1- Localisation des piézomètres, des ruisseaux et des lacs faisant l'objet du programme de suivi.....	44
Figure 3.2- Élévation du niveau d'eau dans les piézomètres PN-9, PN-10 et PN-11.....	45
Figure 3.3- Élévation du niveau d'eau dans les piézomètres PN-12 et PN-13.....	46
Figure 3.4- Élévation du niveau d'eau dans les piézomètres PN-14 et PN-15.....	47
Figure 3.5- Élévation du niveau d'eau dans les piézomètres PSH-3, PSH-5 et PSH-7.....	48
Figure 3.6- Élévation du niveau d'eau dans les piézomètres PN-1, PN-6 et PN-18.....	49
Figure 3.7- Élévation du niveau d'eau dans les piézomètres PN-7, PN-8 et PN-16.....	50
Figure 3.8- Élévation du niveau d'eau dans les piézomètres PVS-7	51
Figure 3.9- Élévation du niveau des lacs	52

Figure 3.10- Élévation du niveau d'eau en continu dans le piézomètre PN-1.....	53
Figure 3.11- Élévation du niveau d'eau en continu dans le piézomètre PN-7.....	54
Figure 3.12- Carte piézométrique du 26 mai 2004	55
Figure 3.13- Évolution du débit du ruisseau Villeneuve-Tremblay	56
Figure 3.14- Évolution du débit du ruisseau du Curé	57
Figure 3.15- Évolution du débit du ruisseau Ludger-Pelletier	58
Figure 3.16- Évolution du débit du ruisseau près du terrain de jeux	59
Figure 3.17- Évolution du débit du ruisseau Gravel	60
Figure 3.18- Évolution du débit du ruisseau Tremblay	61
Figure 3.19- Évolution du débit du ruisseau de la sortie du lac Docteur	62
Figure 3.20- Évolution du débit du premier ruisseau sur le chemin des Ruisseaux.....	63
Figure 3.21- Évolution du débit du ruisseau du Coteau	64
Figure 3.22- Évolution du débit du ruisseau 1 du lac de l'Aqueduc	65
Figure 3.23- Évolution du débit du ruisseau 2 du lac de l'Aqueduc	66
Figure 3.24- Évolution du débit du ruisseau de la sortie du lac de l'Aqueduc.....	67
Figure 3.25- Évolution du débit du ruisseau près du lac Mon Repos	68
Figure 3.26- Évolution du débit du ruisseau Chaud	69
Figure 3.27- Carte du lac Docteur montrant les résultats des mesures de flux de filtration.....	70
Figure 3.28- Section schématique d'un lac alimenté par les eaux souterraines.....	70
Figure 4.1- Précipitations mensuelles relevées à la station de Bagotville ..	85
Figure 4.2- Répartition des termes du bilan hydrique pour chacune des trois années du suivi.....	86
Figure 5.1- Distribution des unités hydrostratigraphiques de chacune des couches du modèle numérique, ainsi que les valeurs correspondantes de la conductivité hydraulique (K) et du rendement spécifique (R_s)	112
Figure 5.2- La distribution des unités hydrostratigraphiques à travers une colonne et une rangée du modèle numérique	113
Figure 5.3- Régression linéaire des niveaux piézométriques mesurés et générés	

en régime permanent.....	114
Figure 5.4- Régression linéaire des niveaux piézométriques mesurés et générés durant les 1095 jours (trois ans) de simulation en régime transitoire	114
Figure 5.5- Chronographie des niveaux piézométriques mesurés et générés durant 1095 jours en régime transitoire à PSH-5 et PSH-7.....	115
Figure 5.6- Chronographie des niveaux piézométriques mesurés et générés durant 1095 jours en régime transitoire à PN-18 et PN-6.....	116
Figure 5.7- Chronographie des niveaux piézométriques mesurés et générés durant 1095 jours en régime transitoire à PN-12 et PN-13.....	117
Figure 5.8- Chronographie des niveaux piézométriques mesurés et générés durant 1095 jours en régime transitoire à PN-14 et PN-15.....	118
Figure 5.9- Chronographie des niveaux piézométriques mesurés et générés durant 1095 jours en régime transitoire à PN-16 et PN-7.....	119
Figure 5.10- Chronographie des niveaux piézométriques mesurés et générés durant 1095 jours en régime transitoire à PN-1 et PN-8.....	120
Figure 5.11- Chronographie des niveaux piézométriques mesurés et générés durant 1095 jours en régime transitoire à PVS-7.....	121
Figure 5.12- Comparaison de la piézométrie estimée par interpolation géostatistique à partir de niveaux d'eau mesurés le 16 août 2004 avec la piézométrie simulée pour la même date en régime transitoire	122
Figure 5.13- Magnitude et distribution spatiale des erreurs résiduelles associées à chaque piézomètre entre le niveau d'eau mesuré et le niveau d'eau généré par la simulation numérique en régime transitoire pendant trois années.....	123
Figure 5.14- Prévion de la variation du niveau d'eau entre août 2004 et septembre 2007 en utilisant un scénario optimiste	124
Figure 5.15- Prévion de la variation du niveau d'eau entre août 2004 et septembre 2007 en utilisant un scénario connu.....	125
Figure 5.16- Prévion de la variation du niveau d'eau entre août 2004 et septembre 2007 en utilisant un scénario pessimiste.....	126
Figure 5.17- Répartition des termes du bilan hydrique lors de la troisième année pour chacun des scénarios prévisionnels.....	127
Figure 6.1- Précipitation annuelle des dix dernières années et les précipitations maximales et minimales enregistrées à la station de Bagotville.....	140
Figure E1- Graphique Eh – pH	182
Figure E2- Faciès hydrogéochimiques des échantillons prélevés	183

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1- pH de l'eau des piézomètres échantillonnés	40
Tableau 3.2- Teneur en azote (nitrites-nitrates) de l'eau des piézomètres échantillonnés.....	41
Tableau 3.3- Teneur en chlorure de l'eau des piézomètres échantillonnés.....	41
Tableau 3.4- Teneur en fer total de l'eau des piézomètres échantillonnés.....	42
Tableau 3.5- Dureté de l'eau des piézomètres échantillonnés	43
Tableau 4.1- Précipitations reçues durant le programme de suivi, ainsi que la moyenne de 30 ans	75
Tableau 4.2- Quantité d'eau écoulée à chacune des quatorze stations de mesure de débit durant les trois années du suivi	77
Tableau 4.3- Quantités d'eau prélevées par les principaux exploitants pour l'année 2001-2002.....	78
Tableau 4.4- Quantités d'eau prélevées par les principaux exploitants pour l'année 2002-2003.....	78
Tableau 4.5- Quantités d'eau prélevées par les principaux exploitants pour l'année 2003-2004.....	79
Tableau 4.6- Variations de la quantité d'eau emmagasinée dans le réservoir aquifère pour chacune des années du suivi	80
Tableau 4.7- Valeurs des composantes du bilan hydrique pour chacune des années du suivi	82
Tableau 5.1- Comparaison des bilans hydriques estimés à partir des données de terrain pour les trois années du bilan hydrique avec les bilans de masse de la simulation numérique en régime transitoire	99
Tableau 5.2- Comparaison de la valeur de la lame d'eau sortant aux cours d'eau exutoires selon les simulations et selon les estimations faites à partir des données de terrain, pour chacune des trois années du bilan hydrique	101
Tableau A1- Sondages utilisés	152
Tableau B1- Cote d'élévation de la margelle des piézomètres	158
Tableau B2- Profondeur du niveau d'eau dans les piézomètres par rapport à l'élévation de la margelle.....	159
Tableau C1- Niveau d'eau de lacs	172

Tableau D1- Débit de cours d'eau	173
Tableau E1- Analyse des paramètres et délais à respecter	177
Tableau E2- Paramètres physiques	184
Tableau E3- Paramètres chimiques	185

LISTE DES ANNEXES

Annexe A- Sondages utilisés	152
Annexe B- Niveaux piézométriques	158
Annexe C- Niveaux de lacs	172
Annexe D- Débits de cours d'eau	173
Annexe E- Analyses chimiques réalisées à l'UQAC	176
Annexe F- Équation des indicateurs de performance du calage	186

INTRODUCTION

On considère souvent que l'exploitation d'un aquifère est durable lorsque la quantité de l'eau exploitée n'excède pas la recharge naturelle de l'aquifère. Ce concept plutôt simple sous-estime l'information nécessaire à la compréhension des effets de l'exploitation des eaux souterraines d'un aquifère (Bredehoeft *et al.*, 1982). Un exemple extrême serait un aquifère dans lequel on exploiterait la totalité de la recharge, où l'eau pompée quitterait les limites du bassin d'alimentation de l'aquifère sans que cette eau soit retournée vers le milieu aquifère après son utilisation, ce qui signifie le cas échéant, qu'il ne resterait alors plus d'eau disponible pour alimenter le débit de base des cours d'eau exutoires, au détriment des usagers de ces cours d'eau, ainsi que de la faune et de la flore qui y vivent.

1.1 PROBLÉMATIQUE

Une approche pour évaluer la capacité d'exploitation d'un aquifère consiste en l'analyse de son bilan hydrique. En effet, l'évaluation d'un débit durable d'exploitation des eaux souterraines demande une bonne compréhension des entrées et des sorties qui composent le bilan hydrique d'un aquifère. Toutefois,

l'estimation des composantes du bilan hydrique est affectée par une grande incertitude; c'est le cas notamment de l'évapotranspiration, de la quantité d'eau emmagasinée, du ruissellement et de la quantité d'eau sortie aux cours d'eau exutoires (Alley *et al.*, 1999; Scanlon *et al.*, 2002). Inévitablement, l'étude du bilan hydrique d'un aquifère nécessite la mesure de plusieurs paramètres tels que le niveau d'eau dans les piézomètres, le débit de cours d'eau exutoires, les précipitations et la quantité d'eau prélevée par pompage.

De façon générale, des activités anthropiques telles que le prélèvement d'eau souterraine, doivent nécessairement avoir comme conséquences une diminution de la décharge naturelle d'un aquifère, une baisse du niveau d'eau dans le réservoir aquifère, possiblement une augmentation de la recharge, ou encore une combinaison de ces trois phénomènes (figure 1.1; Alley *et al.*, 1999). Toutefois, ces conséquences ne signifient pas d'emblée qu'il y a surexploitation de la ressource. Par exemple, la diminution d'emmagasinement d'eau dans les terrains en répercussion à une augmentation des quantités d'eau prélevées constitue un phénomène transitoire suite auquel le système recouvrera un nouvel équilibre.

L'aquifère de Saint-Honoré est constitué par un plateau sablonneux d'âge quaternaire situé dans la partie est de la municipalité de Saint-Honoré (figure 1.2). Ce plateau deltaïque repose sur le socle cristallin précambrien, soit directement ou

sur une mince couche d'argile ou de till. Au pied du plateau sablonneux, les eaux souterraines alimentent de nombreuses résurgences, ces dernières constituant la décharge naturelle de l'aquifère. Cette structure que nous appelons l'aquifère de Saint-Honoré est bordée à l'est par la rivière Valin et à l'ouest par le dépôt d'argile sur lequel se situe le village de Saint-Honoré. Les principaux utilisateurs des eaux souterraines de cet aquifère sont la municipalité de Saint-Honoré, la Ville de Saguenay et Mine Niobec. La municipalité de Saint-Honoré alimente sa population à partir de trois puits de captage situés au nord-est de l'aéroport de Saint-Honoré. La Ville de Saguenay approvisionne une partie du secteur nord de l'arrondissement de Chicoutimi à partir de la prise d'eau de surface du lac de l'Aqueduc. Mine Niobec s'est approvisionnée en eau pendant un certain temps à partir des puits de la municipalité de Saint-Honoré, mais elle s'alimente maintenant à partir de ses trois puits de captage situés au sud de l'aéroport. En outre, de nombreux résidents du secteur utilisent les plans d'eau de surface reliés à l'aquifère, ainsi que les eaux souterraines à partir de puits de captage individuels. Finalement, une partie sans doute importante de la faune et de la flore du territoire a besoin des apports des eaux souterraines dans les écosystèmes aquatiques et terrestres. Considérant les extractions actuelles et planifiées des eaux souterraines, il s'avère nécessaire de déterminer si la nappe phréatique offre la capacité de desservir tous les exploitants sans engendrer une surexploitation.

1.2 DÉMARCHES ANTÉRIEURES

Une première estimation du bilan a été réalisée par les Laboratoires SL (2000b), après avoir délimité une aire de territoire à l'intérieur de laquelle l'eau qui s'infiltre alimente la portion considérée de l'aquifère. Cette estimation a utilisé des valeurs moyennes sur plusieurs années pour certains des termes de l'équation du bilan, comme les précipitations par exemple. Il a alors été supposé que l'eau, disponible pour la recharge par infiltration correspond à 50% de la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration potentielle; que l'autre 50% de cette différence ruisselle hors de l'aquifère. Cette première estimation du bilan n'a pas considéré les variations de la quantité d'eau dans le réservoir souterrain, ni la quantité d'eau sortant de façon naturelle de l'aquifère par les cours d'eau.

Une deuxième estimation du bilan a été réalisée par Pilote (2002), qui a pris en considération la quantité d'eau sortant de l'aquifère par les ruisseaux à partir des premières campagnes de mesure de débit effectuées en 2001. La variation de la quantité d'eau à l'intérieur du réservoir souterrain n'a pas été considérée pour cette deuxième estimation. Des données supplémentaires ont été obtenues à partir de 2002, notamment sur le débit de cours d'eau, ainsi que sur le niveau de lacs et le niveau d'eau dans plusieurs piézomètres.

Ces estimations du bilan hydrique sont pertinentes pour l'évaluation du potentiel hydrogéologique de l'aquifère, cependant leur calcul utilise la valeur de l'évapotranspiration potentielle comme substitut de l'évapotranspiration réelle. Cette approche revient à surestimer l'évapotranspiration et donc à sous-estimer la recharge par infiltration. L'utilisation de méthodes plus fines pour analyser la recharge s'avère donc nécessaire pour améliorer l'estimation du bilan hydrique et éviter une surexploitation de la nappe phréatique. À titre d'information, dans le cadre de la conférence de GéoQuébec en 2004, une version fortement abrégée de ce mémoire a été présentée par Tremblay et Rouleau (2004a).

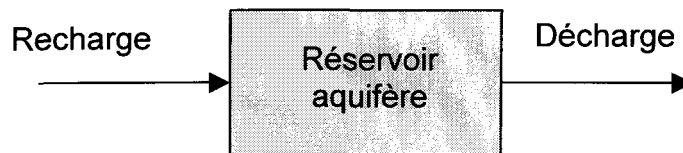
1.3 MÉTHODOLOGIE

L'évaluation de la capacité d'un système aquifère et du taux d'exploitation auquel il peut être soumis de façon durable, requiert de bien décrire le système aquifère lui-même et de bien estimer les quantités d'eau qui y circulent. La structure interne et les limites du système aquifère doivent être déterminées à partir de l'interprétation des informations géologiques et stratigraphiques disponibles. Cette étape essentielle permet de décrire les différents faciès des dépôts sédimentaires et leur agencement, ces facteurs ayant un effet prépondérant sur le comportement hydrogéologique du milieu, notamment sur la détermination des limites de l'aquifère.

L'étude de la piézométrie de l'aquifère permet de déterminer le gradient hydraulique produisant l'écoulement, la direction d'écoulement, ainsi que les variations de la quantité d'eau stockée dans le réservoir souterrain. Les mesures périodiques de débit des principaux cours d'eau considérés comme des exutoires de l'aquifère fournissent une estimation de la quantité d'eau se déchargeant de l'aquifère durant une période déterminée. Un bilan hydrique de l'aquifère peut être élaboré en tenant compte de toutes les entrées et de toutes les sorties d'eau durant une période déterminée.

Un modèle de simulation numérique de l'écoulement permet d'intégrer l'ensemble des informations disponibles à l'intérieur d'un modèle conceptuel du système aquifère. La simulation de l'écoulement en régime permanent vise notamment à tester les hypothèses concernant les limites du bassin d'alimentation, la recharge et les quantités d'eau circulant dans l'aquifère. La simulation numérique de l'écoulement en régime transitoire permet de considérer les variations avec le temps de certains termes du bilan hydrique, tels que la recharge, l'évapotranspiration, le pompage, le débit des ruisseaux aux exutoires et la quantité d'eau emmagasinée. Ainsi, une simulation numérique de l'écoulement des eaux souterraines réalisée en régime transitoire permet de considérer ces variations durant une période de temps correspondant à celle du bilan hydrique, et ainsi d'analyser divers scénarios d'exploitation.

**A) Aquifère sans pompage
en équilibre avec les conditions climatiques moyennes**



**B) Aquifère soumis à un pompage,
vers un nouvel équilibre...**

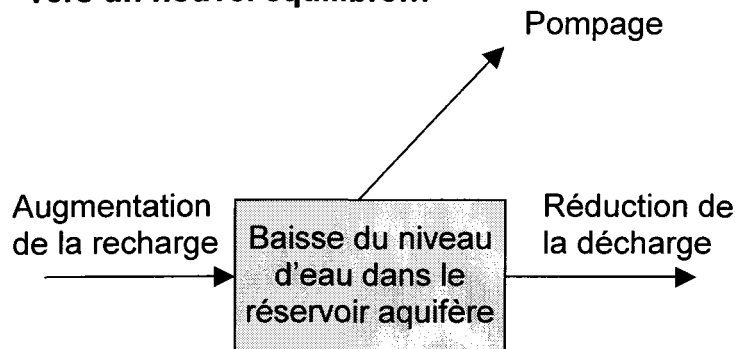


Figure 1.1- Schémas illustrant les conséquences de l'exploitation des eaux souterraines sur les composantes générales du bilan hydrique de l'aquifère (inspiré de Alley *et al.*, 1999). A) Schéma du bilan hydrique illustrant un aquifère sans exploitation de l'eau souterraine. B) Schéma du bilan hydrique présentant un aquifère soumis à une exploitation par pompage de l'eau souterraine. L'exploitation de l'eau souterraine a comme conséquence de modifier la valeur des paramètres de la recharge, de la décharge et/ou de l'emmagasinement d'eau à l'intérieur du réservoir; tous ces phénomènes doivent être considérés dans l'évaluation de la durabilité de l'exploitation de la ressource.

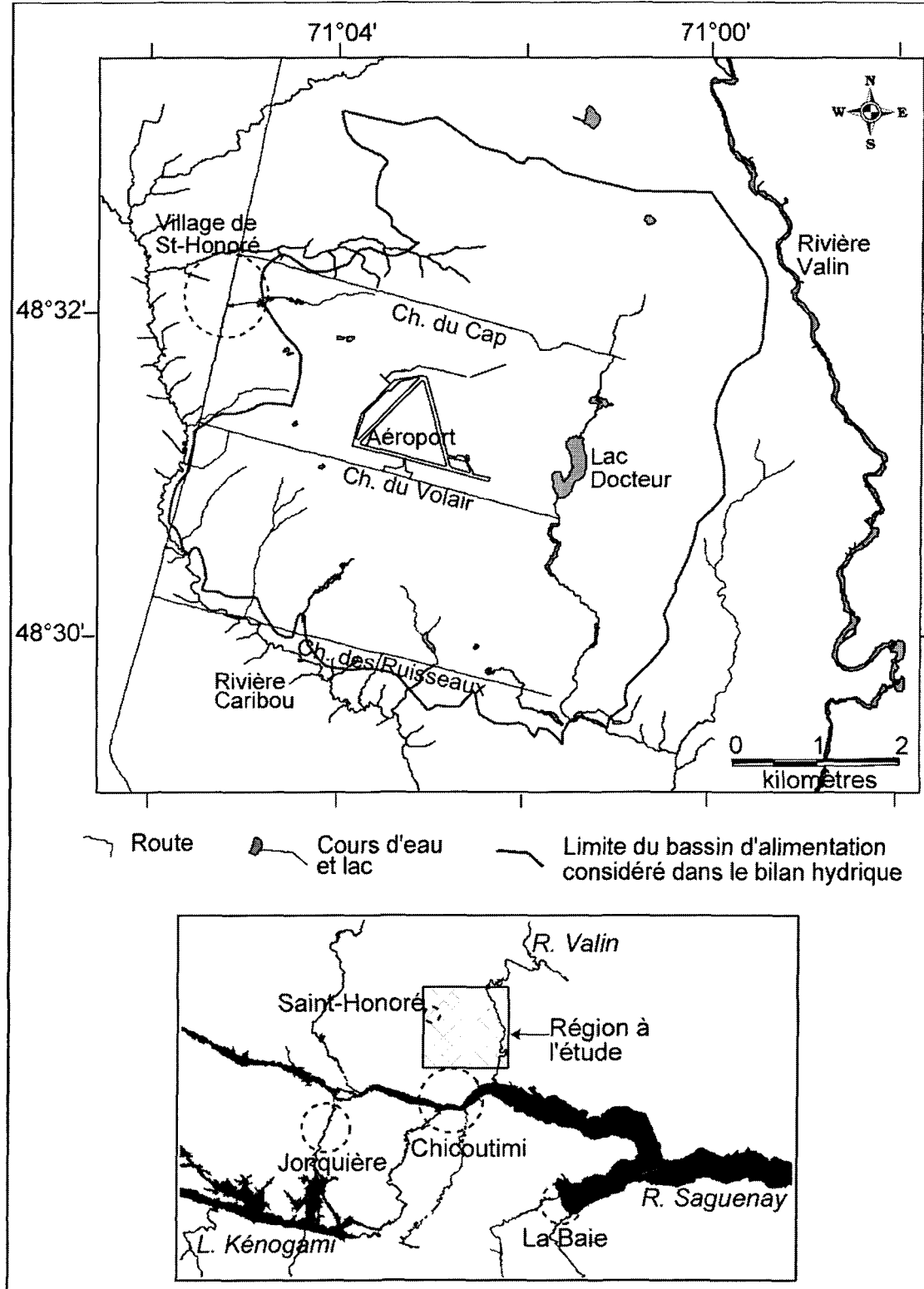


Figure 1.2- Localisation de la région à l'étude

2

DESCRIPTION DE L'AQUIFÈRE ET DE LA RÉGION À L'ÉTUDE

La région à l'étude est bordée à l'est par la rivière Valin et à l'ouest par le dépôt d'argile sur lequel se situe le village de Saint-Honoré (figure 2.1). La portion de l'aquifère considérée dans ce rapport fait intégralement partie du bassin versant de la rivière Caribou, un affluent de la rivière Saguenay. Ce chapitre décrit les informations utilisées pour la réalisation de ce rapport, ainsi que les éléments pertinents du territoire à l'étude, notamment la géologie, la vulnérabilité de l'aquifère, et l'utilisation du territoire au-dessus de l'aquifère. Des outils d'analyse géomatiques comme le logiciel *MapInfo Professionnal version 6.5* (MapInfo, 2001), *Vertical Mapper version 3.0* (NTI et MML, 2001) et *Discover version 4.02* (Encom, 2001) ont été utilisés pour générer les modèles numériques de terrain et les sections stratigraphiques, et pour effectuer diverses opérations lors de l'élaboration du modèle conceptuel de l'aquifère.

2.1 SOURCES D'INFORMATION

Diverses sources d'information ont été utilisées pour réaliser cette étude, soit : 1) des rapports cartographiques, 2) des rapports hydrogéologiques et

géotechniques, et 3) des données du programme de suivi de l'aquifère. Le programme de suivi de l'aquifère et les données qui en ont résulté sont décrits au chapitre 3. Nous décrivons ici seulement les deux premières catégories de sources d'information.

2.1.1 INFORMATIONS CARTOGRAPHIQUES

Les fichiers numériques incluant la topographie, le réseau routier et le réseau hydrographique nous ont été prêtés par la MRC du Fjord-du-Saguenay. La cartographie des dépôts meubles de Lasalle et Tremblay (1978; figure 2.1) a également constitué une source d'information très utile pour circonscrire le dépôt aquifère.

2.1.2 ÉTUDES HYDROGÉOLOGIQUES ET GÉOTECHNIQUES

Plusieurs campagnes de sondage ont été réalisées sur le territoire de l'aquifère, dont les données se retrouvent dans les rapports hydrogéologiques et géotechniques suivants: CIE (1976), STES (1977), Dion (1986), Hydrogéol-Sol (1999), Laboratoires SL (1995, 1999a, 1999b, 2000a, 2000b, 2003a, 2003b) ainsi que dans l'Annuaire de puits et forages (MENVIQ, 2001). La localisation de ces informations est représentée sur la figure 2.2, alors que l'annexe A contient des informations plus détaillées sur leurs coordonnées et leur provenance. La

nomenclature adoptée pour identifier les sondages est la suivante : PN pour les sondages hydrogéologiques de Mine Niobec, PSH pour les sondages hydrogéologiques de la municipalité de Saint-Honoré, PVS pour les sondages hydrogéologiques de Ville de Saguenay, D pour les sondages géotechniques de Dion et APF pour les puits répertoriés jadis dans l'Annuaire de puits et forages (MENVIQ, 2001). Par ailleurs, l'ensemble des piézomètres et des puits appartenant à Mine Niobec, à la municipalité de Saint-Honoré et à Ville de Saguenay a récemment fait l'objet d'un relevé d'arpentage (Laboratoires SL, com. pers.). Cette information a été utilisée lorsqu'elle était disponible.

2.2 GÉOLOGIE DU TERRITOIRE ET VULNÉRABILITÉ DE L'AQUIFÈRE

La structure que nous appelons l'aquifère de Saint-Honoré constitue un plateau sablonneux situé à l'intérieur des basses terres du Saguenay. La topographie du substratum rocheux et la stratigraphie des dépôts meubles ont été obtenues à partir de l'interprétation des données de forage contenues dans les rapports énumérés précédemment.

2.2.1 TOPOGRAPHIE

Dans la région à l'étude, la topographie de la surface des terrains et celle du substratum rocheux sont toutes deux légèrement inclinées vers le sud-ouest. La

topographie de surface (figure 2.3) présente un plateau raviné à l'est par la rivière Valin et se terminant au sud et au sud-ouest par un petit escarpement de forme circulaire qui constitue le talus du dépôt sablonneux. La dépression locale située directement au sud de l'aéroport est d'origine anthropique, il s'agit de sablières. Le modèle numérique du socle rocheux présente également une pente variable vers le sud-ouest (figure 2.4).

2.2.2 NATURE DU SOCLE ROCHEUX

Le socle rocheux affleure à certains endroits à l'intérieur du secteur à l'étude. Il est composé principalement de roches cristallines précambriennes, notamment de mangérite et d'anorthosite (Hébert et Lacoste, 1998). De plus, quelques forages carottés dans le substratum rocheux sous les dépôts aquifères, témoignent de sa nature cristalline (Laboratoires S.L., 2003a; MENVIQ, 2001). Du calcaire ordovicien en discordance sur le socle précambrien affleure dans la partie ouest et sud-ouest. Ce dernier est d'épaisseur variable et aucune information n'indique sa présence sous les dépôts. Par contre, il n'est pas impossible que du calcaire ait été préservé sous l'aquifère sablonneux à l'intérieur des dépressions du socle. Le réseau de fractures à travers le socle cristallin ou dans une éventuelle couverture de calcaire fissurée en discordance sur ce dernier est inconnu.

La topographie du fond rocheux sous le paléo delta présente les mêmes linéaments que montrent les collines avoisinantes où le couvert de dépôts meubles est mince ou absent, à savoir les orientations suivantes par ordre d'importance : NW-SE (ligne de talus sous le centre du secteur étudié), à peu près N-S (sous la vallée du lac Docteur et sous l'aéroport), et WNW-ESE (ligne de talus parallèle à l'axe du fjord du Saguenay sous le pied SSE du prodelta et auge sous le coin nord des pistes de l'aéroport). Les effets possibles de ces linéaments sur la circulation de l'eau souterraine dans le secteur étudié pourraient faire l'objet d'un projet complémentaire.

2.2.3 NATURE ET ARCHITECTURE INTERNE DES DÉPÔTS MEUBLES

L'aquifère de Saint-Honoré consiste en un plateau de sédiments deltaïques d'âge quaternaire qui repose sur le socle cristallin précambrien, soit directement ou sur une couche d'argile ou de till. En plan, le plateau sablonneux aquifère a une forme triangulaire et recouvre une superficie d'environ 42 km². Son épaisseur atteint au maximum 50 m localement. En examinant les sections stratigraphiques (figures 2.5, 2.6 et 2.7) localisées sur la figure 2.2, on constate une succession de faciès sédimentaires à granulométrie croissante vers le haut et vers le nord. En effet, l'argile de la mer Laflamme et les boues du prodelta en contact avec le socle sont surmontées par des dépôts plus sablonneux dans lesquels la granulométrie augmente de la base vers le sommet. L'aquifère de Saint-Honoré n'est donc pas

confiné par un horizon moins perméable en surface. L'information des sondages indique des variations latérales dans les dépôts sédimentaires compatibles avec la morphologie d'un dépôt deltaïque. Les sections stratigraphiques utilisent les données des forages qui sont situés à l'intérieur d'une zone tampon d'une largeur de 150 mètres; les projections qui en résultent peuvent causer des artefacts portant à confusion. Par exemple, le sommet de la ligne représentant le forage APF-13 (figure 2.6) n'apparaît pas situé à la surface du terrain; la base de la ligne du forage PN-1 est correctement représentée comme reposant sur le roc sur la section BB' (figure 2.6), alors qu'elle laisse croire à un carottage du roc sur la section DD' (figure 2.7).

2.2.4 MODÈLE GÉNÉTIQUE DE MISE EN PLACE DES DÉPÔTS MEUBLES

La dernière avancée glaciaire qui a affecté la région étudiée est la réavance, « Valders » survenue il y a environ 11 800 années ^{14}C . Le glacier actif a alors déposé une moraine de fond (généralement imperméable ou presque) qui peut être surmontée d'une moraine d'ablation (généralement très perméable) lors de la fonte du dit glacier (Denis W. Roy, communication personnelle, 2005). Cette fonte date d'environ 11 650 années ^{14}C à Bagotville selon Lasalle et Tremblay (1978) et probablement de peu après au site d'étude. Suite au retrait du glacier, un delta fluvio-glaciaire a été formé à l'embouchure d'une rivière venant du nord, et se déversant vers le sud (probablement la rivière Valin), dans la mer Laflamme alors

en régression (figure 2.8). La mer Laflamme atteignait alors un niveau équivalent à 160-165 m d'altitude actuelle dans le haut Saguenay. La régression de la mer Laflamme a été rapide et son niveau baissait à environ 120 m il y a 7 000 années ^{14}C . C'est ainsi que les dépôts sablonneux du front deltaïque ont surmonté les argiles de la mer Laflamme et les boues du prodelta. L'abondance de dépôts sablonneux dans le delta s'explique par un taux de sédimentation local très supérieur à celui des dépôts d'argile marine. Les variations latérales s'expliquent quant à elle, principalement par la présence ou l'absence à ces endroits de chenaux distributeurs de l'eau alimentant le delta.

2.2.5 VULNÉRABILITÉ DE L'AQUIFÈRE

L'aquifère de Saint-Honoré est un dépôt de sable et gravier deltaïque bien trié, ce qui lui confère une grande perméabilité. De plus, la topographie relativement plane du dépôt atténue le ruissellement en surface. Ces observations permettent de supposer que l'infiltration se produit facilement et efficacement à partir des précipitations. Une autre observation est l'absence d'un horizon imperméable, riche en argile et près de la surface, lequel pourrait agir en écran, protégeant l'aquifère de l'infiltration d'éventuel contaminant. De plus, la nappe d'eau souterraine est généralement située à faible profondeur et même subaffleurante en plusieurs endroits comme en témoignent les nombreuses

résurgences. La vulnérabilité de la nappe y est donc considérée comme élevée à très élevée (Laboratoire SL, 2000a).

2.3 UTILISATION DU TERRITOIRE

Une utilisation importante du territoire de l'aquifère de Saint-Honoré consiste en l'exploitation de l'aéroport de Saint-Honoré, aménagé dans la partie centre nord de l'aquifère. Le site de l'aéroport, anciennement à vocation militaire, sert et a servi à l'entreposage de carburant dans des réservoirs comme mentionné dans le rapport des Laboratoires SL (2000a). Aucune fuite d'hydrocarbure sur le site n'a été portée à notre connaissance à ce jour. Des produits dégraçants à base d'urée ont été utilisés pour l'entretien des pistes durant les périodes hivernales pendant un peu plus de vingt ans (Ministère des Transports, com. pers.). Ces produits dégraçants peuvent être considérés comme une source potentielle de contamination en azote.

Le village de Saint-Honoré, qui n'est pas directement situé sur le bassin d'alimentation de l'aquifère, possède un réseau d'égout municipal dont l'étendue est limitée au village même. Ainsi, la population résidant directement sur le territoire de l'aquifère utilise des installations septiques privées, lesquelles peuvent présenter des risques de contamination en cas de fuite. Les secteurs les plus à risque de se retrouver à l'intérieur de l'aire de captage des puits municipaux de

Saint-Honoré sont ceux en amont du chemin du Cap et en périphérie de l'aéroport. Quant au réseau d'aqueduc de la municipalité de Saint-Honoré, il s'étend au-delà du village proprement dit. En effet, il rejoint les secteurs du lac Mon Repos, du chemin du Cap, du chemin Des Ruisseaux et un segment de la route Martel (figure 2.9).

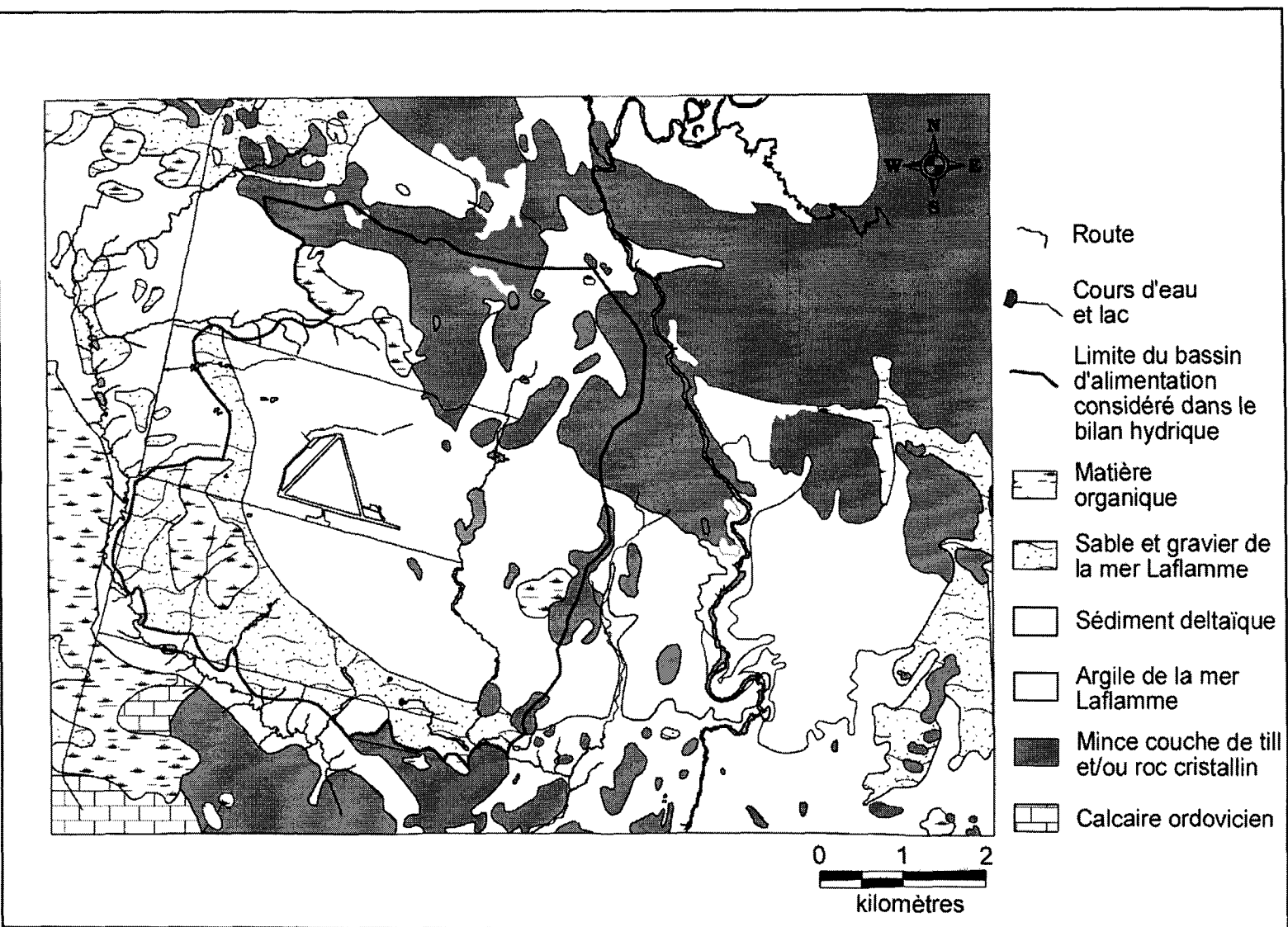
Tous les riverains du lac Docteur et de son affluent utilisent à la fois des puits et des installations septiques privées. Les mesures de flux de filtration qui ont été effectuées autour du lac Docteur et discutées au prochain chapitre, ont révélé que le lac se recharge à environ 75% à partir des apports d'eau souterraine, lesquels s'écoulent donc vers le lac. Ces informations suggèrent que le lac Docteur est un écosystème vulnérable, susceptible de recevoir en bonne partie l'engrais épandu, les fuites éventuelles des installations septiques, l'eau enrichie en nitrates provenant de leur champ d'épuration, ainsi que tout autre contaminant en provenance des riverains via les apports d'eau souterraine. En outre, les informations personnelles obtenues indiquent que l'installation septique de plusieurs riverains du lac Docteur est située en amont hydraulique de leur puits, ce qui favorise la contamination du puits.

Un cimetière localisé le long du chemin Volair doit être considéré comme présentant un risque de contamination pour les puits situés plus au sud (figure 2.9). Ce risque est accentué par le fait que la nappe d'eau est relativement peu

profonde à l'endroit du cimetière. Quant au cimetière du village de Saint-Honoré, il ne présente pas de risque de contamination de l'aquifère, considérant que son emplacement n'est pas sur l'aquifère et que l'écoulement de l'eau souterraine dans ce secteur n'est pas en direction de l'aquifère.

Un certain nombre d'autres types d'utilisation du territoire ont été portés à notre connaissance. Ainsi, un ancien dépotoir a été répertorié entre l'aéroport et l'école primaire de Saint-Honoré (figure 2.9). Les lots # 45 à 49, à l'est du lac Docteur, sont utilisés pour la culture du bleuet par *Bleuetière Saguenay*; nous ne disposons d'aucune information concernant l'utilisation de pesticides sur ces terrains ni ailleurs sur le territoire. Un secteur fortement agricole est situé au sud-ouest de l'aéroport de Saint-Honoré. De nombreuses sablières dont certaines sont en exploitation sont situées au sud des puits de Mine Niobec sur les lots # 57 à 68, entre le chemin Volair et le chemin des Ruisseaux. Un site de dépôt de matériaux secs et un champ de tir sont situés dans la partie sud de l'aquifère, à environ 500 à 750 mètres de la prise d'eau de surface du lac de l'Aqueduc (figure 2.9). Le reste du territoire, environ 60 %, est recouvert de végétation, notamment d'une forêt principalement composée de conifères.

Figure 2.1 - Carte des dépôts meubles selon Lasalle et Tremblay (1978)



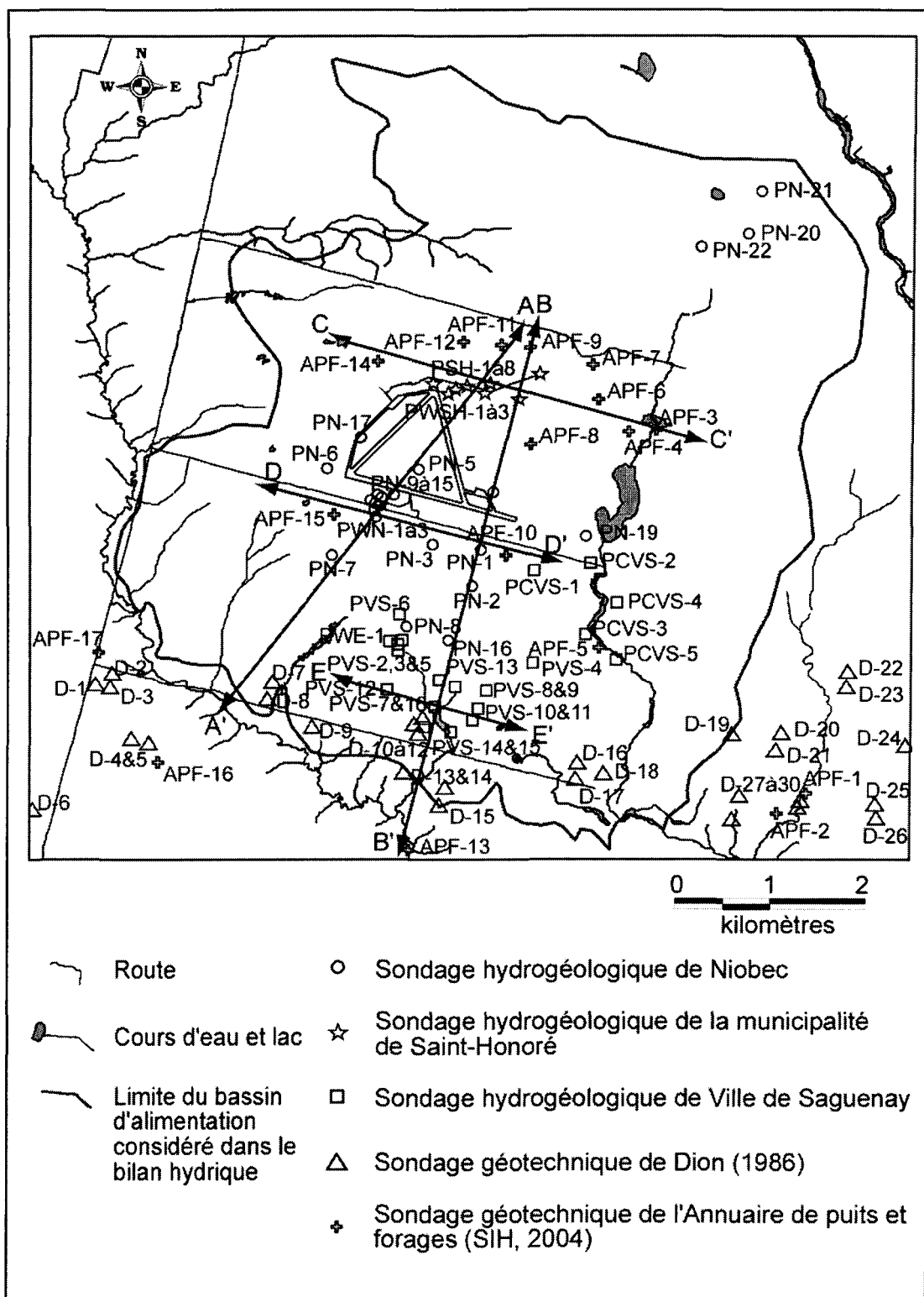


Figure 2.2- Sondages réalisés dans le cadre d'études géotechniques et hydrogéologiques

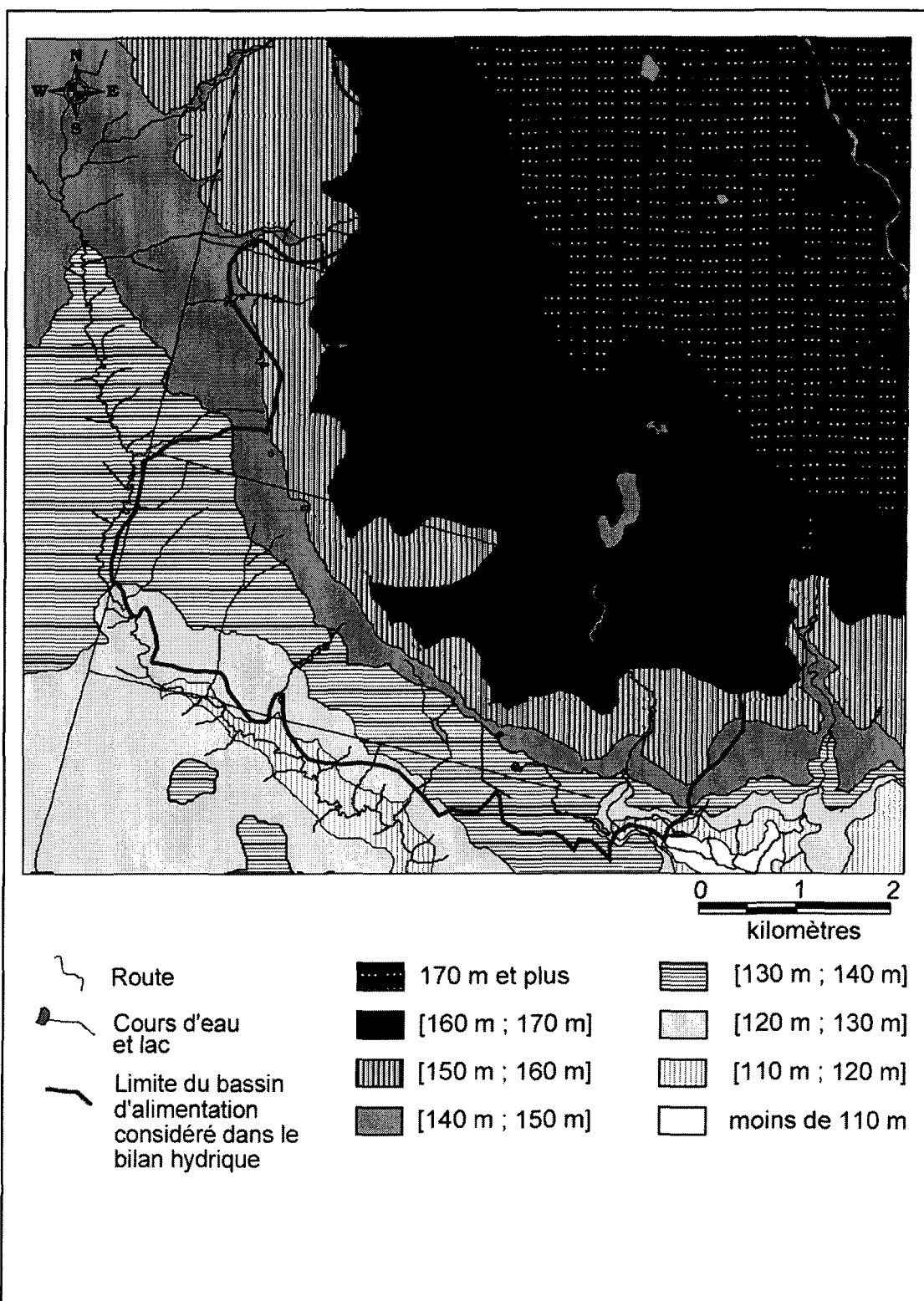


Figure 2.3- Modèle numérique de la topographie de surface

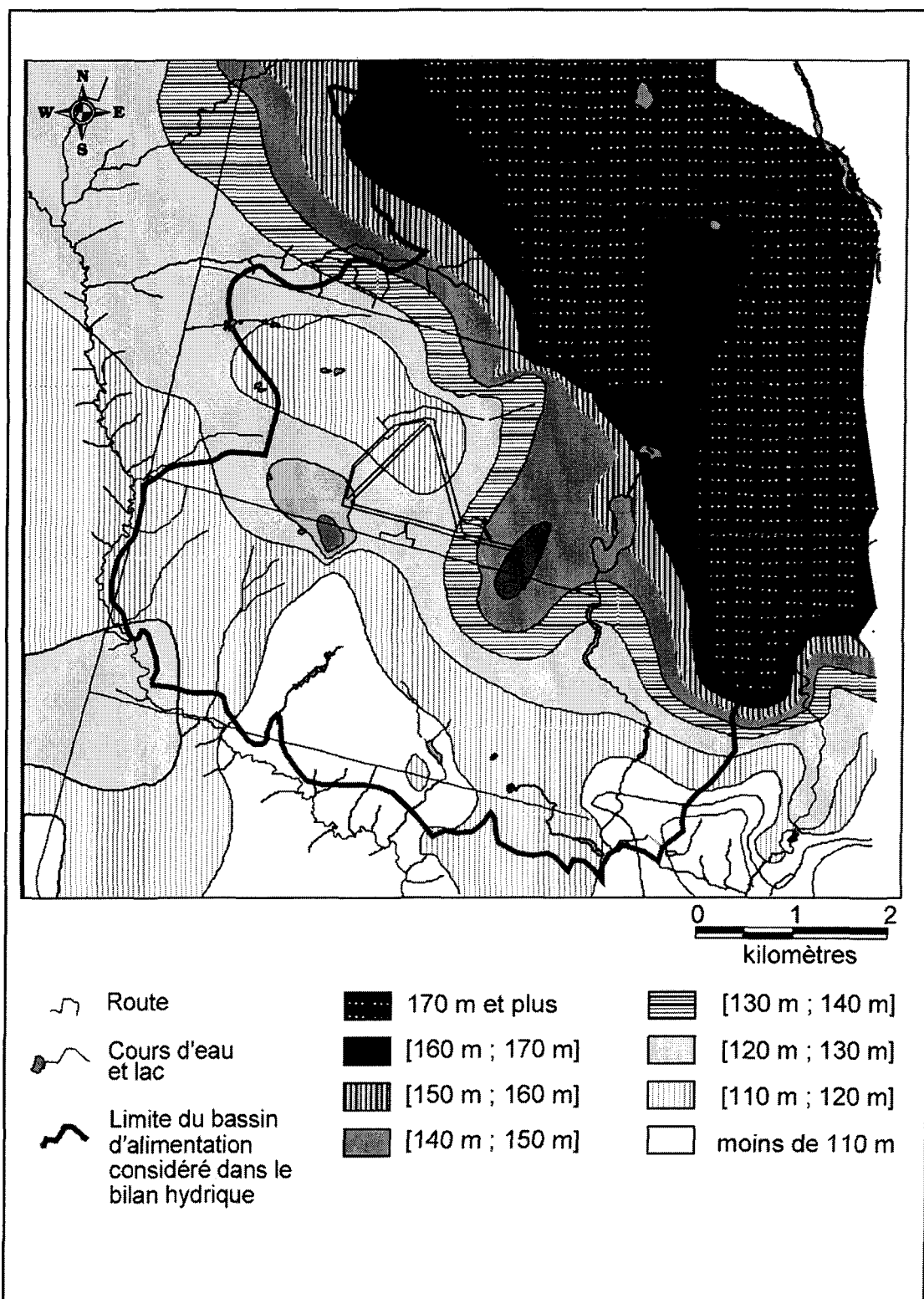


Figure 2.4- Modèle numérique de la topographie du socle rocheux

Figure 2.5- Section stratigraphique AA'

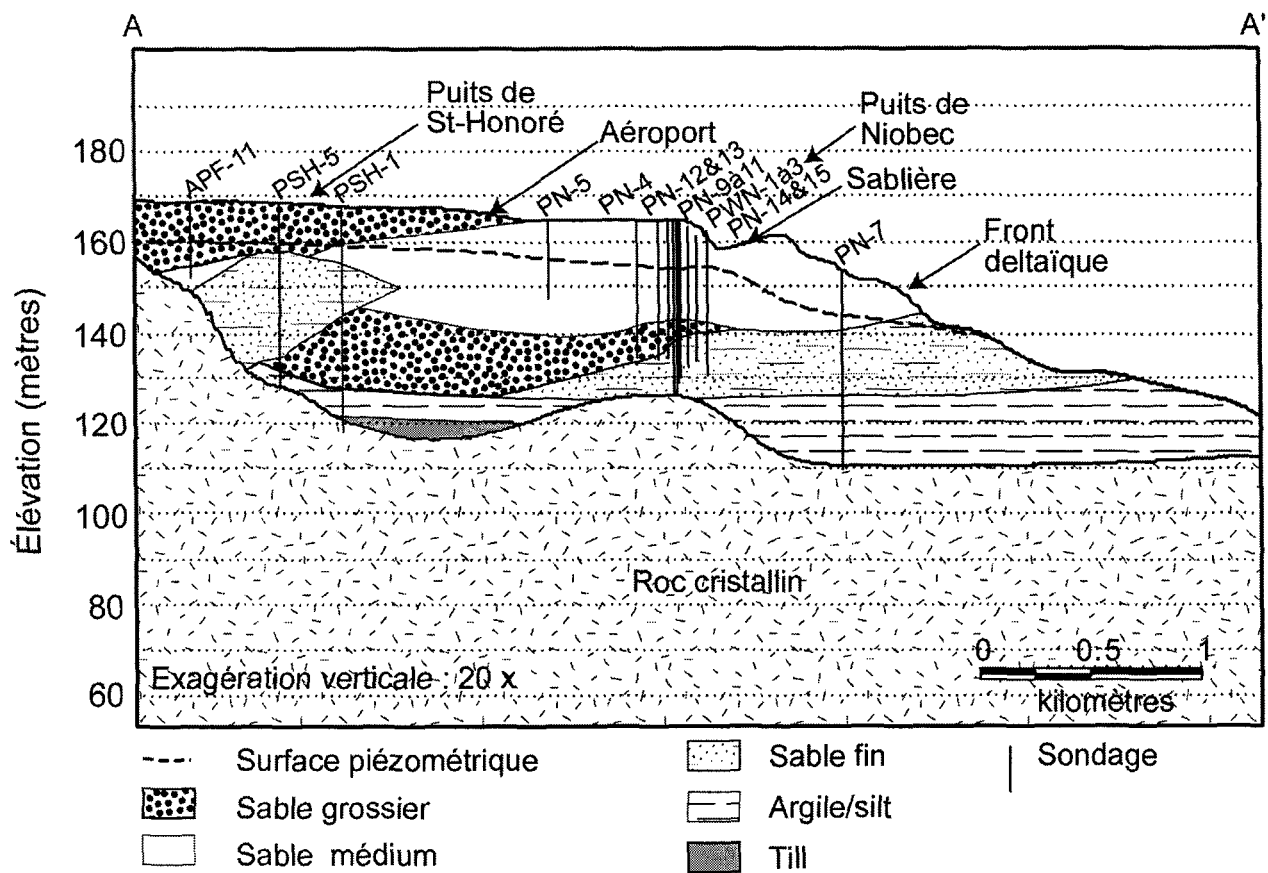
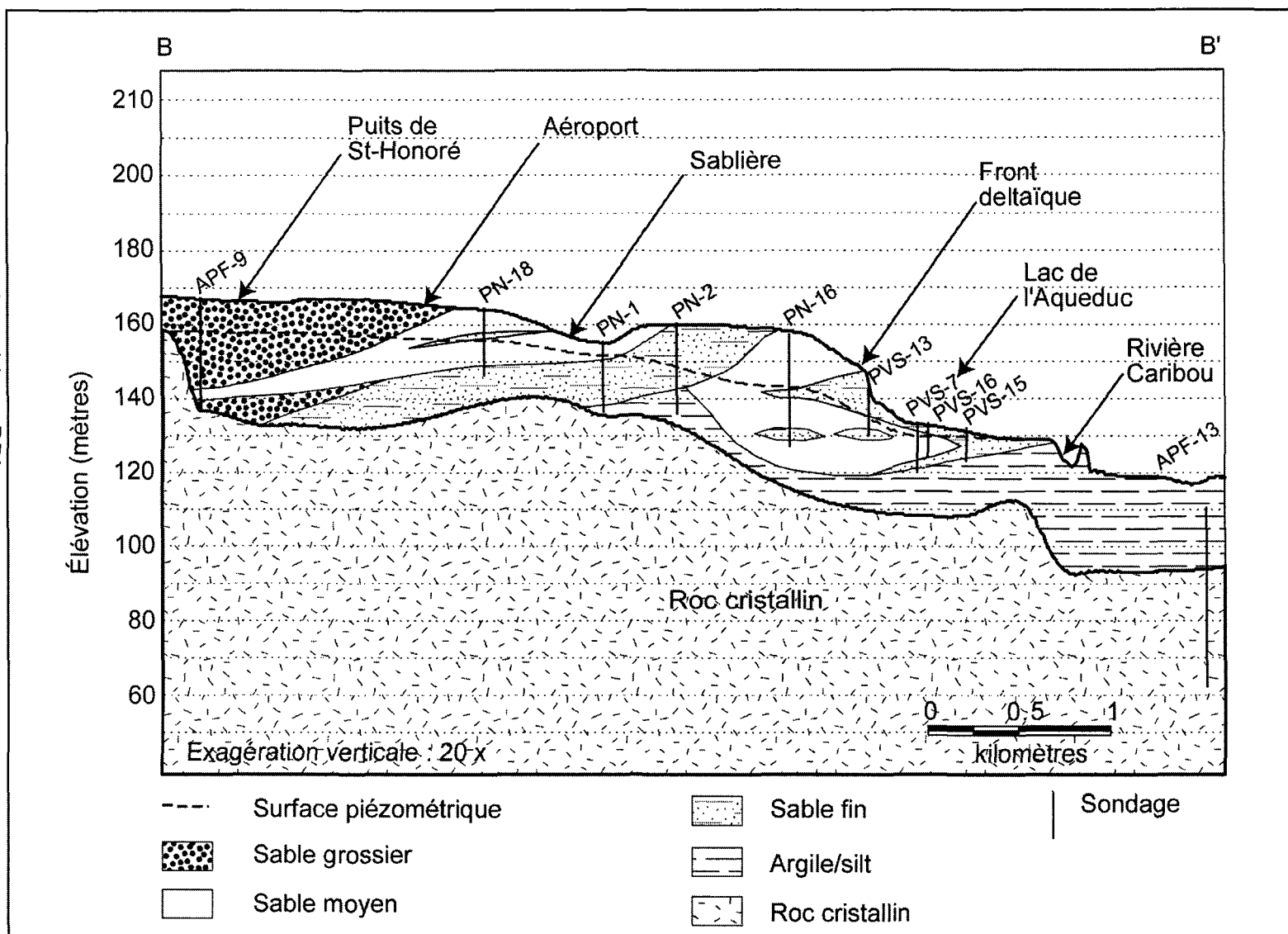


Figure 2.6- Section stratigraphique BB'



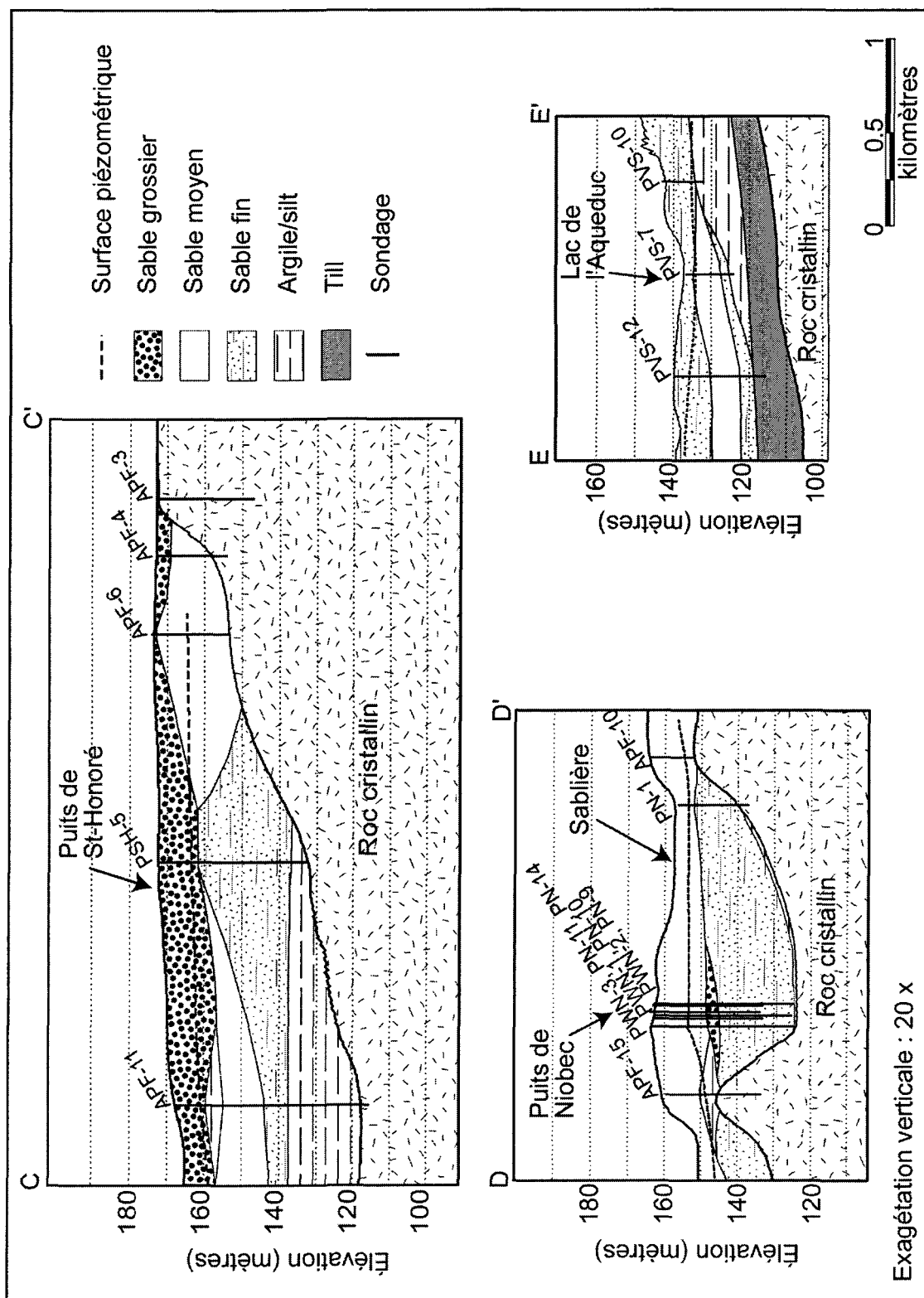


Figure 2.7- Section stratigraphique CC', DD' et EE'

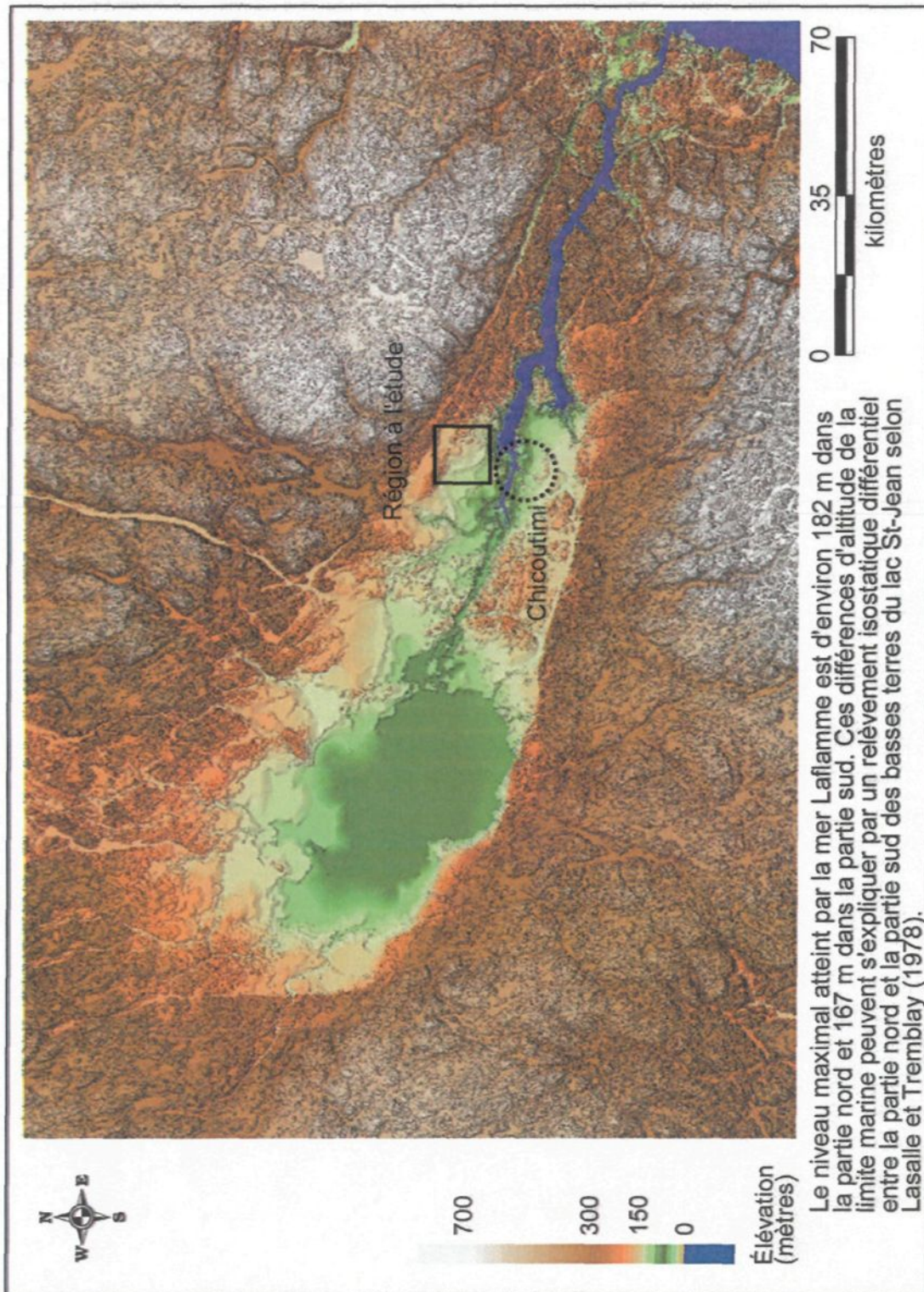


Figure 2.8- Modèle numérique de terrain de la région du Saguenay-Lac-Saint-Jean (gracieuseté du CERM, 2004)

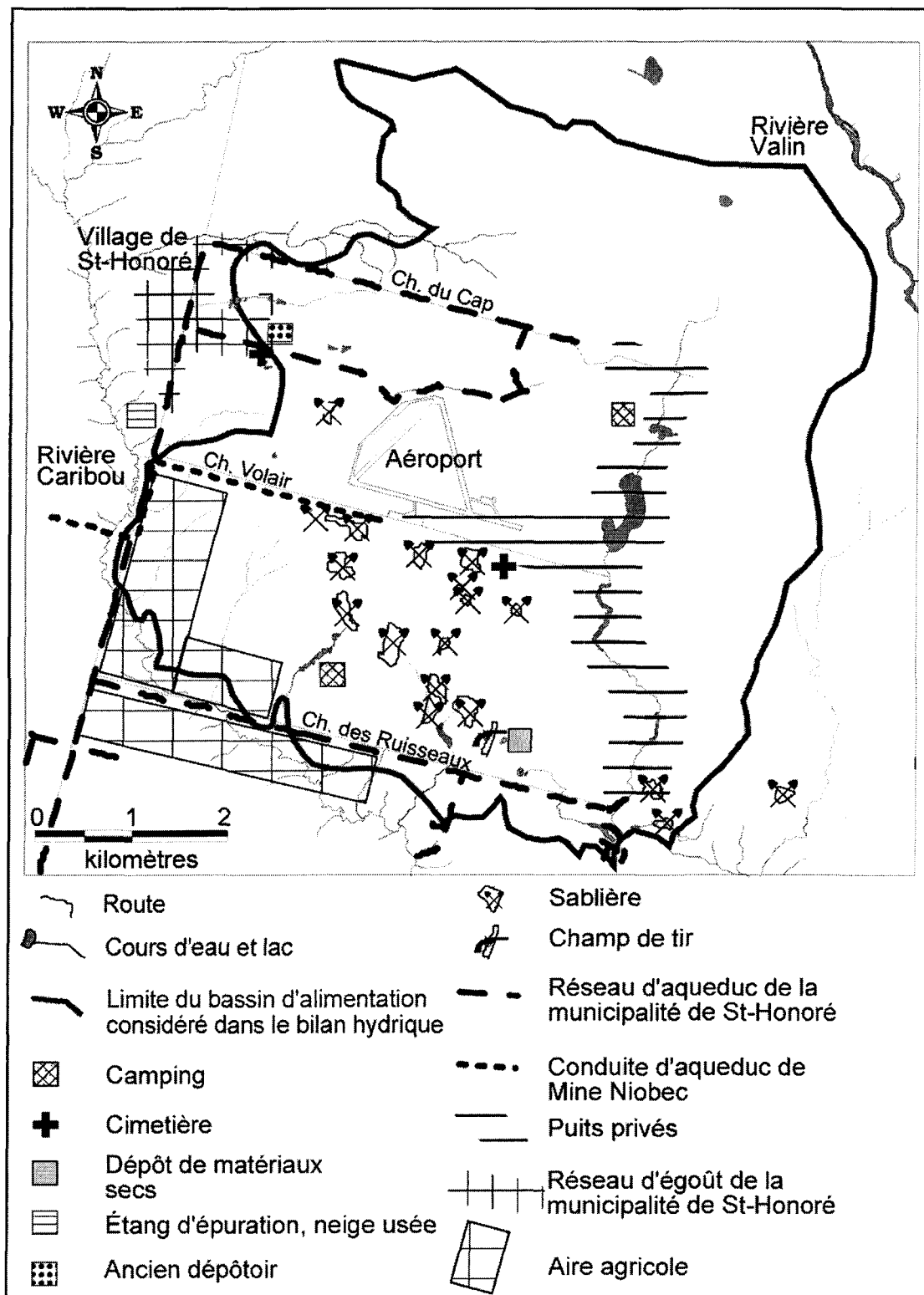


Figure 2.9- Utilisation du territoire et contamination potentielle

3

LEVÉS HYDROGÉOLOGIQUES RÉCENTS

Les levés hydrogéologiques récents consistent aux relevés qui ont été effectués depuis le 26 août 1999 dans le cadre de l'aménagement des premiers piézomètres et du puits PWN-1 appartenant à Mine Niobec. Les mesures considérées incluent donc celles effectuées le 9 mars 2000 suite à l'aménagement de nouveaux piézomètres et des deux puits filtrants PWN-2 et PWN-3, ainsi que les mesures effectuées en relation avec les essais de pompage de longue durée qui ont été réalisés du 9 au 16 mars 2000, puis du 24 juillet au 12 octobre 2000. Le programme de suivi du niveau d'eau de la nappe souterraine a débuté subséquemment.

3.1 LE PLAN DE SUIVI

Mine Niobec a assuré un suivi de l'aquifère d'une durée de trois ans qui a débuté en octobre 2001. Ce suivi de l'aquifère (figure 3.1) pour lequel la firme Les Laboratoires SL a été mandatée, a consisté en la mesure périodique du niveau d'eau dans dix-sept piézomètres (annexe B), du niveau d'eau de quatre lacs (annexe C), et du débit de cours d'eau à quatorze stations (annexe D). De plus afin

de mieux définir le secteur sur lequel s'appliquait le plan de suivi, quatre piézomètres additionnels ont été aménagés au cours de l'année 2003 (PN-19, PN-20, PN-21 et PN-22), lesquels ont été ajoutés au programme de suivi. Le nouveau forage aménagé à l'ouest du lac Docteur (PN-19) a été équipé de deux cellules piézométriques dont une est située au niveau du socle cristallin et l'autre à l'intérieur des dépôts meubles. Les trois autres nouveaux forages sont situés au nord du lac Joly, chacun étant équipé d'une cellule piézométrique (Laboratoires S.L., 2003a). Ce plan de suivi comprend aussi la surveillance de certains paramètres de la qualité de l'eau aux piézomètres PSH-5, PN-6, PN-13 et PN-18, soit le pH, l'azote nitrites-nitrates, les chlorures, le fer total et la dureté.

3.2 PIÉZOMÉTRIE

L'appareil utilisé pour la mesure du niveau d'eau à l'intérieur des piézomètres est une sonde à interface air-eau. Le niveau des lacs a été mesuré à l'aide d'un théodolite et d'un repère géodésique.

3.2.1 DIAGRAMMES D'ÉVOLUTION DU NIVEAU D'EAU

Les figures 3.2 à 3.8 présentent l'élévation en mètre du niveau d'eau dans chacun des piézomètres en fonction du temps. Le premier relevé du niveau d'eau utilisé pour la construction des diagrammes est celui du 26 août 1999 pour les

piézomètres où cette donnée est disponible (annexe B). Les figures 3.2 à 3.8 regroupent les piézomètres en fonction de leur distance par rapport aux puits de Mine Niobec ou par rapport à ceux de la municipalité de Saint-Honoré.

À l'endroit des piézomètres PN-9, PN-10 et PN-11, soit à une distance de 4 à 5 m des puits de Mine Niobec, on observe une baisse soutenue du niveau d'eau depuis la première mesure réalisée le 9 mars 2000 jusqu'au mois de juillet 2003 environ (figure 3.2). La baisse totale du niveau d'eau atteint environ 3.5 m en juillet 2003. Le niveau de la nappe à ces endroits est demeuré à peu près stable de juillet 2003 à mars 2004; il a ensuite remonté de 0.5 m au cours du printemps et de l'été 2004 pour atteindre l'élévation d'environ 152 m en août 2004.

Le niveau d'eau dans les piézomètres PN-12 et PN-13 (figure 3.3), respectivement à 55 et 54 m des puits de Mine Niobec, a aussi subi une baisse atteignant environ 3 m en juillet 2003. Une remontée du niveau d'eau s'est amorcée à la fonte des neiges de l'année 2004; cette remontée était de 0.75 m le 16 août 2004.

Les piézomètres PN-14 et PN-15, respectivement à 135 et 162 m des puits de Mine Niobec, ont d'abord présenté une baisse du niveau d'eau de 2.5 m, laquelle s'est maintenue de juillet 2003 à mars 2004, pour ensuite subir une remontée de 0.5 m d'avril à septembre 2004 (figure 3.4).

Les piézomètres PSH-3, PSH-5 et PSH-7 appartiennent à la municipalité de Saint-Honoré et ils sont situés respectivement à 23, 92 et 66 m des puits PWSH-3, PWSH-2 et PWSH-1. Le piézomètre PSH-3 est obstrué depuis la fin août 2002 à la profondeur de 8.32 m. Quant au piézomètre PSH-7, il a malencontreusement été confondu avec le piézomètre PSH-8 depuis le 9 mars 2003 par l'équipe de terrain du suivi. Une remontée de la nappe d'eau est observée au piézomètre PSH-3, durant la période du 26 août 1999 jusqu'à ce que l'obstruction du piézomètre survienne à la fin août 2002 (figure 3.5). Cette remontée pourrait vraisemblablement être causée par l'arrêt ou la diminution du débit de pompage dans le puits PWSH-3. En effet, Mine Niobec a diminué la quantité d'eau achetée de la municipalité de Saint-Honoré suite à la mise en exploitation de ses propres puits en 2000. Au plus bas, le niveau d'eau dans les piézomètres PSH-5 et PSH-7 a atteint une baisse d'environ 2 m vraisemblablement attribuable aux précipitations très faibles des années 2001-2002 et 2002-2003, et peut-être aussi à la mise en exploitation des puits de Mine Niobec. Ces mêmes piézomètres ont cependant affiché une hausse de niveau d'eau de 1 m entre mars et septembre 2004. Les puits de pompage de Mine Niobec sont situés à une distance variant de 1500 à 2000 m au sud des puits de la municipalité de Saint-Honoré (figure 3.1).

Les piézomètres PN-1, PN-6 et PN-18 sont situés respectivement à 1194, 646 et 1158 m des puits de Mine Niobec. Certaines des mesures effectuées dans

le piézomètre PN-18 sont douteuses (figure 3.6), mais une tendance générale ressort quand même de ce diagramme. L'évolution du niveau d'eau dans ces piézomètres affiche une baisse depuis mars 2000, atteignant approximativement 1 à 1.5 m en juillet 2003. Par contre, une augmentation d'environ 0.5 m est survenue entre mars et septembre 2004.

Les piézomètres PN-7, PN-8 et PN-16 sont situés respectivement à 741, 1363 et 1647 m des puits d'exploitation de Mine Niobec. Le piézomètre PN-7 ne semble que faiblement ressentir les effets de la mise en exploitation des puits de Mine Niobec (figure 3.7). En effet, il présente une baisse du niveau d'eau qui a atteint son maximum à 0.5 m à la fin de l'hiver 2003. Le niveau d'eau à cet endroit s'est maintenu par la suite, bien qu'il subisse les fluctuations saisonnières. En omettant les mesures erratiques, le niveau d'eau dans les piézomètres PN-8 et PN-16 est descendu d'un peu moins que 2 m depuis juillet 2000. Depuis juillet 2003 cependant, le niveau y est resté relativement stable et il affiche une remontée de 0.5 m entre mars et septembre 2004.

Le niveau d'eau au piézomètre PVS-7 situé près du lac de l'Aqueduc est stable à une élévation de 131 m (figure 3.8). Ce niveau est influencé par le lac de l'Aqueduc, lequel est maintenu à un niveau d'environ 131 m par le barrage appartenant à Ville de Saguenay.

En somme, une baisse de niveau d'eau plus ou moins concentrique a été observée suite à la mise en exploitation des puits de Mine Niobec. À la fin de l'hiver 2003, le rabattement à l'endroit des puits était de 3.5 m et il atteignait environ 1.5 m à 1500 m de distance des puits de Mine Niobec. L'atteinte d'un palier a ensuite été observée durant la période de juillet 2003 à mars 2004 dans la majorité des piézomètres faisant l'objet du suivi. Ensuite, une remontée généralisée du niveau d'eau a débuté au cours du printemps 2004 pour atteindre environ 0.5 m à la fin de la campagne de suivi en septembre 2004. Cette remontée est sans doute due aux abondantes précipitations reçues au cours du printemps et de l'été 2004.

Le niveau des lacs Pit-Tremblay, Docteur, Mon Repos et Jean-Paul Tremblay est demeuré constant depuis le début du suivi (figure 3.9 et annexe C). Cette constance est due au fait que le niveau de chacun de ces lacs est maintenu artificiellement à l'aide d'écluses.

3.2.2 CAPTEURS DE PRESSION EN CONTINU

Deux capteurs de pression en continu de marque *Levellogger* ont été installés dans les piézomètres PN-1 et PN-7, du début d'avril 2003 jusqu'en juillet 2004. Contrairement aux relevés manuels de niveau d'eau effectués périodiquement, ces capteurs de pression permettent d'enregistrer en continu les

fluctuations du niveau d'eau. La profondeur de la nappe d'eau depuis la surface des terrains est respectivement d'environ 3.5 mètres dans le piézomètre PN-1 et d'environ 10 mètres dans le piézomètre PN-7.

Les figures 3.10 et 3.11 combinent l'information provenant des relevés périodiques de niveau d'eau et celle enregistrée en continue. On y discerne les événements de recharge due à la fonte des neiges au printemps 2003 et au printemps 2004. Deux autres épisodes de remontée notable de la nappe d'eau sont identifiables au cours de l'année 2003. La première remontée s'est amorcée au début du mois d'août suite aux importantes précipitations reçues durant la deuxième moitié du mois de juillet 2003 et pendant tout le mois d'août 2003. La deuxième s'est produite au début du mois de novembre 2003 engendrée par les précipitations supérieures à la normale du mois d'octobre 2003. La fonte au printemps 2004 de l'accumulation de neige plus élevée que la normale hivernale a généré une importante remontée du niveau d'eau. Le territoire a bénéficié de précipitations près de la normale, ou supérieures à la normale, durant les mois de mai et juin 2004, résultant en une poursuite de la remontée du niveau d'eau durant l'été 2004.

3.2.3 CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

La carte piézométrique de la figure 3.12 présente les lignes d'isovaleur de l'élévation de la nappe phréatique (isopièzes) le 26 mai 2004. L'intervalle entre les lignes isopièzes est de 2 mètres. Cette carte a été construite par interpolation géostatistique à partir des données de niveau d'eau obtenues aux points de mesures constitués par les piézomètres PSH-5, PSH-8, PN-1, PN-4, PN-6, PN-7, PN-9, PN-10, PN-11, PN-12, PN-13, PN-14, PN-15, PN-16, PN-17, PN-18, PN-19, PN-20, PN-21, PN-22 et PVS-7, ainsi que par les lacs Docteur, Pit-Tremblay, Jean-Paul Tremblay et Mon Repos. En première approximation, nous considérons que l'aquifère de Saint-Honoré a une conductivité hydraulique isotrope. La direction d'écoulement des eaux souterraines dans un tel milieu est orthogonale aux lignes isopièzes.

La majeure partie de l'année, trois directions d'écoulement des eaux souterraines sont observées dans la moitié ouest de l'aquifère: soit vers le sud-ouest, vers le nord-ouest et vers l'ouest (figure 3.12), l'écoulement vers le sud-ouest étant prédominant. Les trois nouveaux piézomètres aménagés dans la partie nord-est de l'aquifère à l'intérieur de l'appendice de sable (PN-20, PN-21 et PN-22; figures 2.1 et 3.1) suggèrent une direction d'écoulement des eaux souterraines vers le sud-ouest; cette portion du territoire contribue donc à la recharge de la partie de l'aquifère considérée dans cette étude. Le piézomètre PN-19 aménagé

près du lac Docteur est équipé de deux cellules piézométriques, une à l'intérieur du sable et l'autre à l'intérieur du socle rocheux; les données provenant de ces deux cellules ne permettent pas d'identifier une composante verticale significative du gradient hydraulique à cet endroit.

3.3 DÉBIT DE COURS D'EAU

Le débit des cours d'eau a été mesuré à l'aide d'appareils de mesure de la vitesse de courant d'eau. Un premier appareil constitué d'une sonde électromagnétique a été utilisé durant la majeure partie du programme du suivi, soit de septembre 2001 à décembre 2003. Un problème d'équipement a forcé l'utilisation d'un deuxième appareil, constitué celui-ci d'un micromoulinet mécanique, de janvier à août 2004. La procédure suivie consiste en la prise de quatre à cinq mesures de vitesse de courant à travers une section transversale du cours d'eau. Le produit de la vitesse par l'aire de la section d'écoulement donne une estimation du débit du cours d'eau. Les figures 3.13 à 3.26 présentent l'évolution du débit des cours d'eau aux quatorze points de mesure au cours des trois années du suivi. Les données de mesure de débit sont présentées à l'annexe D.

3.4 FILTRATION AU LAC DOCTEUR

L'eau des plans d'eau de surface est constamment en relation étroite avec l'eau souterraine, ces deux réservoirs étant hydrauliquement connectés. Le lac Docteur, situé à l'est de l'aéroport de Saint-Honoré (figure 3.1), constitue le plan d'eau le plus important de l'aquifère, couvrant 0.17 km². Des mesures de flux de filtration ont été réalisées au lac Docteur afin d'évaluer l'interaction des eaux de ce lac avec les eaux souterraines de l'aquifère. Ces mesures de flux de filtration ont été réalisées le 7 juillet 2004 à six stations situées sur les rives au pourtour du lac (figure 3.27).

Le flux de filtration a été mesuré à partir d'un mesureur de flux. La méthode consiste à insérer l'extrémité tronquée d'un baril à travers le lit des sédiments d'un lac. On mesure ensuite le temps qu'a pris un certain volume d'eau pour entrée ou sortir du sac qui est connecté au baril (Lee et Cherry, 1978).

Le flux de filtration s'est avéré entrant dans le lac à chacune des six stations de mesure. La magnitude du flux varie cependant d'un endroit à l'autre: la valeur maximale de 1.3×10^{-2} m/h a été obtenue dans la partie nord-est du lac, alors que la valeur minimale de 1.0×10^{-3} m/h a été mesurée dans la partie sud du lac. Il appert donc que le lac Docteur était alimenté à cette date par l'eau souterraine sur toute sa superficie tel que schématisé par la figure 3.28. Cette alimentation était environ

dix fois plus importante dans la partie est et nord-est du lac que dans sa partie sud. Les précipitations nettement supérieures à la normale reçues durant le mois de juin 2004 ont possiblement contribué à cette situation.

Un corollaire de cette alimentation du lac Docteur par les eaux souterraines sur tout son pourtour est que l'on doit présumer la présence d'une ligne de partage des eaux souterraines quelque part entre le lac Docteur et l'aéroport, du moins lors de la réalisation des mesures en juillet 2004. Cette ligne de partage local des eaux souterraines n'est pas discernable sur la carte piézométrique de la figure 3.12, à cause de la faible résolution de cette carte.

L'hypothèse d'une importante alimentation du lac Docteur par les eaux souterraines, exprimée plus haut, est supportée par les données de débit de cours d'eau. En effet, le débit mesuré au ruisseau Tremblay, à l'entrée du lac Docteur, a représenté environ 25, 36 et 92% de la valeur du débit mesuré à la sortie du lac au cours des trois années de suivi, respectivement de septembre 2001 à août 2002, de septembre 2002 à août 2003 et de septembre 2003 à août 2004.

3.5 ANALYSES CHIMIQUES

La surveillance de certains paramètres de la qualité des eaux souterraines a fait partie du programme de suivi de l'aquifère. Des échantillons d'eau ont été

prélevés trimestriellement dans les piézomètres PN-6, PN-13, PN-18 et PSH-5 (figure 3.1). Les analyses ont été réalisées par le laboratoire *Éco-Santé* pour les paramètres suivants : le pH, l'azote (nitrites-nitrates), les chlorures, le fer total et la dureté.

Les résultats des analyses chimiques indiquent des valeurs moyennes de pH légèrement basique, variant entre 7.9 et 8.7 (tableau 3.1). Parmi les explications de ces valeurs relativement élevées, on peut invoquer la possibilité qu'une fraction des dépôts meubles constituant l'aquifère provienne de roche calcaireuse, ou encore que des lambeaux de roche calcaireuse se retrouvent préservés sous les dépôts aquifères. Cette deuxième possibilité est suggérée par la présence de quelques affleurements de calcaire paléozoïque qui ont résisté à l'érosion à l'intérieur de la région à l'étude (figure 2.1). Une eau en équilibre dans un environnement calcaire présente une valeur de pH d'environ 8.3 (Behra *et al.*, 1994), ce qui cadre bien avec les valeurs moyennes de pH de l'eau des piézomètres PN-6, PN-13, PN-18 et PSH-5.

La valeur moyenne des teneurs en azote (nitrites-nitrates) de l'eau des piézomètres échantillonnés varie entre 0.20 et 1.16 mg/L (tableau 3.2). L'eau des piézomètres PN-6 et PN-13 montre généralement les teneurs les plus élevées. Les valeurs moyennes des teneurs en chlorure sont d'environ 2.3 mg/L pour l'eau de tous les piézomètres (tableau 3.3). Quant aux teneurs en fer, elles se trouvent

généralement en deçà de la limite de détection de la méthode d'analyse, soit moins de 0.02 mg/L (tableau 3.4). La dureté quant à elle présente des valeurs moyennes variant entre 40 et 58 mg/L (tableau 3.5).

Tableau 3.1- pH de l'eau des piézomètres échantillonnés

Date	PH			
	PSH-5	PN-6	PN-13	PN-18
3 juillet 2001	--	--	8.37	8.19
15 octobre 2001	7.33	8.2	8.26	8.12
4 février 2002	8.17	8.0	7.96	8.66
11 juin 2002	8.6	8.5	8.4	8.1
24 octobre 2002	7.9	8.7	8.4	8.7
18 mars 2003	8.1	--	8.4	8.5
26 juin 2003	7.9	8.0	8.4	8.0
18 juin 2004	7.88	8.75	8.72	8.44
Moyenne	8.0	8.4	8.4	8.3

- Norme à respecter selon le règlement sur la qualité de l'eau potable: entre 6.5 et 8.5 unités pH

- Concentration d'ordre esthétique recommandée par Santé Canada: entre 6.5 et 8.5 unités pH

Tableau 3.2- Teneur en azote (nitrites-nitrates) de l'eau des piézomètres échantillonnés

Date	Concentration en azote nitrites-nitrates (mg/L)			
	PSH-5	PN-6	PN-13	PN-18
3 juillet 2001	--	--	0.15	0.24
15 octobre 2001	0.47	0.79	0.81	0.06
4 février 2002	< 0.05	1.60	0.10	0.08
11 juin 2002	0.87	1.90	0.12	0.06
24 octobre 2002	0.22	0.69	0.13	0.91
18 mars 2003	0.66	--	1.10	0.10
26 juin 2003	0.15	1.1	1.7	0.1
18 juin 2004	0.41	0.88	1.1	< 0.05
Moyenne	0.40	1.16	0.65	0.20

- Norme à respecter selon le règlement sur la qualité de l'eau potable: 10 (exprimée en N)

- Concentration maximale acceptable recommandée par Santé Canada: 45 mg/L

Tableau 3.3- Teneur en chlorure de l'eau des piézomètres échantillonnés

Date	Concentration en chlorure (mg/L)			
	PSH-5	PN-6	PN-13	PN-18
3 juillet 2001	--	--	2.9	0.32
15 octobre 2001	2.7	2.4	2.4	2.0
4 février 2002	2.5	2.9	2.2	6.9
11 juin 2002	5.1	4.2	2.6	4.8
24 octobre 2002	1.6	2.3	1.8	0.49
18 mars 2003	0.56	--	0.45	0.54
26 juin 2003	2.4	0.32	2.7	0.43
18 juin 2004	--	--	--	--
Moyenne	2.48	2.42	2.15	2.21

- Norme à respecter selon le règlement sur la qualité de l'eau potable: non réglementée

- Concentration d'ordre esthétique recommandée par Santé Canada: ≤ 250 mg/L

Tableau 3.4- Teneur en fer total de l'eau des piézomètres échantillonnés

Date	Concentration en fer total (mg/L)			
	PSH-5	PN-6	PN-13	PN-18
3 juillet 2001	--	--	< 0.01	< 0.01
15 octobre 2001	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
4 février 2002	0.11	< 0.02	< 0.02	0.06
11 juin 2002	< 0.02	< 0.02	< 0.02	< 0.02
24 octobre 2002	0.07	< 0.02	< 0.02	< 0.02
18 mars 2003	0.03	--	< 0.03	< 0.03
26 juin 2003	0.03	0.04	0.03	0.02
18 juin 2004	0.007	0.033	0.002	0.007
- Norme à respecter selon le règlement sur la qualité de l'eau potable: non réglementée				
- Concentration d'ordre esthétique recommandée par Santé Canada: ≤ 0.3 mg/L				

La valeur de tous les paramètres analysés est généralement en deçà de la concentration maximale acceptée par le Ministère de l'Environnement du Québec dans le *Règlement sur la qualité de l'eau potable* adopté le 30 mai 2001 (MENVIQ, 2004). Le pH fait exception, puisque la valeur de pH dépasse la valeur maximale acceptée de 8.5 pour un certain nombre d'échantillons prélevés dans chacun des quatre piézomètres considérés; la valeur la plus élevée, 8.75, est observée dans l'eau du piézomètre PN-6.

Tableau 3.5- Dureté de l'eau des piézomètres échantillonnés

Date	Dureté (mg/L)			
	PSH-5	PN-6	PN-13	PN-18
3 juillet 2001	--	--	--	--
15 octobre 2001	14	44	40	42
4 février 2002	36	58	46	46
11 juin 2002	37	60	37	93
24 octobre 2002	81	28	30	40
18 mars 2003	61	--	51	34
26 juin 2003	82	26	32	66
18 juin 2004	93	36	43	30
Moyenne	58	48	40	50

- Norme à respecter selon le règlement sur la qualité de l'eau potable: non réglementée
- Concentration d'ordre esthétique recommandée par Santé Canada: aucune recommandation

Au début du mois d'octobre 2002, deux campagnes d'échantillonnage et d'analyse des eaux de l'aquifère de Saint-Honoré ont été réalisées dans le cadre d'une activité d'enseignement de premier cycle en géochimie environnementale de l'UQAC. Cette activité réalisée à l'UQAC par des étudiants ne fait pas partie du programme de suivi par Mine Niobec. Les résultats des analyses sont quand même présentés à l'annexe E, ainsi qu'un certain nombre de commentaires qu'ils suggèrent.

Figure 3.1 - Localisation des piézomètres, des ruisseaux et des lacs faisant l'objet du programme de suivi

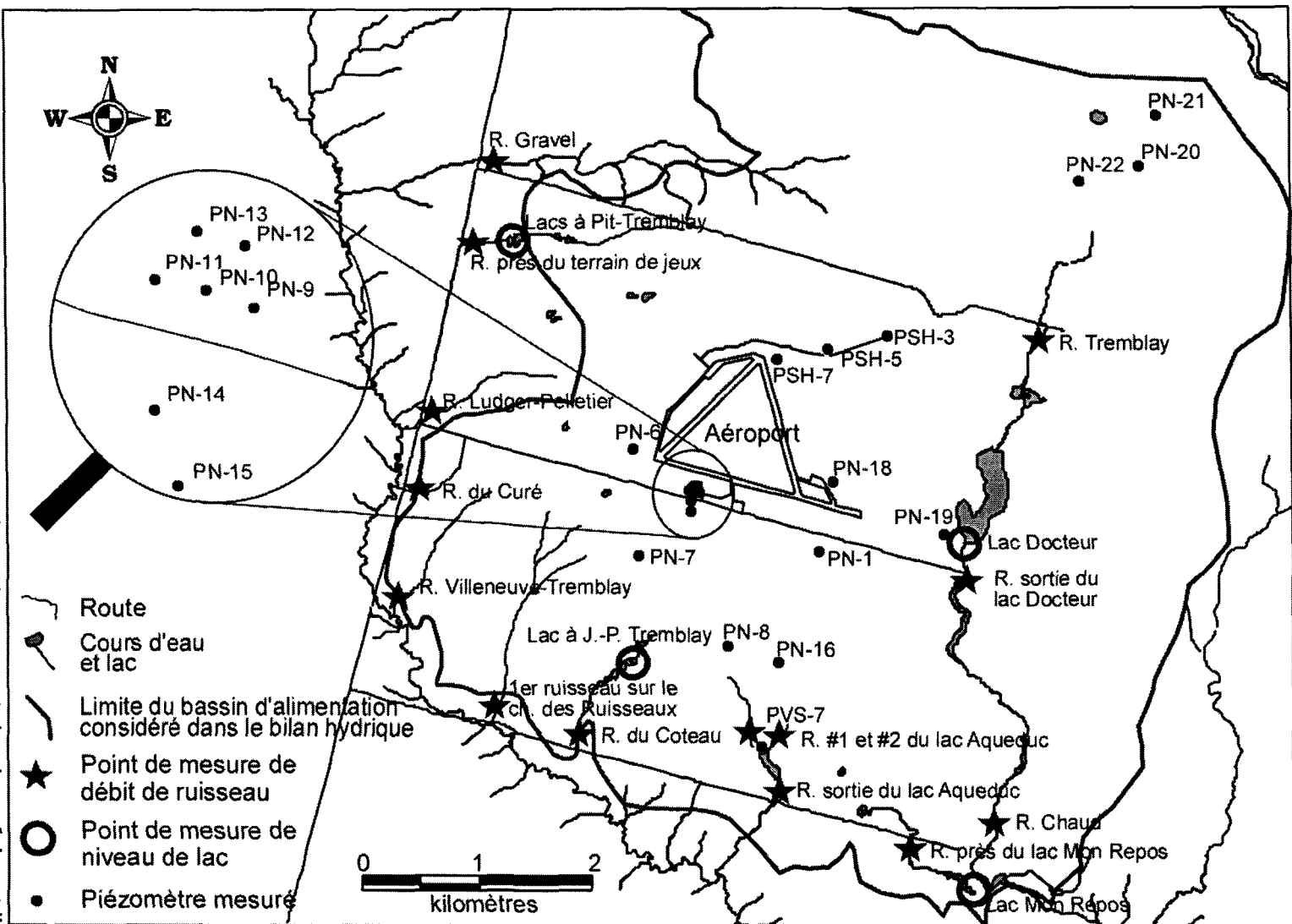


Figure 3.2- Élévation du niveau d'eau dans les piézomètres PN-9, PN-10 et PN-11

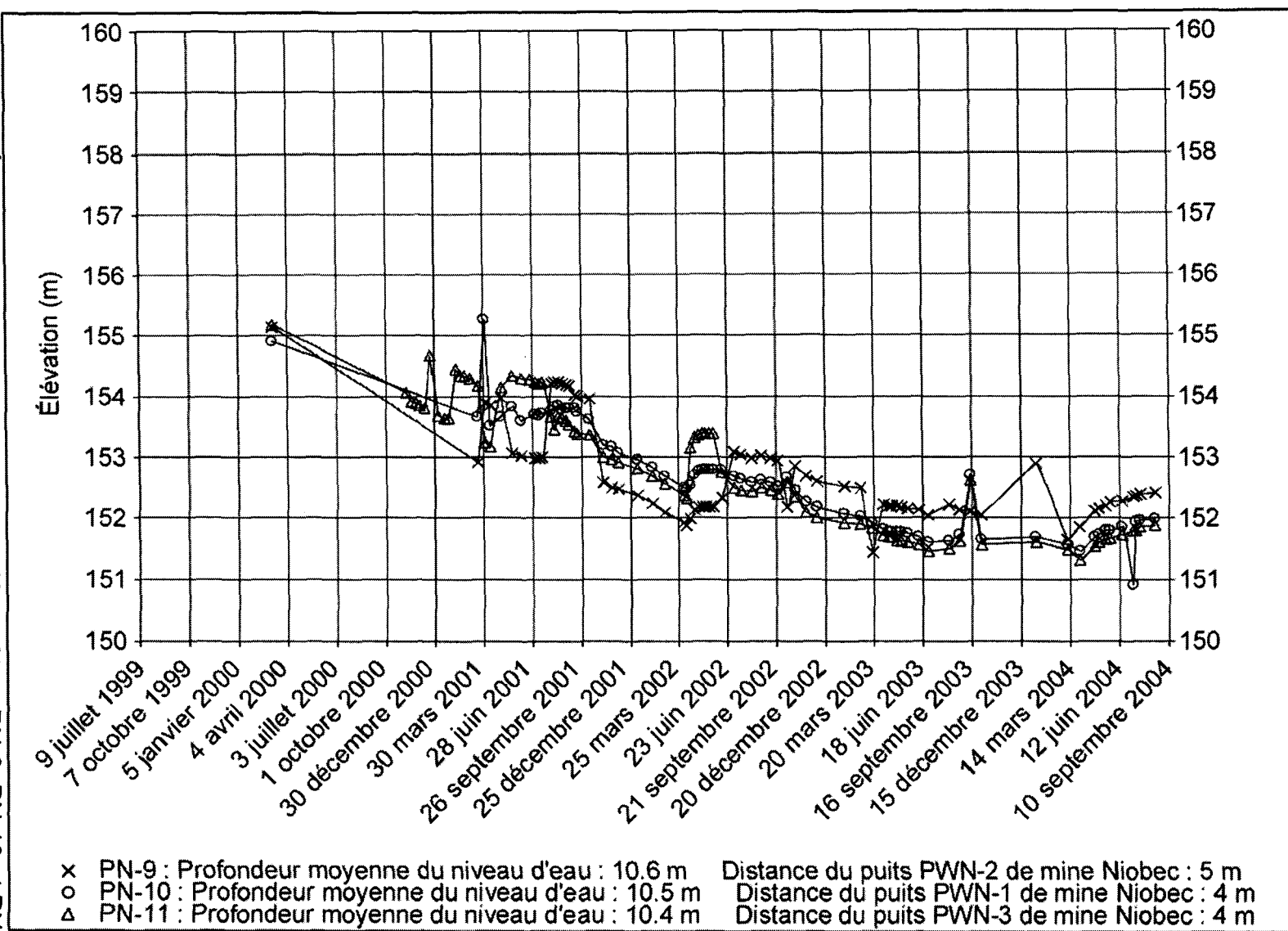


Figure 3.3- Élévation du niveau d'eau dans les piézomètres PN-12 et PN-13

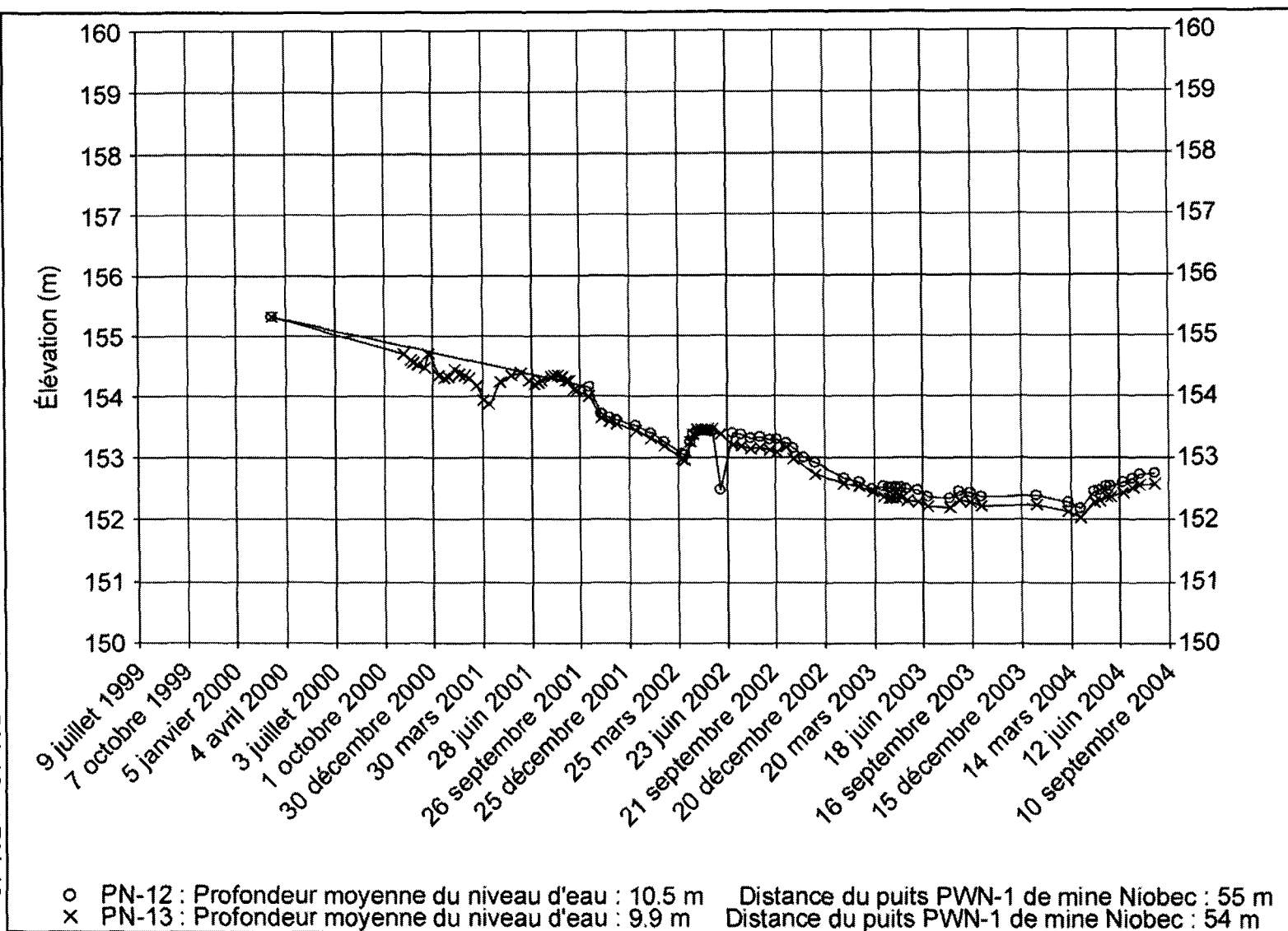


Figure 3.4- Élévation du niveau d'eau dans les piézomètres PN-14 et PN-15

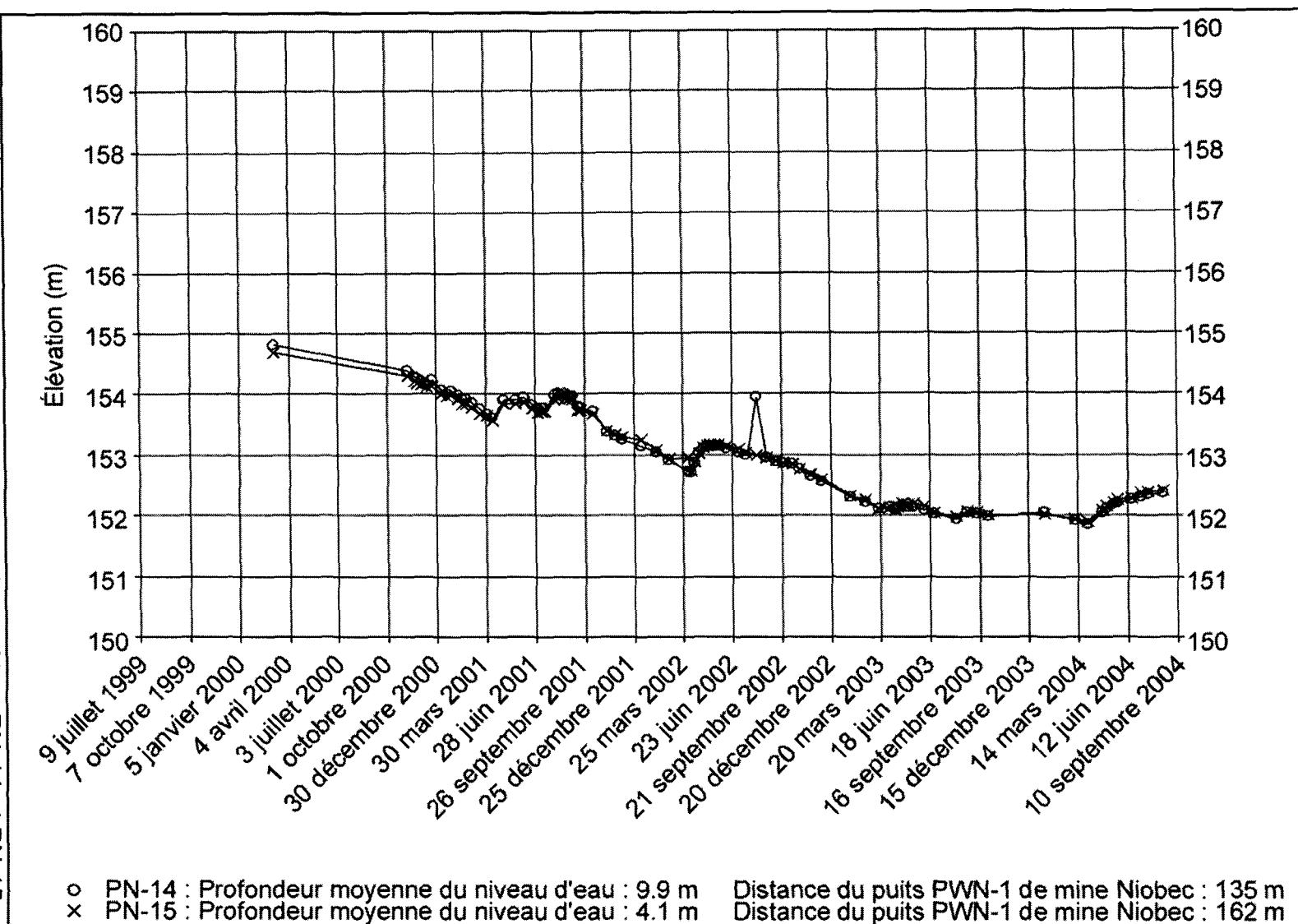


Figure 3.5- Élévation du niveau d'eau dans les piézomètres PSH-3, PSH-5 et PSH-7

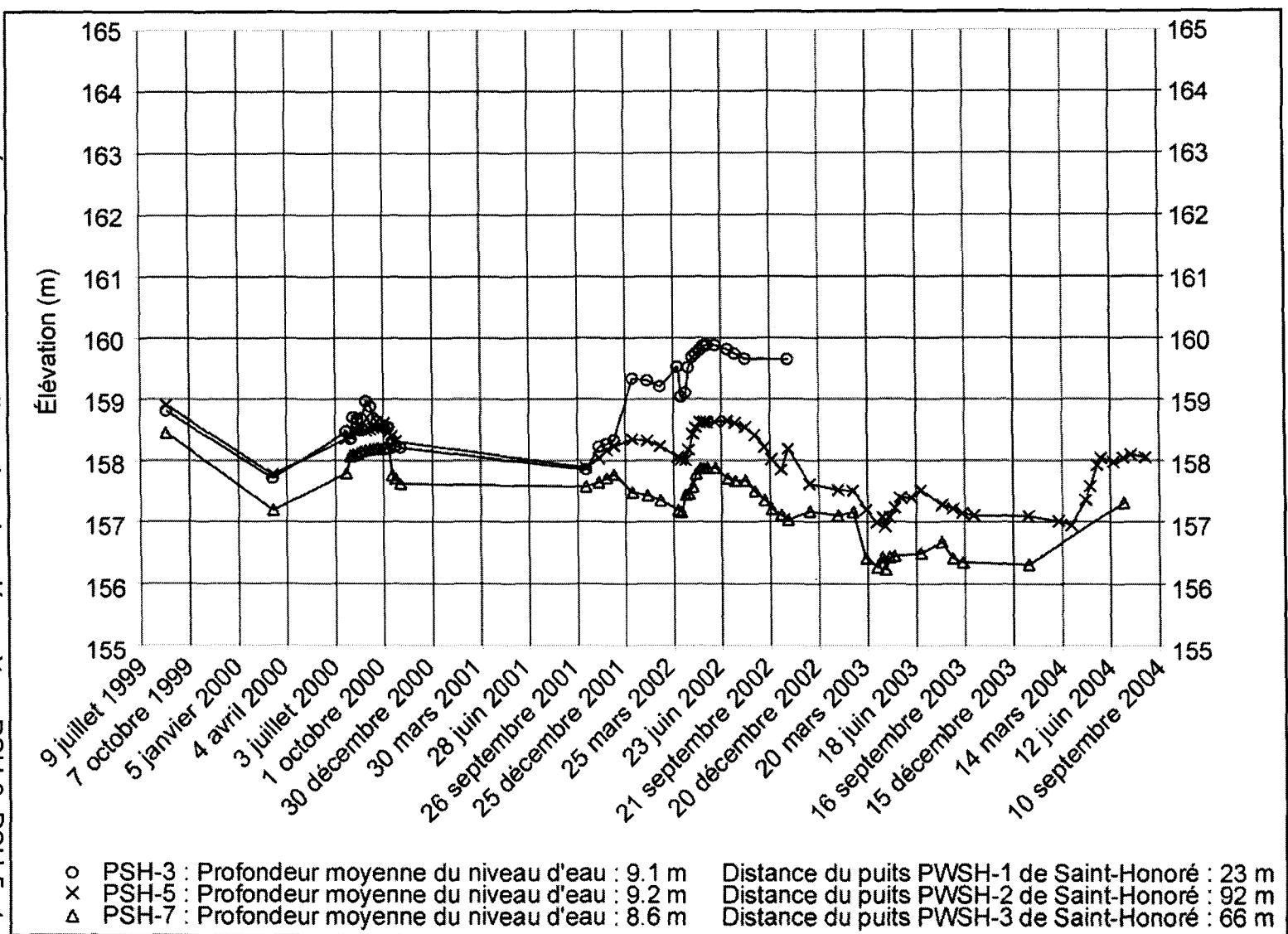


Figure 3.6- Élévation du niveau d'eau dans les piézomètres PN-1, PN-6 et PN-18

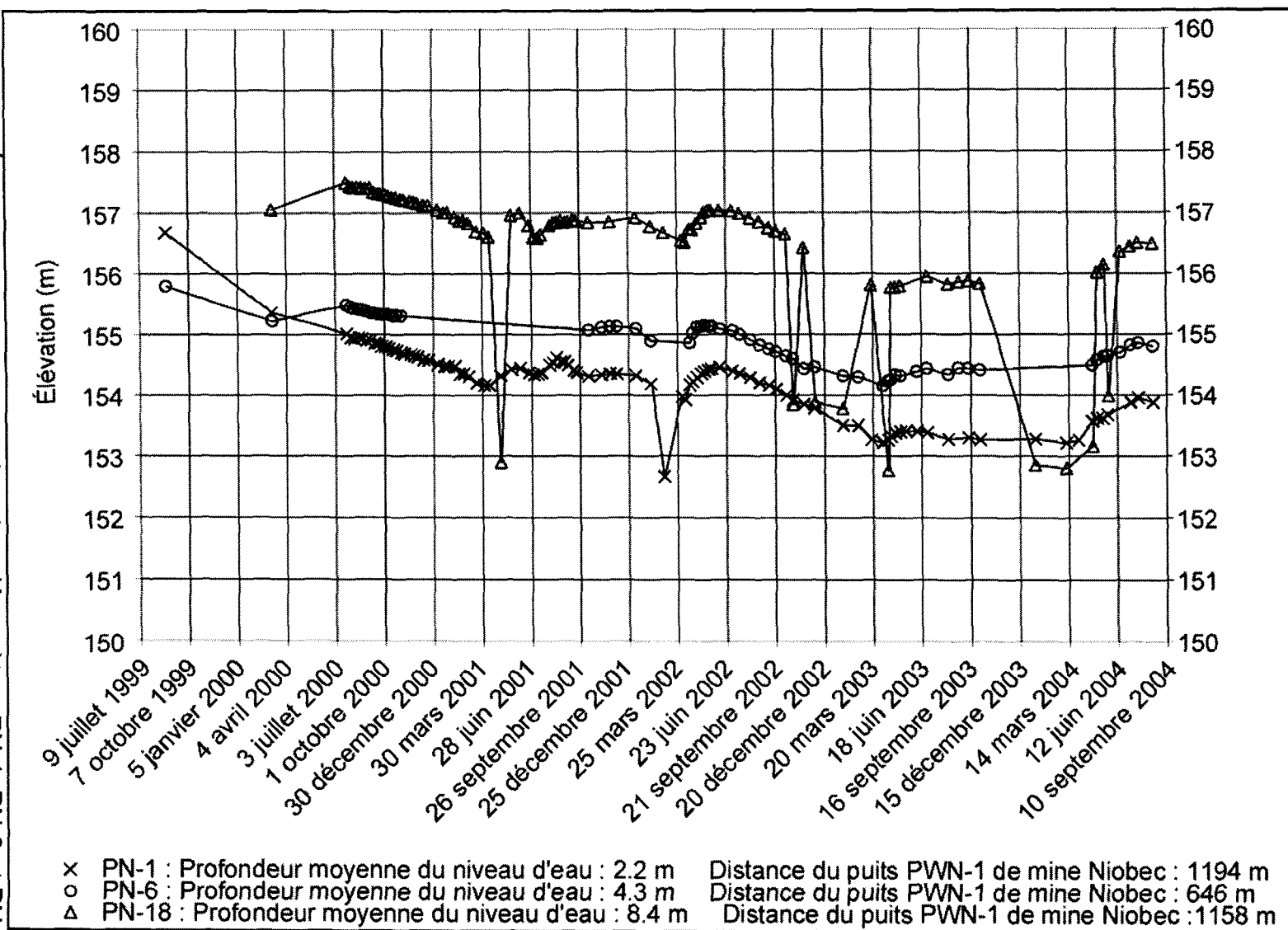


Figure 3.7- Élévation du niveau d'eau dans les piézomètres PN-7, PN-8 et PN-16

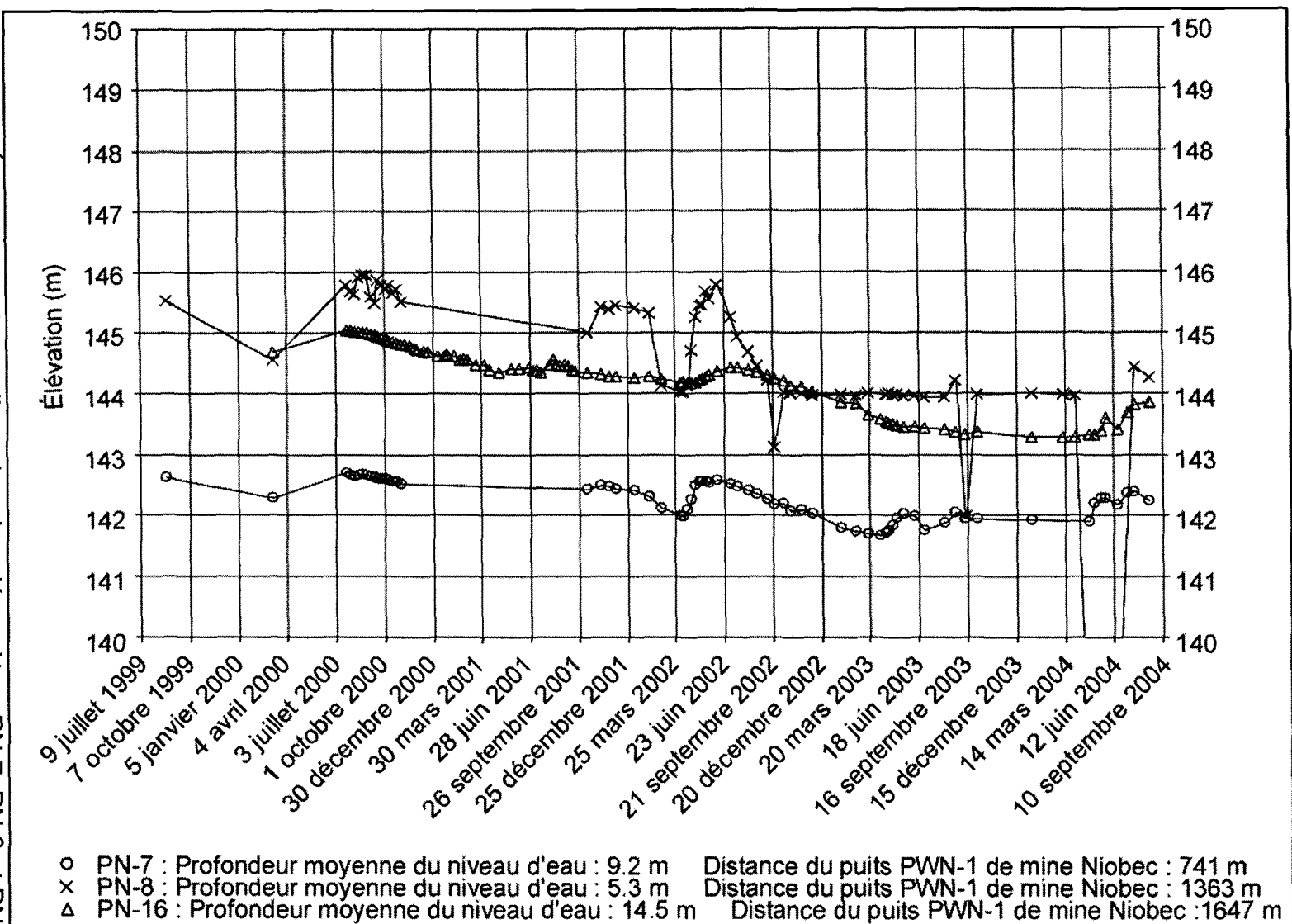


Figure 3.8- Élévation du niveau d'eau dans les piézomètres PVS-7

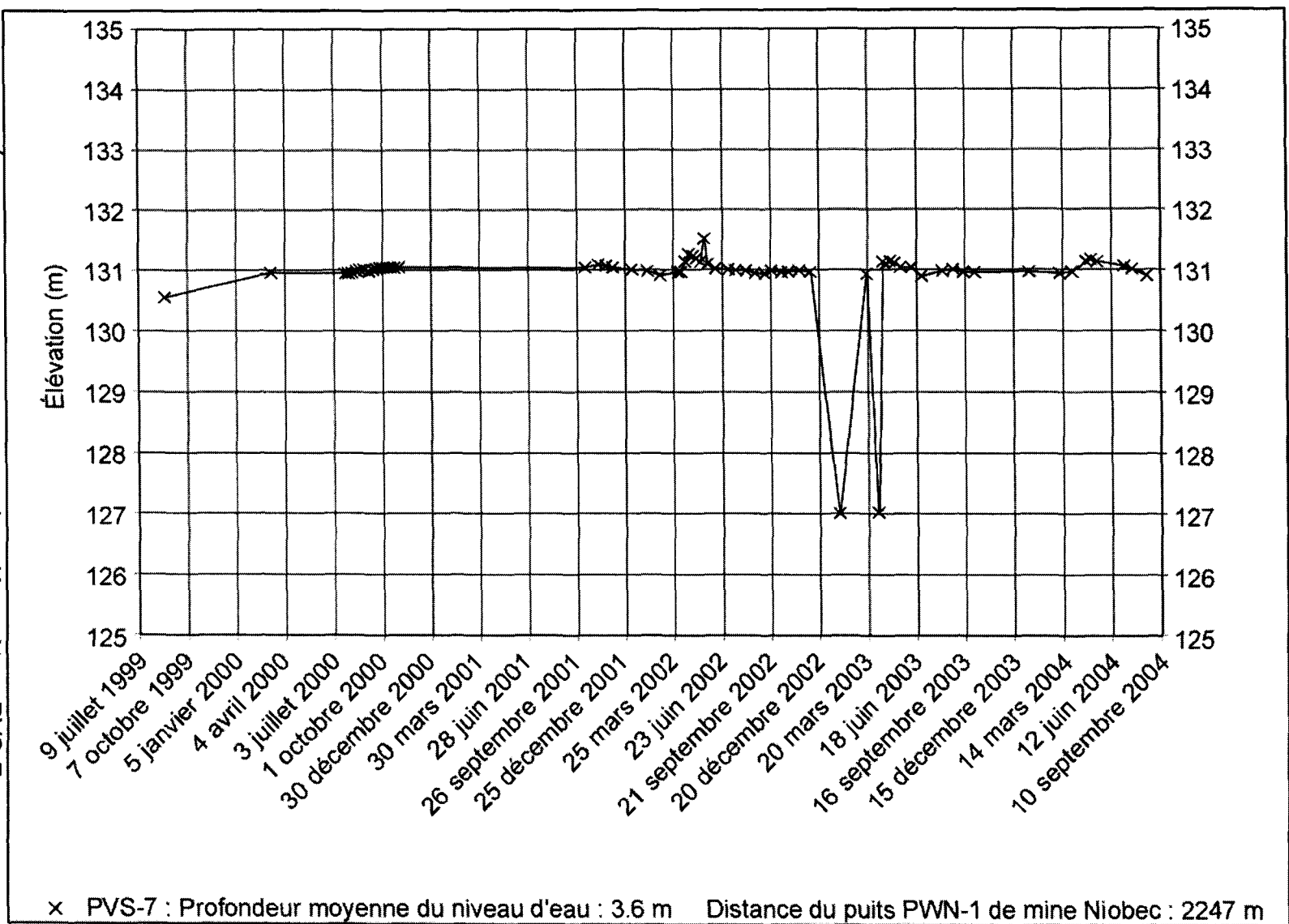


Figure 3.9- Élévation du niveau des lacs

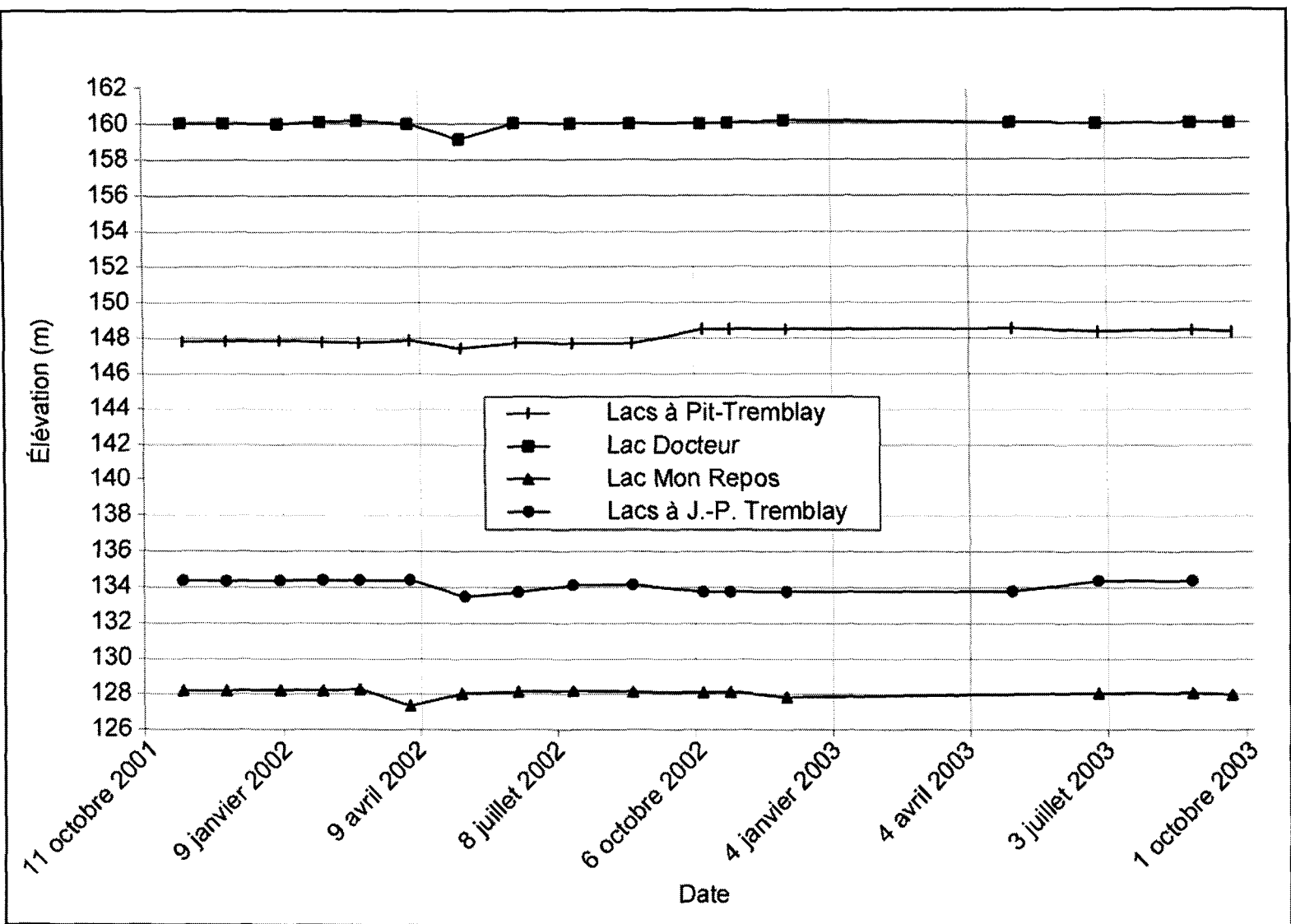


Figure 3.10- Élévation du niveau d'eau en continu dans le piézomètre PN-1

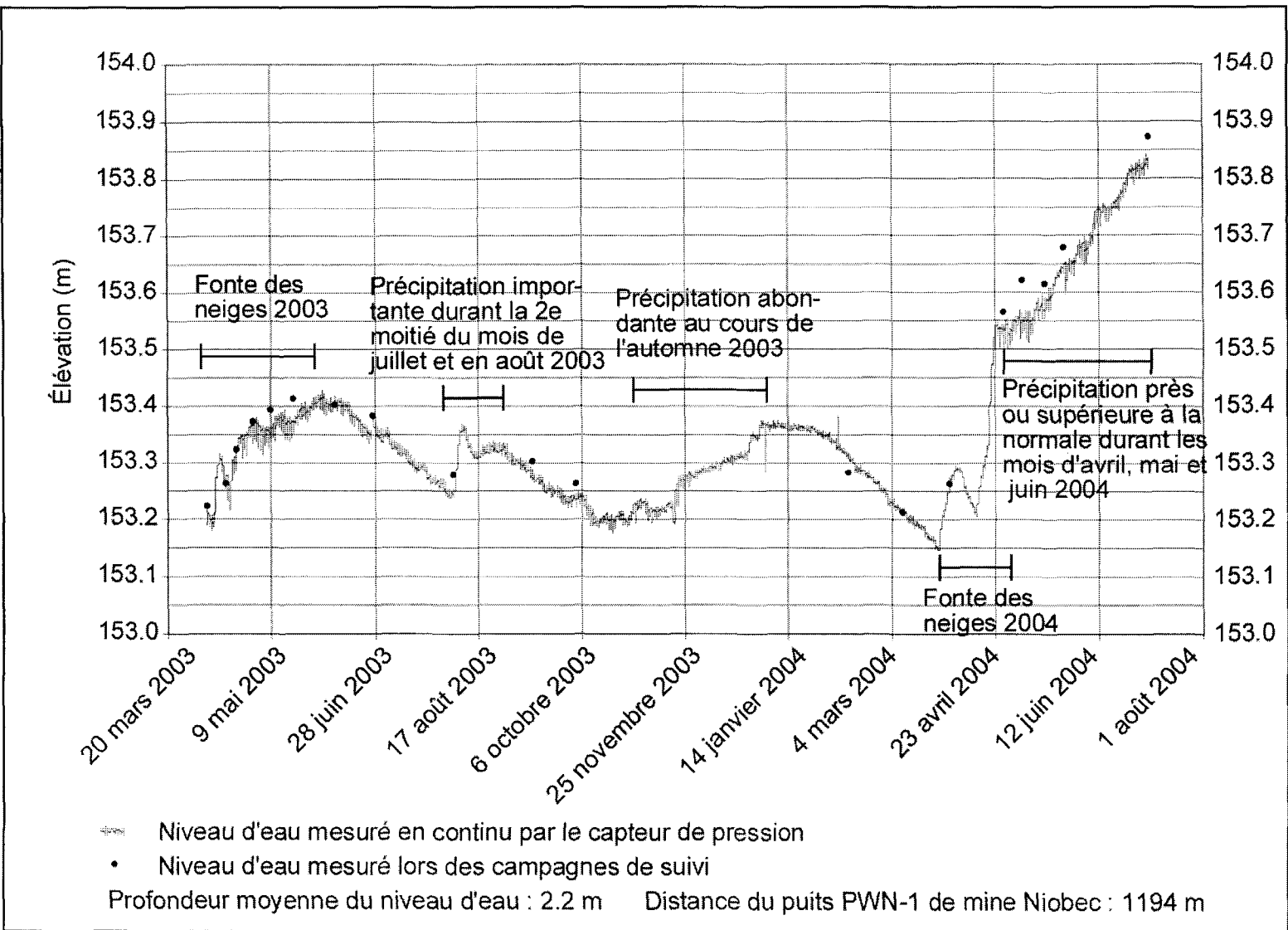
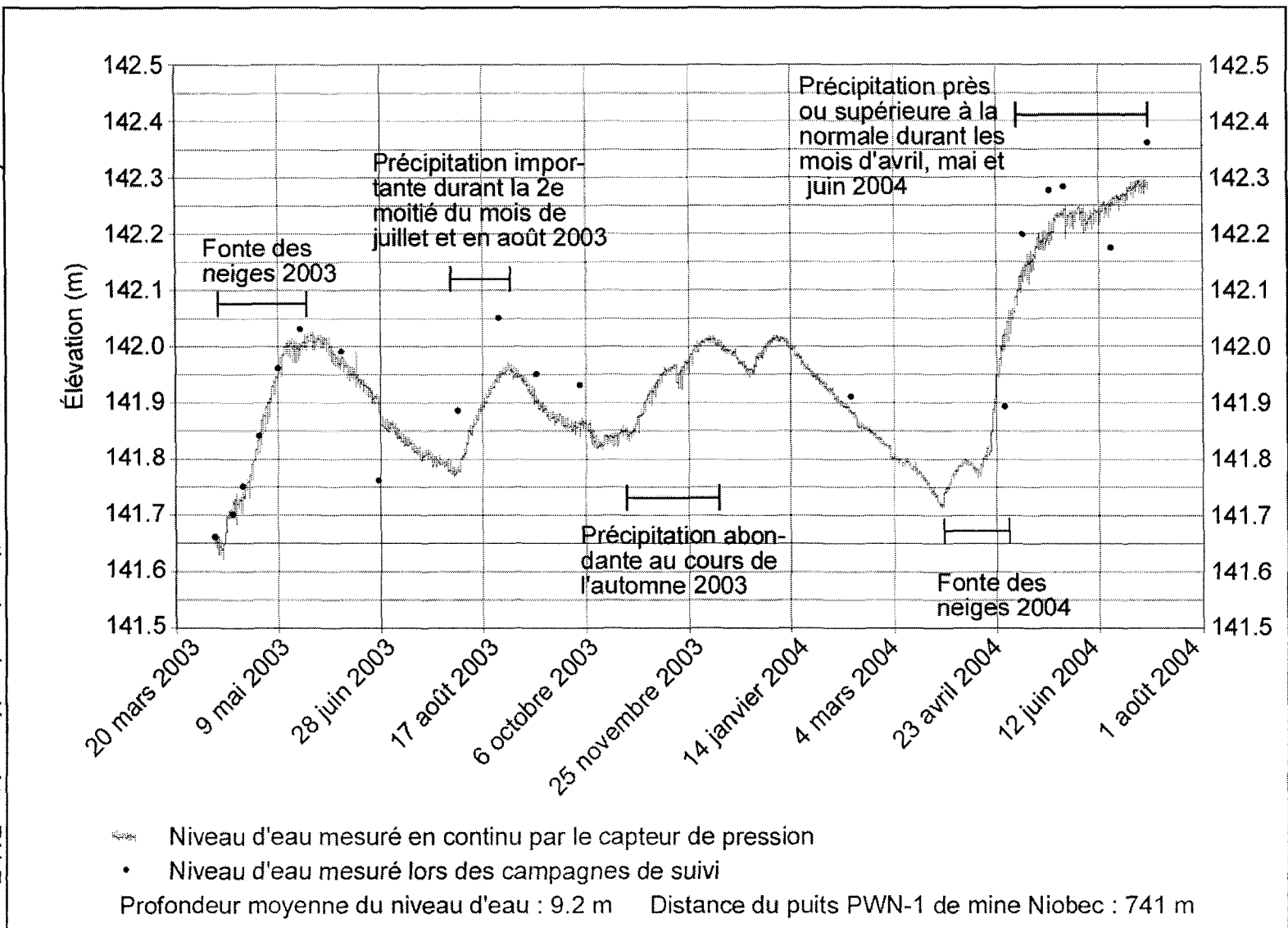


Figure 3.11 - Élévation du niveau d'eau en continu dans le piézomètre PN-7



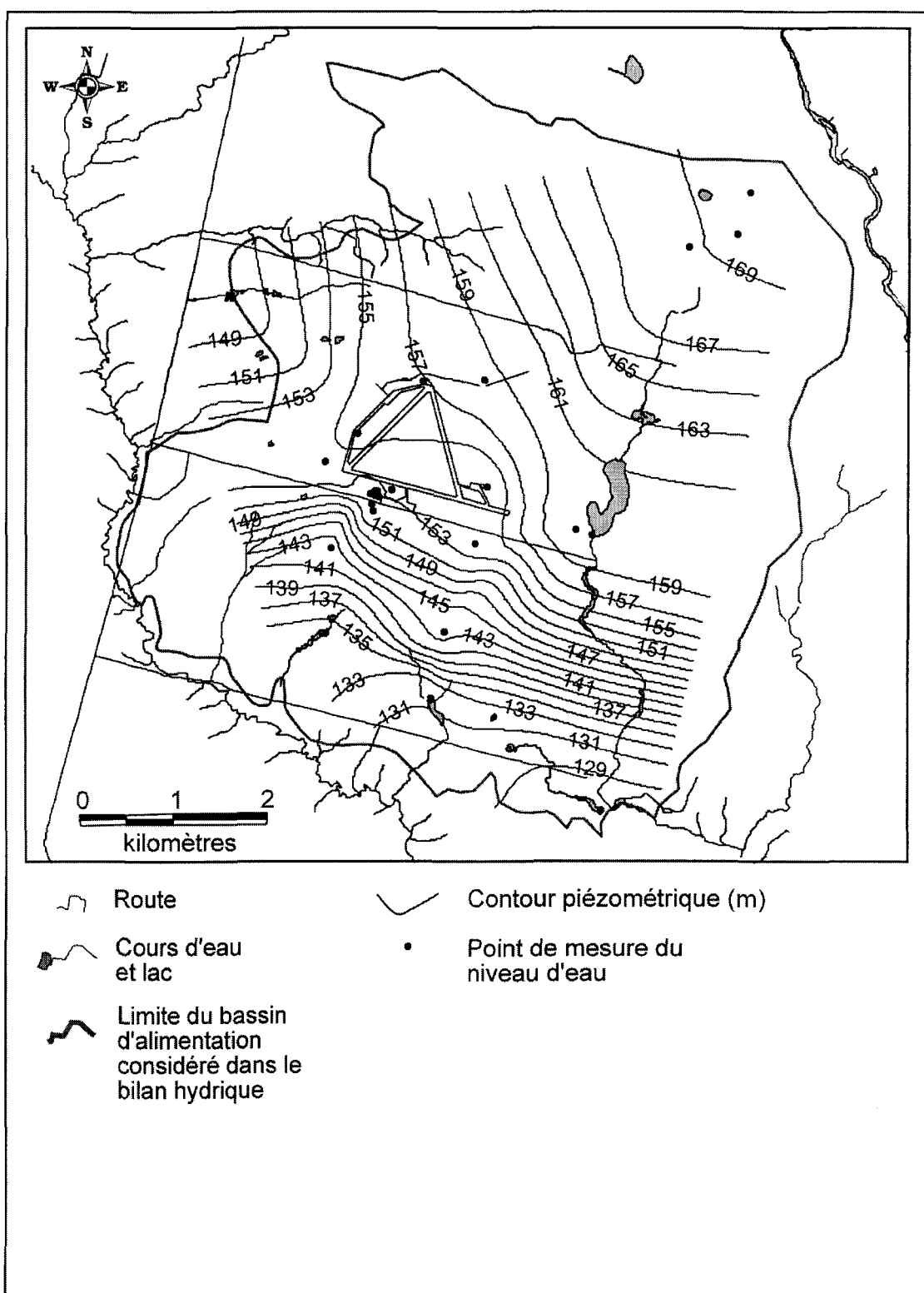


Figure 3.12- Carte piézométrique du 26 mai 2004

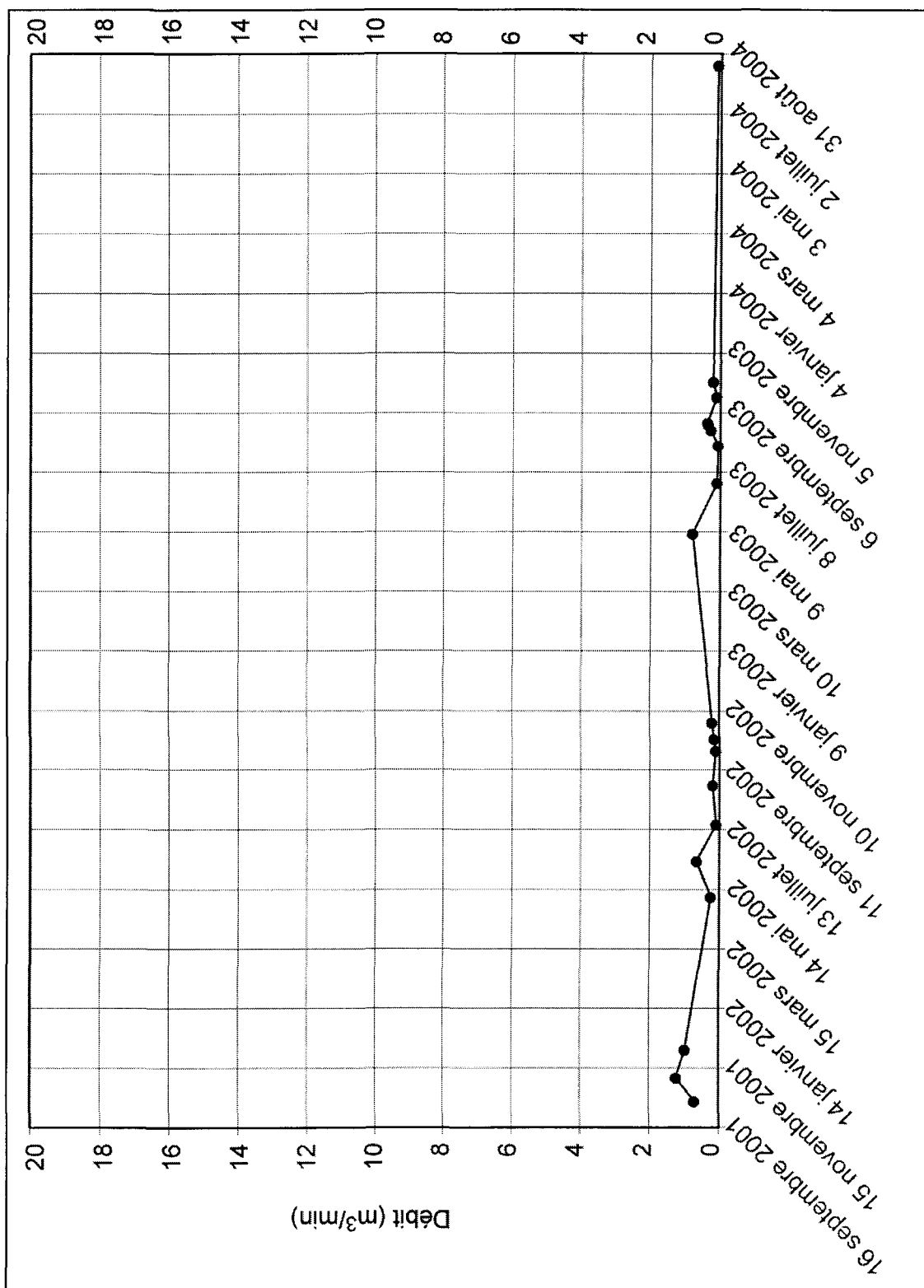
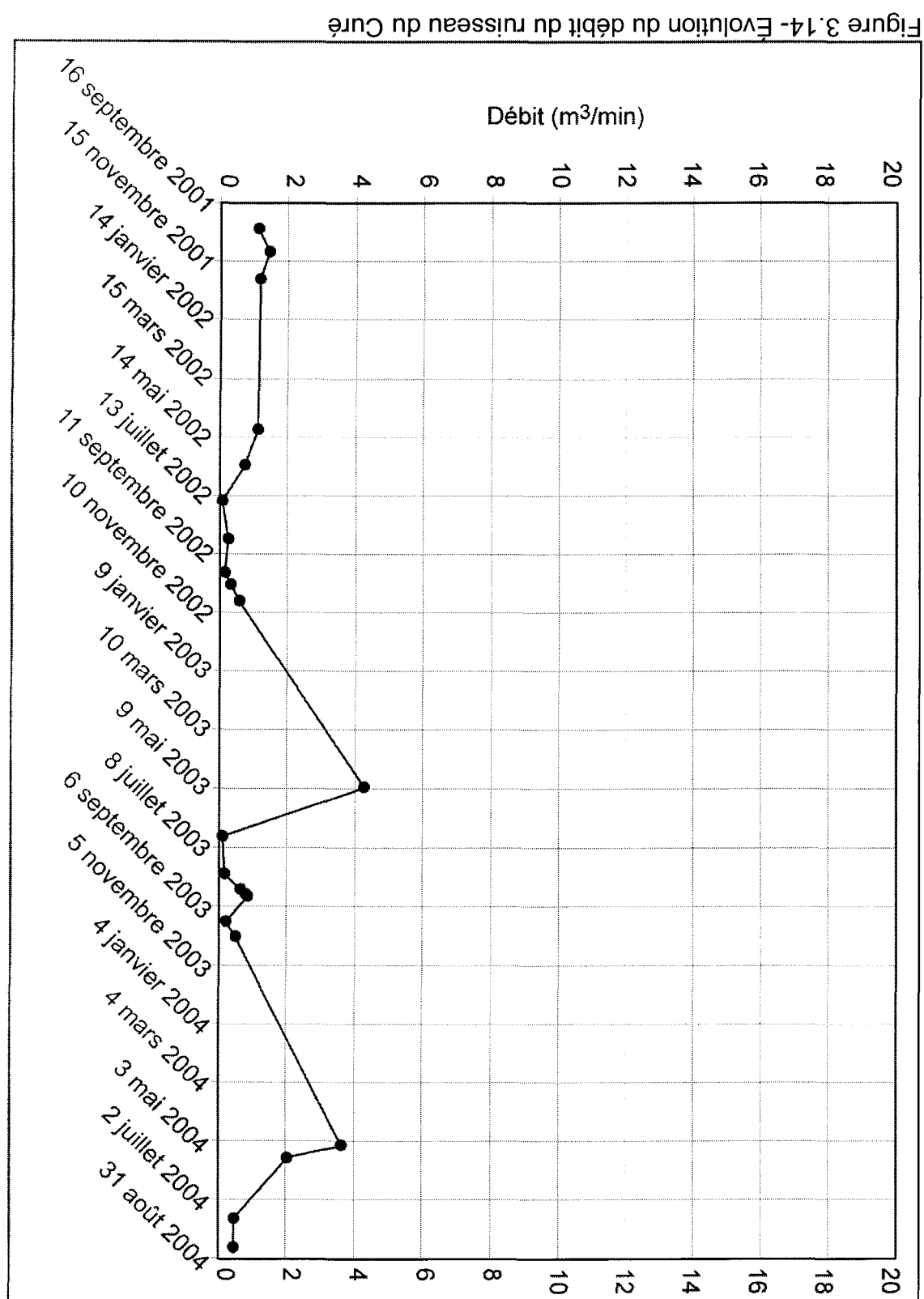
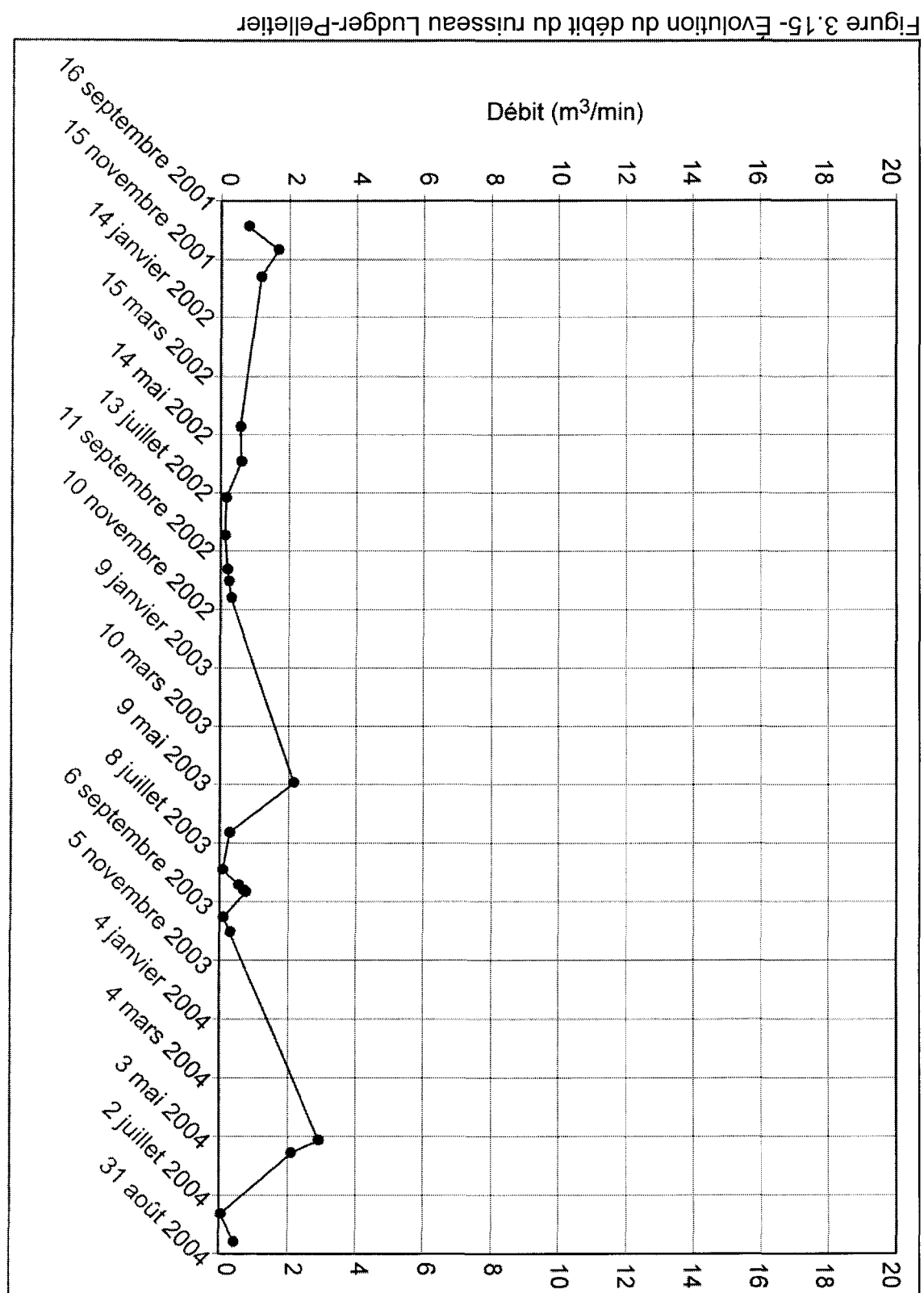


Figure 3.13- Évolution du débit du ruisseau Villeneuve-Tremblay





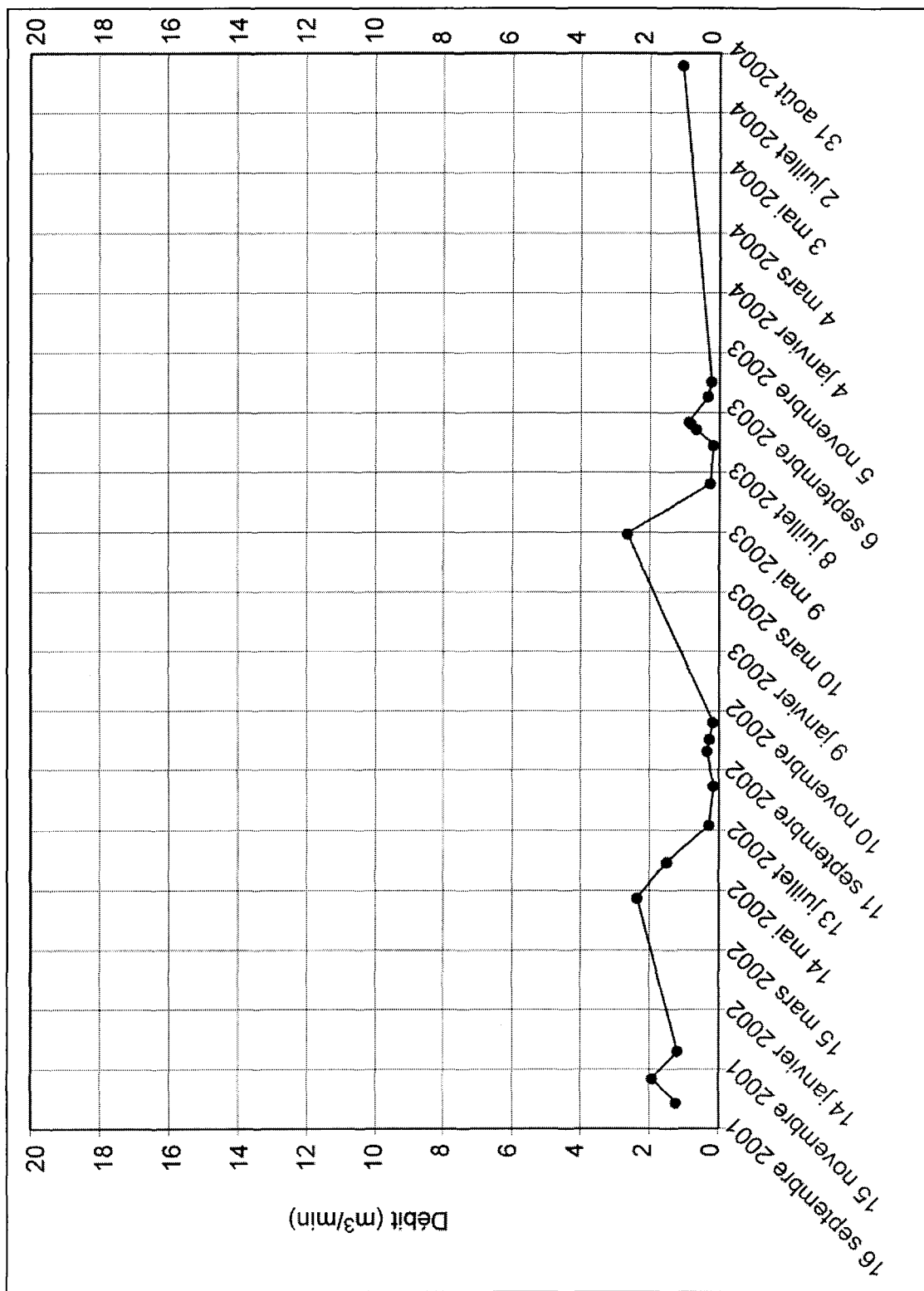


Figure 3.16- Évolution du débit du ruisseau près du terrain de jeux

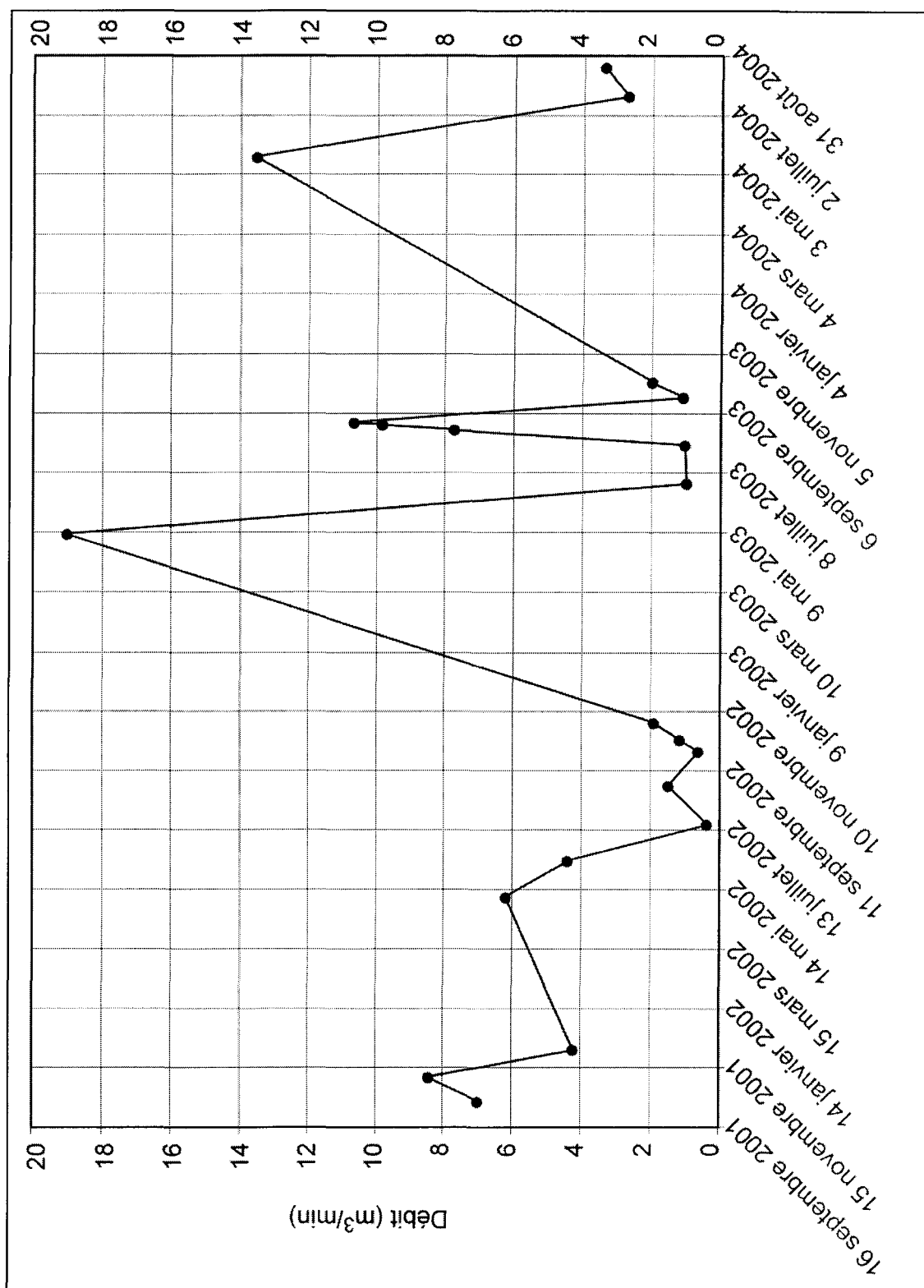
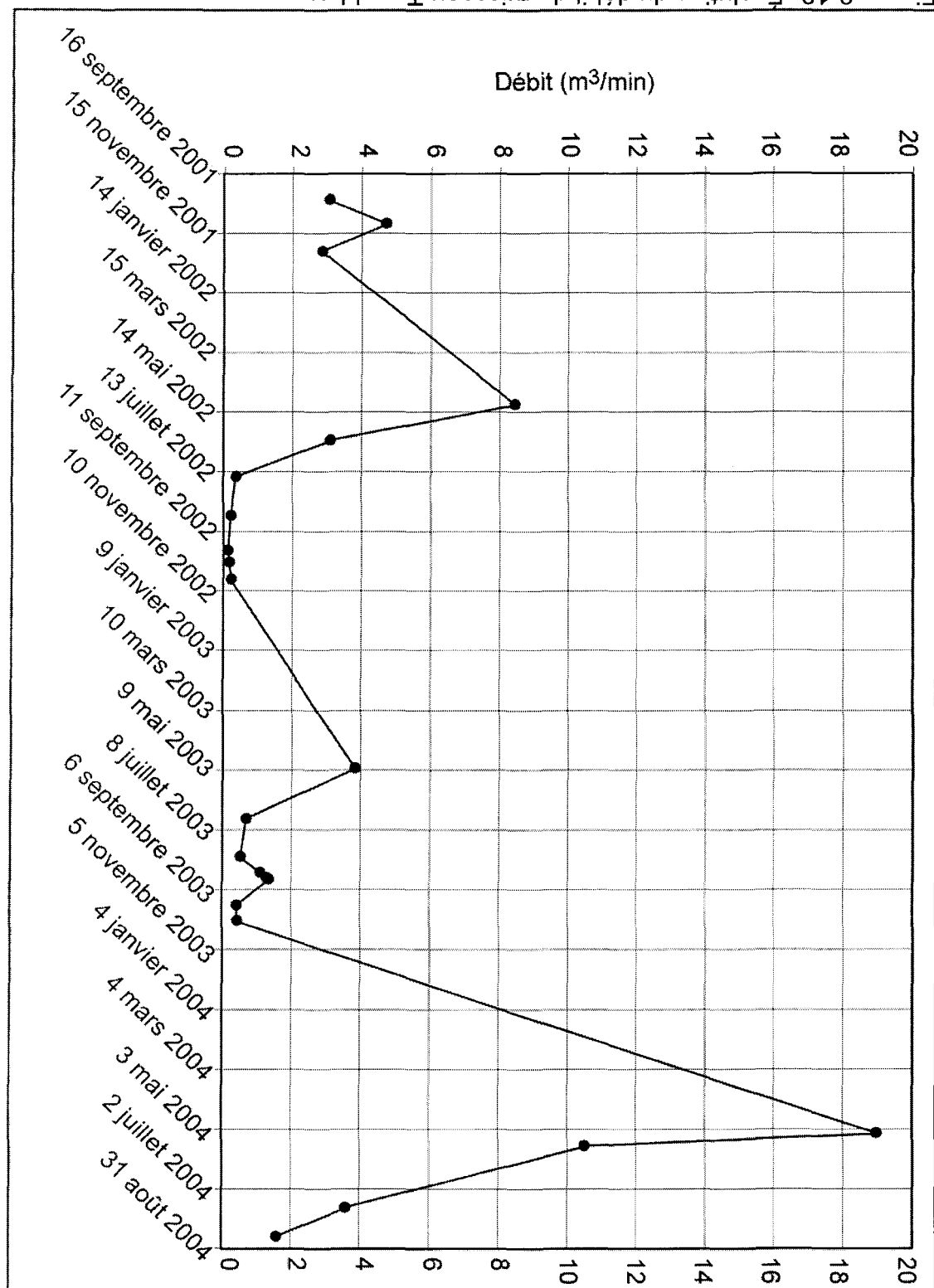


Figure 3.17- Évolution du débit du ruisseau Gravel

Figure 3.18 - Evolution du débit du ruisseau Tremblay



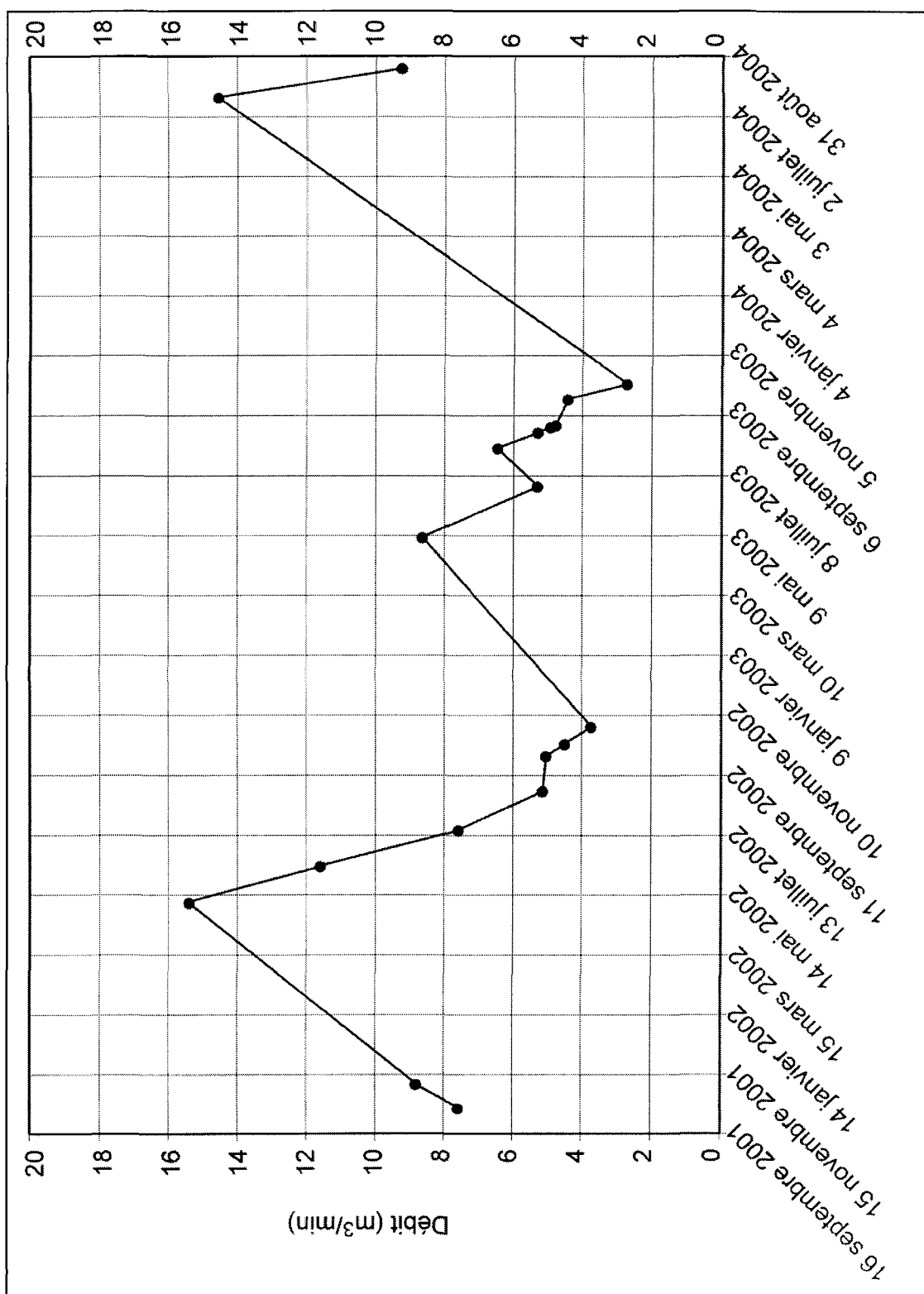


Figure 3.19- Évolution du débit du ruisseau de la sortie du lac Docteur

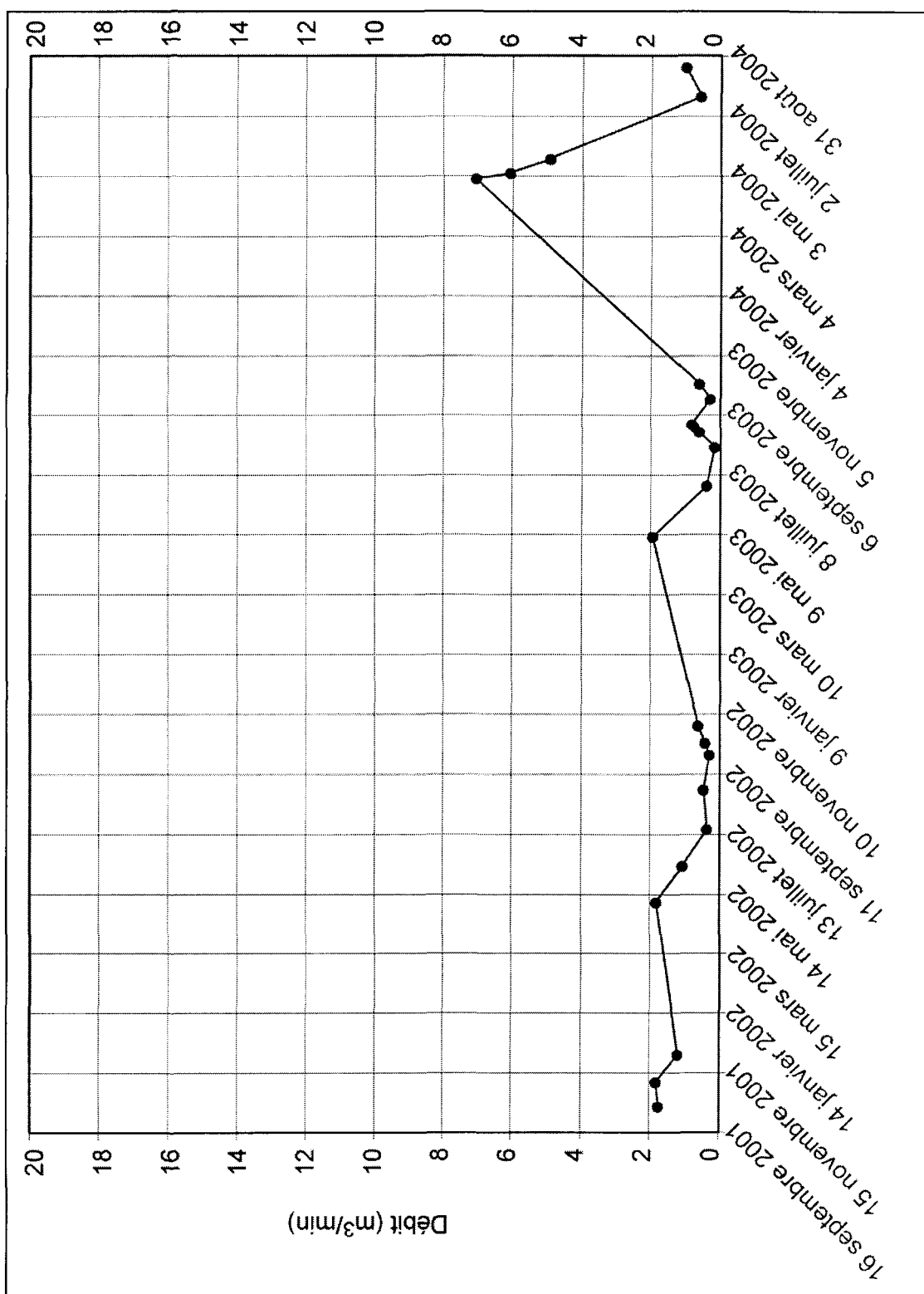


Figure 3.20- Évolution du débit du premier ruisseau sur le chemin des Ruisseaux

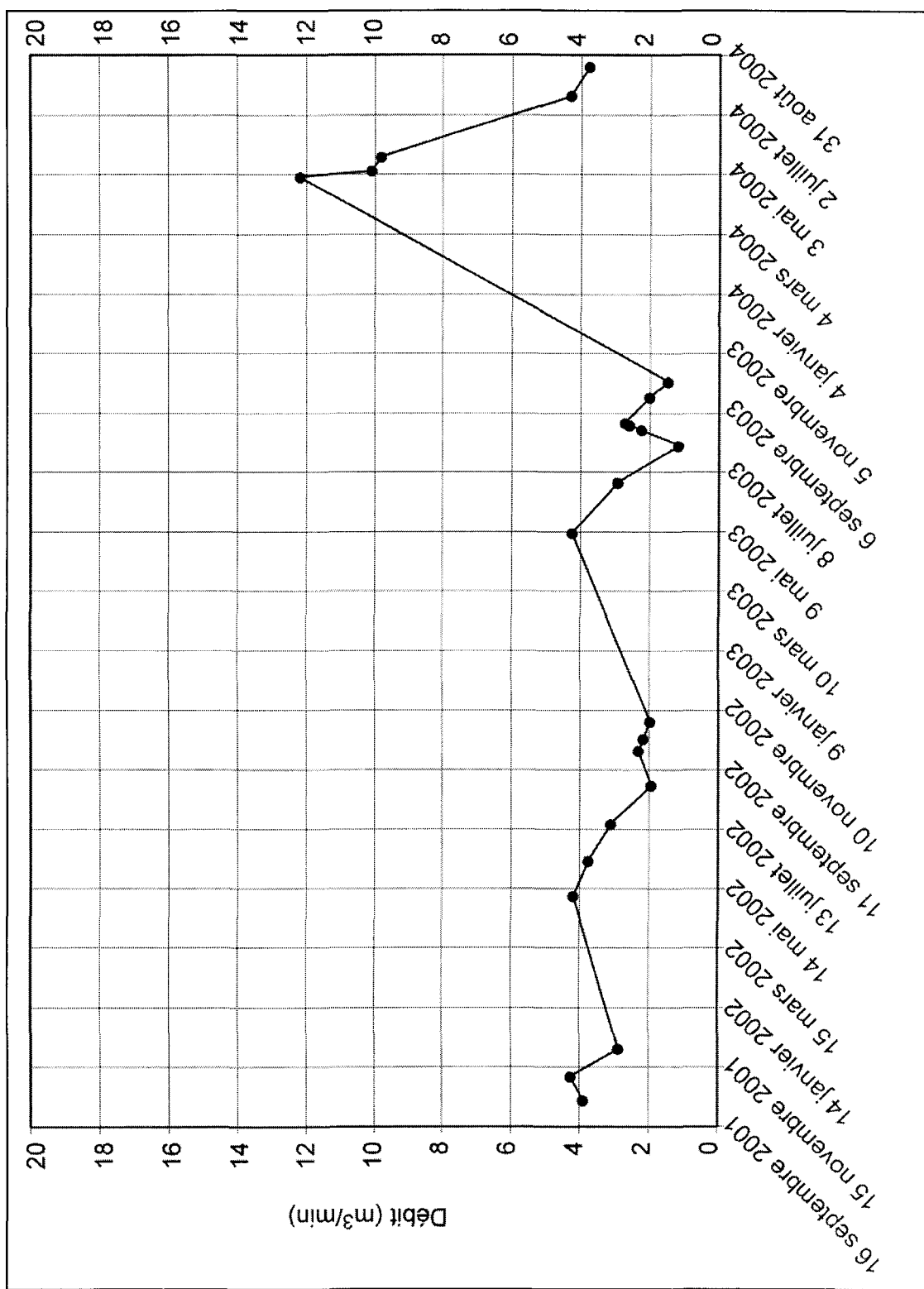


Figure 3.21- Évolution du débit du ruisseau du Coteau

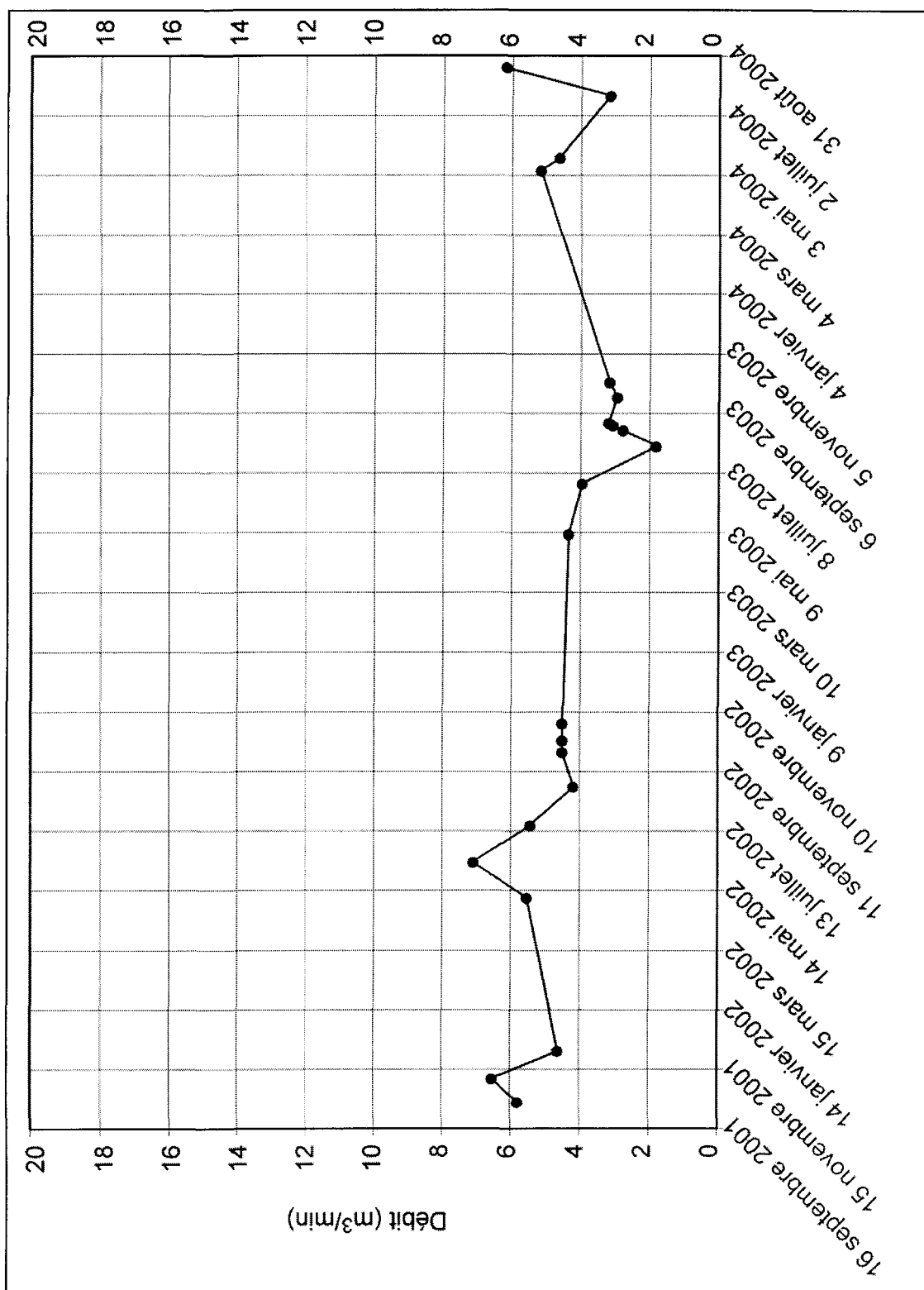
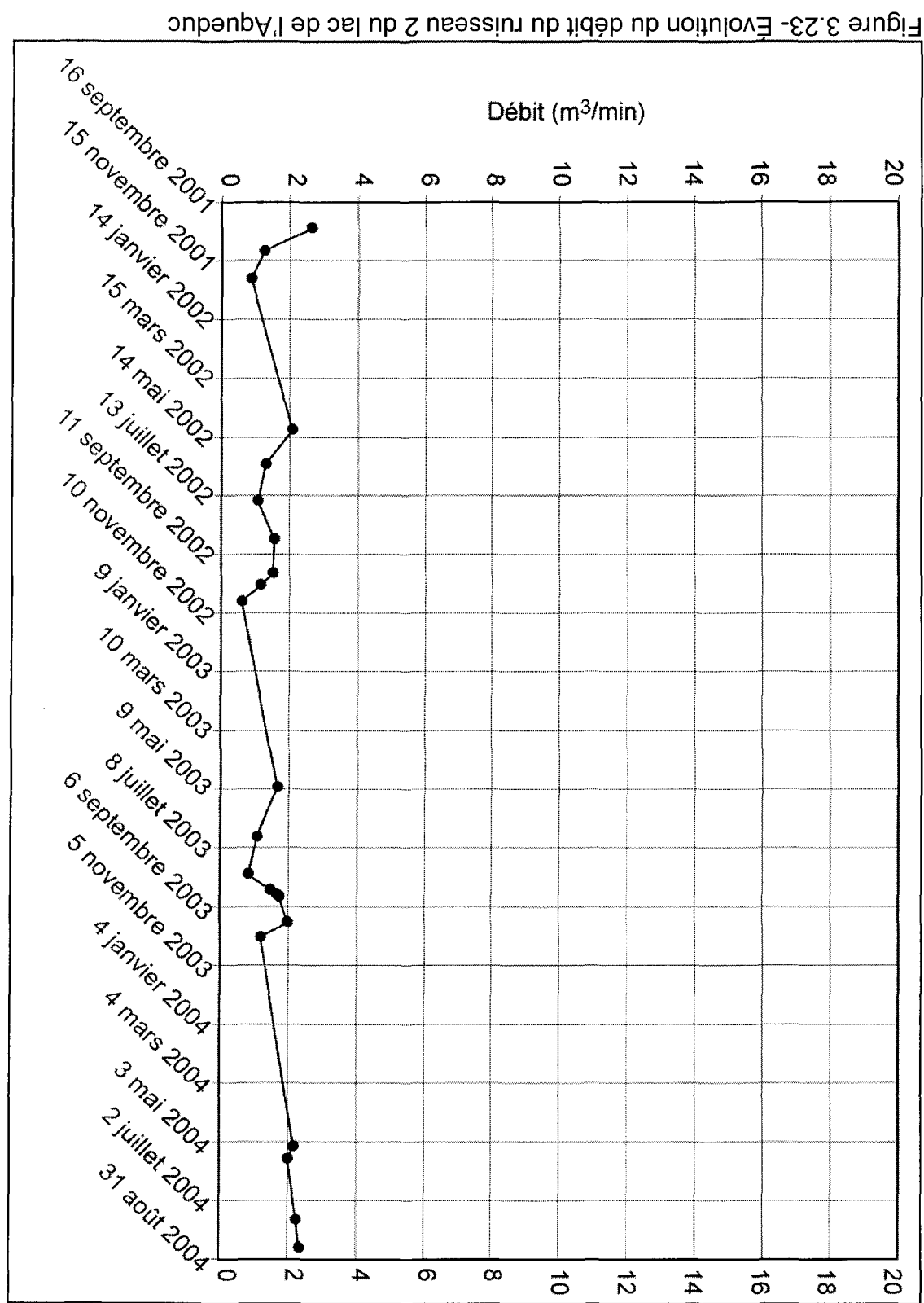
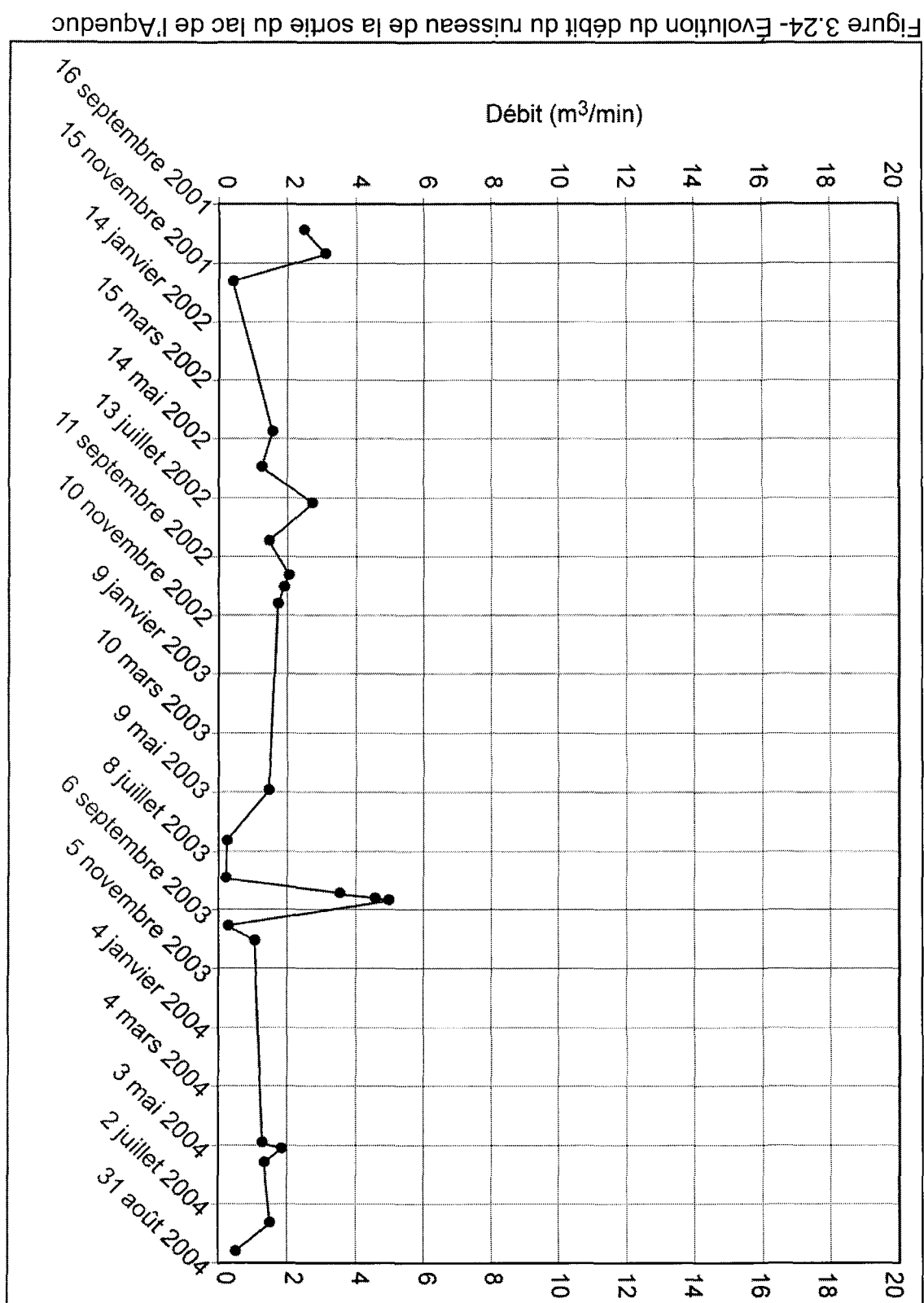


Figure 3.22- Évolution du débit du ruisseau 1 du lac de l'Aqueduc





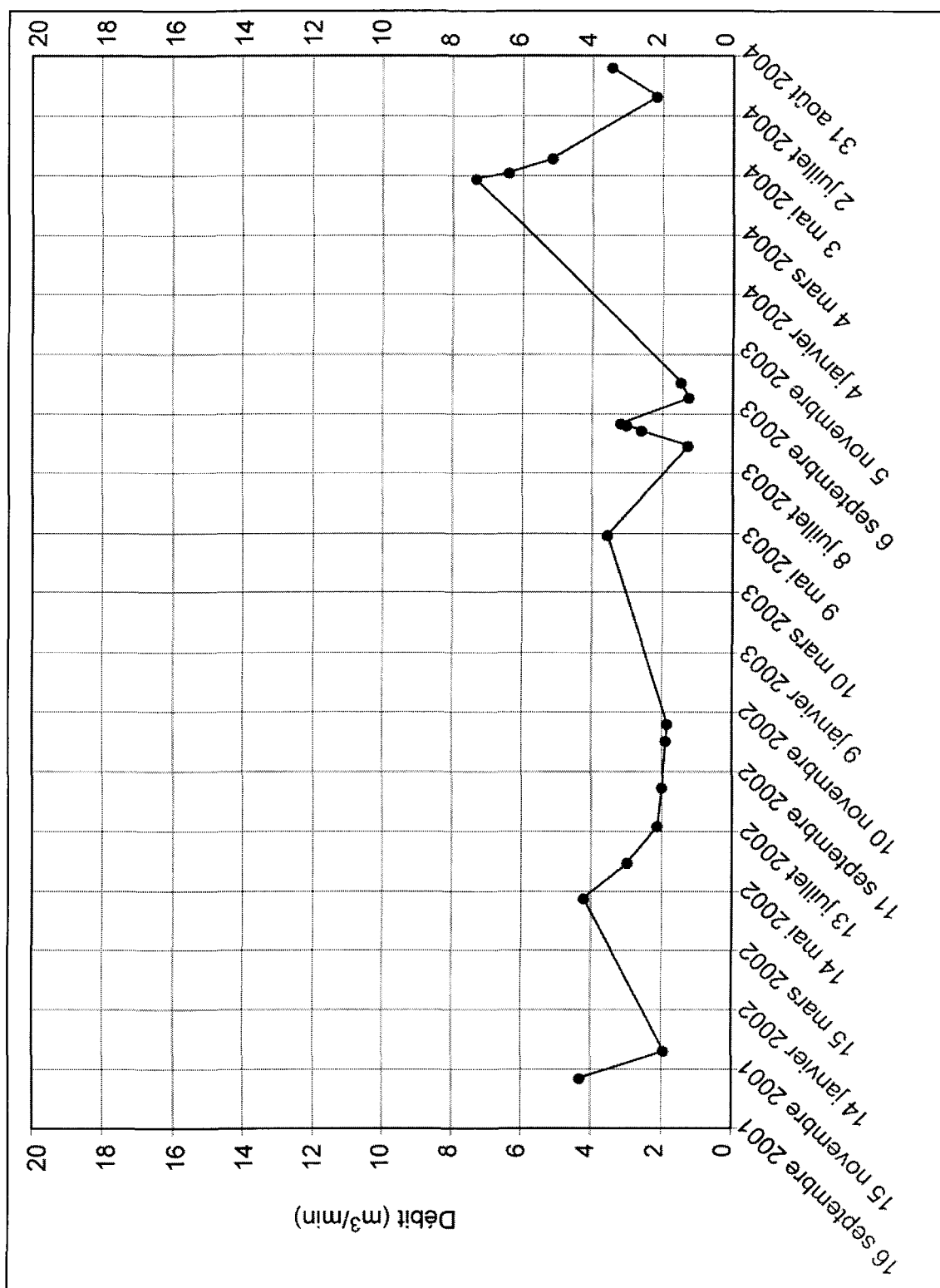


Figure 3.25- Évolution du débit du ruisseau près du lac Mon Repos

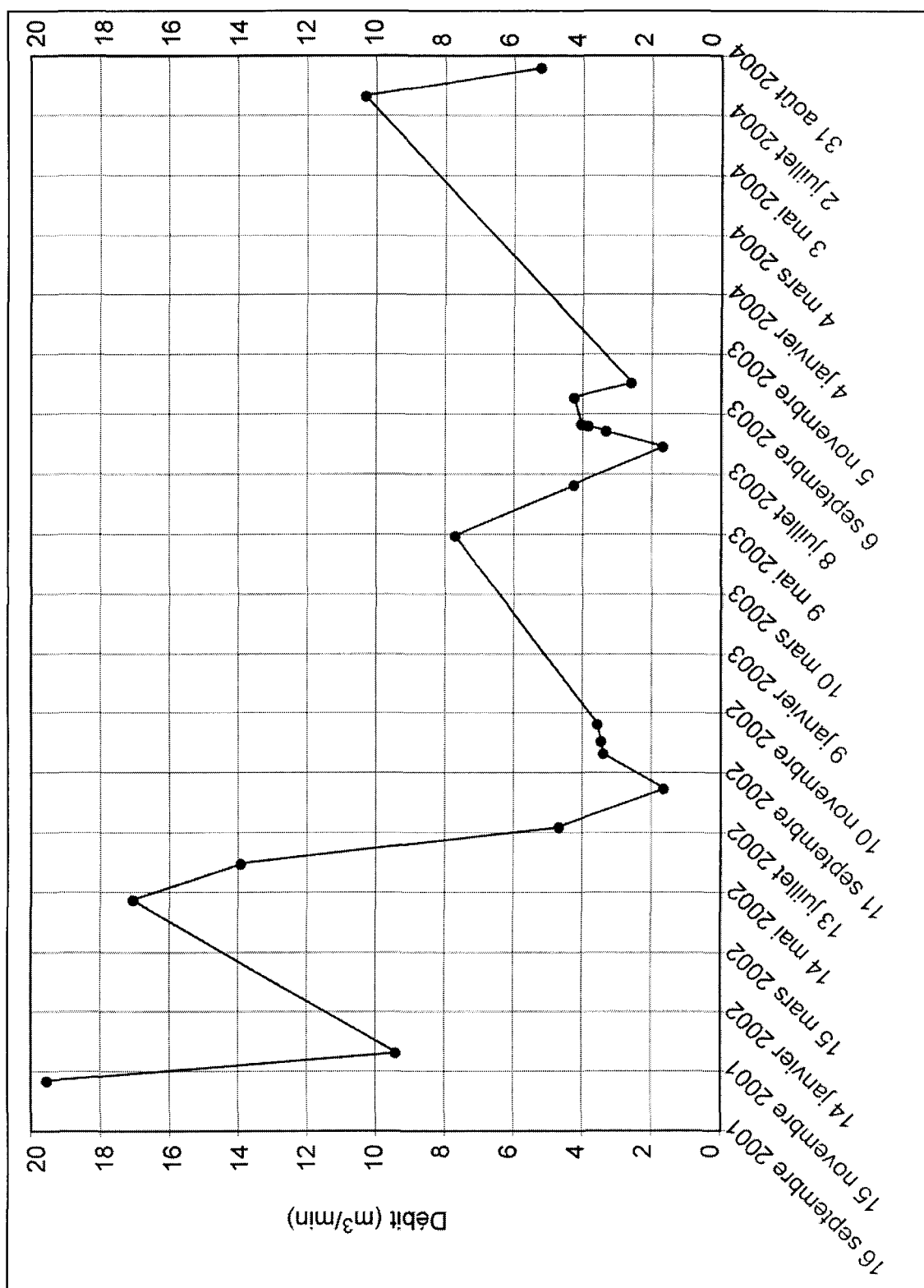


Figure 3.26- Évolution du débit du ruisseau Chaud

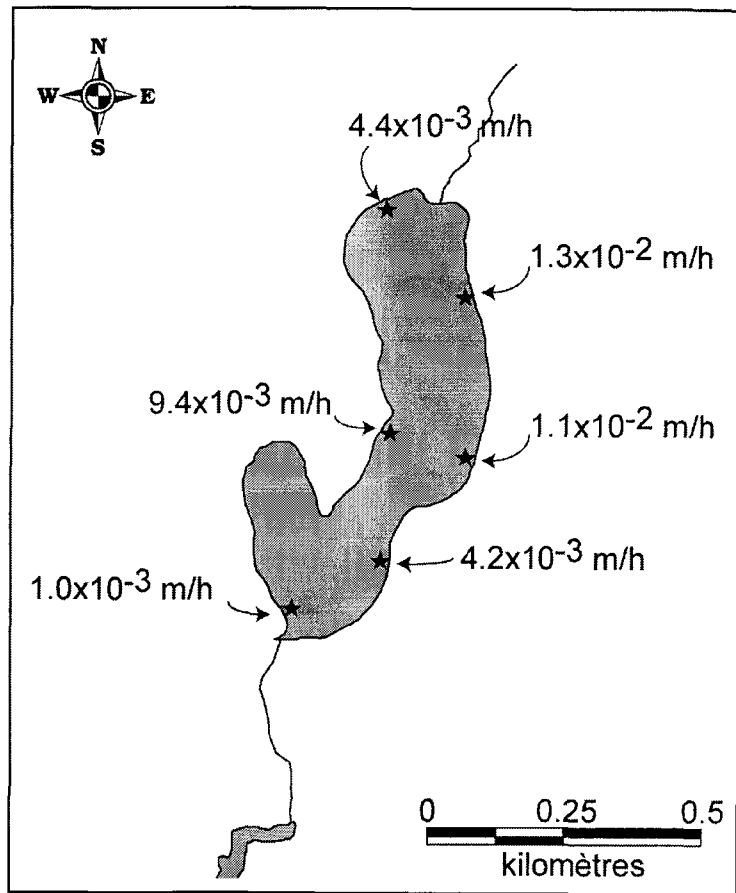


Figure 3.27- Carte du lac Docteur montrant les résultats des mesures de flux de filtration

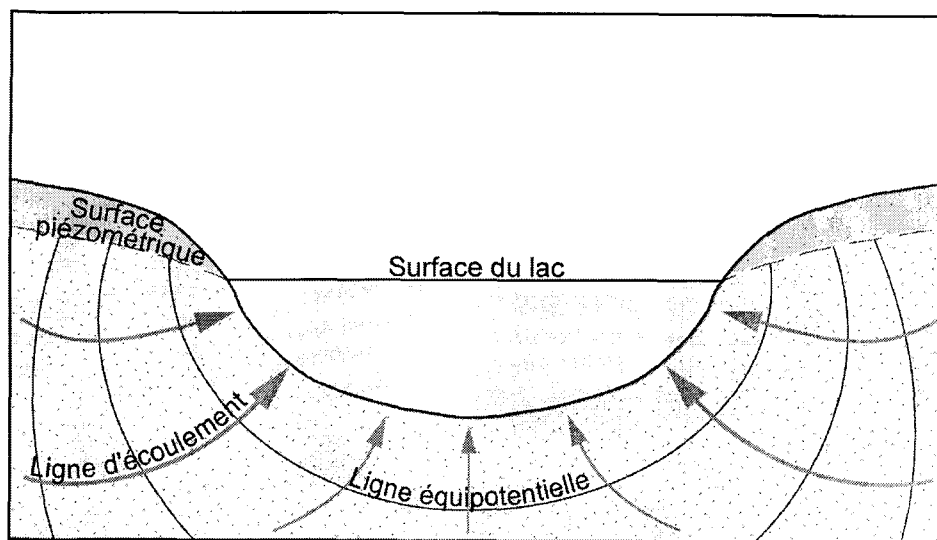


Figure 3.28- Section schématique d'un lac alimenté par les eaux souterraines

4

BILAN HYDRIQUE DE L'AQUIFÈRE

Ce chapitre décrit les diverses composantes du bilan hydrique de l'aquifère de Saint-Honoré, notamment les éléments qui forment la recharge, la décharge et les variations de la quantité d'eau emmagasinée dans l'aquifère. Par la suite, un exercice de calcul du bilan hydrique est présenté en utilisant les données du programme du suivi, ce pour chacune des trois années consécutives, soit de septembre 2001 à août 2002, de septembre 2002 à août 2003 et de septembre 2003 à août 2004.

4.1 MODÈLE CONCEPTUEL

Le modèle conceptuel de l'aquifère comprend les limites de la portion de l'aquifère considérée dans cet exercice de bilan hydrique, ainsi que les éléments constituant sa recharge et sa décharge. Comme tout modèle conceptuel, celui-ci constitue une représentation simplifiée de la réalité. Ses composantes et leurs interactions sont cependant considérées suffisamment réalistes pour supporter l'analyse du bilan hydrique global présentée par la suite.

4.1.1 LIMITE DE LA PORTION CONSIDÉRÉE DE L'AQUIFÈRE

La limite du bassin d'alimentation considéré pour l'analyse du bilan hydrique circonscrit une aire de 41.6 km² (figure 2.1). Dans ses parties est et nord, cette limite correspond à une ligne de partage des eaux de surface, laquelle est présumée coïncider avec une crête de la surface piézométrique. À l'ouest et au sud, la limite de la portion considérée de l'aquifère est constituée par la limite du dépôt de sable, lequel repose généralement à ces endroits sur un dépôt argileux considéré comme imperméable. Le plateau paléodeltaïque qui constitue l'aquifère repose sur le socle cristallin précambrien, soit directement ou sur une mince couche d'argile ou de till recouvrant le socle. Quelques forages carottés dans le substratum rocheux immédiatement sous les dépôts meubles de l'aquifère, ont indiqué la nature cristalline du socle (Laboratoires S.L., 2003a; MENVIQ, 2001). Le socle rocheux est lui aussi considéré comme une barrière imperméable n'offrant aucun apport et aucun exutoire à l'aquifère, tout comme les dépôts de till et d'argile rencontrés à la base d'une partie importante du dépôt sablonneux.

Ce modèle conceptuel considère donc que le réseau de fractures dans le socle cristallin n'est pas suffisamment développé pour permettre un écoulement important des eaux souterraines. Ce modèle néglige également la présence possible de lambeaux de roche calcaireuse reposant en discordance sur le socle cristallin, pouvant constituer une extension de l'aquifère et faciliter une connexion

entre des parties éloignées de ce dernier. Ces deux limitations du modèle conceptuel sont données ici à titre d'exemple de facteurs pouvant donner lieu à des études ultérieures sur l'aquifère de Saint-Honoré.

4.1.2 REPRÉSENTATION DE LA RECHARGE ET DE LA DÉCHARGE

Les limites de la portion considérée de l'aquifère telles que décrites plus haut reviennent à supposer que cette portion de l'aquifère est isolée hydrauliquement des milieux géologiques adjacents sur tous ses côtés latéraux ainsi qu'à sa base. Les précipitations (P) tombées sur le bassin d'alimentation d'une superficie de 41.6 km² sont donc considérées comme l'unique terme de la recharge de cette portion de l'aquifère, après que l'évapotranspiration (ET) en ait prélevé une certaine quantité.

La décharge de l'aquifère s'effectue de différentes façons, notamment par l'évapotranspiration mentionnée plus haut, par l'écoulement aux cours d'eau exutoires et par les prélèvements aux puits de pompage. Les cours d'eau exutoires (D) sont distribués au pied du plateau sablonneux aquifère; ils drainent les eaux souterraines vers la rivière Caribou qui s'écoule à l'ouest et au sud du plateau. Les dix principaux cours d'eau exutoires ont été l'objet de mesures périodiques de débit dans le cadre du programme de suivi de l'aquifère. Le débit de ces cours d'eau est composé d'eau résurgente de l'aquifère (débit de base) et d'eau de

ruissellement. La quantité de cette eau de ruissellement est cependant supposée négligeable dans notre analyse du bilan hydrique, considérant la nature sablonneuse du plateau aquifère. Les quantités d'eau prélevée (*EX*) par les puits de pompage de la municipalité de Saint-Honoré et de Mine Niobec, ainsi qu'à la prise d'eau de surface de Ville de Saguenay, composent aussi le terme de décharge de l'aquifère. Enfin, l'évapotranspiration réelle (*ET*) comprend deux termes : celle qui se produit dans la zone vadose et en surface des terrains, i.e. avant que l'eau d'infiltration n'atteigne le toit de la nappe, et celle qui est prélevée à partir de la zone saturée, notamment par les racines les plus profondes des plantes.

4.2 ESTIMATION DES PARAMÈTRES DU BILAN

Par souci d'uniformité, les paramètres du bilan sont exprimés en terme de hauteur de lame d'eau répartie uniformément sur la portion considérée du modèle de l'aquifère, soit sur une superficie de 41.6 km².

4.2.1 PRÉCIPITATION (RECHARGE)

Les données de précipitations utilisées sont celles de la station météorologique de l'aéroport de Bagotville, située quinze kilomètres au sud de

l'aquifère de Saint-Honoré. Les précipitations moyennes annuelles pour la période de 1971 à 2000 sont de 950.8 mm.

Le tableau 4.1 présente les précipitations annuelles tombées (*P*) sur le bassin d'alimentation de l'aquifère, lors de chacune des trois années consécutives pour lesquelles le bilan hydrique est estimé. Chacune de ces trois années de bilan commence en septembre et se termine en août de l'année calendaire suivante. Lors des deux premières années, les températures ont été supérieures et les quantités de précipitations ont été nettement inférieures aux normales climatiques calculées sur trente ans (EC, 2004) (figure 4.1). Cependant les quantités de précipitation reçues pour la période de septembre 2003 à août 2004 se rapprochent de la normale climatique de 1971 à 2000. Les précipitations (*P*) reçues lors des années 2001-2002, 2002-2003 et 2003-2004 sont respectivement de 812.7, 814.3 et 892.2 mm.

Tableau 4.1- Précipitations reçues durant le programme de suivi, ainsi que la moyenne de 30 ans

	Année 2001-2002	Année 2002-2003	Année 2003-2004	Moyenne annuelle (1971-2000)
Volume* des précipitations (m ³)	33 808 320	33 874 880	37 115 520	39 553 280
Précipitations (mm)	812.7	814.3	892.2	950.8

* sur le bassin d'alimentation de l'aquifère

4.2.2 DÉCHARGE

L'évapotranspiration potentielle moyenne annuelle calculée à partir de la formule de Thornwaite pour la période entre 1971 et 2000 est de 514.1 mm (EC, 2004). Les valeurs estimées de l'évapotranspiration réelle annuelle sont discutées plus loin dans le chapitre du bilan hydrique.

Le débit des cours d'eau a été mesuré périodiquement à quatorze stations (figure 3.1) à l'aide d'un appareil de mesure de vitesse de courant (Laboratoires SL, com. pers.). Dix de ces stations sont situées au pourtour des limites sud et ouest; elles ont permis d'estimer par des mesures directes la quantité d'eau sortant naturellement de l'aquifère (D). La sommation des débits mesurés à ces exutoires fournit une estimation totale de la lame d'eau sortant de l'aquifère. L'estimation de la valeur annuelle de cette lame d'eau est réalisée en intégrant les courbes de chacun des dix hydrogrammes sur une période de douze mois, en l'occurrence de septembre à août inclusivement. Le tableau 4.2 présente les données permettant d'estimer la quantité d'eau sortant de l'aquifère par les cours d'eau exutoires (D) pour les années 2001-2002, 2002-2003 et 2003-2004; les hauteurs des lames d'eau correspondantes sont respectivement de 328.1, 299.9 et 398.1 mm.

Tableau 4.2- Quantité d'eau écoulee à chacune des quatorze stations de mesure de débit durant les trois années du suivi

Cours d'eau	Volume annuel (m ³)		
	Année 2001-2002	Année 2002-2003	Année 2003-2004
Ruisseau Villeneuve-Tremblay	269 825	187 486	75 730
Ruisseau du Curé	443 819	872 048	851 230
Ruisseau Ludger-Pelletier	357 166	459 476	668 602
Ruisseau près du terrain de jeux	685 449	540 497	326 378
Ruisseau Gravel	2 193 885	3 918 144	3 716 177
Ruisseau Tremblay	1 953 158	787 180	4 039 453
Ruisseau sortie du lac Docteur	5 359 335	3 137 885	4 375 794
Premier ruisseau sur le chemin Des Ruisseaux	607 604	496 292	1 617 403
Ruisseau du Coteau	1 740 638	1 474 731	3 268 255
Ruisseau #1 du lac de l'Aqueduc	2 525 091	2 157 557	2 125 953
Ruisseau #2 du lac de l'Aqueduc	757 505	619 127	954 799
Ruisseau sortie du lac de l'Aqueduc	795 655	742 334	708 162
Ruisseau près du lac Mon Repos	1 372 151	1 288 217	2 062 937
Ruisseau Chaud	5 181 819	2 496 939	3 267 519
Écoulement sortant de l'aquifère			
Volume (m ³)	13 648 011	12 476 163	16 562 393
Lame d'eau (mm)	328.1	299.9	398.1

* Les informations dans les cellules grises ne concernent pas des exutoires de l'aquifère

Les quantités d'eau prélevées (EX) par les principaux exploitants nous ont été transmises par communications personnelles par ces derniers, soit la municipalité de Saint-Honoré, Mine Niobec et Ville de Saguenay. Les tableaux 4.3, 4.4 et 4.5 présentent les quantités d'eau annuelles prélevées par ces exploitants. La hauteur de lame d'eau correspondante est de 130.3 mm pour l'année 2001-2002, 136.9 mm pour l'année 2002-2003 et 128.5 mm pour l'année 2003-2004. La quantité prélevée à partir des puits individuels privés est négligée

ici, considérant que la majeure partie de cette eau retourne dans le milieu aquifère après utilisation.

Tableau 4.3- Quantités d'eau prélevées par les principaux exploitants pour l'année 2001-2002

Principaux exploitants	Débits réels prélevés		Volume prélevé (m ³)	Lame* d'eau prélevée (mm)
	(GUSPM)	(m ³ /h)		
Saint-Honoré	647	146.9	1 287 279	30.9
Niobec	795	180.6	1 581 742	38.0
Ville de Saguenay	1 282	291.2	2 550 683	61.3
Totaux	2 724	618.7	5 419 704	130.3
* sur le bassin d'alimentation de l'aquifère				

Tableau 4.4- Quantités d'eau prélevées par les principaux exploitants pour l'année 2002-2003

Principaux exploitants	Débits réels prélevés		Volume prélevé (m ³)	Lame* d'eau prélevée (mm)
	(GUSPM)	(m ³ /h)		
Saint-Honoré	633	143.8	1 259 425	30.3
Niobec	739	167.8	1 470 324	35.3
Ville de Saguenay	1 491	338.6	2 966 512	71.3
Totaux	2 863	650.3	5 696 260	136.9
* sur le bassin d'alimentation de l'aquifère				

Tableau 4.5- Quantités d'eau prélevées par les principaux exploitants pour l'année 2003-2004

Principaux exploitants	Débits réels prélevés		Volume prélevé (m ³)	Lame* d'eau prélevée (mm)
	(GUSPM)	(m ³ /h)		
Saint-Honoré	727	165.1	1 446 110	34.8
Niobec	765	173.8	1 522 053	36.6
Ville de Saguenay	1 194	271.2	2 375 833	57.1
Totaux	2 686	610.1	5 343 996	128.5
* sur le bassin d'alimentation de l'aquifère				

4.2.3 VARIATIONS D'EMMAGASINEMENT

La variation de la quantité d'eau emmagasinée (ΔV) à l'intérieur du réservoir de l'aquifère a été estimée à partir des données de deux campagnes de mesure de niveau d'eau dans les piézomètres, l'une en septembre d'une année calendaire et l'autre en août de l'année suivante. Le changement du volume saturé de l'aquifère est d'abord estimé en intégrant la différence entre les surfaces piézométriques initiales et finales de la période considérée. La variation du volume d'eau emmagasinée est ensuite évaluée en appliquant à ce volume de matériel aquifère une valeur moyenne de porosité de 30%, valeur considérée représentative pour un sable (e.g. Freeze et Cherry, 1979). La valeur de ΔV exprimée en hauteur de lame d'eau est ainsi estimée à -43.7, -51.1 et +40.0 mm, pour les années 2001-2002, 2002-2003 et 2003-2004 respectivement (tableau 4.6).

Tableau 4.6- Variations de la quantité d'eau emmagasinée dans le réservoir aquifère pour chacune des années du suivi

	Année 2001-2002	Année 2002-2003	Année 2003-2004
Variations d'emmagasinement d'eau (m ³)*	-1 816 768	-2 126 573	1 665 526
Lame d'eau équivalente (mm)	-43.7	-51.1	+40.0
* sur le bassin d'alimentation de l'aquifère			

4.3 BILAN HYDRIQUE

L'équation du bilan hydrique de l'aquifère de Saint-Honoré peut s'écrire de la façon suivante :

$$P = ET + D + EX + \Delta V \quad [1]$$

et

$$\Delta V = V_{fin} - V_{init} \quad [2]$$

où P est les précipitations; ET est l'évapotranspiration réelle; D est la décharge aux cours d'eau exutoires alimentés par les eaux résurgentes et les eaux de ruissellement; ΔV est la variation d'emmagasinement d'eau dans le réservoir de l'aquifère; V_{fin} est le volume saturé de l'aquifère à la fin de la période considérée; V_{init} est le volume saturé de l'aquifère au début de la période considérée; et EX est la quantité d'eau prélevée. Toutes ces composantes du bilan sont exprimées en terme de hauteur de lame d'eau répartie uniformément sur la portion considérée du modèle de l'aquifère, soit sur une superficie de 41.6 km².

Les périodes considérées pour le calcul du bilan hydrique sont de septembre 2001 à août 2002, de septembre 2002 à août 2003 et de septembre 2003 à août 2004. Les valeurs des composantes du bilan hydrique pour ces trois périodes consécutives de douze mois sont respectivement (tableau 4.7) de 812.7,

814.3 et 892.2 mm pour les précipitations, de 328.1, 299.9 et 398.1 mm pour la décharge aux cours d'eau, de 130.3, 136.9 et 128.5 mm pour les eaux prélevées par les puits de pompage, et de -43.7, -51.1 et +40.0 mm pour la variation d'emmagasinement d'eau à l'intérieur du réservoir aquifère.

Tableau 4.7- Valeurs des composantes du bilan hydrique pour chacune des années du suivi

Composantes du bilan hydrique	Année 2001-2002	Année 2002-2003	Année 2003-2004
Entrées			
Précipitations (mm/an)	812.7	814.3	892.2
Sorties			
Lame d'eau sortante (mm/an)	328.1	299.9	398.1
Variation d'emmagasinement d'eau dans le sol (mm/an)	-43.7	-51.1	+40.0
Lame d'eau prélevée (mm/an)	130.3	136.9	128.5
Évapotranspiration réelle calculée (mm/an)	398.0	428.6	325.6

L'évapotranspiration réelle constitue la seule inconnue de l'équation [1]; elle est estimée à 398.0, 428.6 et 325.6 mm respectivement pour la première, la seconde et la troisième année du suivi. Ces valeurs de l'évapotranspiration réelle peuvent être comparées à la valeur moyenne d'évapotranspiration potentielle annuelle qui est de 514.1 mm (EC, 2004). Il est normal que la valeur de l'évapotranspiration potentielle soit plus élevée que celle de l'évapotranspiration réelle car l'estimation de l'évapotranspiration potentielle néglige les périodes de

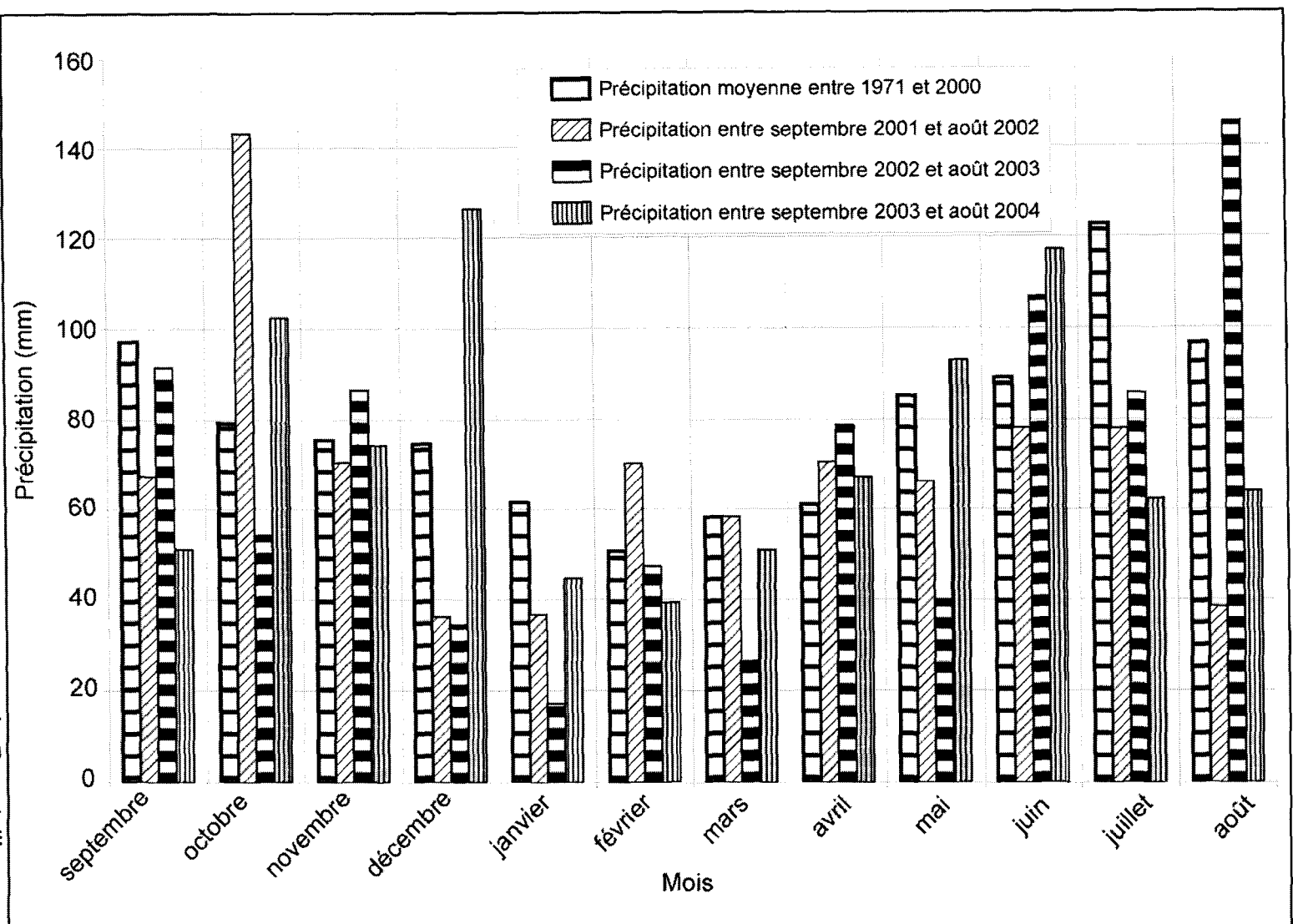
pénurie d'eau dans les terrains au cours de l'année, lesquelles surviennent tous les étés.

4.4 IMPORTANCE RELATIVE DE L'EXPLOITATION ET DE LA RECHARGE

Dans le cas de l'aquifère de Saint-Honoré, nous supposons que les précipitations constituent l'unique apport d'eau dans l'aquifère, i.e. 100% des entrées d'eau. De la quantité des précipitations, on doit soustraire l'évapotranspiration qui est inéluctable et dont la valeur estimée varie entre 36 et 53% des précipitations pour chacune des trois années du bilan. L'évapotranspiration se produit d'une part à la surface des terrains et à travers la zone vadose avant que l'eau d'infiltration n'atteigne le toit de la nappe, et d'autres part dans la zone saturée où l'eau est extraite par les racines les plus profondes des plantes. Nous supposons donc qu'environ 50 à 60% des précipitations reçues annuellement constituent la recharge naturelle de l'aquifère (figure 4.2). D'autres part, les données du suivi indiquent que les principaux exploitants prélèvent environ 25 à 35% de cette recharge. La recharge résiduelle, soit environ 65 à 75% de la recharge naturelle, continue à maintenir un niveau d'eau à l'intérieur du réservoir aquifère et à alimenter les cours d'eau exutoires. Un corollaire est qu'une augmentation de la quantité d'eau souterraine pompée de l'aquifère aura inévitablement comme répercussions une certaine baisse du niveau d'eau dans le réservoir et/ou une réduction du débit global des cours d'eau exutoires, sans

augmenter de façon significative la recharge de l'aquifère, laquelle est tributaire des précipitations reçues.

Figure 4.1- Précipitations mensuelles relevées à la station de Bagotville



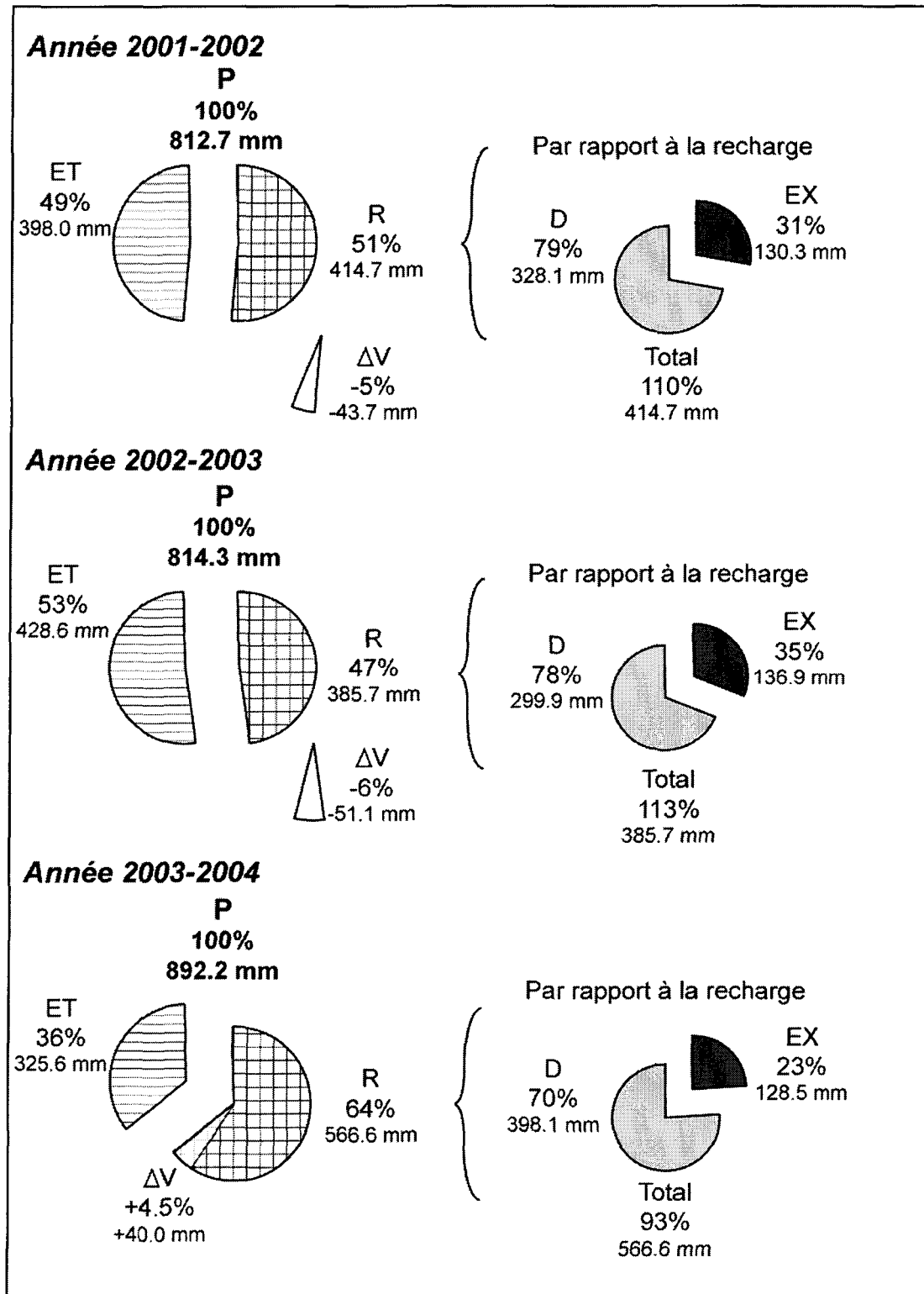


Figure 4.2- Répartition des termes du bilan hydrique pour chacune des trois années du suivi

SIMULATION NUMÉRIQUE DE L'ÉCOULEMENT DES EAUX SOUTERRAINES

Ce chapitre porte sur les simulations numériques de l'écoulement de l'eau souterraine dans l'aquifère de Saint-Honoré. Les éléments constitutifs du modèle numérique sont d'abord décrits, puis les résultats sont présentés pour les simulations en régime permanent et en régime transitoire. Enfin, des extrapolations permettront d'avancer des prévisions quant à l'évolution future de la nappe d'eau souterraine selon trois scénarios de recharge et d'exploitation. La modélisation de l'aquifère de Saint-Honoré a été effectuée avec le programme de simulation *MODFLOW* (McDonald et Harbaugh, 1988) en utilisant l'interface *Visual MODFLOW v. 3.0.0* (WHI, 2002).

5.1 MODÈLE NUMÉRIQUE

Le modèle numérique tridimensionnel présenté dans ce chapitre constitue une représentation régionale de l'aquifère de Saint-Honoré s'appuyant sur les hypothèses du modèle conceptuel présenté dans les chapitres précédents. Le

modèle numérique est basé sur l'équation de l'écoulement de l'eau dans un milieu poreux, laquelle s'écrit :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) + P - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad [1]$$

où x, y et z sont les coordonnées cartésiennes [L];
 K_{xx}, K_{yy} et K_{zz} , sont la conductivité hydraulique du milieu selon x , selon y et selon z [L/T];
 ∂ est le symbole de dérivée partielle;
 h est la charge hydraulique produisant l'écoulement, correspondant typiquement à l'élévation du toit de la nappe d'eau au-dessus d'un niveau de référence [L];
 t est le temps [T];
 P est un flux volumétrique unitaire représentant l'infiltration [1/T];
 W est un flux volumétrique unitaire représentant le pompage [1/T];
 S_s est le coefficient d'emmagasinement du milieu [1/L].

Le modèle numérique requiert la subdivision du domaine simulé en un grand nombre de mailles (ou cellules), permettant l'application de l'équation de l'écoulement sous une forme différentielle à l'intérieur de chaque maille. Le modèle peut considérer divers types d'interaction entre l'aquifère et son milieu environnant, ce qui permet la prise en compte notamment des diverses conditions de recharge et de décharge de l'aquifère.

5.1.1 MAILLAGE

Le modèle numérique considère un domaine rectangulaire d'environ 9 km par 9 km. Le domaine simulé a été divisé en cinq couches, comportant chacune 11664 cellules. Les cellules varient entre 660 m² et 5950 m² en superficie; les plus petites cellules étant attribuées aux deux zones entourant les puits de pompage de Mine Niobec et de la municipalité de Saint-Honoré, afin d'améliorer la précision du calage à ces endroits. La topographie de la surface des terrains et celle du socle rocheux ont toutes deux été importées à partir des modèles numériques de terrain décrits au chapitre 2. Toutes les cellules situées en bordure et à l'extérieur du bassin d'alimentation du modèle de l'aquifère ont été désignées inactives.

5.1.2 REPRÉSENTATION DES PROPRIÉTÉS HYDROGÉOLOGIQUES

Le domaine du modèle a été divisé en cinq unités hydrostratigraphiques correspondant à cinq zones de conductivité hydraulique différentes : le roc cristallin, l'argile de la mer Laflamme, et trois unités de sables, i.e. une unité de sable fin, une unité de sable moyen et une unité de sable grossier.

Des valeurs de conductivité hydraulique de 9×10^{-9} et de 2×10^{-11} m/s et de coefficient de rendement spécifique de 3% ont été attribuées aux unités de très faible perméabilité telles que le roc cristallin et l'argile de la mer Laflamme. Les

valeurs de conductivité hydraulique initialement attribuées aux unités de sable fin, de sable moyen et de sable grossier sont basées sur l'information provenant de la combinaison des données stratigraphiques des sondages et des résultats des essais de pompage réalisés sur l'aquifère (CIE, 1976; STES, 1977; Hydrogéol-Sol, 1999; Laboratoires S.L., 1995, 1999a, 1999b, 2000a, 2000b, 2003a, 2003b; MENVIQ, 2001). Les valeurs de rendement spécifique assignées aux unités de sable varient de 23 à 28% et elles sont basées sur les données de la littérature en hydrogéologie (e.g. Todd, 1980).

5.1.3 REPRÉSENTATION DE LA RECHARGE

Les précipitations dans la simulation en régime permanent ont été fixées à 950.8 mm, soit la moyenne annuelle de 1971 à 2000 selon les mesures prises à la base de Bagotville (EC, 2004). Les simulations en régime transitoire utilisent, pour chacune des trente-six périodes considérées (36 périodes de un mois), les valeurs mensuelles effectivement mesurées des précipitations pour chacune de ces périodes. Les précipitations tombées durant les mois d'hiver (décembre à mars inclusivement) sont additionnées en réserve et appliquées au mois d'avril, afin de reproduire l'événement important de recharge se produisant à la fonte des neiges.

5.1.4 REPRÉSENTATION DE LA DÉCHARGE

La forêt occupe environ 60 % de la superficie du territoire et elle constituée principalement d'épinettes d'âge mature. De plus, le toit de la nappe phréatique est relativement peu profond dans la plupart des secteurs, soit à moins de dix mètres de profondeur. Considérant ces informations, l'évapotranspiration a été assignée active dans le modèle jusqu'à dix mètres de profondeur. La valeur de l'évapotranspiration utilisée est de 514.1 mm dans la simulation en régime permanent, soit la moyenne annuelle à la base de Bagotville pour la période entre 1971 et 2000 (EC, 2004). En régime transitoire, les valeurs de l'évapotranspiration mesurées à la base de Bagotville sont définies pour chacune des trente-six périodes sauf durant la période hivernale où elle est considérée nulle.

Les quatorze cours d'eau sur le territoire de l'aquifère ont été modélisés comme des drains auxquels une élévation est attribuée à chaque extrémité, ainsi qu'une valeur de conductance hydraulique.

Les puits d'exploitation considérés dans le modèle conceptuel sont les puits de pompage PWSH-1, PWSH-2 et PWSH-3 de la municipalité de Saint-Honoré, et les puits PWN-1, PWN-2 et PWN-3 de Mine Niobec. La prise d'eau de surface de Ville de Saguenay, qui est située en aval de l'écoulement souterrain, capte l'exutoire du lac de l'Aqueduc à la sortie de l'aquifère. Cette prise d'eau n'est pas

représentée dans nos simulations. On émet plutôt l'hypothèse que la quantité d'eau sortant du lac de l'Aqueduc, incluant le débit prélevé par Ville de Saguenay, constitue la quantité sortant naturellement à ce cours d'eau exutoire. Pour la simulation en régime transitoire, les valeurs de débit de pompage sont fixées mensuellement à partir de la moyenne annuelle (Niobec, com. pers.; Saint-Honoré, com. pers.; Ville de Saguenay, com. pers.). La quantité prélevée à partir des puits individuels privés est négligée, considérant que la majeure partie de cette eau retourne dans le milieu aquifère après utilisation.

Les lacs Docteur, de l'Aqueduc et Joly ne sont pas considérés comme des limites à charge constante dans ce rapport-ci, contrairement à l'hypothèse émise dans le rapport intérimaire de Tremblay (2003). Ce changement de condition aux limites s'explique par des contraintes engendrées par la simulation en régime transitoire. En effet, l'assignation de charges constantes à ces plans d'eau en régime transitoire a des répercussions inopportunes laquelle ajoute ou retire des quantités illimitées d'eau dans le secteur de la charge constante et elle atténue indûment les variations de niveau d'eau avec le temps.

5.2 PROCESSUS DE CALAGE

Le processus de calage du modèle de simulation consiste en un ajustement des paramètres du système aquifère de façon à minimiser l'écart entre les valeurs

des paramètres hydrogéologiques calculées par le modèle et les mesures faites sur le terrain de ces mêmes paramètres. Un paramètre du système aquifère qui est communément soumis à un ajustement est la conductivité hydraulique. Le niveau d'eau est le paramètre hydrogéologique le plus souvent utilisé dans la comparaison entre les valeurs observées sur le terrain et celles calculées par le modèle.

Le calage représente une étape essentielle et souvent laborieuse dans le développement d'un modèle de simulation d'un système aquifère. Cette étape est requise avant l'utilisation du modèle pour simuler le comportement du système aquifère, selon divers scénarios de recharge ou d'exploitation par exemple. De plus, les résultats du calage permettent souvent d'appuyer des analyses du système aquifère, telles l'estimation de son bilan hydrique. C'est ce type d'application qui sera présenté dans une section ultérieure de ce chapitre.

Le calage du modèle numérique de l'aquifère de Saint-Honoré a été réalisé en régime permanent, puis en régime transitoire. En régime permanent, le critère de calage a consisté à reproduire, à l'intérieur d'un écart préétabli, une série de mesures de niveau d'eau réalisées à une date donnée dans trente et un piézomètres. De ces trente et une valeurs de niveau d'eau mesurées, treize proviennent de piézomètres qui ont fait l'objet d'un suivi périodique de septembre 2001 à août 2004. Ce sont les mesures faites dans ces treize piézomètres qui ont

été utilisées subséquemment pour le calage du modèle en régime transitoire. Lors du calage, les valeurs de conductivité hydraulique et la distribution des trois zones des sables aquifères ont subi de légères modifications afin d'améliorer la reproduction par le modèle du niveau d'eau mesuré dans les trente et un piézomètres mesurés sur le terrain. En première approximation, ces zones d'égale valeur de conductivité hydraulique avaient été délimitées sur la base de l'information fournie par les multiples sondages réalisés sur le territoire (CIE, 1976; Hydrogéol-Sol, 1999; Laboratoires S.L., 1995, 1999a, 2000a, 2000b, 2003a, 2003b, MENVIQ, 2001); quant aux valeurs initiales de la conductivité hydraulique, elles proviennent des résultats d'essais de pompage réalisés dans l'aquifère (STES, 1977; Laboratoires S.L., 1995, 1999b, 2000a, 2000b, 2003b).

L'analyse de l'écoulement en régime transitoire vise à reproduire les variations de l'élévation du toit de la nappe d'eau souterraine pendant les trois années du suivi. Chaque année hydrique a été divisée en douze périodes transitoires pour un total de trente-six périodes d'un mois. Les conditions aux limites sont fixées à l'intérieur du modèle pour chaque période d'un mois, mais elles peuvent varier d'une période à l'autre. C'est le cas notamment des précipitations, de l'évapotranspiration et du pompage. La surface piézométrique calculée par la simulation en régime permanent a établi les conditions initiales de la simulation en régime transitoire. Un critère de calage en régime transitoire a consisté à reproduire mensuellement les mesures de niveau d'eau dans les treize

piézomètres pendant les trois années du suivi couvrant la période de septembre 2001 à août 2004. Les treize piézomètres dont les données ont été utilisées pour le calage du modèle en régime transitoire sont PN-1, PN-6, PN-7, PN-8, PN-12, PN-13, PN-14, PN-15, PN-16, PN-18, PSH-5, PSH-7 et PVS-7 (figure 3.1). De plus, un autre critère du calage en régime transitoire consistait à reproduire la somme des flux d'écoulements mesurés aux cours d'eau exutoires pour chacune des trois années du suivi. Les valeurs de conductivité hydraulique et la distribution des trois zones des sables aquifères ont à nouveau subi de légères modifications lors de ce calage en régime transitoire, afin d'optimiser la reproduction par le modèle des niveaux d'eau mesurés dans les treize piézomètres, ainsi que le flux total d'écoulement hors du système pour chacune des trois années. Ces valeurs optimisées de la conductivité hydraulique pour les sables deltaïques aquifères sont présentées aux figures 5.1 et 5.2.

5.2.1 RÉSULTATS DU CALAGE EN RÉGIME PERMANENT

La performance du calage en régime permanent est représentée par une régression linéaire entre les valeurs de niveau d'eau mesurées et celles qui sont générées par le modèle pour l'ensemble des piézomètres.

La régression linéaire des trente et une paires de valeurs de niveau d'eau mesuré et généré en régime permanent est présentée à la figure 5.3. Cette

représentation graphique démontre la concordance entre les valeurs de niveau d'eau générées par la simulation et celles mesurées sur le terrain. En effet, une majorité de points se situe à l'intérieur ou en bordure de l'intervalle de 95 %. Le coefficient de corrélation est de 0.98 et la moyenne de la racine de la somme des écarts au carré (en anglais RMS pour *root mean squared error*) normalisée est de 5.93 % pour cette simulation en régime permanent. Enfin, le résiduel moyen et le résiduel moyen absolu entre les niveaux piézométriques mesurés et générés sont respectivement de 0.09 et de 1.29 m. Ces indicateurs statistiques de performance du calage sont calculés à partir des équations 1, 2, 3, 4 et 5 présentées à l'annexe F.

Il n'existe pas d'indicateur de performance du calage qui soit absolu. En effet, chacun des indicateurs présentés peut être biaisé dépendamment du contexte simulé. Ainsi tous ces indicateurs doivent être considérés pour évaluer la performance du calage.

5.2.2 RÉSULTATS DU CALAGE EN RÉGIME TRANSITOIRE

La performance du calage en régime transitoire est représentée par une régression linéaire entre les valeurs de niveau d'eau mesurées et celles qui sont générées par le modèle pour l'ensemble des piézomètres, ainsi que par les

chronographies de niveau d'eau (*time-series graphs*) et par le bilan de masse de la simulation.

5.2.2.1 RÉGRESSION LINÉAIRE

La figure 5.4 illustre la régression linéaire de toutes les valeurs de niveau mesurées et celles qui sont générées par la simulation en régime transitoire considérées, ce aux treize piézomètres qui ont fait l'objet d'un suivi sur trois ans. Cette figure met en graphique 4680 points, soit la représentation de dix résultats mensuels pendant trois ans aux treize piézomètres. Chaque nuage de points illustre ainsi le champ de variabilité à travers lequel évoluent les valeurs de niveau mesurées et générées de un ou de plusieurs piézomètres. Cette représentation graphique démontre la concordance et la stabilité des résultats générés avec ceux mesurés pour la durée des trois années simulées. Le coefficient de corrélation est de 0.98 et la RMS (*root mean squared error*) normalisée est de 4.68 % durant les 1095 jours de simulation en régime transitoire. Enfin, le résiduel moyen et le résiduel moyen absolu entre les niveaux piézométriques mesurés et générés sont respectivement de 0.27 et de 1.05 m.

5.2.2.2 CHRONOGRAPHIES

Les figures 5.5 à 5.11 présentent les chronographies des niveaux piézométriques mesurés et générés durant 1095 jours (trois ans) en régime transitoire. Ces figures montrent les variations avec le temps, i.e. l'évolution en régime transitoire du niveau d'eau de septembre 2001 à août 2004. Les variations des niveaux piézométriques générés par le modèle aux piézomètres PSH-5, PSH-7, PN-18, PVS-7 (figures 5.5, 5.6 et 5.11) et aux piézomètres PN-14, PN-15 (figure 5.8) reproduisent adéquatement les valeurs mesurées sur le terrain, bien que les valeurs générées soient systématiquement surestimées pour les premiers et sous-estimées pour les seconds. Quant aux niveaux piézométriques générés et mesurés aux piézomètres PN-1, PN-6, PN-8, PN-12, PN-13 et PN-16 (figures 5.6, 5.7, 5.9 et 5.10), ils présentent des faibles résiduels moyens inférieurs au résiduel moyen absolu de 1.05 m. Par contre, l'amplitude de variation des niveaux piézométriques générés est plus grande que celle des niveaux mesurés, notamment lors de périodes d'étiage et d'événements de recharge à la fonte des neiges. On remarque un calage moins efficace avec un résiduel moyen de 2.94 m entre les valeurs de niveau piézométrique générées et mesurées à l'endroit du piézomètre PN-7 (figure 5.9).

5.2.2.3 BILAN DE MASSE DE LA SIMULATION

Le tableau 5.1 compare le bilan hydrique de l'aquifère estimé au chapitre 4 à partir des données de terrain (tableau 4.7) pour les années 2001-2002, 2002-2003 et 2003-2004, avec le bilan de masse de la simulation numérique en régime transitoire correspondant à ces mêmes années.

Tableau 5.1- Comparaison des bilans hydriques estimés à partir des données de terrain pour les trois années du bilan hydrique avec les bilans de masse de la simulation numérique en régime transitoire

Composante du bilan	Lame d'eau simulée (mm)			Lame d'eau estimée (mm)		
	Année 2001-2002	Année 2002-2003	Année 2003-2004	Année 2001-2002	Année 2002-2003	Année 2003-2004
Entrées						
Précipitation	812.3	813.9	890.6	812.7	814.3	892.2
Sorties						
Emmagasinement	-142.5	20.9	7.0	-43.7	-51.1	+40.0
Puits d'exploitation	129.9	136.6	128.1	130.3	136.9	128.5
Cours d'eau	405.3	286.2	362.3	328.1	299.9	398.1
Évapotranspiration réelle	419.5	370.2	393.1	398.0	428.6	325.6
Entrées – Sorties	0.1	0.0	0.1	0	0	0

Les précipitations et les quantités d'eau exploitées constituent des paramètres d'entrée préalablement définis dans le modèle numérique; les valeurs des paramètres résultant des simulations sont comparables à celles qui sont

estimées à partir des données de terrain. Les variations de l'emmagasinement dans les simulations sont influencées par les conditions initiales du modèle, lesquelles utilisent les résultats de niveau piézométrique obtenus par la simulation en régime permanent ; ceci explique l'importante diminution de l'eau emmagasinée dans le modèle la première année. La comparaison entre les valeurs résultant de la simulation et celles estimées à partir des données de terrain indique que la simulation reproduit adéquatement la lame d'eau évapotranspirée et celle sortant aux cours d'eau exutoires.

La reproduction de la lame d'eau sortant aux cours d'eau exutoires constitue un critère supplémentaire de calage du modèle en régime transitoire (tableau 5.2). Le pourcentage d'écart entre la lame d'eau simulée et estimée est de 23.5, -4.6 et -8.9% respectivement pour la première, la deuxième et la troisième année du bilan hydrique. Le pourcentage d'écart relativement élevé de la première année provient des conditions initiales utilisées par la simulation en régime transitoire, lesquelles ont été établies par la simulation en régime permanent.

Tableau 5.2- Comparaison de la valeur de la lame d'eau sortant aux cours d'eau exutoires selon les simulations et selon les estimations faites à partir des données de terrain, pour chacune des trois années du bilan hydrique

	Lame d'eau sortante aux cours d'eau exutoires		Pourcentage d'écart
	Simulée	Estimée	
Année 2001-2002	405.3	328.1	+23.5
Année 2002-2003	286.2	299.9	-4.6
Année 2003-2004	362.3	398.1	-8.9

5.2.2.4 CARTE PIÉZOMÉTRIQUE

La figure 5.12 superpose la piézométrie estimée par interpolation géostatistique à partir de niveaux d'eau mesurés le 16 août 2004 avec la piézométrie obtenue pour la même date, i.e. après 1095 jours, par la simulation en régime transitoire. Les lignes équipotentiellles sont tracées à un intervalle de cinq mètres. On remarque une bonne correspondance entre les deux séries de courbes dans le secteur de l'aéroport, notamment pour les isovaleurs de 160, 155, 150, 145 et 140 m. On constate par contre la présence d'artefacts dans les secteurs périphériques du domaine simulé, là où les points d'information sont plus distancés et l'interpolation des valeurs est plus incertaine. C'est le cas par exemple du fléchissement des lignes de contour piézométrique des valeurs mesurées dans le secteur sud-ouest de l'aquifère et des valeurs simulées dans le secteur sud-est.

5.2.2.5 MAGNITUDE ET DISTRIBUTION SPATIALE DES ERREURS RÉSIDUELLES

La figure 5.13 présente la distribution spatiale des erreurs résiduelles (ou écarts) absolues observées à chaque piézomètre entre le niveau d'eau mesuré et le niveau d'eau généré par la simulation numérique en régime transitoire pendant 1095 jours (trois ans). Les erreurs résiduelles absolues les plus élevées se situent dans les secteurs du domaine simulé où les points de mesure sont le plus distancés, soit dans les secteurs nord et sud de l'aquifère ou encore dans les secteurs où la charge hydraulique est élevée, à PN-7 par exemple. La magnitude de l'erreur résiduelle absolue est proportionnelle au diamètre du cercle noir. Les erreurs résiduelles absolues des piézomètres PN-1, PN-6, PN-8, PN-12, PN-13, PN-16 et PVS-7 sont inférieures au résiduel moyen absolu de 1.05 m. Par contre, les piézomètres PSH-5, PSH-7, PN-7, PN-14, PN-15 et PN-18 ont des erreurs résiduelles absolues supérieures au résiduel moyen absolu de 1.05 m.

5.3 SIMULATIONS PRÉVISIONNELLES

Tel que présenté précédemment, le modèle numérique a été adéquatement calé en régime transitoire pendant trois années consécutives. Les critères de calage du modèle consistaient à reproduire le niveau d'eau mensuel de treize piézomètres et le débit annuel total sorti à dix cours d'eau. Une fois calé, ce modèle numérique a donc été utilisé pour étudier trois différents scénarios de

recharge et d'exploitation de l'aquifère de Saint-Honoré. Ces scénarios, que nous qualifierons d'optimiste, de connu et de pessimiste, ont été effectués sur un horizon de trois années futures, i.e. du 1^{er} septembre 2004 au 31 août 2007. Cette section décrit plus en détail les différentes conditions de recharge et d'exploitation qui caractérisent chacun des scénarios, ainsi que leurs prévisions après trois années quant à la variation du niveau d'eau et à la quantité d'eau exploitée en comparaison avec la recharge.

5.3.1 PRÉSENTATION DES SCÉNARIOS

Dans le cadre de cet exercice, les prévisions se déroulent sur un horizon de trois années. En effet selon Bredehoeft (2003), les prévisions qui sont effectuées sur un intervalle de temps similaire à la période-échantillon utilisée pour le calage, en occurrence trois années dans ce cas-ci, possèdent un degré de certitude raisonnable; au-delà de cette intervalle, l'exactitude des prévisions peut diminuer grandement.

5.3.1.1 PREMIER SCENARIO : OPTIMISTE

Le premier scénario est désigné optimiste. En effet, il utilise les précipitations mensuelles moyennes de 30 ans, totalisant 950.8 mm, ainsi que les quantités annuelles moyennes d'eau prélevées entre 2001 et 2004 aux puits de la

municipalité de Saint-Honoré et de Mine Niobec, respectivement de 32.0 mm et de 36.6 mm.

Tel que mentionné précédemment, la prise d'eau de surface de Ville de Saguenay, qui est située en aval de l'écoulement souterrain, capte l'exutoire du lac de l'Aqueduc à la sortie de l'aquifère. Cette prise d'eau n'a donc pas été modélisée pour la simulation. Dans le cadre de ces simulations, on concevait plutôt l'hypothèse que si le débit n'était pas capté par la prise, il affluerait naturellement au cours d'eau à la sortie du lac de l'Aqueduc. Aussi, le calage n'a pas été effectué de façon individuelle sur le débit de chacun des cours d'eau, mais plutôt sur le débit annuel total de tous les cours d'eau. Les prévisions ne portent donc pas sur le débit qui serait disponible à la prise d'eau de surface de Ville de Saguenay, située à la sortie du lac de l'Aqueduc. Il est possible, par exemple que le débit disponible pour la prise d'eau de surface du lac de l'Aqueduc ressente de façon plus accentuée les exploitations effectuées en amont. Nous avons simplement vérifié que la quantité totale sortie par tous les cours d'eau demeurerait nettement supérieure dans notre modèle à la quantité annuelle moyenne prélevée par Ville de Saguenay correspondant à une lame d'eau de 63.2 mm.

5.3.1.2 DEUXIEME SCENARIO : CONNU

Le deuxième scénario s'apparente à la situation connue lors du suivi. Il dispose de précipitations mensuelles inférieures de 15% à la moyenne de 30 ans, pour un total annuel de 808.2 mm, et il utilise les quantités annuelles moyennes d'eau prélevée de 2001 à 2004 aux puits de la municipalité de Saint-Honoré et de Mine Niobec, respectivement de 32.0 mm et de 36.6 mm. Une considération a été à nouveau portée afin de vérifier si dans le modèle, une quantité d'eau nettement supérieure à la quantité annuelle moyenne prélevée de 63.2 mm par Ville de Saguenay s'écoulait par tous les cours d'eau.

5.3.1.3 TROISIEME SCENARIO : PESSIMISTE

Le troisième scénario est qualifié de pessimiste. D'une part, il emploie des précipitations mensuelles inférieures de 15% à la moyenne de 30 ans, qui totalisent 808.2 mm. D'autres part, il considère une augmentation de 15% des débits prélevés par rapport aux débits moyens des principaux exploitants entre 2001 et 2004. Cette augmentation globale correspondrait alors à une accroissement d'environ 93.9 m³/h (415 GUSPM) du débit exploité de l'aquifère réparti de façon uniforme sur tous les principaux exploitants. Pour ce faire, les quantités prélevés sont accrues de 15% aux puits de la municipalité de Saint-

Honoré et de Mine Niobec, respectivement à 36.8 mm et 42.1 mm. Il est implicite que ce scénario implique qu'une lame d'eau de plus de 72.7 mm, correspondant à une augmentation de 15% des prélèvements de Ville de Saguenay, devrait s'écouler à la sortie de tous les cours d'eau exutoires. Toutefois, il est possible que les cours d'eau alimentant le lac de l'Aqueduc ressentent de façon plus marquée l'augmentation de l'exploitation de l'aquifère en amont, et que leur débit ne soit plus suffisamment élevé pour permettre l'alimentation de la prise d'eau de surface du lac de l'Aqueduc.

5.3.2 PREVISIONS DES SCENARIOS ENVISAGES

Pour chacun de ces scénarios, nous effectuerons les prévisions quant à la variation du niveau d'eau entre le 31 août 2004 et le 1^{er} septembre 2007, et quant à la proportion de la quantité d'eau exploitée par rapport à la recharge pour la troisième année, soit entre le 31 août 2006 et 1^{er} septembre 2007.

5.3.2.1 VARIATION DU NIVEAU D'EAU

La variation de l'élévation du niveau d'eau a été estimée à partir de deux cartes piézométriques générées par la simulation, l'une en date du 1^{er} septembre 2007 et l'autre représentant la situation du niveau d'eau à la fin du programme de suivi au 31 août 2004. En effet le modèle fournit, pour chacune de ces dates, une

surface piézométrique simulée de l'aquifère. La variation totale de l'élévation du niveau d'eau au cours des trois années est alors estimée en soustrayant la surface piézométrique en date du 31 août 2004 de la surface piézométrique du 1^{er} septembre 2007. Le résultat de cette opération est présenté sous forme de carte de variation du niveau d'eau pour chacun des scénarios énoncés précédemment.

En utilisant un scénario optimiste, i.e. des précipitations moyennes et les débits de pompage moyens entre 2001 et 2004, on remarque une remontée généralisée, mais variable du niveau d'eau (figure 5.14). Cette dernière est plus importante au nord-est de l'aéroport, atteignant de +0.8 à +1.0 m et elle diminue de façon assez régulière en direction sud et sud-ouest pour porter la remontée à +0.2 à +0.4 m dans ces secteurs. En effet, les nombreuses résurgences, situées au pourtour sud et sud-ouest de l'aquifère, drainent les eaux souterraines et amortissent ainsi la remontée du niveau d'eau.

En utilisant un scénario, dit connu, i.e. celui qui a prévalu durant les deux premières années du suivi et qui utilise des précipitations 15% inférieures à la normale et les débits de pompage moyens entre 2001 et 2004, les prévisions sur le niveau d'eau en date du 1^{er} septembre 2007 présentent une baisse variable par rapport au niveau d'eau mesuré le 31 août 2004. Cette baisse du niveau d'eau atteint son maximum, soit de -0.6 à -0.8 m, pour un petit secteur à l'ouest de

l'aéroport, et de -0.4 à -0.6 m, pour le secteur même de l'aéroport (figure 5.15). Cette baisse tend cependant à se résorber en périphérie de l'aquifère.

Le troisième scénario, qualifié de pessimiste, utilise des précipitations inférieures de 15% à la normale de 30 ans, et suppose des quantités d'eau prélevées dans l'aquifère de 15% supérieures aux débits de pompage moyens entre 2001 et 2004. En appliquant ces conditions pessimistes, on remarque une baisse généralisée et plus ou moins concentrique du niveau d'eau autour du secteur de l'aéroport, ce dernier étant le secteur le plus fortement affecté (figure 5.16). Directement au sud-ouest de l'aéroport, la variation appréhendée est de -0.8 à -1.2 m, tandis que le secteur même de l'aéroport présente un abaissement du niveau d'eau de -0.6 à -0.8 m. Le secteur au sud de l'aéroport est également affecté par une baisse d'environ -0.4 à -0.6 m. En périphérie de l'aquifère, la baisse estimée est de 0.0 à -0.2 m.

5.3.2.2 EXPLOITATION PAR RAPPORT À LA RECHARGE

La figure 5.17 présente la proportion de la quantité d'eau exploitée par rapport à la recharge dans chacun des scénarios prévisionnels lors de la troisième année, soit pour la période entre le 31 août 2006 et le 1^{er} septembre 2007. Seules les prévisions de la troisième année sont présentées ici, puisque les variations d'eau emmagasinée dans l'aquifère sont faibles, moins de 2%. On peut ainsi

présumer que les conditions de recharge et d'exploitation à ce moment auraient atteint un certain équilibre.

Pour chacun des scénarios, les précipitations qui constituent l'unique entrée d'eau (100%) dans l'aquifère se répartissent de façon semblable, i.e. environ 43 à 46% des précipitations tombées retournent par évapotranspiration qui est inéluctable, tandis que la balance, environ 54 à 57%, s'infiltrant et jouent un rôle de recharge pour l'aquifère (figure 5.17).

En utilisant un scénario optimiste avec des précipitations moyennes de 950.8 mm, les quantités d'eau exploitées représentent environ 24% de la recharge de l'aquifère. Le deuxième scénario, quant à lui, s'apparente davantage à la situation connue lors du suivi. En effet, il utilise des précipitations inférieures de 15% à la normale durant trois années consécutives. Aussi, la quantité d'eau prélevée par rapport au terme de la recharge atteint une proportion d'environ 30%. Le scénario pessimiste, pour lequel les précipitations sont inférieures de 15% à la normale et l'exploitation est augmentée de 15%, prélève environ 35% du terme de la recharge.

5.4 LIMITATIONS DU MODÈLE NUMÉRIQUE

En vertu des hypothèses qui lui sont implicites, le modèle numérique présenté simule adéquatement plusieurs aspects de l'écoulement régional dans l'aquifère de Saint-Honoré. Cependant, un modèle numérique même s'il est bien calé ne peut pas être considéré comme produisant l'unique comportement possible du système aquifère. Par exemple, un modèle numérique basé sur un modèle conceptuel différent, aurait quand même pu être adéquatement calé.

Plusieurs incertitudes demeurent notamment dans le modèle conceptuel, dans la géométrie et les propriétés hydrogéologiques des unités stratigraphiques, ainsi que dans les conditions de recharge de l'aquifère. Ces paramètres ont une influence majeure sur les résultats du modèle. Les valeurs de plusieurs de ces paramètres ont été estimées à partir de l'information météorologique provenant de la base de Bagotville, ainsi que de l'information des sondages et des essais de pompage réalisés sur l'aquifère. Les données de chacune de ces sources d'informations sont elles aussi entachées d'incertitudes qui leur sont propres. Les secteurs de l'aquifère où il y a peu ou pas d'information présentent un degré d'incertitude plus élevé, comme le démontrent les figures 5.12 et 5.13.

Les variations des niveaux piézométriques générés (durées et amplitudes) par le modèle reproduisent adéquatement les valeurs mesurées sur le terrain, bien

que le logiciel ModFlow estime ces valeurs en omettant les phénomènes de rétention capillaire et de drainage gravitaire qui se produisent dans la zone non-saturée.

Enfin, les prévisions de ce modèle numérique constituent seulement un exercice expérimental à titre informatif. Tel que déjà mentionné, la prise d'eau de surface de Ville de Saguenay n'a pas été modélisée, aussi il est possible que le cours d'eau à partir duquel s'alimente ce dernier soit affecté de façon plus marquée à cet endroit par les prélèvements effectués en amont.

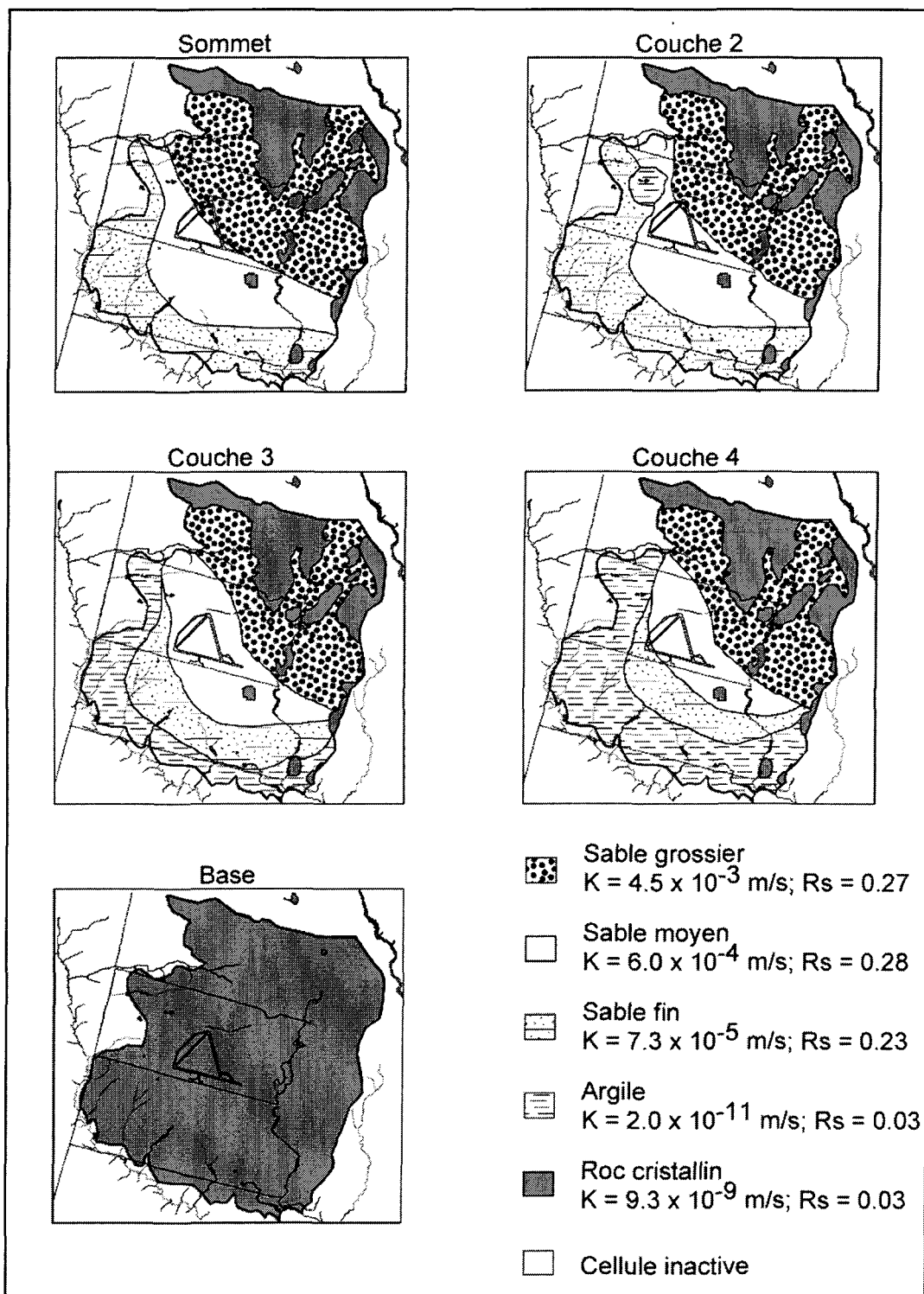


Figure 5.1- Distribution des unités hydrostratigraphiques de chacune des couches du modèle numérique, ainsi que les valeurs correspondantes de la conductivité hydraulique (K) et du rendement spécifique (R_s)

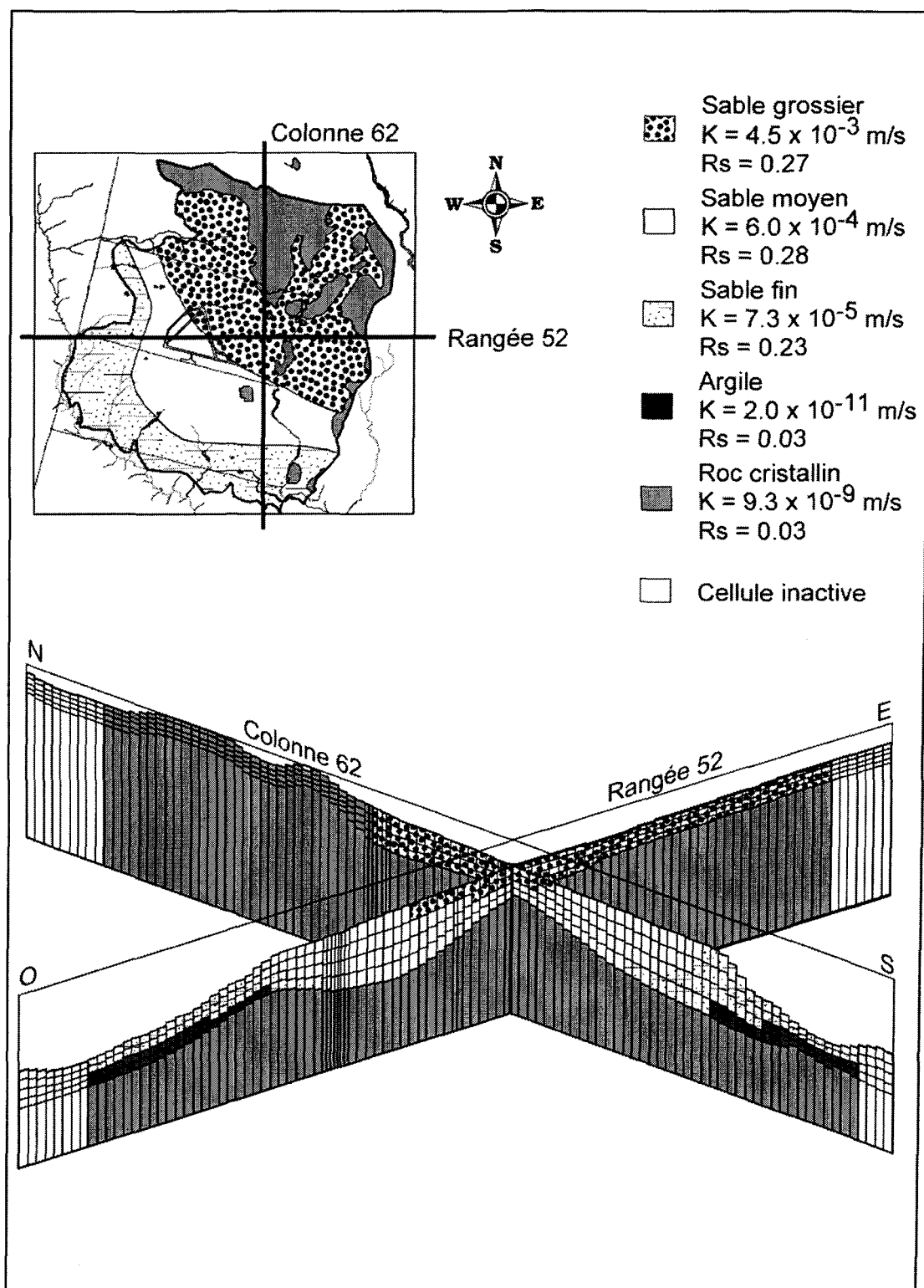


Figure 5.2- La distribution des unités hydrostratigraphiques à travers une colonne et une rangée du modèle numérique

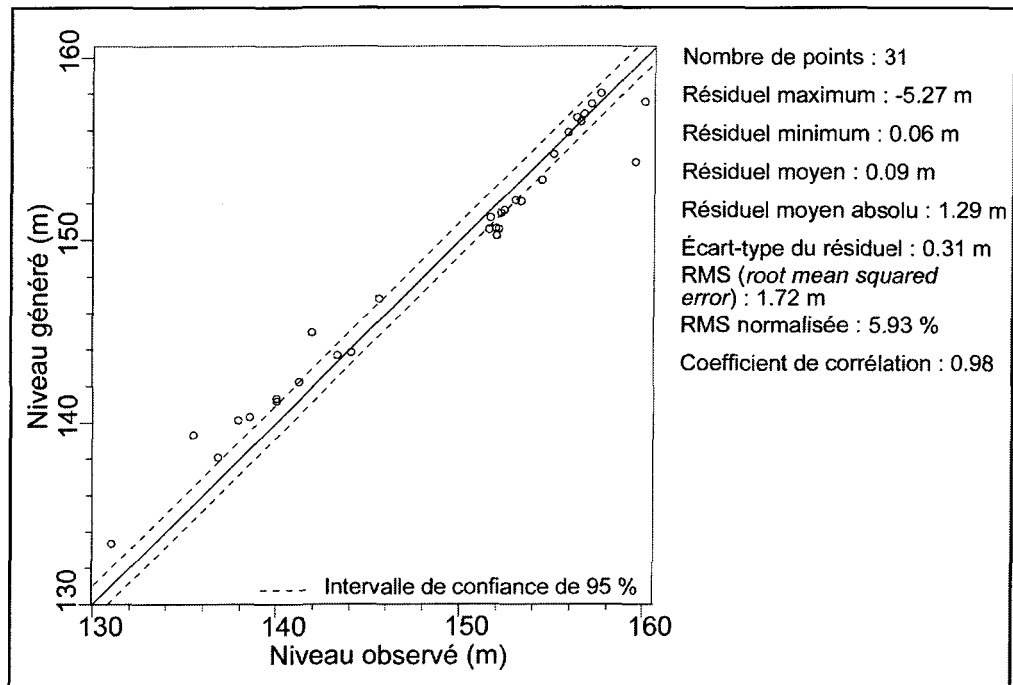


Figure 5.3- Régression linéaire des niveaux piézométriques mesurés et générés en régime permanent

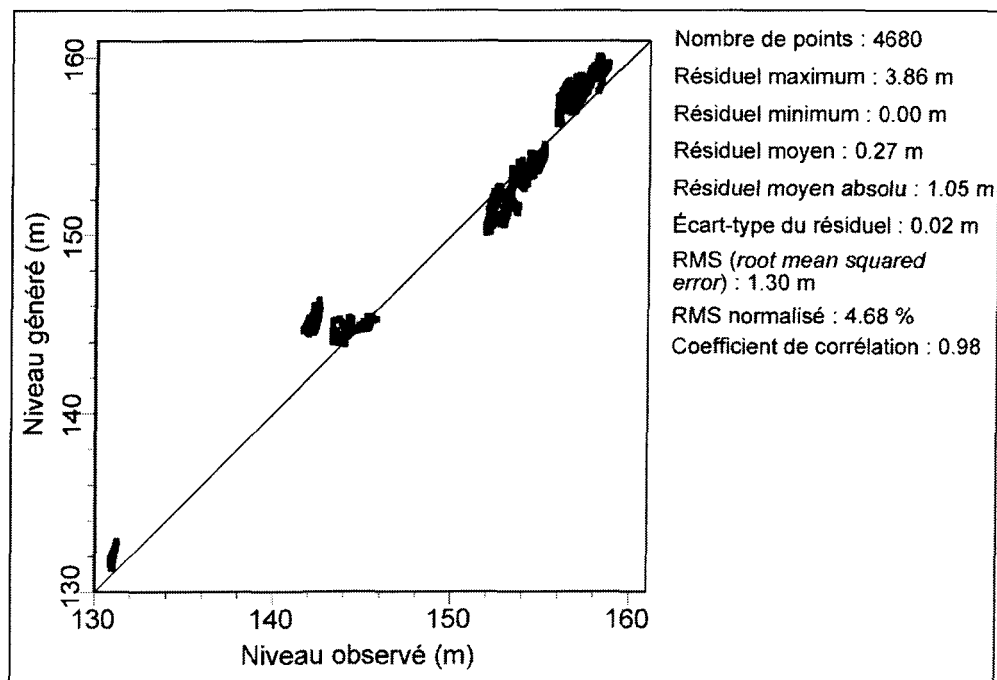


Figure 5.4- Régression linéaire des niveaux piézométriques mesurés et générés durant les 1095 jours (trois ans) de simulation en régime transitoire

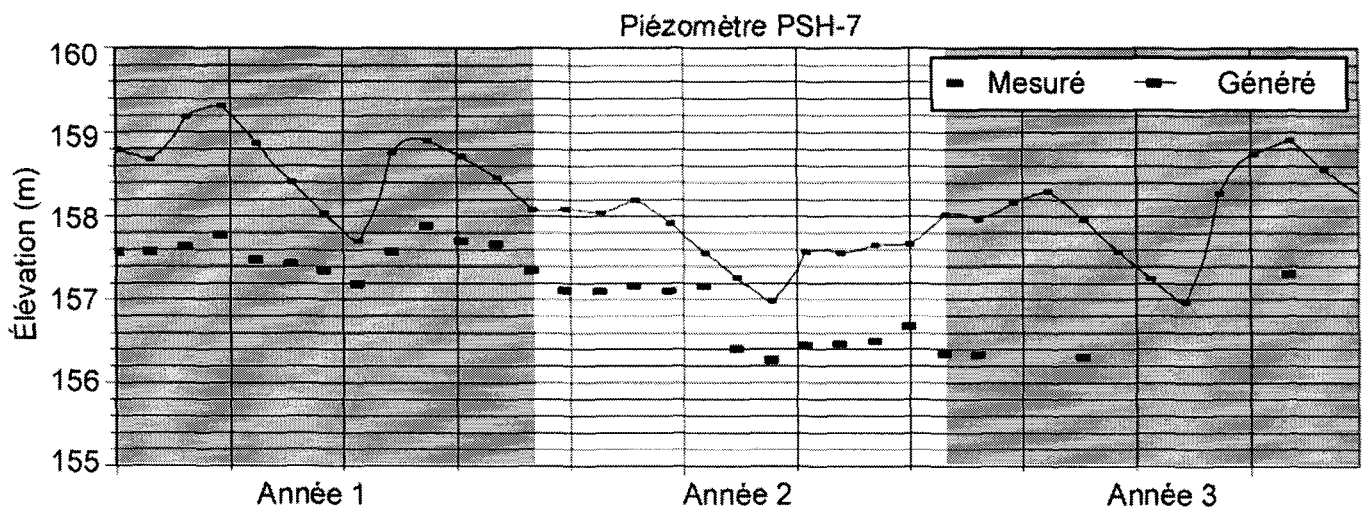
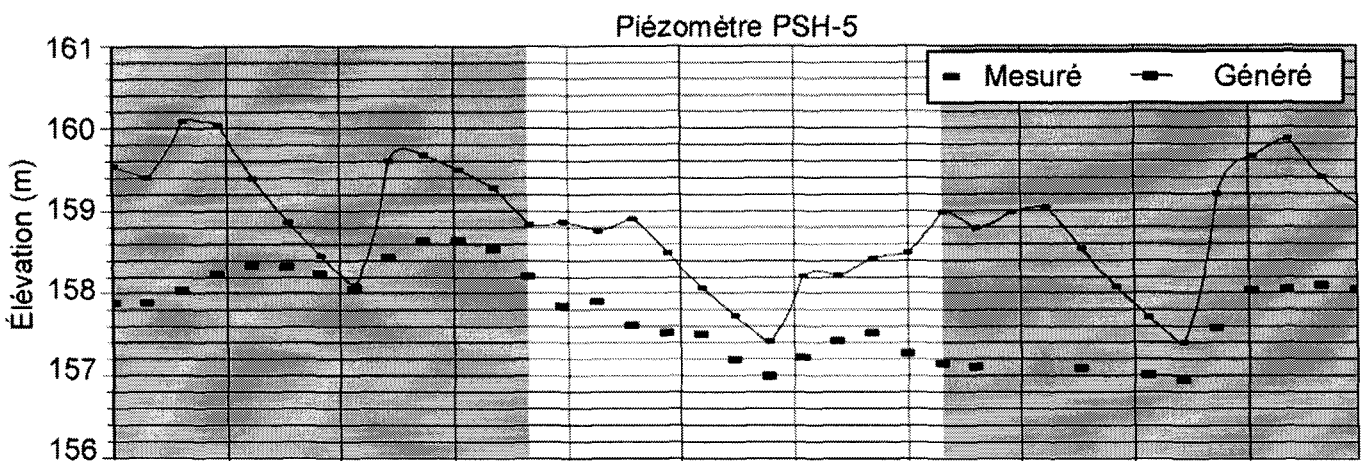


Figure 5.5- Chronographie des niveaux piézométriques mesurés et générés durant 1095 jours en régime transitoire à PSH-5 et PSH-7

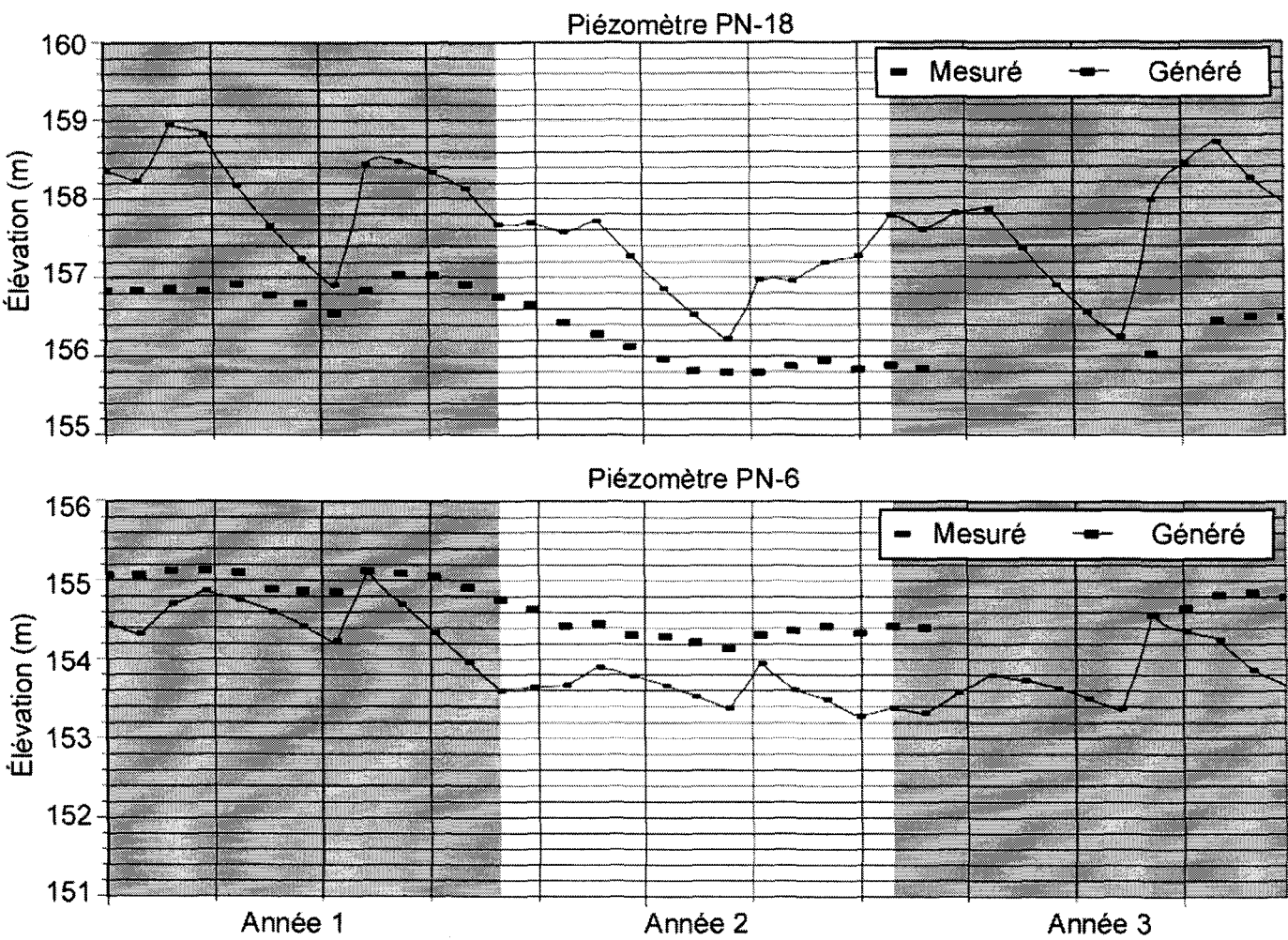


Figure 5.6- Chronographie des niveaux piézométriques mesurés et générés durant 1095 jours en régime transitoire à PN-18 et PN-6

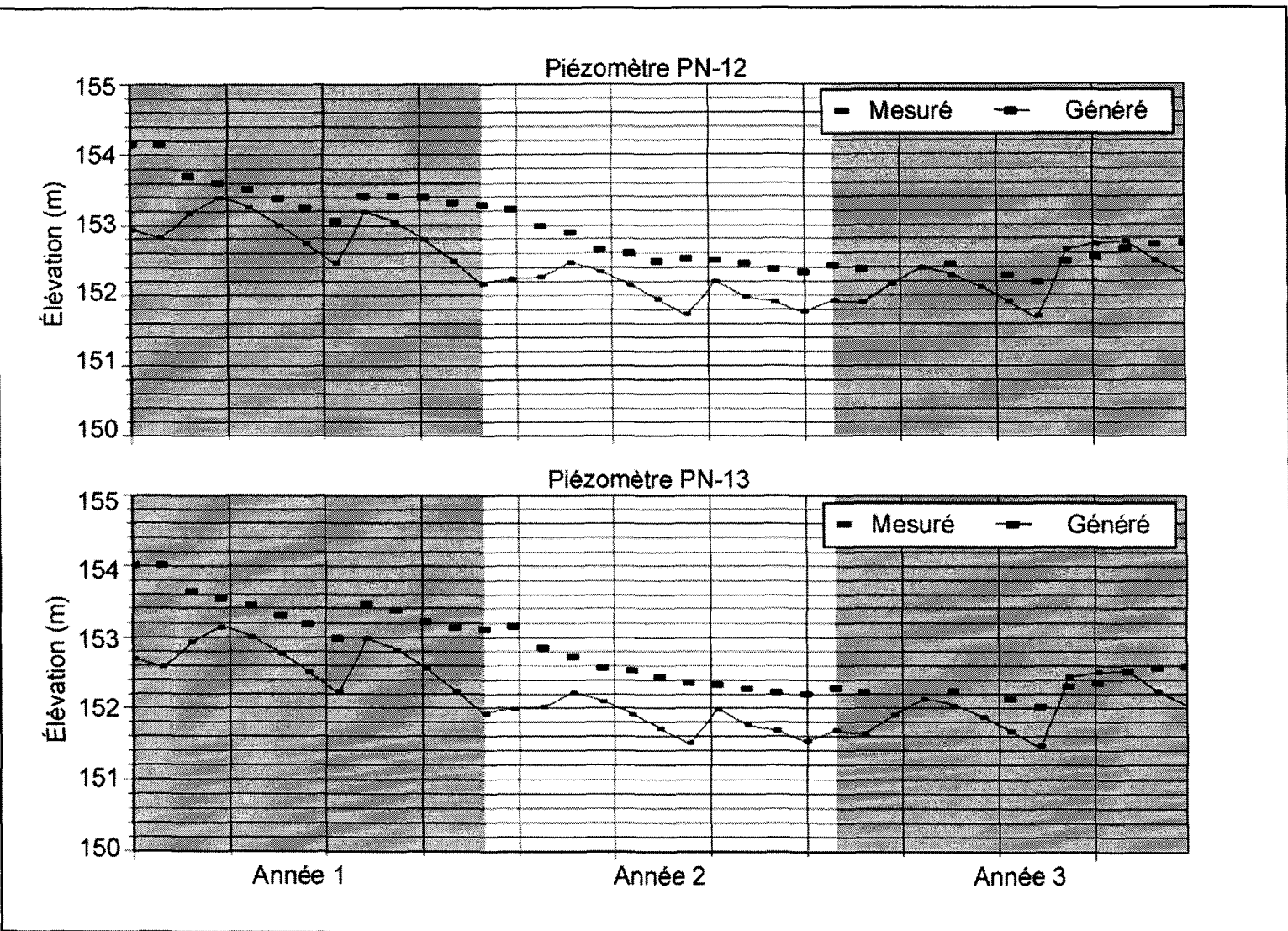


Figure 5.7 - Chronographie des niveaux piézométriques mesurés et générés durant 1095 jours en régime transitoire à PN-12 et PN-13

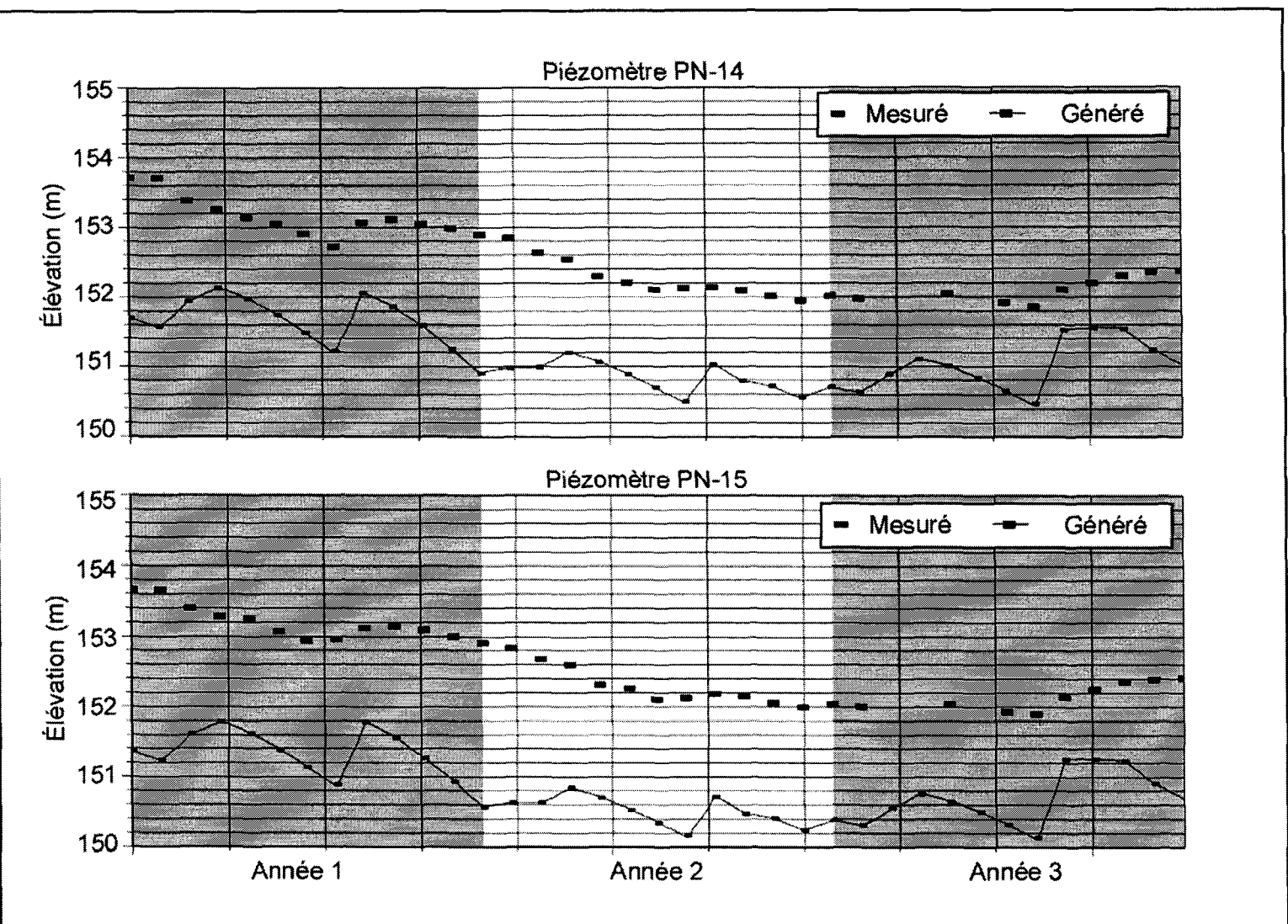


Figure 5.8- Chronographie des niveaux piézométriques mesurés et générés durant 1095 jours en régime transitoire à PN-14 et P-15

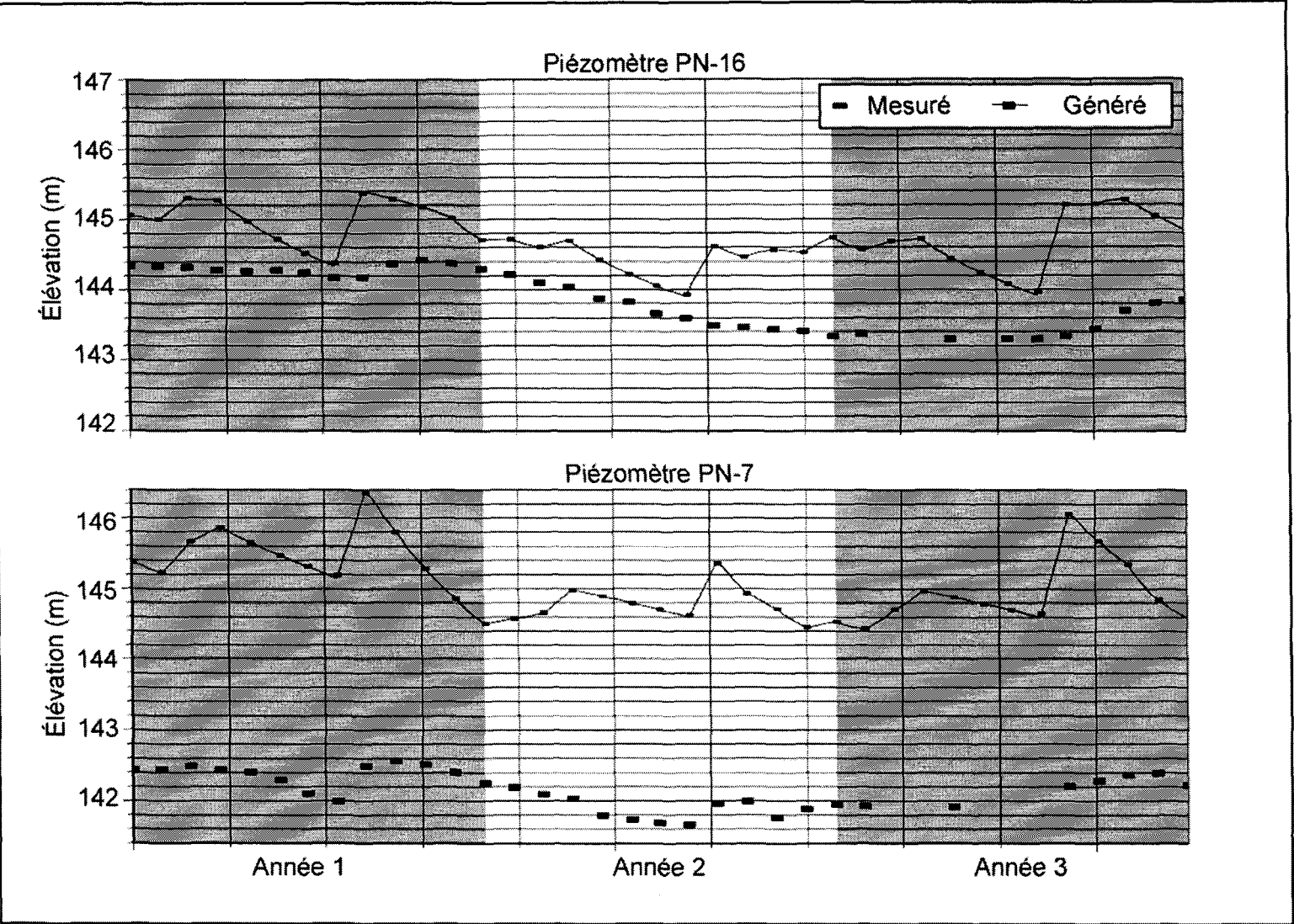


Figure 5.9- Chronographie des niveaux piézométriques mesurés et générés durant 1095 jours en régime transitoire à PN-16 et PN-7

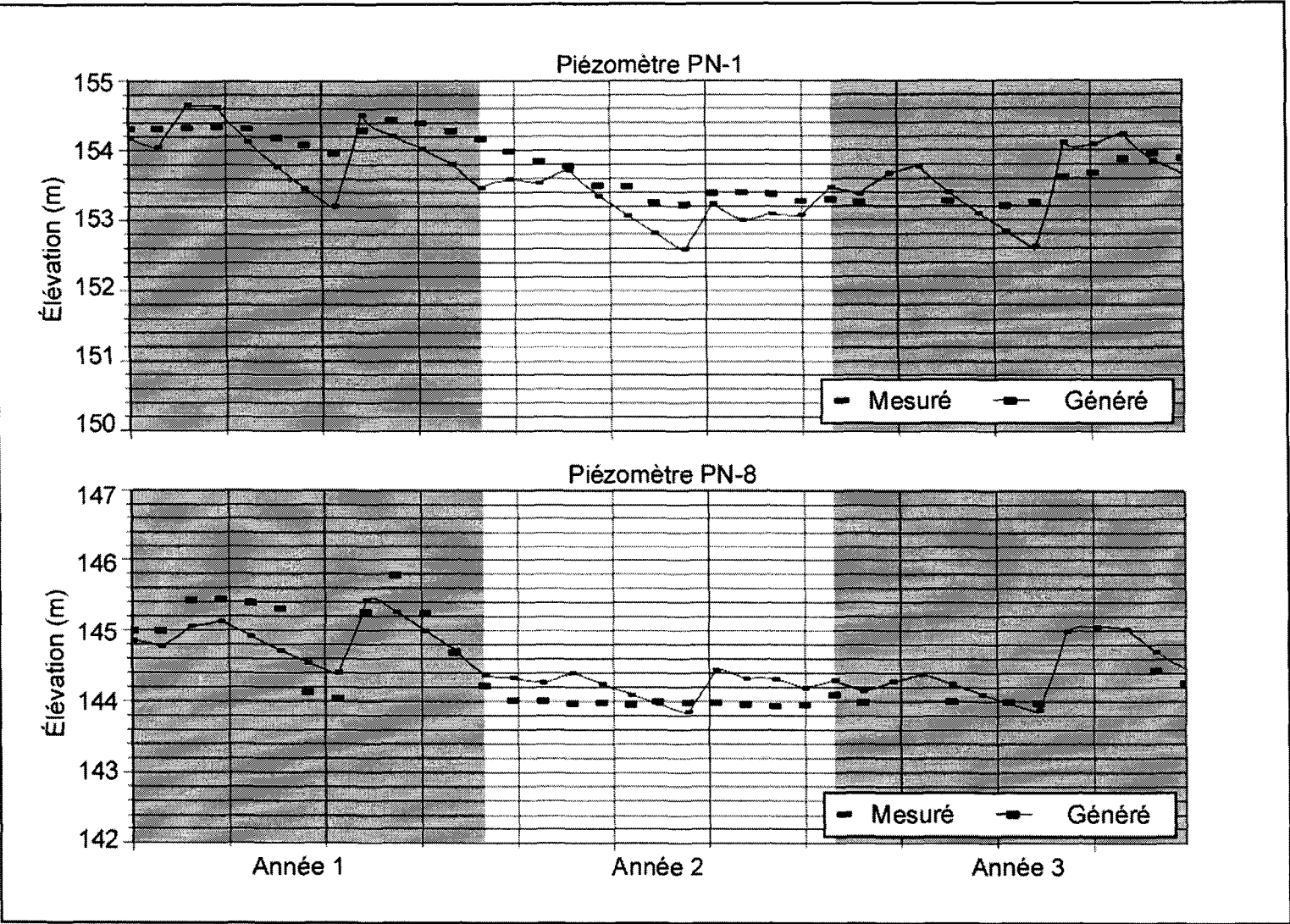


Figure 5.10- Chronographie des niveaux piézométriques mesurés et générés durant 1095 jours en régime transitoire à PN-1 et PN-8

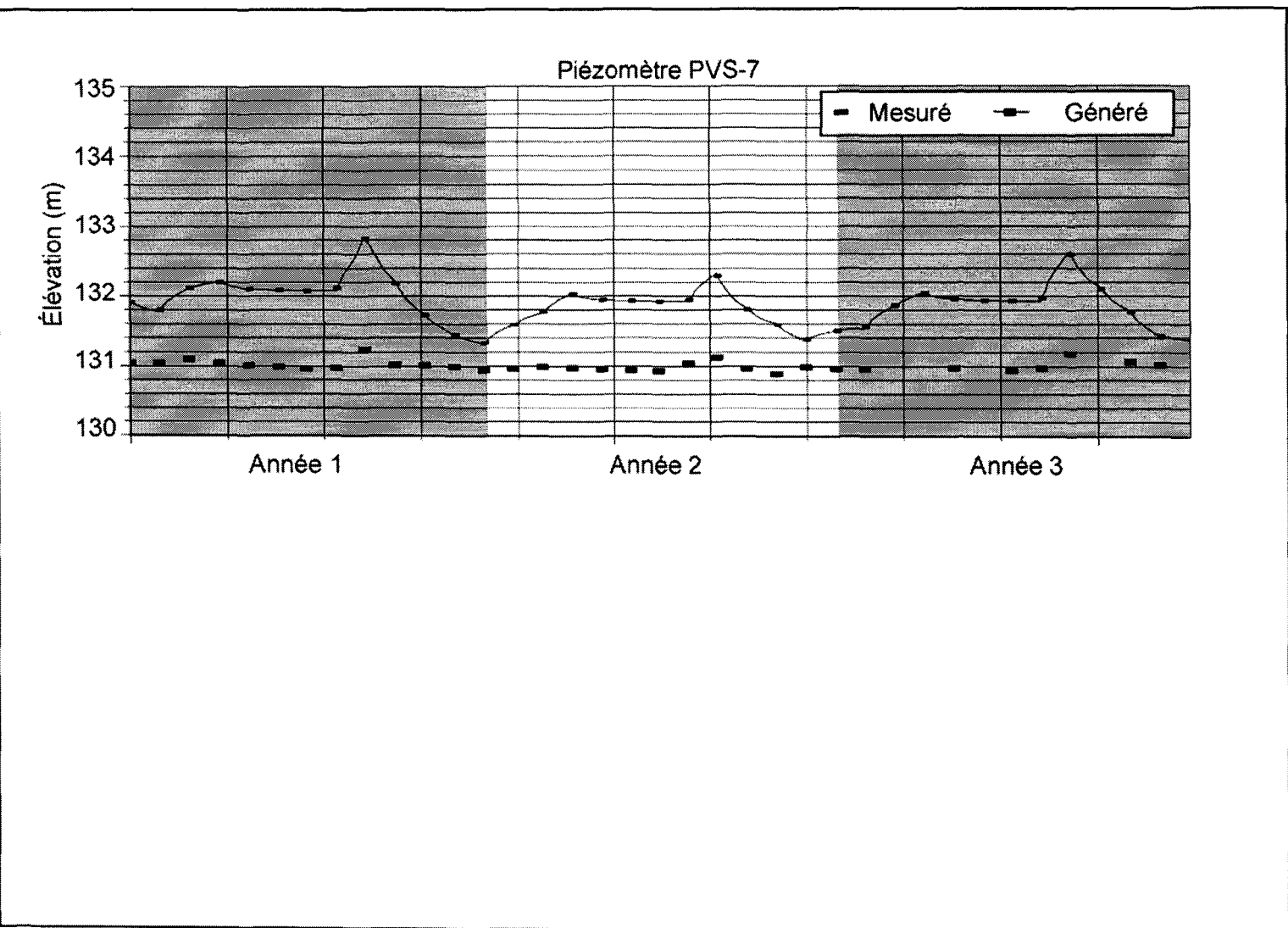


Figure 5.11 - Chronographie des niveaux piézométriques mesurés et générés durant 1095 jours en régime transitoire à PVS-7

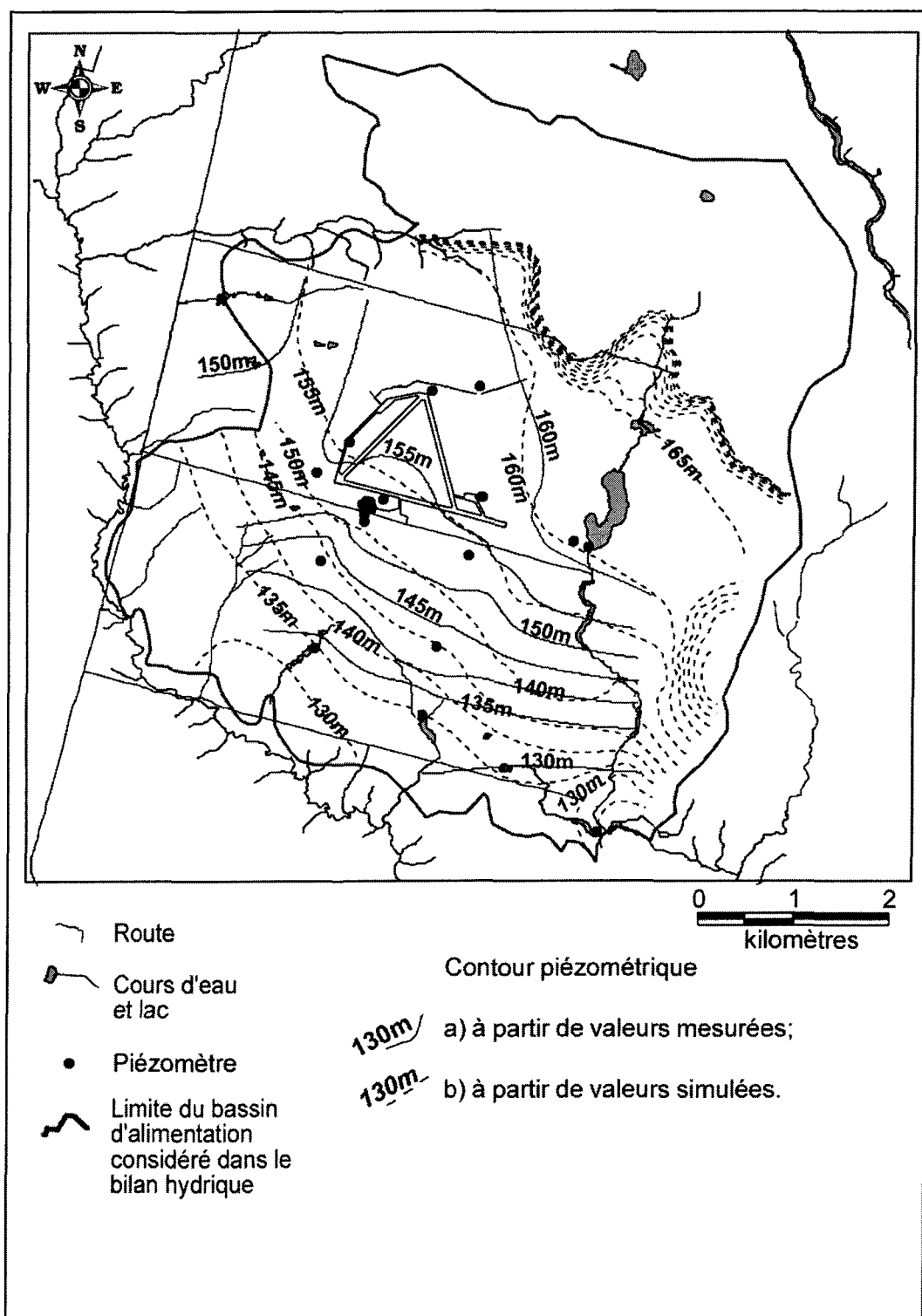


Figure 5.12- Comparaison de la piézométrie estimée par interpolation géostatistique à partir de niveaux d'eau mesurés le 16 août 2004 avec la piézométrie simulée pour la même date en régime transitoire

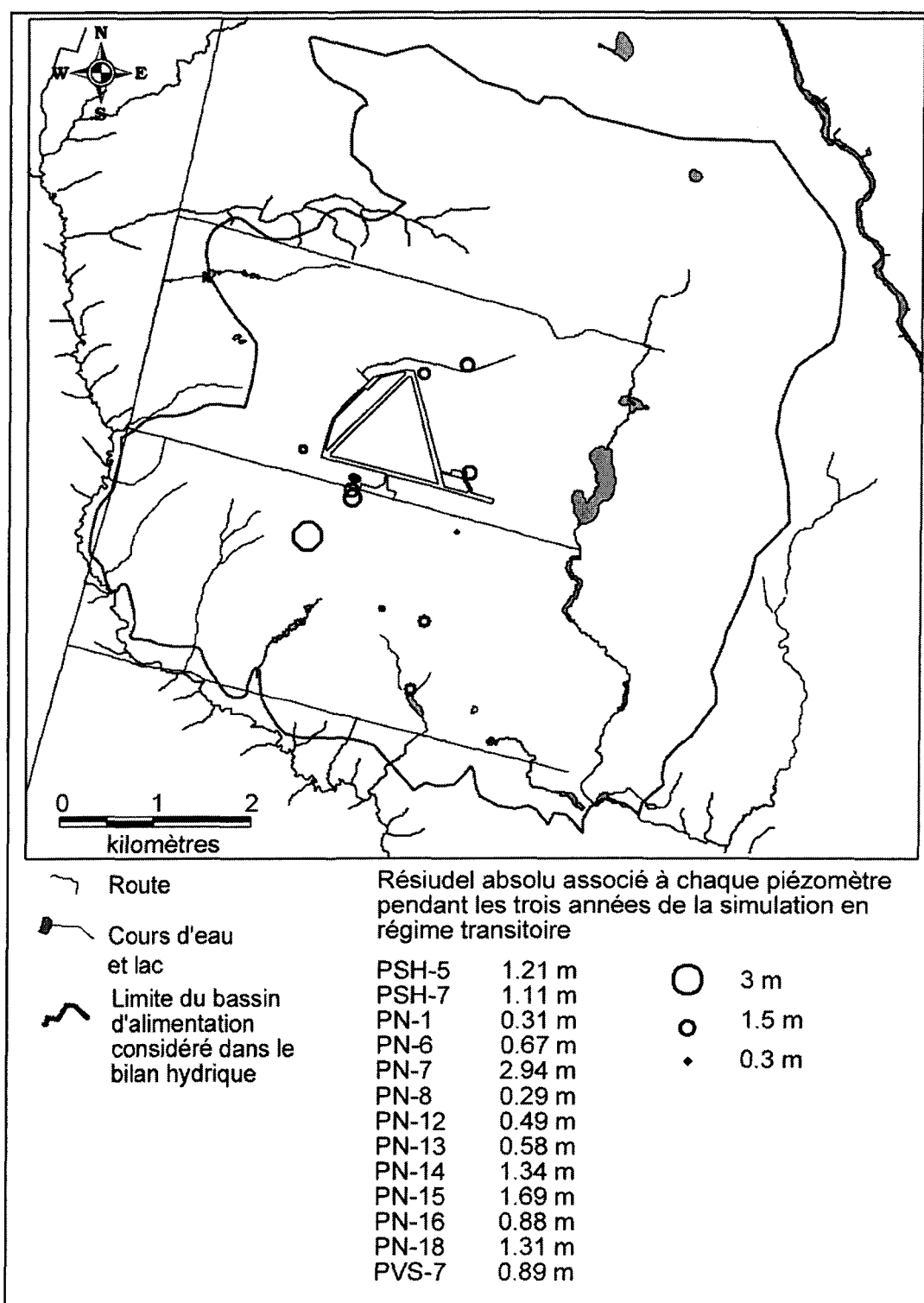


Figure 5.13- Magnitude et distribution spatiale des erreurs résiduelles associées à chaque piézomètre entre le niveau d'eau mesuré et le niveau d'eau généré par la simulation numérique en régime transitoire pendant trois années

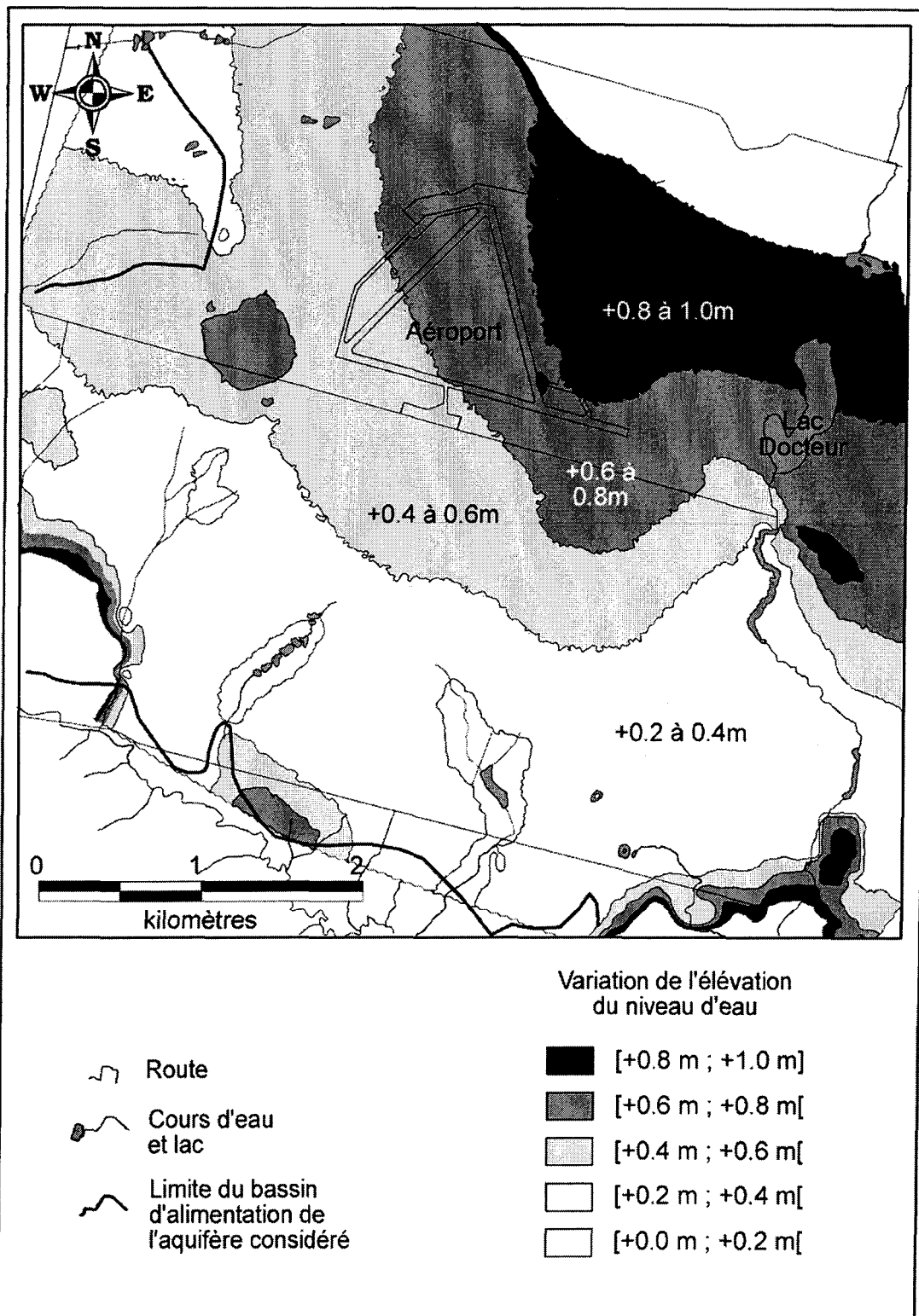


Figure 5.14- Prédiction de la variation du niveau d'eau entre août 2004 et septembre 2007 en utilisant un scénario optimiste

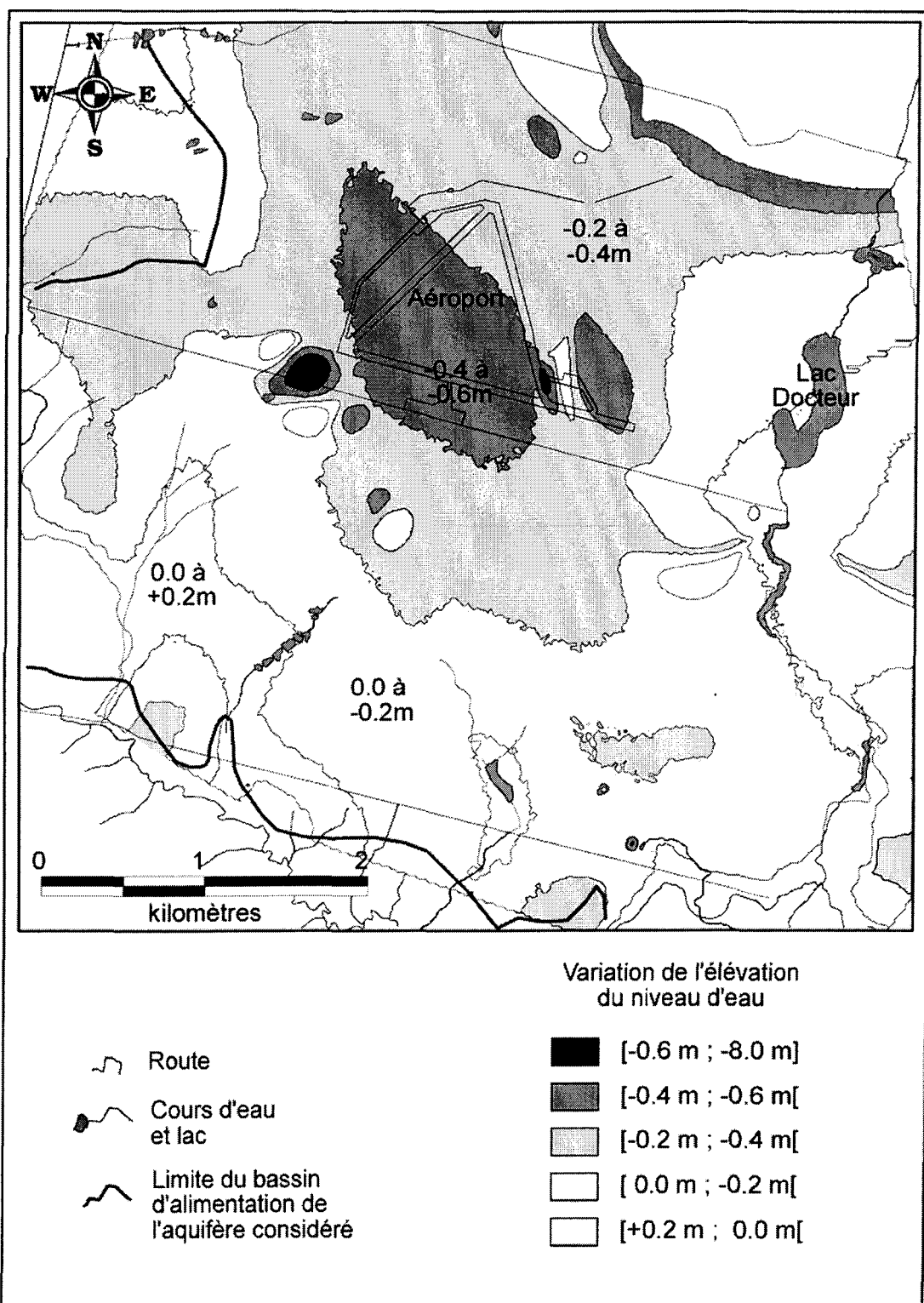


Figure 5.15- Prédiction de la variation du niveau d'eau entre août 2004 et septembre 2007 en utilisant un scénario connu

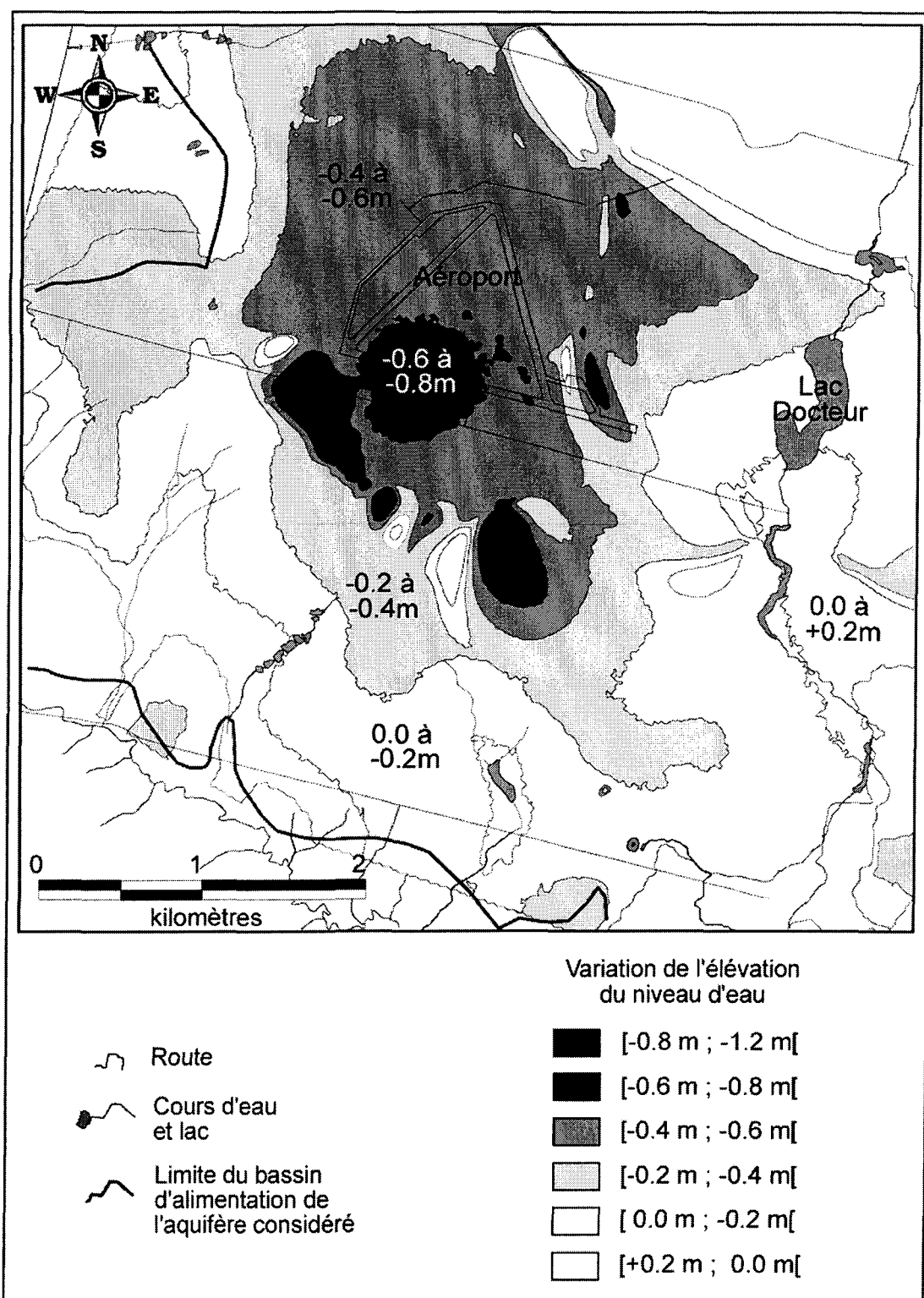


Figure 5.16- Prédiction de la variation du niveau d'eau entre août 2004 et septembre 2007 en utilisant un scénario pessimiste

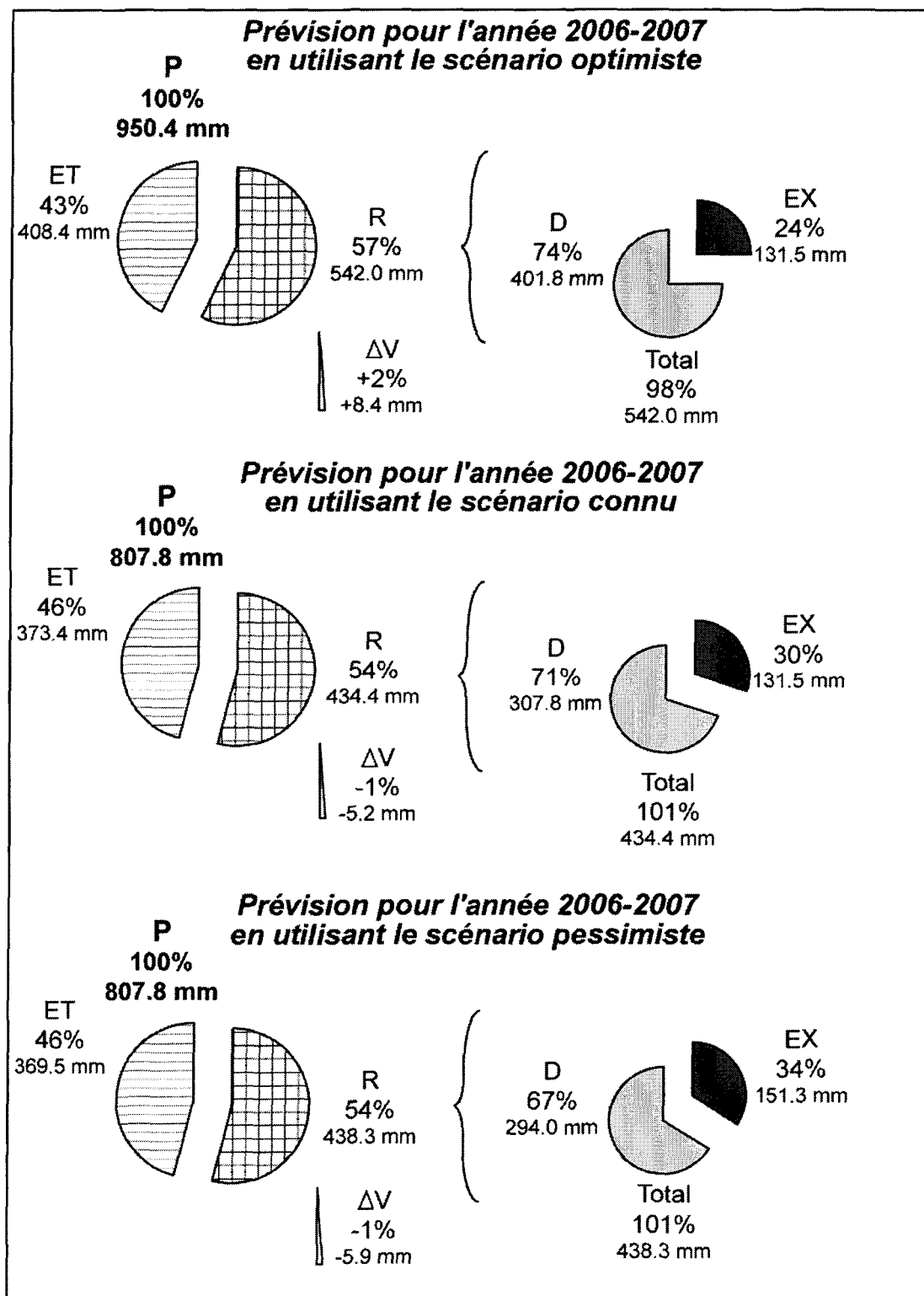


Figure 5.17- Répartition des termes du bilan hydrique lors de la troisième année pour chacun des scénarios prévisionnels

6

DISCUSSION

Les effets de l'augmentation de l'exploitation des eaux souterraines de l'aquifère de Saint-Honoré ont été étudiés en utilisant trois méthodes différentes. Les deux premières méthodes, relativement directes, consistent d'une part, à analyser les diagrammes d'évolution avec le temps du niveau d'eau piézométrique et, d'autre part, à estimer le bilan hydrique de l'aquifère. La troisième méthode, plus indirecte, est basée sur un modèle de simulation numérique de l'écoulement dans l'aquifère afin de reproduire les mesures de niveau d'eau et de débit d'écoulement.

L'augmentation des quantités d'eau prélevées dans l'aquifère a nécessairement eu pour effet de modifier son bilan hydrique. En réponse au nouveau stress, en l'occurrence le pompage accru, il importe de déterminer si le système connaît une période transitoire avant de retrouver un nouvel équilibre; ou bien si le système voit une diminution progressive et incessante du niveau d'eau dans le réservoir à long terme, ce qui indiquerait un état de surexploitation. Une situation de surexploitation n'est souhaitable pour aucun des usagers; il est donc pertinent de déterminer un débit durable d'exploitation de l'aquifère de Saint-

Honoré. L'évaluation du débit durable d'exploitation requiert une bonne évaluation des entrées et des sorties du système aquifère, i.e. des diverses composantes du bilan hydrique d'un aquifère, ainsi qu'un modèle conceptuel adéquat de ce système élaboré à partir d'observations de terrain et d'hypothèses simplificatrices appropriées.

Ce chapitre traite de divers aspects importants de l'évaluation du potentiel de l'aquifère de Saint-Honoré, soit 1) la validité des hypothèses simplificatrices implicites au modèle conceptuel du système aquifère, 2) les incidences de l'augmentation de l'exploitation, et 3) l'estimation d'un débit durable d'exploitation.

6.1 HYPOTHÈSES SIMPLIFICATRICES DU MODÈLE CONCEPTUEL

L'élaboration d'un modèle conceptuel d'un système aquifère requiert plusieurs hypothèses implicites et explicites, lesquelles ne doivent pas affecter de façon importante les éléments de l'analyse du système réel. Un certain nombre de ces hypothèses simplificatrices sont discutées ici, ainsi que leurs effets sur l'interprétation des résultats.

Nous avons vu au chapitre 2, que l'architecture interne du dépôt deltaïque et la topographie du socle rocheux ont été construites à partir des données de 105 forages provenant des rapports hydrogéologiques et géotechniques suivants: CIE

(1976), STES (1977), Dion (1986), Hydrogéol-Sol (1999), Laboratoires SL (1995, 1999a, 1999b, 2000a, 2000b, 2003a, 2003b) et MENVIQ (2001) (figure 2.2 et annexe A). Les informations utilisées proviennent donc de sources diverses et elles sont présentées selon des normes et des formats différents d'une source à l'autre. L'arrimage de données aussi diverses nécessite une standardisation résultant en un certain degré de gommage du contenu en information.

Nous avons vu au chapitre 4 que le modèle conceptuel de l'aquifère utilisé pour le bilan hydrique suppose que le socle de roche cristalline sous les dépôts sablonneux est imperméable. Cette hypothèse implique que le réseau de fractures, dans le socle cristallin ou dans une possible couverture de roche calcaireuse en discordance sur ce dernier, n'est pas suffisamment développé pour créer une connexion entre des parties distantes de l'aquifère ou avec des aquifères voisins. Les simulations numériques permettent de tester certaines hypothèses quant à la recharge, à la décharge et aux quantités d'eau circulant dans l'aquifère. Le modèle numérique a été adéquatement calé en régime permanent et en régime transitoire, ce qui corrobore l'hypothèse qu'une quantité d'eau négligeable circule à travers le roc. Ces résultats ne constituent cependant pas une démonstration claire de l'imperméabilité des limites du système aquifère considéré.

Le modèle conceptuel utilisé pour le bilan hydrique considère que le ruissellement de surface est négligeable sur le plateau sablonneux. Cette

hypothèse revient à négliger des événements particuliers tels qu'une fonte rapide de la neige au printemps qui peuvent engendrer un ruissellement significatif. Ce ruissellement alimente les cours d'eau résurgents et il est en principe mesuré lors des campagnes de mesure de débit. La quantité d'eau qui ruisselle ainsi ne peut cependant constituer une recharge de l'aquifère, contrairement à l'hypothèse émise selon laquelle la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration est considérée comme le terme de la recharge de l'aquifère.

La quantité d'eau prélevée dans l'aquifère à partir des puits individuels privés est considérée négligeable. Cette hypothèse est basée sur l'observation qu'une quantité importante de cette eau retourne dans le même milieu aquifère après son utilisation.

6.2 INCIDENCES DE L'AUGMENTATION DE L'EXPLOITATION DE L'AQUIFÈRE

Une baisse en partie transitoire du niveau d'eau dans les terrains et une réduction de la décharge aux cours d'eau exutoires de l'aquifère de Saint-Honoré ont été observées suite à l'augmentation de la quantité d'eau prélevée dans l'aquifère lors de la mise en exploitation des puits de Mine Niobec. Ces effets ont été accentués par le fait que les précipitations reçues durant la première et la deuxième année du bilan hydrique ont été nettement inférieures à la moyenne annuelle des trente dernières années. La situation a vraisemblablement été

similaire lors de la mise en exploitation des puits de la municipalité de Saint-Honoré il y a quelques décennies; des impacts semblables ont sans doute été générés alors avec plus ou moins d'importance.

6.2.1 BAISSSE DU NIVEAU D'EAU DANS LES TERRAINS

Une baisse du niveau d'eau dans les terrains a été mesurée lors des deux premières années du suivi de l'aquifère. Cette baisse du niveau d'eau dans le réservoir aquifère s'est effectuée de façon soutenue depuis mars 2000, date du premier relevé effectué, jusqu'en juillet 2003. Le rabattement du niveau d'eau aux puits de Mine Niobec était alors de 3.5m pour diminuer à environ 1.5m (± 0.5 m) à une distance radiale de 1500m. À partir de juillet 2003, le niveau d'eau s'est maintenu à peu près constant dans la plupart des piézomètres jusqu'en mars 2004. Une remontée du niveau d'eau, d'environ 0.5m dans tous les piézomètres, s'est amorcée lors de la fonte des neiges au printemps 2004 et s'est poursuivie jusqu'à la fin août 2004, soutenue par les abondantes précipitations qu'a connu le secteur tout au long de l'été 2004. De façon générale, la baisse totale observée entre l'année 2000 et août 2004, atteint 3 m près des puits de Mine Niobec et diminue progressivement à environ 1 m (± 0.5 m) à une distance radiale de 1500 m.

6.2.2 REDUCTION DE LA DECHARGE AUX COURS D'EAU EXUTOIRES

Les données ne sont pas disponibles pour estimer la lame d'eau qui s'écoulait naturellement aux cours d'eau exutoires avant la mise en exploitation des puits de Mine Niobec et de toute autre exploitation. En l'absence de ces données de départ, il est difficile de déterminer la réduction qu'a connu le débit de ces cours d'eau suite à la mise en exploitation des puits de Mine Niobec. Par contre, à l'intérieur même de la période du suivi, on observe une réduction de la décharge aux cours d'eau exutoires entre la première année et la deuxième année du suivi, respectivement de 328.1 à 299.9 mm. À prime abord, on pourrait attribuer cette réduction de la décharge au pompage ou aux faibles précipitations reçues. Il convient cependant d'être prudent avec l'interprétation de ces mesures étant donné leur grande variabilité et les incertitudes qui les affectent. En effet, une partie de la décharge en surface de l'eau de l'aquifère n'est probablement pas mesurée parce qu'elle se produit de façon diffuse ou par des ruisselets trop petits pour être soumis à la campagne de mesure. De plus, les mesures de débit des cours d'eau n'ont malheureusement pas été réalisées durant l'hiver et durant la première partie de la fonte des neiges, surtout pour les deux premières années du suivi, à cause des difficultés à réaliser ces mesures sous un couvert de neige. La période et la rapidité de la fonte printanière affectent la prise de mesure et la possibilité de manquer le pic de débit avec des mesures de fréquence mensuelle.

Les précipitations importantes de la troisième année du suivi quant à elles ont fait augmenter à 398.1 mm la lame d'eau écoulée par les cours d'eau exutoires.

6.3 ÉVALUATION D'UN DEBIT DURABLE D'EXPLOITATION

L'évaluation d'un débit durable d'exploitation de l'aquifère doit tenir compte des effets directs pour les usagers advenant une augmentation de l'exploitation, mais aussi des possibles écarts climatiques.

6.3.1 ÉCARTS CLIMATIQUES

Le modèle conceptuel utilisé suppose que la recharge de la partie de l'aquifère de Saint-Honoré considérée dans notre analyse du bilan hydrique est entièrement tributaire des précipitations reçues directement sur le territoire défini dans ce modèle et couvrant 41,6 km² (voir la figure 2.1 et la section 4.1). Les effets ressentis suite à l'augmentation de l'exploitation de l'aquifère ont sans doute été accentués par les faibles précipitations reçues durant la première et la deuxième année du bilan hydrique. En effet, au cours des deux premières années du suivi, les températures ont été supérieures et les quantités de précipitations ont été nettement inférieures aux normales climatiques calculées sur 30 ans (EC, 2004; figure 6.1 et tableau 4.1). Cependant, les précipitations de la troisième année du

suivi sont plus près de la normale, bien que les précipitations reçues soient encore une fois sous la moyenne des trente dernières années.

Une planification de l'exploitation future de l'aquifère requiert de considérer les fluctuations passées sur plusieurs années. Le graphique des précipitations annuelles des dix dernières années (figure 6.1) montre que les deux premières années du suivi s'inscrivent dans une séquence d'années marquées par des précipitations sous la normale débutant en 1997, à l'exception de l'année 1999-2000 (septembre à août). Il ne faudrait donc pas banaliser les faibles précipitations des deux premières années de ce programme de suivi en considérant que ces années ne constituent pas la norme. Un plan de gestion durable de l'exploitation d'un aquifère doit considérer l'éventualité de ces écarts climatiques, ainsi que la possibilité que ces écarts puissent sévir durant de longues périodes.

6.3.2 BAISSÉ ACCEPTABLE DE NIVEAU D'EAU

Nous avons vu qu'une augmentation du débit d'exploitation entraîne une baisse du niveau d'eau dans l'aquifère sur une portion plus ou moins importante du territoire. Il importe de déterminer si le niveau du toit de la nappe phréatique résultant de cette exploitation, même s'il est maintenu à l'équilibre, constitue un niveau toujours approprié pour les usagers autres que Mine Niobec. Ces usagers incluent la municipalité de Saint-Honoré, Ville de Saguenay, les résidents du

secteur qui utilisent les plans d'eau de surface et les eaux de cet aquifère à partir de puits de captage individuels, ainsi que la faune et la flore du territoire qui ont besoin des apports des eaux souterraines dans les écosystèmes aquatiques et terrestres. Par exemple, l'eau souterraine est nécessaire à la croissance de plusieurs espèces végétales; les possibilités d'extraction de l'eau souterraine par la végétation sont affectées par les variations de la profondeur du toit de la nappe phréatique. Soulignons que les arbres notamment jouent un rôle significatif dans la quantité d'eau circulant dans un aquifère. En effet, des secteurs boisés ont l'effet d'une clôture retenant la neige du balayage par les vents; cette neige contribue alors à la recharge du système aquifère au printemps.

Un autre effet de la baisse du niveau d'eau dans l'aquifère peut être le déplacement local de la ligne de partage des eaux souterraines. Considérons par exemple le territoire situé immédiatement à l'ouest du Lac Docteur. Il semble que la ligne de partage local des eaux souterraines soit présentement située quelque part entre le lac Docteur et l'aéroport, tel que supposé à la section 3.4. On peut présumer que la position de cette ligne varie selon les conditions de recharge et d'exploitation de l'aquifère. Une diminution de la recharge due aux précipitations et/ou une augmentation de l'exploitation près de l'aéroport pourraient résulter en un déplacement de cette ligne de partage en direction du lac Docteur, produisant une diminution de l'alimentation du lac par les eaux souterraines.

Les simulations prévisionnelles présentées à la section 5.3 considèrent trois différents scénarios de recharge et d'exploitation dont les variations du niveau d'eau font l'objet de prévisions après trois années. Les prévisions du scénario le plus optimiste présentent une remontée du niveau d'eau de 0.4 à 0.8m qui s'opère en utilisant des précipitations normales durant les prochaines années. En utilisant les précipitations connues lors du suivi, soit des précipitations de 15% inférieures à la normale, la baisse du niveau d'eau se poursuit pour atteindre une baisse supplémentaire à celle mesurée à la fin du suivi (août 2004) d'environ 0.8m au puits de Niobec, de 0.4 à 0.6m pour le secteur de l'aéroport et de 0.2 à 0.4m pour les secteurs plus éloignés. En augmentant uniformément de 15% la quantité d'eau souterraine exploitée pour tous les exploitants et en supposant que les précipitations demeurent sous la normale de 15%, une baisse plus accentuée est mesurée d'environ 1.2m au puits de Niobec, de 0.4 à 0.8m pour le secteur de l'aéroport et de 0.4 à 0.6m pour les secteurs plus éloignés. Il semble selon ces simulations que les secteurs en bordure de l'aquifère subissent de façon moins marquée les baisses de niveau d'eau. La présence de résurgence dans les secteurs en bordure a déjà pour effet de rabattre de façon naturelle le niveau d'eau à ces endroits.

6.3.3 RÉDUCTION ACCEPTABLE DU DÉBIT DE BASE DES COURS D'EAU

Le débit de base des cours d'eau est affecté par la quantité d'eau prélevée dans le réservoir aquifère. Une baisse de ce débit de base sous un certain seuil peut faire en sorte que ce cours d'eau ne puisse plus remplir certaines fonctions physiques ou écologiques, notamment le maintien de son attrait récréatif et esthétique, de son chenal d'écoulement et de la richesse de son habitat pour la faune aquatique. Il appert donc nécessaire de préserver un certain débit minimal dans un cours d'eau. Le débit de base minimal à préserver dans un cours d'eau correspond à environ 60% du débit de base original selon certains auteurs (Gippel et Stewardson, 1995) et à 80 % selon d'autres (Whiting, 2002).

Dans le cas de l'aquifère de Saint-Honoré, nous ne possédons pas d'information sur les débits qui s'écoulaient à la sortie de l'aquifère avant toute exploitation. On peut cependant présumer que la quantité d'eau, présentement prélevée aux puits de la municipalité de Saint-Honoré, de Mine Niobec et à partir de la prise d'eau de surface de Ville Saguenay, s'écoulait à l'origine de façon naturelle par les cours d'eau exutoires de l'aquifère. Selon cette hypothèse, la figure 4.2 permet de déduire que le débit total actuellement maintenu aux cours d'eau exutoires correspond à environ 70 à 80% du débit de décharge original de l'aquifère si l'on tient compte des variations d'emmagasinement d'eau dans les terrains. Cette analyse porte sur le débit total aux cours d'eau exutoires et non pas

sur le débit des cours d'eau individuels. On peut présumer que les ruisseaux situés directement en aval des activités de pompage voient leur débit diminué de façon plus marquée que ceux situés ailleurs en bordure de l'aquifère.

La figure 5.17 présente le débit total maintenu aux cours d'eau exutoires pour chacun des scénarios prévisionnels. Le scénario qui utilise les précipitations normales et la même quantité d'eau pompée que lors du suivi avance qu'environ 74% du débit de décharge original de l'aquifère serait maintenu. Le scénario connu lors du suivi, i.e. qui est simulé avec les précipitations 15% inférieures à la normale et la même quantité d'eau pompée lors du suivi avance qu'environ 71% du débit de décharge original de l'aquifère est préservé aux cours d'eau exutoires. Le troisième scénario, qualifié de pessimiste, utilise des précipitations 15% inférieures à la normale et une quantité d'eau pompée 15% supérieures. Selon ce scénario, 67% du débit de décharge original de l'aquifère serait maintenu aux cours d'eau exutoires.

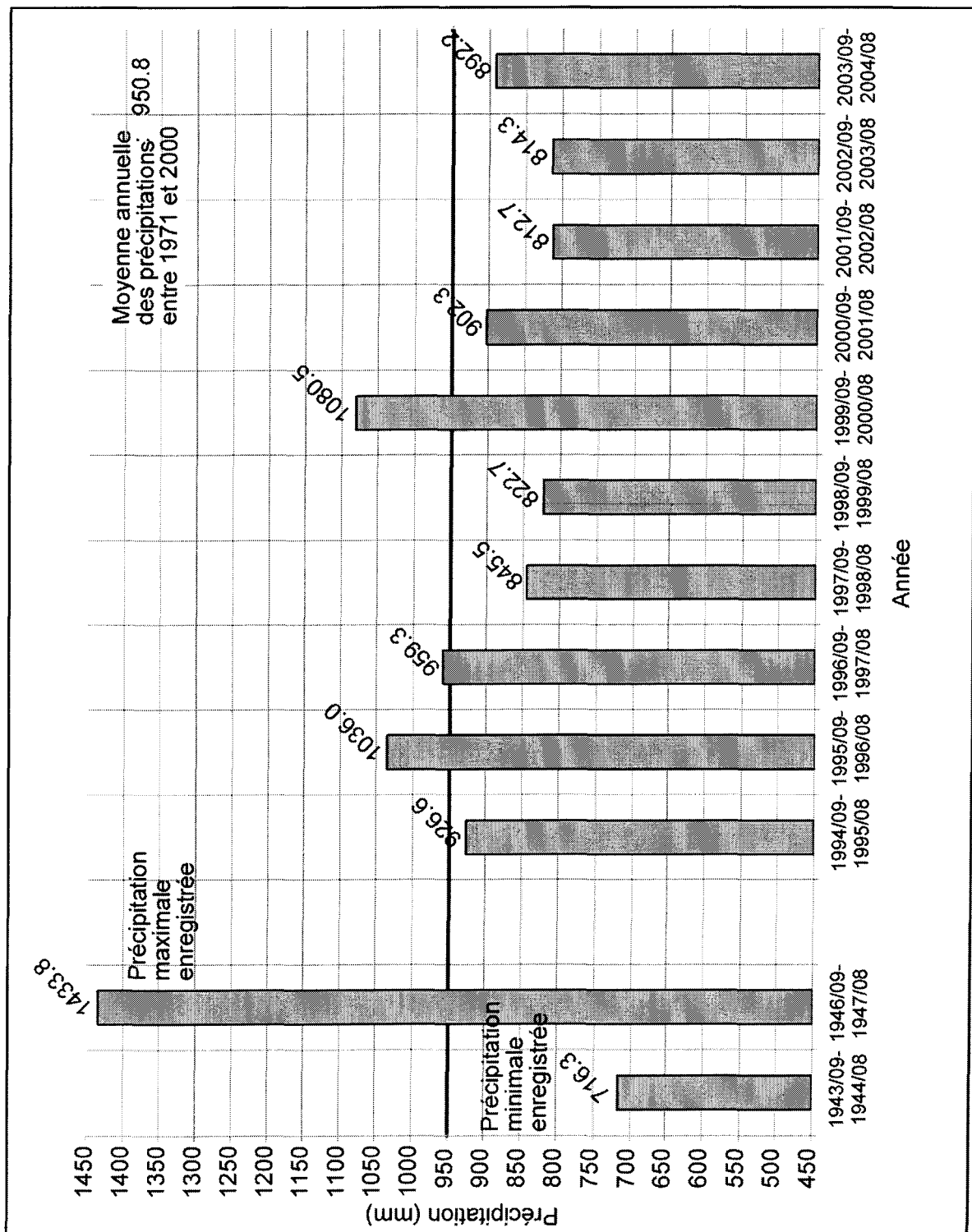


Figure 6.1- Précipitation annuelle des dix dernières années et les précipitations maximales et minimales enregistrées à la station de Bagotville

7

CONCLUSION

L'aquifère de Saint-Honoré consiste en une structure paléodeltaïque qui prend la forme d'un plateau sablonneux reposant sur le socle rocheux précambrien, soit directement ou sur une mince couche de till ou d'argile. Un modèle conceptuel de cet aquifère a été développé à partir d'une grande quantité d'informations provenant de nombreuses sources, incluant les données sur la topographie du terrain, des cartes géologiques, la description des puits existants, les données stratigraphiques de nombreux sondages et des résultats d'essais de pompage. Ce modèle élaboré sur ordinateur à l'aide d'un système d'information géographique à référence spatiale (SIG) demeure suffisamment réaliste en dépit des simplifications inéluctables.

Un programme de suivi du comportement de la nappe phréatique a été mis en œuvre par Mine Niobec pendant trois années, soit d'octobre 2001 à septembre 2004. Le niveau d'eau a notamment été mesuré dans dix-sept piézomètres, ainsi que le débit d'écoulement en surface à plusieurs stations, dont dix cours d'eau exutoires de l'aquifère en périphérie du plateau sablonneux.

Le modèle de l'aquifère et les données du suivi ont permis l'évaluation du bilan hydrique de l'aquifère sur trois années consécutives. L'évapotranspiration réelle (*ET*) est estimée à 398.0, 428.6 et 325.6 mm respectivement pour la première, la seconde et la troisième année du suivi. Ces valeurs de l'évapotranspiration réelle peuvent être comparées à la valeur moyenne de l'évapotranspiration potentielle annuelle qui est de 514.1 mm (EC, 2004). Il est normal que l'évapotranspiration potentielle soit plus élevée que l'évapotranspiration réelle car l'estimation de l'évapotranspiration potentielle néglige les périodes de pénurie d'eau dans les terrains au cours de l'année, lesquelles surviennent tous les étés. Les précipitations pour les mêmes périodes sont respectivement de 812.7, 814.3 et 892.2 mm tandis que les précipitations moyennes annuelles pour la période entre 1971 et 2000 sont de 950.8 mm (EC, 2004).

Une baisse du niveau d'eau dans les terrains et une réduction de la décharge aux cours d'eau exutoires de l'aquifère de Saint-Honoré ont été observées suite à l'augmentation de la quantité d'eau prélevée dans l'aquifère lors de la mise en exploitation des puits de Mine Niobec. Ces effets ont sans doute été accentués par les faibles précipitations reçues durant la première et la deuxième année du bilan hydrique. De mars 2000 jusqu'en juillet 2003, le rabattement a atteint 3.5 m à l'endroit des puits de Mine Niobec et environ 1.5 m à 1500 m de distance de ces puits. Un palier dans l'évolution du niveau d'eau est observé entre

juillet 2003 et mars 2004 dans la majorité des piézomètres faisant l'objet du suivi. Une remontée généralisée du niveau d'eau, d'environ 0.5 m, s'est amorcée au cours du printemps 2004 et s'est poursuivie jusqu'à la fin du mois d'août 2004 due aux abondantes précipitations reçues durant le printemps et l'été 2004.

Une réduction de la décharge aux cours d'eau exutoires a été observée entre la première année et la deuxième année du suivi, alors que la lame d'eau correspondante est estimée respectivement à 328.1 et 299.9 mm. Par contre, les précipitations plus importantes de la troisième année du suivi ont entraîné une augmentation à 398.1 mm de la lame d'eau sortie aux cours d'eau exutoires. Les effets ressentis suite à l'augmentation de l'exploitation étaient prévisibles; ils peuvent être considérés comme des phénomènes transitoires s'apparentant à un réajustement vers un nouvel équilibre en réponse à l'application d'un nouveau stress, en occurrence un pompage accru.

Un modèle numérique a été développé pour simuler l'écoulement de l'eau dans l'aquifère de Saint-Honoré. Le modèle numérique a été calé sur le niveau d'eau de trente et un piézomètres en régime d'écoulement permanent; puis en régime transitoire, sur le niveau d'eau de treize piézomètres et sur le débit de dix cours d'eau exutoires pour une période correspondant aux trois années du bilan. Les résultats de la simulation numérique en régime transitoire corroborent l'estimation du bilan hydrique faite à partir des données de terrain. Ce modèle de

simulation a aussi servi à analyser les effets de trois différents scénarios d'exploitation sous diverses conditions de recharge de l'aquifère.

L'estimation d'un débit durable d'exploitation de l'aquifère de Saint-Honoré requiert notamment la détermination de la valeur de baisse de niveau du toit de la nappe phréatique qui serait acceptable pour les usagers autres que Mine Niobec. Ces usagers incluent la municipalité de Saint-Honoré, Ville de Saguenay, les résidents du secteur qui utilisent les plans d'eau de surface et les eaux de cet aquifère à partir de puits de captage individuels, ainsi que la faune et la flore du territoire qui ont besoin des apports des eaux souterraines dans les écosystèmes aquatiques et terrestres.

Le débit durable d'exploitation doit aussi assurer le maintien à une valeur acceptable du débit de base des cours d'eau exutoires. Le débit de base minimal à préserver dans un cours d'eau varie entre 60 et 80% du débit de base original selon les auteurs. En émettant l'hypothèse que le niveau actuel du toit de la nappe phréatique soit maintenu et que ce niveau soit approprié pour tous les usagers, alors le débit actuel d'exploitation s'approche du débit durable d'exploitation de l'aquifère. En effet, le débit total actuellement maintenu aux cours d'eau exutoires correspond à environ 70 à 80% du débit de la décharge d'origine de l'aquifère si l'on tient compte des variations d'emmagasinement d'eau dans les terrains.

Les effets de l'augmentation de l'exploitation des eaux souterraines de l'aquifère de Saint-Honoré ont donc été analysés selon trois méthodes différentes. Les deux premières méthodes ont consisté d'une part, à analyser les diagrammes d'évolution avec le temps du niveau d'eau piézométrique et, d'autre part, à estimer le bilan hydrique de l'aquifère. Ces deux méthodes sont relativement directes bien qu'une grande incertitude soit rattachée à l'estimation des composantes du bilan hydrique; i.e. c'est le cas notamment de l'évapotranspiration, de la quantité d'eau emmagasinée, du ruissellement et de la quantité d'eau sortie aux cours d'eau exutoires. De plus, l'utilisation de ces méthodes nécessite la mesure de plusieurs paramètres tels que le niveau d'eau dans les piézomètres, le débit des cours d'eau exutoires, les précipitations et la quantité d'eau prélevée par pompage. Nos travaux ont démontré que la disponibilité de données de qualité sur ces paramètres permet d'élaborer un bilan hydrique crédible et utile.

Les simulations numériques, qui constituent la troisième méthode utilisée pour évaluer les effets de l'exploitation de l'aquifère, sont plus indirectes et présentent un complément à cette recherche. Une étude du bilan hydrique est préalable à la réalisation des simulations numériques. Il en va donc que les incertitudes rattachés au modèle conceptuel de l'aquifère sont reportées aux simulations numériques lors de l'exercice de calage, auxquels s'ajoutent les incertitudes implicites et explicites à l'utilisation de modèle numérique pour reproduire l'écoulement dans un système aquifère. Pour ces raisons, il appert

important de caler le modèle de simulation en utilisant plus d'un critère de calage; notre modèle a donc été calé sur les flux d'écoulement aux cours d'eau, en plus du critère couramment utilisé qu'est le niveau d'eau dans des piézomètres. La robustesse du calage du modèle a permis l'utilisation de ce dernier en mode prévisionnel, pour analyser les effets de divers scénarios pendant les trois années à venir, soit pour une durée équivalente à celle de la période de calage du modèle.

RÉFÉRENCES

ALLEY W.M., REILLY T.E. et FRANKE O.L. (1999) Sustainability of Ground-Water Resources. U.S. Geological Survey Circular 1186, Denver, CO, USA, 79p.

ASTM (1995) Standard practice for measuring elements in water by flame atomic absorption spectrophotometry. Designation D4691.87, Water and environment, American Society for Testing and Materials, volume 11.01 Water (I).

BÉDARD P. (2000) L'utilisation des appareils *HACH* pour la géochimie de l'eau. Document interne non publié, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Qc, Canada, 32 p.

BEHRA P., SIGG L. et STUMM W. (1994) Chimie des milieux aquatiques. 2^e édition, Masson, Paris, France, 391 p.

BOUCHER M. (1994) Guide d'échantillonnage à des fins d'analyses environnementales. Ministère de l'environnement et de la faune, Direction des laboratoires, Sainte-Foy, Qc, Canada, 69 p.

BREDEHOEFT J.D., PAPADOPULOS S.S., et COOPER H.H. Jr. (1982) Groundwater – The water-budget myth., dans Scientific Basis of Water-Ressource Management, National Academy Press, pp. 51-57

CERM (2004) Modèle numérique de terrain de la mer Laflamme. Université du Québec à Chicoutimi, Qc, Canada, 1 carte

CIE (1976) Municipalité de Saint-Honoré - Approvisionnement en eau. Rapport préparé pour la municipalité de St-Honoré, par La Compagnie Internationale des Eaux Ltee., Montréal, Qc, Canada, 8 p.

CUSTODIO E. (2002) Aquifer overexploitation : what does it means?. Hydrogeology Journal (10), pp. 254-277

DION D.J. (1986) Levé géotechnique de la région de Jonquière – Chicoutimi – La Baie. Rapport MB 86 – 51, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Gouvernement du Québec, 9 cartes + 227 p.

EC (2004) Archives climatiques nationales, Données climatiques – station Bagotville A, Environnement Canada, Montréal, Qc, Canada.
<http://www.climat.meteo.ec.gc.ca/climateData>, consulté le 10 octobre 2004

ENCOM (2001) *Discover*, version 4.02. Encom Technology Pty Ltd., Sydney, Australia.

FAURE G. (1998) *Principles and Applications of Geochemistry*. 2e edition, Prentice-Hall, New Jersey, USA, 600p.

GIPPEL C.J., STEWARDSON M.J. (1995) Development of an environmental flow management strategy for the Thomson river, Victoria, Australia. *Regulated rivers: Research & Management* (10), pp. 121-135

HACH (1989) *Water Analysis Handbook*. Hach Company, CO, USA, 690 p.

HACH (1991) *DR/700 Colorimeter: Procedures Manual*. Hach Company, CO, USA.

HÉBERT C. et LACOSTE P. (1998) *Géologie de la région de Jonquière – Chicoutimi*. Rapport géologique no. RG 96-08, Ministère des Ressources Naturelles du Québec, 1 carte+32 p.

HYDROGÉO-SOL (1999) *Évaluation du potentiel hydrique souterrain et des techniques de captage de l'eau souterraine dans le secteur du lac de l'Aqueduc, Chicoutimi*. Rapport préparé pour la municipalité de Chicoutimi-Nord, par les Experts-Conseils Hydrogéol-Sol Inc., Chicoutimi, Qc, Canada, 37p.

LABORATOIRES S.L. (1995) *Essai de pompage au puits TW-1-76, Saint-Honoré*. Rapport préparé pour la municipalité de Saint-Honoré, par Les Laboratoire S.L. Inc., Chicoutimi, Qc, Canada, 18 p.

LABORATOIRES S.L. (1999a) *Étude hydrogéologique, Sud de l'aéroport de Saint-Honoré*. Rapport préparé pour Mine Niobec, par Les Laboratoire S.L. Inc., Chicoutimi, Qc, Canada, 15 p.

LABORATOIRES S.L. (1999b) *Étude hydrogéologique complémentaire et essai de pompage, Chemin Volair*. Rapport préparé pour Mine Niobec, par Les Laboratoire S.L. Inc., Chicoutimi, Qc, Canada, 35 p.

LABORATOIRES S.L. (2000a) *Essai de pompage, Chemin Volair, Saint-Honoré*. Rapport préparé pour Mine Niobec, par Les Laboratoire S.L. Inc., Chicoutimi, Qc, Canada, 28 p.

LABORATOIRES S.L. (2000b) *Informations complémentaires, Chemin Volair, Saint-Honoré*. Rapport préparé pour Mine Niobec, par Les Laboratoire S.L. Inc., Chicoutimi, Qc, Canada, 13 p.

LABORATOIRES S.L. (2003a) Installation de piézomètres, Secteur chemin Volair, Rapport préparé pour Mine Niobec, par Les Laboratoire S.L. Inc., Chicoutimi, Qc, Canada, 2 p.

LABORATOIRES S.L. (2003b) Recherche en eau souterraine, Phase IIIA, Rapport d'étape no1, Lac de l'Aqueduc. Rapport préparé pour Ville de Saguenay, par Les Laboratoires S.L. Inc., Chicoutimi, Qc, Canada, 12 p.

LASALLE P. et TREMBLAY G. (1978) Dépôts meubles – Saguenay Lac St-Jean. Rapport géologique no. RG-191, Ministère des richesses naturelles du Québec. 7 cartes+61 p.

LEE D.R. et CHERRY J.A. (1978) A field exercise on groundwater flow using seepage meters and mini-piezometers. *Journal of Geological Education*, 16 (2), pp. 439-447

LONG A.J., PUTNAM L.D. et CARTER J.M. (2003) Simulated Ground-Water Flow in the Ogallala and Arikaree Aquifers, Rosebud Indian Reservation Area, South Dakota. Water-Ressources Investigations Report 03-4043, U.S. Geological Survey, Denver, CO, USA, 69 p.

MapInfo (2001) *MapInfo Professionnal*, version 6.5. MapInfo Corporation, Troy, NY, USA.

McDONALD M.G. et HARBAUGH A.W. (1988) A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model. *Techniques of Water-Ressources Investigations*, United States Geological Survey, Washington, DC, USA.

MENVIQ (2004) Règlement sur la qualité de l'eau potable, édition 2004. Ministère de l'Environnement du Québec, Gouvernement du Québec.
<http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/potable/brochure/index.htm#reglement>, consulté le 10 octobre 2004

MENVIQ (2001) Annuaire de puits et forages – Version 2001. Système d'information hydrogéologie, Ministère de l'Environnement du Québec, Gouvernement du Québec.
<http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/souterraines/sih/index.htm>, consulté le 03 mai 2001

NIELSEN D.M. (1991) *Practical Handbook of Ground-Water Monitoring*. Lewis Publishers, Michigan, USA. 717 p.

NTI et MML (2001) *Vertical Mapper*, version 3.0. Northwood Technologies Inc. and Marconi Mobile Limited, Richardson, USA.

PILOTE C. (2002) Étude et évaluation préliminaire du bilan hydrogéologique de l'aquifère de Saint-Honoré. Projet de fin d'études 6SCT604, Université du Québec à Chicoutimi, Chicoutimi, Qc, Canada, 36p.

SCANLON B.R., COOK P.G. et HEALY R.W. (2002) Choosing appropriate technique for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* (10), pp. 18-39

STES (1977) Aménagement de deux (2) puits filtrants à Saint-Honoré, Compté de Dubuc. Rapport préparé pour la municipalité de Saint-Honoré, par le Services Techniques en Eaux Souterraines Inc., Dorval, Qc, Canada, 16 p.

TREMBLAY P. (2002) Étude hydrogéologique de l'aquifère de Saint-Honoré. Rapport intérimaire #1, Rapport remis à Niobec, Chicoutimi, Qc, Canada 49 p.

TREMBLAY P. (2003) Étude hydrogéologique de l'aquifère de Saint-Honoré. Rapport intérimaire #2, Rapport remis à Niobec, Chicoutimi, Qc, Canada, 49 p.

TREMBLAY P. et ROULEAU A. (2004a) Water budget analysis of the paleo-deltaic Saint-Honore aquifer in the Saguenay lowlands; dans *Proceedings of the Fifth Joint Annual Conference, Can. Geotech. Soc. & Can. Chap. of Int. Assoc. Of Hydrogeologists*, Québec (Qc), Canada, Oct. 23-27, Session 6A, pp. 24-30

TREMBLAY P. et ROULEAU A. (2004b) Étude hydrogéologique de l'aquifère de Saint-Honoré avec emphase sur le bilan hydrique. Rapport remis à Mine Niobec, Centre d'études sur les ressources minérales, UQAC, Canada, 142 p.

TODD D.K. (1980) *Groundwater Hydrology*. Second edition. John Wiley & sons., Berkeley, CA, USA, 535 p.

WHI (1999) *MODFLOW Packages: Reference Manual*. Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo, Ont, Canada.

WHI (1999) *WinPEST : User's Manual*. Software-consulting-training, Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo, Ont, Canada, 154 p.

WHI (2002) *Visual MODFLOW Pro : User's Manual*. Software-consulting-training, Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo, Ont, Canada, 370 p.

WHI (2002) *Visual MODFLOW*, version 3.0.0. Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo, Ont, Canada.

WHI (2002) *WinPEST*, version 3.0. Waterloo Hydrogeologic Inc., Waterloo, Ont, Canada.

WHITING P.J. (2002) Streamflow necessary for environmental maintenance. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* (30), pp. 181-206

WINTER T.C., HARVEY J.W., FRANKE O.L. et ALLEY W.M. (1998) *Ground Water and Surface Water : A Single Ressource*. U.S. Geological Survey Circular 1139, Denver, CO, USA, 79p.

ANNEXE A

SONDAGES UTILISÉS

Tableau A1- Sondages utilisés

No	Id source	MTM X NAD 83 Zone 7	MTM Y NAD 83 Zone 7	Client	Rapport	Commentaires
PSH-1	TH-3, P-1	264 381.69	5 376 650.42	Mun. de St-Honoré	(CIE, 1976)	Forage par rotation Géoréférencé
PSH-2	P-2	264 689.09	5 376 601.00	Mun. de St-Honoré	(STES, 1977)	Piézomètre du puits PP-1 Géoréférencé
PSH-3	P-3	265 266.73	5 376 809.23	Mun. de St-Honoré	(STES, 1977)	Piézomètre du puits PP-2 Arpenté
PSH-4	P-4	264 507.23	5 376 682.67	Mun. de St-Honoré	(Laboratoires SL, 1999b)	Arpenté
PSH-5	TH-4, P-5	264 754.02	5 376 705.59	Mun. de St-Honoré	(CIE, 1976)	Forage par rotation Arpenté
PSH-6	P-6	265 041.68	5 376 543.33	Mun. de St-Honoré	(Laboratoires SL, 1999b)	Arpenté
PSH-7	TF-1, P-7	264 298.65	5 376 606.74	Mun. de St-Honoré	(Laboratoires SL, 1995)	Arpenté
PSH-8	TH-2, P-8	264 093.21	5 376 694.10	Mun. de St-Honoré	(CIE, 1976)	Forage par rotation Arpenté
PWSH-1	TW-1	264 383.67	5 376 720.97	Mun. de St-Honoré	(Laboratoires SL, 1995)	Ancien puits aménagé dans les années 1940 et remis en état en 1995 Géoréférencé
PWSH-2	PP-1	264 741.34	5 376 629.69	Mun. de St-Honoré	(CIE, 1976), (STES, 1977)	Forage par percussion Géoréférencé
PWSH-3	PP-2	265 264.27	5 376 806.21	Mun. de St-Honoré	(CIE, 1976), (STES, 1977)	Forage par percussion Géoréférencé
PN-1	TF-1,	264 650.18	5 374 944.01	Niobec	(Laboratoires SL, 1999a)	Forage par percussion

	PZ-1					Arpenté
PN-2	TF-2, PZ-2	264 546.22	5 374 559.14	Niobec	(Laboratoires SL, 1999a)	Forage par percussion Géoréférencé
PN-3	TF-3, PZ-3	264 141.26	5 374 999.96	Niobec	(Laboratoires SL, 1999a)	Forage par percussion Géoréférencé
PN-4	TF-4, PZ-4	263 747.18	5 375 535.23	Niobec	(Laboratoires SL, 1999a), (Laboratoires SL, 1999b)	Arpenté
PN-5	TF-5, PZ-5	263 995.54	5 375 812.64	Niobec	(Laboratoires SL, 1999a), (Laboratoires SL, 1999b)	Géoréférencé
PN-6	TF-6, PZ-6	263 042.29	5 375 829.16	Niobec	(Laboratoires SL, 1999a), (Laboratoires SL, 1999b)	Arpenté
PN-7	TF-7, PZ-7	263 092.45	5 374 902.99	Niobec	(Laboratoires SL, 1999a), (Laboratoires SL, 1999b)	Arpenté
PN-8	PZ-8	263 868.51	5 374 136.10	Niobec	(Laboratoire SL, 2000a), (Laboratoire SL, 2000b)	Arpenté
PN-9	PZ-9	263 615.77	5 375 457.10	Niobec	(Laboratoire SL, 2000a), (Laboratoire SL, 2000b)	Arpenté
PN-10	PZ-10	263 574.04	5 375 471.09	Niobec	(Laboratoire SL, 2000a), (Laboratoire SL, 2000b)	Arpenté
PN-11	PZ-11	263 530.86	5 375 482.47	Niobec	(Laboratoire SL, 2000a), (Laboratoire SL, 2000b)	Arpenté
PN-12	PZ-12	263 607.46	5 375 510.37	Niobec	(Laboratoire SL, 2000a), (Laboratoire SL, 2000b)	Arpenté
PN-13	PZ-13	263 567.43	5 375 520.86	Niobec	(Laboratoire SL, 2000a), (Laboratoire SL, 2000b)	Arpenté
PN-14	PZ-14	263 541.59	5 375 385.73	Niobec	(Laboratoire SL, 2000a), (Laboratoire SL, 2000b)	Arpenté
PN-15	PZ-15	263 549.00	5 375 306.65	Niobec	(Laboratoire SL, 2000a), (Laboratoire SL, 2000b)	Arpenté
PN-16	PZ-16	264 305.67	5 373 990.93	Niobec	(Laboratoire SL, 2000a), (Laboratoire SL, 2000b)	Arpenté
PN-17	PZ-17	263 395.94	5 376 139.28	Niobec	(Laboratoire SL, 2000a), (Laboratoire SL, 2000b)	Arpenté
PN-18	PZ-18	264 782.80	5 375 558.11	Niobec	(Laboratoire SL, 2000a), (Laboratoire SL, 2000b)	Arpenté
PN-19	PZ-19	265 745.68	5 375 089.72	Niobec	(Laboratoires SL, 2003a)	Arpenté
PN-20	PZ-20	267 463.08	5 378 277.13	Niobec	(Laboratoires SL, 2003a)	Arpenté

PN-21	PZ-21	267 611.83	5 378 721.99	Niobec	(Laboratoires SL, 2003a)	Arpenté
PN-22	PZ-22	266 958.20	5 378 139.81	Niobec	(Laboratoires SL, 2003a)	Arpenté
PWN-1	PW-1, PWN-1	263 572.91	5 375 466.32	Niobec	(Laboratoires SL, 1999b), (Laboratoire SL, 2000a), (Laboratoire SL, 2000b)	Arpenté
PWN-2	PW-2, PWN-2	263 614.35	5 375 452.23	Niobec	(Laboratoire SL, 2000a), (Laboratoire SL, 2000b)	Arpenté
PWN-3	PW-3, PWN-3	263 529.53	5 375 477.65	Niobec	(Laboratoire SL, 2000a), (Laboratoire SL, 2000b)	Arpenté
PVS-1	PVS-1	266 072.90	5 374 384.04	Ville de Saguenay	(Laboratoires SL, 2003b)	Arpenté
PVS-2	PVS-2	263 787.50	5 373 855.42	Ville de Saguenay	(Laboratoires SL, 2003b)	Arpenté
PVS-3	PVS-3	263 686.91	5 373 981.91	Ville de Saguenay	(Laboratoires SL, 2003b)	Arpenté
PVS-4	PVS-4	265 194.95	5 373 735.28	Ville de Saguenay	(Laboratoires SL, 2003b)	Arpenté
PVS-5	PVS-5	263 816.87	5 373 996.90	Ville de Saguenay	(Laboratoires SL, 2003b)	Arpenté
PVS-6	PVS-6	263 794.69	5 374 302.36	Ville de Saguenay	(Laboratoires SL, 2003b)	Arpenté
PVS-7	PVS-7, F-2	264 164.51	5 373 272.18	Ville de Saguenay	(Hydrogéo-Sol, 1999), (Laboratoires SL, 2003b)	Arpenté
PVS-8	PVS-8	264 699.39	5 373 444.12	Ville de Saguenay	(Hydrogéo-Sol, 1999), (Laboratoires SL, 2003b)	Arpenté
PVS-9	PVS-9	264 372.70	5 373 487.34	Ville de Saguenay	(Laboratoires SL, 2003b)	Arpenté
PVS-10	PVS-10	264 622.04	5 373 258.76	Ville de Saguenay	(Laboratoires SL, 2003b)	Arpenté
PVS-11	PVS-11	264 563.62	5 373 134.22	Ville de Saguenay	(Laboratoires SL, 2003b)	Arpenté
PVS-12	F-4	263 655.50	5 373 463.60	Ville de Saguenay	(Hydrogéo-Sol, 1999)	Géoréférencé
PVS-13	F-1	264 203.10	5 373 574.60	Ville de Saguenay	(Hydrogéo-Sol, 1999)	Géoréférencé
PVS-14	F-5	264 324.50	5 373 002.10	Ville de Saguenay	(Hydrogéo-Sol, 1999)	Géoréférencé
PVS-15	F-3	264 039.50	5 373 064.30	Ville de Saguenay	(Hydrogéo-Sol, 1999)	Géoréférencé
PVS-16	F-6	264 156.80	5 373 243.80	Ville de Saguenay	(Hydrogéo-Sol, 1999)	Géoréférencé
PWE-1	PE-1	263 808.40	5 373 979.41	Ville de Saguenay	(Laboratoires SL, 2003b)	Arpenté
PCVS-1	PZCVS-1	265 206.20	5 374 723.13	Ville de Saguenay	(Laboratoires SL, 2003b)	Piézocône Arpenté
PCVS-2	PZCVS-2	265 798.31	5 374 797.32	Ville de Saguenay	(Laboratoires SL, 2003b)	Piézocône Arpenté
PCVS-3	PZCVS-3	265 750.16	5 374 036.00	Ville de Saguenay	(Laboratoires SL, 2003b)	Piézocône Arpenté
PCVS-4	PZCVS-4	266 072.91	5 374 376.68	Ville de Saguenay	(Laboratoires SL, 2003b)	Piézocône Arpenté
PCVS-5	PZCVS-5	266 067.94	5 373 769.78	Ville de Saguenay	(Laboratoires SL, 2003b)	Piézocône

						Arpenté
APF-1	2000;110; 6133	268 071	5 372 341		(MENVIQ, 2001)	Forage par rotation
APF-2	1981;100; 3162	267 761	5 372 127		(MENVIQ, 2001)	Forage par rotation
APF-3	1984;100; 6473	266 495	5 376 212		(MENVIQ, 2001)	Forage par rotation
APF-4	1978;100; 35371	266 187	5 376 183		(MENVIQ, 2001)	Forage par rotation
APF-5	2000;110; 6132	265 884	5 373 900		(MENVIQ, 2001)	Forage par rotation
APF-6	1984;100; 7408	265 882	5 376 525		(MENVIQ, 2001)	Forage au câble
APF-7	1984;100; 7434	265 823	5 376 896		(MENVIQ, 2001)	Forage au câble
APF-8	1984;100; 7418	265 181	5 376 067		(MENVIQ, 2001)	Forage au câble
APF-9	1984;100; 7517	265 168	5 377 086		(MENVIQ, 2001)	Forage au câble
APF-10	1984;100; 7518	264 906	5 374 895		(MENVIQ, 2001)	Forage au câble
APF-11	1984;100; 7539	264 860	5 377 119		(MENVIQ, 2001)	Forage au câble
APF-12	1983;100; 5037	264 471	5 377 153		(MENVIQ, 2001)	Forage par rotation
APF-13	1984;100; 9466	263 878	5 371 752		(MENVIQ, 2001)	Forage par rotation
APF-14	1978;100; 35369	263 567	5 376 943		(MENVIQ, 2001)	Forage par rotation
APF-15	1984;100; 6073	263 104	5 375 340		(MENVIQ, 2001)	Forage par rotation
APF-16	1985;100; 1858	261 257	5 372 698		(MENVIQ, 2001)	Forage par rotation
APF-17	1978;100; 35370	260 630	5 373 877		(MENVIQ, 2001)	Forage par rotation
D-1	1299	260 775.67	5 373 638.45		Dion (1986)	Résistivité électrique Géoréférencé

D-2	982x	260 584.09	5 373 526.20		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-3	982y	260 739.21	5 373 490.37		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-4	981x	260 964.57	5 372 947.92		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-5	981y	261 158.35	5 372 887.25		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-6	1297	259 920.36	5 372 184.93		Dion (1986)	Résistivité électrique Géoréférencé
D-7	984y	262 453.67	5 373 543.84		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-8	984x	262 405.78	5 373 355.69		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-9	1301	262 875.93	5 373 044.28		Dion (1986)	Résistivité électrique Géoréférencé
D-10	1303	263 952.43	5 373 078.73		Dion (1986)	Résistivité électrique Géoréférencé
D-11	985x	264 032.06	5 373 133.04		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-12	985y	263 992.57	5 372 972.15		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-13	1300	263 836.45	5 372 563.30		Dion (1986)	Résistivité électrique Géoréférencé
D-14	988x	264 277.66	5 372 395.27		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-15	988y	264 210.73	5 372 218.11		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-16	987y	265 667.33	5 372 660.63		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-17	987x	265 644.19	5 372 494.22		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-18	1304	265 925.92	5 372 543.73		Dion (1986)	Résistivité électrique Géoréférencé
D-19	1306	267 289.46	5 372 962.02		Dion (1986)	Résistivité électrique Géoréférencé
D-20	990x	267 811.19	5 372 962.93		Dion (1986)	Sismique réfraction

						Géoréférencé
D-21	990y	267 752.42	5 372 780.27		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-22	991x	268 504.62	5 373 621.00		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-23	991y	268 481.50	5 373 457.32		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-24	1308	269 110.36	5 372 827.39		Dion (1986)	Résistivité électrique Géoréférencé
D-25	993x	268 794.16	5 372 206.21		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-26	993y	268 806.56	5 372 043.78		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-27	28	268 013.18	5 372 237.60		Dion (1986)	Forage Géoréférencé
D-28	27	267 974.52	5 372 183.14		Dion (1986)	Forage Géoréférencé
D-29	989x	267 363.56	5 372 299.90		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé
D-30	989y	267 290.64	5 372 054.52		Dion (1986)	Sismique réfraction Géoréférencé

ANNEXE B

NIVEAUX PIÉZOMÉTRIQUES

Les premiers relevés de la profondeur du niveau de l'eau souterraine inventoriés dans cette annexe sont ceux mesurés le 26 août 1999 dans les piézomètres existant à cette date. Ces mesures ont été prises avant l'essai de pompage dans un puits d'essai de Mine Niobec qui deviendra par la suite le puits PWN-1. La profondeur de la nappe a été mesurée à nouveau le 9 mars 2000 dans plusieurs piézomètres suite à la construction de nouveaux piézomètres et à l'aménagement des deux puits filtrants soit PWN-2 et PWN-3. Une partie des données de niveau d'eau mesurées lors des essais de pompage de longue durée qui ont eu lieu du 9 au 16 mars 2000 et du 24 juillet au 12 octobre 2000 sont aussi incluses dans cette annexe, ainsi que les mesures prises dans le cadre du plan de suivi de l'aquifère qui a débuté subséquemment. La profondeur du niveau d'eau dans les piézomètres est référée par rapport au sommet de la margelle.

Tableau B1- Cote d'élévation de la margelle des piézomètres

Piézomètre	Élévation de la margelle (m)	Piézomètre	Élévation de la margelle (m)
PN-1	156.753	PN-17	161.246
PN-2		PN-18	165.298
PN-3		PN-19	163.842
PN-4	163.363	PN-20	171.824
PN-5		PN-21	171.416
PN-6	159.536	PN-22	170.226
PN-7	151.711	PSH-1	
PN-8	150.639	PSH-2	
PN-9	163.926	PSH-3	168.02
PN-10	163.895	PSH-4	167.109
PN-11	164.051	PSH-5	167.544
PN-12	163.962	PSH-6	167.357
PN-13	163.925	PSH-7	166.449
PN-14	163.616	PSH-8	164.932
PN-15	157.711	PVS-7	134.7
PN-16	159.07		

Tableau B2- Profondeur du niveau d'eau dans les piézomètres par rapport à l'élévation de la margelle

Piézomètre	1999/08/26	2000/03/09	2000/07/24	2000/07/31	2000/08/06	2000/08/14	2000/08/21	2000/08/29
PN-1	0.08	1.39	1.74	1.81	1.83	1.81	1.82	1.86
PN-2	8.97	9.06						
PN-3	2.21	2.24	2.92	2.96	3.00	3.03	3.09	3.17
PN-4	7.00	7.84						
PN-5	7.00	7.84	7.50	7.52	7.55	7.58	7.60	7.64
PN-6	3.74	4.32	4.05	4.09	4.11	4.12	4.13	4.15
PN-7	9.10	9.44	9.02	9.06	9.08	9.06	9.04	9.05
PN-8	5.12	6.09	4.86	4.96	5.01	4.74	4.69	4.69
PN-9		8.78						
PN-10		8.99						
PN-11		8.88						
PN-12		8.65						
PN-13		8.61						
PN-14		8.80						
PN-15		3.03						
PN-16		14.38	14.02	14.03	14.04	14.05	14.06	14.07
PN-17		4.56	4.25	4.28	4.31	4.32	4.34	4.37
PN-18		8.24	7.80	7.86	7.88	7.88	7.89	7.90
PN-19								
PN-20								
PN-21								
PN-22								
PSH-1	9.11	9.85	9.03	8.16	8.12	8.08	8.06	8.04
PSH-2	10.65	10.80	10.35	10.02	10.07	9.95	9.72	9.76
PSH-3	9.21	10.31	9.55	9.67	9.32	9.35	9.33	9.05
PSH-4	7.85	9.51	8.94	8.88	8.83	8.81	8.78	8.78
PSH-5	8.64	9.77	9.19	9.13	9.05	9.05	9.03	9.05
PSH-6	7.87	9.39	8.80	8.84	8.83	8.84	8.85	8.84
PSH-7	8.00	9.26	8.66	8.38	8.36	8.33	8.30	8.28
PSH-8		7.37	6.90	6.88	6.87	6.84	6.80	6.78
PVS-7	4.15	3.74	3.75	3.75	3.74	3.72	3.69	3.69

Piézomètre	2000/09/06	2000/09/13	2000/09/20	2000/09/26	2000/10/03	2000/10/10	2000/10/17	2000/10/23
PN-1	1.85	1.91	1.90	1.95	1.96	1.98	2.01	2.02
PN-2								
PN-3	3.27	3.32	3.35	3.39	3.42	3.44	3.44	3.44
PN-4								
PN-5	7.68	7.70	7.73	7.74	7.73	7.74	7.74	7.74
PN-6	4.18	4.19	4.20	4.21	4.21	4.21	4.23	4.22
PN-7	9.08	9.10	9.11	9.11	9.12	9.13	9.15	9.16
PN-8	5.04	5.16	4.78	4.86	4.93	4.85	4.98	4.92
PN-9								
PN-10								
PN-11								
PN-12								
PN-13								
PN-14								
PN-15								
PN-16	14.09	14.11	14.13	14.15	14.17	14.19	14.22	14.23
PN-17	4.43	4.46	4.49	4.51	4.52	4.53	4.54	4.54
PN-18	7.89	7.96	7.98	7.99	8.00	8.02	8.04	8.05
PN-19								
PN-20								
PN-21								
PN-22								
PSH-1	8.05	8.02	8.04	8.04	8.02	8.00	9.45	9.50
PSH-2	9.82	9.53	9.90	9.31	9.25	9.20	10.36	10.36
PSH-3	9.14	9.33	9.38	9.44	9.48	9.48	9.70	9.79
PSH-4	8.77	8.74	8.75	8.73	8.70	8.70	8.86	8.94
PSH-5	9.04	9.01	9.00	8.96	8.93	8.92	9.08	9.15
PSH-6	8.86	8.86	8.87	8.88	8.86	8.86	8.89	8.91
PSH-7	8.27	8.26	8.25	8.26	8.24	8.24	8.69	8.75
PSH-8	6.79	6.76	6.75	6.70	6.76	6.80	6.81	6.84
PVS-7	3.72	3.69	3.67	3.66	3.66	3.66	3.66	3.66

Piézomètre	2000/11/01	2000/11/07	2000/11/19	2000/11/25	2000/12/02	2000/12/13	2000/12/22	2001/01/08
PN-1	2.06	2.08	2.09	2.11	2.13	2.17	2.18	2.25
PN-2								
PN-3	3.44							
PN-4								
PN-5	7.74							
PN-6	4.23							
PN-7	9.20							
PN-8	5.14							
PN-9								
PN-10								
PN-11		10.00	10.13	10.16	10.20	10.25	9.37	10.38
PN-12								
PN-13		9.23	9.32	9.36	9.40	9.46	9.22	9.57
PN-14		9.22	9.33	9.36	9.39	9.45	9.38	9.54
PN-15		3.40	3.50	3.53	3.56	3.60	3.57	3.70
PN-16	14.26	14.27	14.28	14.32	14.34	14.37	14.39	14.44
PN-17	4.54							
PN-18	8.07	8.08	8.11	8.12	8.14	8.17	8.18	8.25
PN-19								
PN-20								
PN-21								
PN-22								
PWN-1		9.67			9.85	9.90	9.58	10.01
PWN-2		8.84			9.01	9.05	13.44	9.15
PWN-3		17.41			17.78	17.77	9.36	18.02
PSH-1	9.57							
PSH-2	10.41							
PSH-3	9.81							
PSH-4	9.03							
PSH-5	9.23							
PSH-6	8.94							
PSH-7	8.83							
PSH-8	6.92							
PVS-7	3.65							

Piézomètre	2001/01/19	2001/01/26	2001/02/08	2001/02/16	2001/03/05	2001/03/20	2001/04/02	2001/04/12
PN-1	2.29	2.28	2.29	2.40	2.45	2.56	2.60	2.60
PN-2								
PN-3								
PN-4								
PN-5								
PN-6								
PN-7								
PN-8								
PN-9						11.00	10.03	10.08
PN-10						10.23	8.63	10.385
PN-11	10.42	10.42	9.62	9.71	9.76	9.89	10.81	10.885
PN-12								
PN-13	9.62	9.60	9.48	9.56	9.63	9.75	9.98	10.04
PN-14	9.60	9.56	9.62	9.70	9.76	9.87	9.94	10.01
PN-15	3.74	3.73	3.79	3.87	3.93	4.04	4.07	4.14
PN-16	14.46	14.42	14.45	14.51	14.52	14.60	14.60	14.68
PN-17								
PN-18	8.30	8.29	8.37	8.43	8.47	8.61	8.63	8.69
PN-19								
PN-20								
PN-21								
PN-22								
PWN-1	10.05	10.05		9.91	10.00			
PWN-2	9.20	9.19	13.70	14.01	14.09			
PWN-3	17.89	17.89		9.69	9.77			
PSH-1								
PSH-2								
PSH-3								
PSH-4								
PSH-5								
PSH-6								
PSH-7								
PSH-8								
PVS-7								

Piézomètre	2001/05/02	2001/05/23	2001/06/08	2001/06/24	2001/07/03	2001/07/11	2001/07/17	2001/08/02
PN-1	2.44	2.33	2.31	2.39	2.42	2.41	2.39	2.26
PN-2								
PN-3								
PN-4								
PN-5								
PN-6								
PN-7								
PN-8								
PN-9	9.95	10.85	10.90		10.95	10.94	10.93	9.72
PN-10	10.24	10.075	10.30		10.20	10.21	10.18	10.14
PN-11	9.905	9.71	9.75	9.78	9.83	9.84	9.82	10.39
PN-12								
PN-13	9.69	9.585	9.54	9.66	9.72	9.70	9.67	9.61
PN-14	9.715	9.715	9.67	9.79	9.85	9.83	9.83	9.63
PN-15	3.875	3.88	3.86	3.96	4.02	4.00	4.00	3.81
PN-16	14.715	14.67	14.66	14.64	14.69	14.68	14.72	14.60
PN-17								
PN-18	12.40	8.34	8.30	8.51	8.70	8.71	8.66	8.51
PN-19								
PN-20								
PN-21								
PN-22								
PWN-1				10.14				
PWN-2				10.91				
PWN-3				9.79				
PSH-1								
PSH-2								
PSH-3								
PSH-4								
PSH-5								
PSH-6								
PSH-7								
PSH-8								
PVS-7								

Piézomètre	2001/08/09	2001/08/15	2001/08/23	2001/08/30	2001/09/05	2001/09/14	2001/09/20	2001/10/12
PN-1	2.22	2.14	2.21	2.20	2.26	2.35	2.38	2.44
PN-2								
PN-3								
PN-4								
PN-5								
PN-6								4.47
PN-7								9.28
PN-8								5.64
PN-9	9.69	9.69	9.71	9.74	9.77	9.90	9.92	9.97
PN-10	10.06	10.04	10.11	10.09	10.09	10.10	10.16	10.27
PN-11	10.36	10.39	10.42	10.45	10.51	10.63	10.66	10.70
PN-12								9.81
PN-13	9.57	9.57	9.61	9.66	9.67	9.81	9.84	9.91
PN-14	9.61	9.62	9.61	9.64	9.65	9.82	9.84	9.90
PN-15	3.78	3.72	3.78	3.79	3.81	3.97	3.98	4.05
PN-16	14.51	14.60	14.61	14.60	14.61	14.69	14.70	14.73
PN-17								
PN-18	8.46	8.46	8.43	8.46	8.44	8.41	8.43	8.46
PN-19								
PN-20								
PN-21								
PN-22								
PWN-1								
PWN-2								
PWN-3								
PSH-1								
PSH-2								
PSH-3								10.17
PSH-4								
PSH-5								9.66
PSH-6								
PSH-7								8.88
PSH-8								
PVS-7								3.66

Piézomètre	2001/11/05	2001/11/20	2001/12/03	2002/01/07	2002/02/04	2002/02/28	2002/04/02	2002/04/08
PN-1	2.42	2.40	2.41	2.43	2.57	4.09	2.78	2.83
PN-2								
PN-3								
PN-4								
PN-5								
PN-6	4.42	4.41	4.41	4.44	4.65	Trop neige	Trop neige	Trop neige
PN-7	9.22	9.24	9.28	9.31	9.42	9.61	9.72	9.72
PN-8	5.21	5.26	5.20	5.24	5.33	6.51	6.60	6.61
PN-9	11.35	11.43	11.46	11.56	11.68	11.83	12.01	12.04
PN-10	10.71	10.73	10.83	10.93	11.06	11.21	11.39	11.42
PN-11	11.05	11.10	11.14	11.23	11.37	11.50	11.69	11.72
PN-12	10.25	10.31	10.35	10.44	10.57	10.71	10.90	10.92
PN-13	10.28	10.34	10.38	10.48	10.62	10.74	10.94	10.97
PN-14	10.23	10.31	10.36	10.47	10.57	10.71	10.89	10.91
PN-15	4.31	4.37	4.43	4.46	4.64	4.77	4.75	4.98
PN-16	14.75	14.78	14.79	14.80	14.79	14.82	14.89	14.88
PN-17								
PN-18	8.44	8.45	8.47	8.38	8.52	8.63	8.76	8.79
PN-19								
PN-20								
PN-21								
PN-22								
PWN-1								
PWN-2								
PWN-3								
PSH-1								
PSH-2								
PSH-3	9.80	9.75	9.69	8.68	8.71	8.81	8.44	8.98
PSH-4								
PSH-5	9.51	9.38	9.31	9.20	9.22	9.31	9.49	9.53
PSH-6								
PSH-7	8.81	8.74	8.68	8.97	9.02	9.10	9.26	9.29
PSH-8								
PVS-7	3.61	3.63	3.66	3.69	3.72	3.74	3.73	3.73

Piézomètre	2002/04/16	2002/04/22	2002/04/30	2002/05/08	2002/05/14	2002/05/21	2002/05/27	2002/06/11
PN-1	2.59	2.53	2.465	2.40	2.37	2.335	2.325	2.30
PN-2								
PN-3								
PN-4								
PN-5								
PN-6	4.68	4.52	4.42	4.40	4.39	4.40	4.40	4.45
PN-7	9.62	9.45	9.22	9.15	9.16	9.15	9.17	9.14
PN-8	6.51	5.93	5.38	5.20	5.20	4.97	5.10	4.85
PN-9	11.94	11.80	11.75	11.74	11.74	11.74	11.745	11.61
PN-10	11.35	11.19	11.12	11.11	11.105	11.11	11.11	11.10
PN-11	10.90	10.74	10.68	10.66	10.66	10.665	10.67	11.30
PN-12	10.71	10.58	10.54	10.53	10.53	10.53	10.535	11.50
PN-13	10.68	10.59	10.46	10.47	10.47	10.47	10.47	10.54
PN-14	10.74	10.58	10.505	10.475	10.475	10.475	10.475	10.505
PN-15	4.83	4.69	4.59	4.565	4.555	4.55	4.555	4.57
PN-16	14.90	14.90	14.89	14.86	14.82	14.79	14.765	14.70
PN-17								
PN-18	8.57	8.57	8.47	8.38	8.29	8.265	8.26	8.26
PN-19								
PN-20								
PN-21								
PN-22								
PWN-1								
PWN-2								
PWN-3								
PSH-1								
PSH-2								
PSH-3	8.91	8.50	8.33	8.28	8.22	8.15	8.14	8.14
PSH-4								
PSH-5	9.54	9.37	9.11	9.005	8.92	8.92	8.92	8.91
PSH-6								
PSH-7	9.01	8.99	8.88	8.67	8.58	8.58	8.57	8.57
PSH-8								
PVS-7	3.56	3.44	3.47	3.51	3.56	3.18	3.605	3.68

Piézomètre	2002/07/04	2002/07/18	2002/08/06	2002/08/23	2002/09/10	2002/09/23	2002/10/11	2002/10/24
PN-1	2.36	2.40	2.47	2.55	2.595	2.66	2.765	2.85
PN-2								
PN-3								
PN-4								
PN-5								
PN-6	4.485	4.545	4.63	4.72	4.785	4.83	4.90	4.94
PN-7	9.20	9.25	9.31	9.365	9.46	9.53	9.52	9.64
PN-8	5.39	5.71	5.95	6.195	6.42	7.52	6.62	6.64
PN-9	10.84	10.875	10.94	10.90	10.945	10.99	11.75	11.08
PN-10	11.22	11.26	11.31	11.27	11.325	11.38	11.225	11.44
PN-11	11.55	11.595	11.63	11.55	11.59	11.655	11.48	11.70
PN-12	10.56	10.585	10.64	10.63	10.67	10.68	10.73	10.81
PN-13	10.71	10.73	10.79	10.765	10.81	10.84	10.765	10.94
PN-14	10.57	10.61	9.67	10.665	10.725	10.75	10.77	10.85
PN-15	4.62	4.67	4.71	4.75	4.80	4.84	4.87	4.95
PN-16	14.64	14.65	14.69	14.73	14.77	14.82	14.855	14.93
PN-17								
PN-18	8.27	8.31	8.39	8.45	8.55	8.60	8.65	11.46
PN-19								
PN-20								
PN-21								
PN-22								
PWN-1								
PWN-2								
PWN-3								
PSH-1								
PSH-2								
PSH-3	8.21	8.275	8.36	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué	8.37
PSH-4								
PSH-5	8.90	8.93	9.00	9.13	9.33	9.53	9.70	9.36
PSH-6								
PSH-7	8.745	8.785	8.78	8.95	9.10	9.245	9.34	9.42
PSH-8								
PVS-7	3.69	3.705	3.71	3.75	3.76	3.71	3.74	3.73

Piézomètre	2002/11/13	2002/12/03	2003/01/24	2003/02/21	2003/03/17	2003/04/07	2003/04/17	2003/04/22
PN-1	2.905	2.97	3.25	3.26	3.49	3.53	3.49	3.43
PN-2								
PN-3								
PN-4								
PN-5								
PN-6	5.11	5.08	5.22	5.24		5.39	5.31	5.28
PN-7	9.62	9.68	9.91	9.98	10.025	10.05	10.01	9.96
PN-8	6.63	6.67	6.65	6.68	6.64		6.66	6.63
PN-9	11.25	11.335	11.42	11.44	12.48	11.71	11.72	11.73
PN-10	11.63	11.72	11.82	11.86	11.98	12.07	12.12	12.12
PN-11	11.95	12.05	12.12	12.14	12.22	12.34	12.37	12.37
PN-12	10.97	11.06	11.31	11.36	11.48	11.44	11.46	11.46
PN-13	N/D	11.20	11.36	11.39	11.48	11.56	11.58	11.58
PN-14	10.98	11.07	11.32	11.41	11.51	11.49	11.53	11.51
PN-15	5.03	5.11	5.40	5.45	5.61	5.59	5.62	5.59
PN-16	14.965	15.035	15.20	15.24	15.41	15.48	15.52	15.54
PN-17								
PN-18	8.87	11.42	11.52		9.48		12.53	9.52
PN-19								
PN-20								
PN-21								
PN-22								
PWN-1								
PWN-2								
PWN-3								
PSH-1								
PSH-2								
PSH-3	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué
PSH-4								
PSH-5	N/D	9.93	10.03	10.04	10.35	10.55	10.47	10.62
PSH-6								
PSH-7	N/D	9.28	9.35	9.29	10.04	10.18	10.02	10.22
PSH-8								
PVS-7	3.715	3.735	7.69		3.77	7.68	3.56	3.61

Piézomètre	2003/04/30	2003/05/09	2003/05/20	2003/06/09	2003/06/27	2003/08/05	2003/08/25	2003/09/12
PN-1	3.38	3.36	3.34	3.35	3.37	3.475		3.45
PN-2								
PN-3								
PN-4								
PN-5								
PN-6	5.21	5.22		5.16	5.11	5.20	5.09	5.11
PN-7	9.87	9.75	9.68	9.72	9.95	9.825	9.66	9.76
PN-8	6.65	6.65	6.67	6.68	6.70	6.69	6.43	8.66
PN-9	11.73	11.74	11.76	11.80	11.87	11.71	11.79	11.82
PN-10	12.11	12.12	12.14	12.20	12.28	12.27	12.16	11.18
PN-11	12.43	12.43	12.44	12.48	12.60	12.54	12.42	11.44
PN-12	11.46	11.46	11.47	11.50	11.59	11.63	11.51	11.54
PN-13	11.58	11.59	11.62	11.65	11.70	11.73	11.62	11.64
PN-14	11.46	11.48	11.48	11.52	11.60	11.67	11.57	11.60
PN-15	5.52	5.53	5.52	5.56	5.66	5.72	5.645	5.67
PN-16	15.56	15.58	15.61	15.61	15.63	15.66	15.69	15.73
PN-17								
PN-18	9.52	9.50			9.35	9.47	9.43	9.42
PN-19						1°3.81 2°3.80	1°3.67 2°3.78	1°3.77 2°3.80
PN-20								
PN-21								
PN-22								
PWN-1								
PWN-2								
PWN-3								
PSH-1								
PSH-2								
PSH-3	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué
PSH-4								
PSH-5	10.47	10.32	10.15	10.12	10.03	10.27	10.33	10.40
PSH-6								
PSH-7	10.02	10.00		9.98	9.95	9.775	10.04	10.10
PSH-8								
PVS-7	3.56	3.58	3.66	3.74	3.81	3.72	3.69	3.74

Piézomètre	2003/10/03	2004/02/12	2004/03/09	2004/04/01	2004/04/27	2004/05/06	2004/05/19	2004/05/26
PN-1	3.49	3.47	3.54	3.49	3.188	3.132	3.138	3.074
PN-2								
PN-3					5.148	5.069	4.989	4.938
PN-4					10.176	10.145	10.110	10.095
PN-5								
PN-6	5.13				5.052	4.965	4.908	4.889
PN-7	9.78	9.80	Sec	Sec	9.818	9.512	9.435	9.428
PN-8	6.655	6.64	6.65	6.67		18.266	18.252	
PN-9	11.865	11.04	12.27	12.06	11.807	11.767	11.717	11.669
PN-10	12.24	12.21	12.32	12.44	12.206	12.162	12.107	12.093
PN-11	12.485	12.45	12.58	12.75	12.500	12.442	12.392	12.377
PN-12	11.59	11.58	11.68	11.78	11.512	11.485	11.437	11.425
PN-13	11.70	11.69	11.80	11.91	11.650	11.617	11.572	11.562
PN-14	11.64	11.57	11.70	11.76	11.567	11.510	11.451	11.422
PN-15	5.71	5.68	5.78	5.82	5.632	5.569	5.500	5.461
PN-16	15.705	15.78	15.77	15.78	15.744	15.732	15.678	15.642
PN-17						5.931	5.884	5.875
PN-18	9.46	12.44	12.49		12.130	9.273	9.146	11.312
PN-19	1°4.905 2°4.14	3.96	4.02	3.96	3.744	3.688	3.718	3.760
PN-20		2.55	2.48	2.80				1.324
PN-21	2.465	2.24	2.36	2.50				1.813
PN-22	1.775	1.85	2.01	1.98	1.194			2.370
PWN-1								
PWN-2								
PWN-3								
PSH-1								
PSH-2								
PSH-3	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué
PSH-4								
PSH-5	10.44	10.45	10.53	10.60	10.186	9.967	9.621	9.507
PSH-6								
PSH-7		10.14						
PSH-8		8.40	8.51		8.172	8.170	8.041	7.988
PVS-7	3.74	3.73	3.76	3.73	3.560	3.525	3.559	

Piézomètre	2004/06/18	2004/07/06	2004/07/20	2004/08/16				
PN-1		2.88	2.807	2.876				
PN-2								
PN-3	4.582			4.730				
PN-4			9.920	9.893				
PN-5								
PN-6	4.84	4.72	4.686	4.742				
PN-7	9.537	9.35	9.319	9.485				
PN-8			6.202	6.387				
PN-9	11.65	11.58	11.537	11.508				
PN-10	12.041	12.98	11.925	11.899				
PN-11	12.324	12.26	12.199	12.178				
PN-12	11.362	11.30	11.245	11.223				
PN-13	11.50	11.41	11.363	11.341				
PN-14	11.361	11.32	11.264	11.247				
PN-15	5.427	5.35	5.321	5.298				
PN-16	15.651	15.37	15.261	15.216				
PN-17	5.815		5.680	5.659				
PN-18	8.935	8.85	8.794	8.808				
PN-19	3.648		3.753	3.875				
PN-20								
PN-21								
PN-22								
PSH-1								
PSH-2								
PSH-3	Obstrué	Obstrué	Obstrué	Obstrué				
PSH-4								
PSH-5	9.57	9.50	9.450	9.496				
PSH-6								
PSH-7		9.14						
PSH-8	7.810		7.609	7.587				
PVS-7		3.64	3.682	3.798				

ANNEXE C

NIVEAUX DE LACS

Tableau C1- Niveau d'eau de lacs (m)

Lac	2001/11/05	2001/12/03	2002/01/07	2002/02/04	2002/02/28	2002/04/02	2002/05/06	2002/06/11
Pit-Tremblay	147.83	147.848	147.868	147.793	147.763	147.888	147.443	147.753
Docteur	160.07	160.07	160.03	160.135	160.220	160.020	159.144	160.060
Mon Repos	128.20	128.215	128.22	128.205	128.275	127.380	128.024	128.135
Jean-Paul Tremblay	134.37	134.35	134.35	134.390	134.395	134.405	133.468	133.735

Lac	2002/07/18	2002/08/26	2002/10/11	2002/10/29	2002/12/05	2003/05/02	2003/06/27	2003/08/27
Pit-Tremblay	147.723	147.713	148.513	148.508	148.508	148.54	148.37	148.46
Docteur	160.030	160.030	160.030	160.050	160.190	160.05	160.00	160.02
Mon Repos	128.195	128.135	128.130	128.135	127.845		128.06	128.09
Jean-Paul Tremblay	134.125	134.135	133.745	133.745	133.760	133.78	134.38	134.41

Lac	2003/09/22							
Pit-Tremblay	148.39							
Docteur	160.01							
Mon Repos	128.00							
Jean-Paul Tremblay								

ANNEXE D

DÉBITS DE COURS D'EAU

Tableau D1- Débit de cours d'eau (m³/min)

Cours d'eau	2001/10/12	2001/11/05	2001/12/03	2002/05/06	2002/06/11	2002/07/18	2002/08/26
Villeneuve-Tremblay	0.680	1.221	0.967	0.244	0.642	0.078	0.179
du Curé	1.16	1.440	1.164	1.126	0.740	0.077	0.246
Ludger-Pelletier	0.79	1.650	1.156	0.566	0.592	0.146	0.110
près du terrain de jeux	1.230	1.91	1.188	2.348	1.495	0.279	0.1527
Gravel	7.00	8.430	4.21	6.18	4.397	0.3591	1.4796
Tremblay	3.06	4.693	2.839	8.45	3.085	0.345	0.1926
sortie du lac Docteur	6.240	8.800		15.39	11.583	7.589	5.14
1 ^{er} r. sur le ch. Des Ruisseaux	1.730	1.803	1.17	1.799	1.043	0.355	0.445
du Coteau	3.890	3.15	1.831	4.18	3.753	3.100	1.930
#1 du lac de l'Aqueduc	5.80	6.54	4.631	5.54	7.092	5.438	4.20
#2 du lac de l'Aqueduc	2.75	1.236	0.854	2.076	1.29	1.066	1.5526
sortie du lac de l'Aqueduc	2.460	2.688	0.399	1.544	1.233	2.712	1.4433
près du lac Mon Repos		4.310	1.926	4.193	2.965	2.122	1.9974
Chaud		17.58	9.417	17.06	13.923	4.686	1.638

Cours d'eau	2002/09/30	2002/10/29	2003/05/07	2003/06/27	2003/08/04	2003/08/27	2003/09/22
Villeneuve-Tremblay	0.10428	0.18924	0.7809	0.08055	0.06	0.3633	0.1015
du Curé	0.1467	0.5769	4.2825	0.1002	0.159822	0.84051	0.2068
Ludger-Pelletier	0.1755	0.2895	2.1459	0.270	0.07155	0.737172	0.0825
près du terrain de jeux	0.3396	0.1707	2.6439	0.2526	0.16368	0.866322	0.3174
Gravel	0.6126	1.8966	19.0113	0.9804	1.0224	10.6578	1.0764
Tremblay	0.1176	0.204	3.8154	0.6642	0.4968	1.33086	0.4059
sortie du lac Docteur	5.04	3.7305	8.6422	5.301	6.454	4.7775	4.428
1 ^{er} ruisseau sur le chemin Des Ruisseaux	0.2742	0.60474	1.9322	0.3755	0.15516	0.8028	0.2762
du Coteau	2.295	1.9605	4.2429	2.916	1.158	2.70984	1.9956
#1 du lac de l'Aqueduc	4.51536	4.51962	4.347	3.9549	1.81065	3.192	2.9464
#2 du lac de l'Aqueduc	1.5108	0.6066	1.6515	1.0704	0.8124	1.7382	1.9781
sortie du lac de l'Aqueduc	2.0169	1.714	1.4466	0.2304	0.18963	4.97475	0.2627
près du lac Mon Repos		1.8384	3.5607	2.1477	1.2528	3.17475	1.2457
Chaud	3.38976	3.55776	7.7007	4.2597	1.677702	4.0428	4.2587

Cours d'eau	2003/10/07	2004/05/07	2004/05/20	2004/07/21	2004/08/19		
Villeneuve-Tremblay	0.19905				0.0664		
du Curé	0.49059	3.6357	2.04	0.462	0.450		
Ludger-Pelletier	0.2937	2.91	2.09	0.0300	0.4272		
près du terrain de jeux	0.224125				1.0496		
Gravel	1.971855		13.51	2.703	3.3888		
Tremblay	0.419775	18.97	10.49	3.5784	1.5786		
sortie du lac Docteur	2.713185			14.5467	9.237		
1 ^{er} ruisseau sur le chemin Des Ruisseaux	0.5976	6.07	4.91	0.5648	0.9909		
du Coteau	1.4652	10.08	9.81	4.2922	3.7678		
#1 du lac de l'Aqueduc	3.17115	5.17	4.64	3.1638	6.1842		
#2 du lac de l'Aqueduc	1.1817	2.15	1.99	2.2424	2.3335		
sortie du lac de l'Aqueduc	1.0416	1.82	1.32	1.4856	0.486		
près du lac Mon Repos	1.46775	6.39	5.14	2.1717	3.4432		
Chaud	2.5881			10.3176	5.2437		

ANNEXE E

ANALYSES CHIMIQUES RÉALISÉES À L'UQAC

Une campagne d'échantillonnage des eaux de l'aquifère de Saint-Honoré a été réalisée au début du mois d'octobre 2002 dans le cadre d'une activité pédagogique de géochimie des programmes de premier cycle en géologie de l'Université du Québec à Chicoutimi. Cette activité ne faisait donc pas partie du programme de suivi de l'aquifère. Les résultats en sont présentés ici parce qu'ils permettent des observations pertinentes malgré les aléas inhérents à une activité d'apprentissage.

Le prélèvement des échantillons a été réalisé suivant les protocoles de Nielsen (1991) et de HACH (1989). L'utilisation du laboratoire portatif *HACH* a permis l'analyse de plusieurs paramètres *in situ* (tableau E1). Lors de cette campagne, l'eau de dix cours d'eau résurgents de l'aquifère a été échantillonnée, ainsi que l'eau de trois puits de captage appartenant à la municipalité de Saint-Honoré. Par la suite, l'absorption atomique, la spectrophotocolorimétrie et le titrage ont été utilisés pour l'analyse des paramètres en laboratoire, laquelle s'est effectuée dans les laboratoires de géochimie de l'UQAC en utilisant les méthodologies décrites par ASTM (1995), Bédard (2000), Boucher (1994) et

HACH (1989). Les délais à l'intérieur desquels les analyses doivent être effectuées (tableau E1) ont été respectés.

Tableau E1- Analyse des paramètres et délais à respecter

Paramètres analysés	Types d'analyses	Lieu	Délais à respecter
Alcalinité HCO ₃	Titration	UQAC	24 hres
Oxygène dissous	Laboratoire <i>HACH</i> portatif	<i>In situ</i>	24 hres
Eh, pH, T, conductivité, TSD, couleur, odeur	Laboratoire <i>HACH</i> portatif	<i>In situ</i>	24 hres
Métaux (Ni, Zn, Cu, Fe, Cr, Pb)	Absorption atomique	UQAC	6 mois
Éléments majeurs (Ca, Na, Mg, Mn, Cl, K)	Absorption atomique	UQAC	6 mois
Dosage des carbonates	Titration	UQAC	28 jours
Sulfates, nitrates, phosphates, chlorures	Spectrophotocolorimétrie	UQAC	28 jours

Les résultats de l'analyse des paramètres physiques sont présentés au tableau E2. La température *in situ* de l'eau se situe entre 3.9 et 12.6 °C; elle semble varier en fonction de la profondeur à laquelle l'échantillon a été prélevé et de la proximité de la résurgence par rapport au point d'échantillonnage. Le pH quant à lui est plus élevé à l'endroit des puits de captage de la municipalité, soit environ 8.30, comparativement à 7.45 en moyenne aux exutoires de l'aquifère. Bien que les valeurs de Eh mesurées soient relativement erratiques, tous les échantillons ont un Eh positif impliquant un environnement oxydant. La figure E1 présente le graphique Eh-pH de tous les échantillons, indiquant que tous se situent

dans le champ d'une eau souterraine normale, avec un Eh entre 0 et 300 mV et un pH entre 7.2 et 8.6. On remarque une distinction nette entre les échantillons prélevés dans les ruisseaux résurgents et ceux prélevés dans les puits, lesquels sont soumis à des conditions différentes d'oxydoréduction. De façon générale, les échantillons prélevés dans les ruisseaux résurgents ont des valeurs de pH se rapprochant de 7 et un Eh généralement de moins de 150 mV. Quant à l'oxygène dissous, sa quantité est légèrement inférieure dans l'eau des puits de pompage que dans l'eau des résurgences en surface. Le ruisseau Villeneuve-Tremblay se démarque nettement des autres cours d'eau avec la valeur la plus élevée du total des sels dissous (TSD) mesuré, soit de 281 mg/L.

Les résultats de l'analyse des paramètres chimiques sont donnés au tableau E3 et leur distribution spatiale est montrée à la figure E2. Dans cette figure, la moitié supérieure des diagrammes circulaires illustre les concentrations des cations en pourcentage de milliéquivalent par litre tandis que la moitié inférieure représente les concentrations des anions. Enfin, le diamètre du diagramme exprime proportionnellement la concentration des cations et des anions dans l'échantillon analysé.

Les résultats des analyses sont douteux du fait qu'une erreur élevée de l'équilibre de charge y est rattachée. Seulement quatre des douze échantillons analysés présentent une erreur d'équilibre de charge inférieure à 10 %. En effet, la

limite de l'acceptabilité des analyses en ce qui a trait à ce type d'erreur se situe à environ 5 à 10 % pour un TSD communément inférieur à 200 mg/L. Cette différence pourrait être attribuable en partie au fait que plusieurs cations et anions n'ont pas été considérés dans cette étude, étant peu pertinents pour cet exercice.

Les concentrations les plus élevées de cations Ca^{2+} , entre 14.8 et 17.7 mg/L, ont été mesurées dans l'eau des trois puits de la municipalité de Saint-Honoré et de la recharge du lac de l'Aqueduc. Les concentrations les plus faibles de Ca^{2+} sont retrouvées dans le ruisseau Villeneuve-Tremblay, dans le premier ruisseau sur le chemin des Ruisseaux et dans le ruisseau du Coteau. Les concentrations de K^{+} varient peu d'un échantillon à l'autre; l'exception est l'échantillon ayant été prélevé à la plus grande profondeur, soit au puits #1 de la municipalité de Saint-Honoré et dont la crépine est située à trente-huit mètres depuis la surface, lequel présente une concentration plus élevée en K^{+} , soit de 6.8 mg/L. La concentration de Fe^{3+} est généralement plus faible à l'endroit des puits de pompage. Les concentrations les plus élevées de Fe^{3+} ont été mesurées dans deux cours d'eau exutoires localisés au nord-ouest de l'aquifère, soit le ruisseau Gravel avec 1.51 mg/L et le ruisseau près du terrain de jeux avec 1.24 mg/L. On peut observer que le sous-bassin versant respectif de chacun de ces deux ruisseaux est recouvert en partie par une zone marécageuse, une source possible d'enrichissement en fer à cause des conditions réductrices du milieu. Les concentrations de Mg^{2+} et de Na^{+} présentent peu de variations spatiales, à

l'exception du ruisseau Villeneuve-Tremblay qui affiche des concentrations plus élevées, soit respectivement de 14 mg/L et de 70 mg/L. L'analyse des cations métalliques en utilisant l'absorption atomique a révélé des concentrations sous les limites de détection de l'appareil utilisé pour tous les échantillons.

La concentration en nitrates (NO_3^-) est plus élevée dans les six résurgences échantillonnées au sud de l'aquifère, ainsi que dans l'eau des puits de la municipalité de Saint-Honoré. La concentration des phosphates (PO_4^{3-}) demeure très faible dans tous les échantillons, quoiqu'elle soit légèrement plus faible à l'endroit de la recharge du lac de l'Aqueduc. Les concentrations en sulfates (SO_4^{2-}) sont généralement plus élevées dans la partie sud de l'aquifère, notamment dans le ruisseau Villeneuve-Tremblay, dans le premier ruisseau sur le chemin des Ruisseaux et dans le ruisseau du Coteau. Par ailleurs, elles sont nulles ou faibles à l'endroit des puits de la municipalité de Saint-Honoré.

Le ruisseau Villeneuve-Tremblay dans la partie sud-ouest de l'aquifère se démarque par sa teneur totale en sels dissous. Ce cours d'eau est alimenté par un sous-bassin versant à vocation agricole sur lequel il y a épandage d'engrais et de purin. Nous observons des concentrations élevées en sodium, en sulfates et en nitrates dans le ruisseau Villeneuve-Tremblay. Deux autres cours d'eau situés à proximité du ruisseau Villeneuve-Tremblay démontrent des concentrations plus élevées notamment en sulfates et en nitrates, soit le premier ruisseau sur le

chemin des Ruisseaux et le ruisseau du Coteau. Enfin, l'alcalinité en bicarbonates présente des valeurs variant de 40.5 mg/L et 90.4 mg/L. Le chlore n'est généralement présent qu'en faible quantité dans les eaux météoritiques; la méthode analytique utilisée n'a pas permis sa détection.

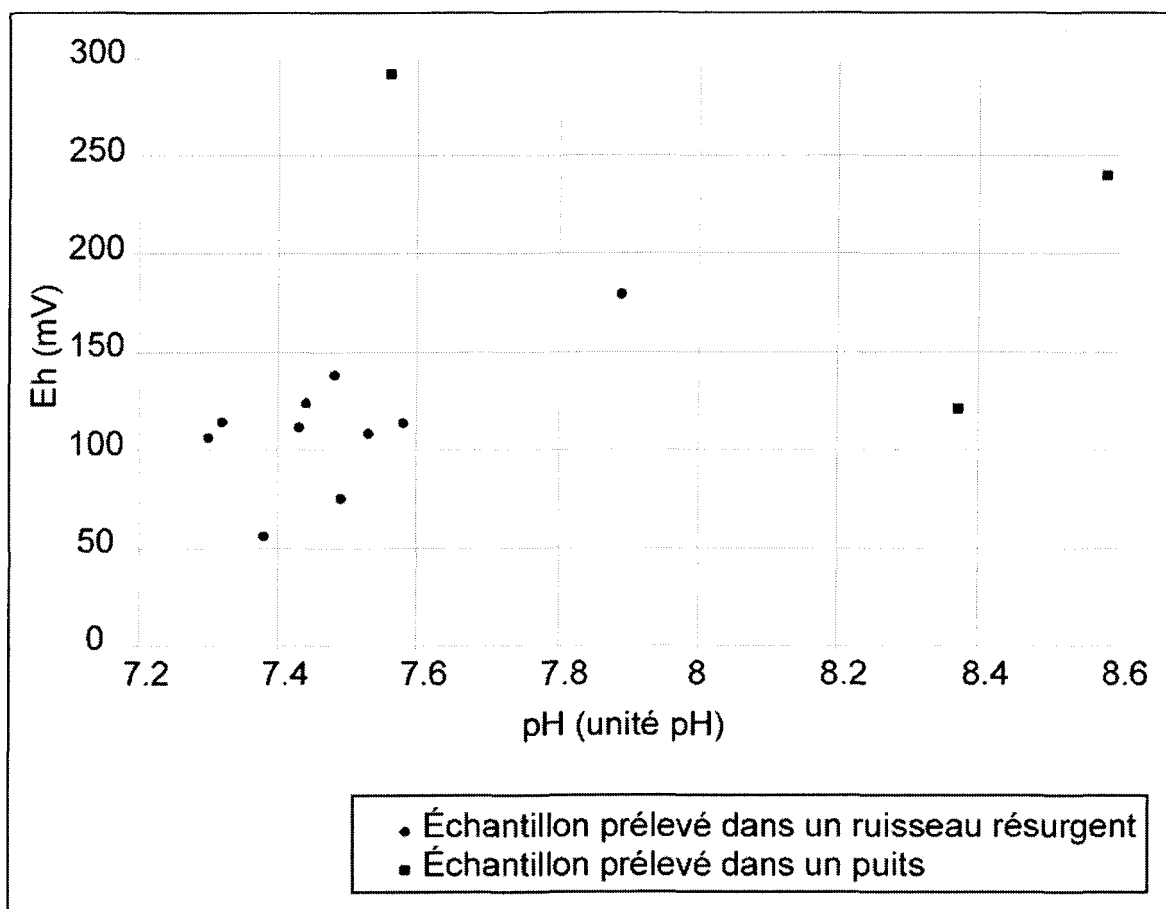


Figure E1- Graphique Eh – pH

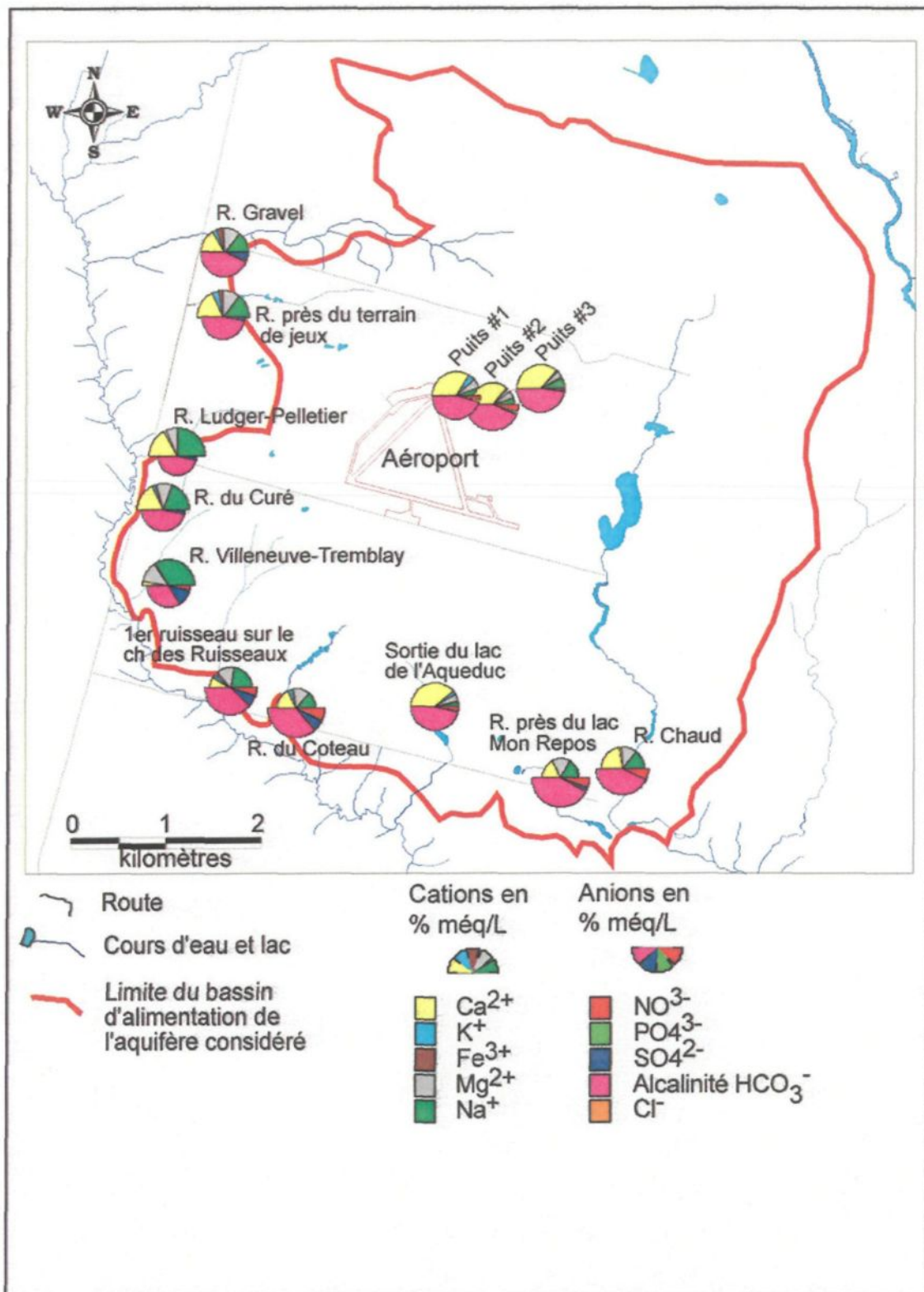


Figure E2- Faciès hydrogéochimiques des échantillons prélevés

Tableau E2- Paramètres physiques

Site d'échantillonnage	Couleur	Odeur	T (°C)	PH (unité ph)	Eh (mV)	Conductivité (mS/cm)	TSD _{mesuré} (mg/L)	TSD _{calculé} (mg/L)	O ₂ ⁰ (mg/L)
Puits #1 de Saint-Honoré	nil	nil	7	8.37	121.1	0.153	73	123.6	5.17
Puits #2 de Saint-Honoré	nil	nil	9	8.58	240.1	0.138	68	104.3	8.02
Puits #3 de Saint-Honoré	nil	nil	10.2	7.56	292	0.113	56	83.0	7.1
Ruisseau Gravel	brunâtre	nil	12.6	7.89	179.4	0.089	44	64.4	9.63
Ruisseau près du terrain de jeux	nil	nil	5.7	7.3	106.2	0.121	64	65.8	9.11
Ruisseau Ludger- Pelletier	brunâtre	nil	3.9	7.43	111.5	0.262	134	116.8	11.83
Ruisseau Villeneuve- Tremblay	nil	nil	4.8	7.38	55.9	0.56	281	281.2	10.89
Ruisseau du Curé	brunâtre	nil	5.1	7.49	75.2	0.213	104	120.5	9.81
Premier ruisseau sur le chemin Des Ruisseaux	brunâtre	nil	5.9	7.53	108.4	0.158	79	108.5	11.02
Ruisseau du Coteau	nil	nil	8.2	7.32	114.3	0.116	59	74.1	10.07
Ruisseau #1 du lac de l'Aqueduc	nil	nil	7.6	7.58	113.8	0.124	64	85.2	9.28
Ruisseau près du lac Mon Repos	nil	nil	9.5	7.48	138.2	0.086	43	66.3	7.58
Ruisseau Chaud	nil	nil	11.1	7.44	123.8	0.082	45	58.0	8.79

Tableau E3- Paramètres chimiques en mg/L

Site d'échantillonnage	O ₂ ⁰ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	PO ₄ ³⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	Alcalinité HCO ₃ ⁻ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Fe ³⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Na ⁺ (mg/L)
Puits #1 de Saint-Honoré	5.17	0.00	7.04	0.31	0.06	82.47	21.00	6.80	0.20	2.20	3.50
Puits #2 de Saint-Honoré	8.02	0.00	7.04	0.22	2.47	72.22	16.00	2.00	0.00	1.80	2.50
Puits #3 de Saint-Honoré	7.10	0.01	2.20	0.33	0.00	57.58	16.00	1.60	0.02	1.30	4.00
Ruisseau Gravel	9.63	0.00	0.00	0.11	4.54	40.99	6.10	2.60	1.51	2.50	6.00
Ruisseau près du terrain de jeux	9.11	0.00	0.00	0.11	1.89	40.50	8.30	3.30	1.24	3.00	7.50
Ruisseau Ludger- Pelletier	11.83	0.00	0.44	0.13	3.19	60.02	17.00	2.30	0.30	4.40	29.00
Ruisseau Villeneuve- Tremblay	10.89	0.01	15.40	0.78	37.83	137.62	5.00	0.40	0.14	14.00	70.00
Ruisseau du Curé	9.81	0.00	0.88	0.19	3.12	74.66	15.00	3.50	0.45	4.70	18.00
Premier ruisseau sur le chemin Des Ruisseaux	11.02	0.00	8.36	0.26	9.37	68.32	3.80	3.10	0.34	3.70	11.20
Ruisseau du Coteau	10.07	0.00	8.80	0.25	6.31	47.34	3.90	1.80	0.26	1.90	3.50
Ruisseau #1 du lac de l'Aqueduc	9.28	0.04	4.84	0.05	0.00	58.07	17.00	1.90	0.03	1.40	1.90
Ruisseau près du lac Mon Repos	7.58	0.01	5.28	0.21	2.00	48.31	3.80	0.10	0.09	2.10	4.40
Ruisseau Chaud	8.79	0.00	6.60	0.21	0.00	40.50	5.00	0.40	0.13	1.50	3.70

ANNEXE F

ÉQUATION DES INDICATEURS DE PERFORMANCE DU CALAGE

Le contenu de cette annexe est tiré en majeure partie de Waterloo hydrogeologic (2002).

Le résiduel moyen (en anglais ME pour *mean error*) se calcule par l'équation suivante :

$$ME = (1/n) \sum (h_{\text{gén}} - h_{\text{mes}}) \quad [1]$$

où $h_{\text{gén}}$ est le niveau d'eau généré dans une cellule par le modèle de simulation; h_{mes} est le niveau d'eau mesuré sur le terrain dans le piézomètre situé dans la même cellule; n correspond au nombre total de piézomètres sur lesquels la simulation a été calée.

Le résiduel moyen absolu (MA) effectue la sommation de la valeur absolue de la différence entre le niveau d'eau généré et le niveau d'eau mesuré pour une même cellule. Cet indicateur calcule la magnitude moyenne du résiduel quel que soit son signe; il constitue par conséquent un meilleur indicateur de performance

du calage que le résiduel moyen. Le résiduel moyen absolu (MA) se calcule par l'équation suivante :

$$MA = (1/n) \sum |h_{\text{gén}} - h_{\text{mes}}| \quad [2]$$

L'écart-type du résiduel aussi appelé le résiduel du calage, est exprimé par l'équation suivante :

$$SEE = ([\sum (h_{\text{gén}} - h_{\text{mes}})^2 - (\sum (h_{\text{gén}} - h_{\text{mes}}))^2 / n] / n)^{1/2} \quad [3]$$

La racine carrée de la moyenne des écarts au carré (en anglais RMS pour *root mean squared error*) est définie par l'équation suivante :

$$RMS = 1/n (\sum (h_{\text{gén}} - h_{\text{mes}})^2)^{1/2} \quad [4]$$

La moyenne de la racine de la somme des écarts au carré (RMS) normalisée est la RMS divisée par l'écart maximum entre les valeurs mesurées.

$$RMS \text{ normalisée} = RMS / ((h_{\text{mes}})_{\text{max}} - (h_{\text{mes}})_{\text{min}}) \quad [5]$$

La RMS normalisée est exprimée en pourcentage. Elle est considérée comme un meilleur indicateur de performance du calage que le RMS elle-même, parce qu'elle tient compte de l'étalement de la fourchette des valeurs.