Université du Québec
INRS - Géoressources

Architecture et hydrostratigraphie d'un complexe morainique et deltaïque dans la région de Saint-Raymond de Portneuf, Québec

Par
Frédéric Girard

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

Jury d'évaluation

Examinateur interne	Bernard Long, Ph.D. Université du Québec INRS-Géoressources
Examinateur externe	Michel Lamothe, Ph.D. Université du Québec à Montréal
Directeur de recherche	Michel Parent, Ph.D. Commission géologique du Canada
Codirecteur de recherche	René Lefebvre, Ph.D. Université du Québec INRS-Géoressources

© droits réservés de Frédéric Girard, 2001

Résumé

Cette étude s'inscrit dans le cadre d'un projet pilote de cartographie hydrogéologique régionale auquel participent la Commission géologique du Canada, l'INRS-Géoressources, l'Université Laval, le ministère de l'Environnement du Québec et la MRC de Portneuf. L'un des principaux objectifs de ce projet pilote est de développer une méthodologie de cartographie hydrogéologique régionale pour les aquifères granulaires de surface.

La cartographie et la caractérisation régionale de la ressource en eau souterraine doivent fournir une description détaillée du contexte hydrogéologique et évaluer les propriétés physiques et hydrodynamiques des aquifères. En plus de cette évaluation intrinsèque des formations aquifères, la caractérisation de leur structure spatiale et de leurs relations avec les matériaux environnants permet une meilleure compréhension de la dynamique d'écoulement des eaux souterraines. Les objectifs de cette étude portent sur ces derniers points et visent plus spécifiquement 1) à établir le cadre hydrostratigraphique de la région de Saint-Raymond et 2) à définir l'architecture tridimensionnelle des différents corps sédimentaires du bassin de Saint-Raymond.

Une compilation multi-sources de données géoscientifiques disponibles pour la MRC de Portneuf a été effectuée antérieurement, dans le cadre du projet pilote. De nouveaux travaux de terrain ont été entrepris dans le cadre de cette étude afin de valider et de compléter l'information. Des levés de coupes stratigraphiques ont permis de répertorier les différents types de lithofaciès présents sur le territoire étudié afin d'en évaluer les relations latérales et verticales. Quatre forages stratigraphiques profonds ont aussi été réalisés au voisinage de la Moraine de Saint-Narcisse afin de connaître son extension latérale en subsurface et ses relations stratigraphiques avec les sédiments marins, prodeltaïques et deltaïques. Les analyses granulométriques et les essais de perméabilité réalisés sur des séries d'échantillons ont permis d'établir avec plus de précision le cadre hydrostratigraphique régional. L'intégration et l'interprétation de l'ensemble des données ont permis de dresser une série de coupes géologiques à intervalle régulier alors que l'interpolation de ces dernières, grâce au logiciel GEOSOLID II, a permis de construire un modèle stratigraphique tridimensionnel informatisé.

La stratigraphie de la partie centrale du bassin de Saint-Raymond consiste en une séquence type de progradation deltaïque caractérisée par un gradient granulométrique inverse. Une unité de sédiments fins marins, mise en place dans la Mer de Champlain, est surmontée par une unité de sédiments silto-sableux prodeltaïques et par une unité de sable deltaïque qui représente la principale formation granulaire aquifère de la région. La reconnaissance de trois différents lobes deltaïques dans le delta de la rivière Sainte-Anne permet maintenant de mieux expliquer la présence d'épais corps sableux en subsurface interdigités avec les sédiments marins et prodeltaïques. Cette configuration de lobes deltaïques a été principalement conditionnée par la régression de la Mer de Champlain tout comme la dissection des sédiments deltaïques par la rivière Sainte-Anne en une série de terrasses étagées. À plusieurs endroits dans le bassin, les aquifères de surface ne sont pas en contact hydraulique direct avec la rivière. Des résurgences d'eau souterraine apparaissent donc à la base des sables deltaïques au contact avec les sédiments prodeltaïques qui correspondent, avec les sédiments marins, à une unité aquitard de forte anisotropie, comme l'indiquent les essais de perméabilité. Les unités pré-champlainiennes et pré-Gentilly, rencontrées lors des différents travaux de forage, représentent quant à elles des aquifères confinés très intéressants et se présentent, à certains endroits, sous des conditions artésiennes. Enfin, la stratigraphie du complexe morainique de Saint-Narcisse dans le bassin de Saint-Raymond indique que le front glaciaire a réavancé sur des sédiments prodeltaïques, probablement lors du refroidissement du Dryas récent.

Frédéric Girard

Michel Parent

René Lefebvre

Remerciements

Je voudrais tout d'abord remercier sincèrement mon directeur de recherche, Michel Parent, de la Commission géologique du Canada pour sa grande disponibilité. Je voudrais également le remercier pour les nombreuses discussions qui ont suscité moult réflexions et enfin pour m'avoir transmis sa passion pour la recherche qui a été pour moi, source de motivation tout au long de ce projet. Mon codirecteur, René Lefebvre de l'INRS-Géoressources pour m'avoir accordé sa confiance et pour ses judicieux conseils. Éric Boisvert de la Commission géologique du Canada sans qui la troisième dimension relèverait toujours de l'imaginaire et Yves Michaud de la Commission géologique du Canada, pour son aide sur le terrain et ses conseils concernant l'ensemble des aspects du projet.

Je tiens également à remercier Bernard Long de l'INRS-Géoressources et Michel Lamothe de l'Université du Québec à Montréal pour leurs commentaires lors de la lecture critique du mémoire. Je remercie également Jean-Pierre Guilbault (BRAQ-Stratigraphie) pour l'extraction et l'analyse de la microfaune des échantillons de forage, Alayn Larouche du laboratoire Jacques-Rousseau du département de géographie de l'Université de Montréal pour l'analyse du contenu en restes végétaux, Luc Trépanier et le département des sols de l'Université Laval pour les essais de perméabilité, Luce Dubé pour la numérisation des coupes stratigraphiques et Marc Greendale du Complexe Scientifique pour les analyses granulométriques. Je tiens aussi à remercier Daniel Larose-Charette pour son aide sur le terrain et toute l'équipe de chercheurs et d'étudiants faisant partie du Projet Portneuf ainsi que l'ensemble du personnel du Centre géoscientifique de Québec pour les bons moments passés. J'aimerais remercier la Commission géologique du Canada, le ministère de l'Environnement du Québec, la MRC de Portneuf et l'Université Laval pour leur aide financière via le projet de cartographie des aquifères du piémont laurentien ainsi que l'Institut national de recherche scientifique (INRS) pour les bourses d'étude qui m'ont été accordées.

Je remercie Nathalie Fagnan pour son aide tout au long de ce projet aussi bien sous la pluie durant les travaux de terrain que durant les longues soirées de travail qu'elle a si souvent partagées avec moi. Enfin, je la remercie pour son dynamisme qu'elle a su si bien me faire partager et pour ses nombreux encouragements.

Table des matières

RÉSUMÉ V
REMERCIEMENTS VII
TABLE DES MATIÈRES IX
LISTE DES FIGURES XI
LISTE DES TABLEAUX XII
INTRODUCTION GÉNÉRALE XIII

CHAPITRE 1 - INTRODUCTION 1

1.1 PROBLÉMATIQUE 1
1.2 OBJECTIFS GÉNÉRAUX ET SPÉCIFIQUES 3
1.3 MÉTHODOLOGIE 4
1.3.1 Cadre hydrostratigraphique 4
1.3.2 Construction des coupes stratigraphiques 5
1.3.3 Modèle conceptuel tridimensionnel 8
1.4 CONTRIBUTION DE L'AUTEUR ET DES COAUTEURS 9

CHAPITRE 2 – MORAINE DE SAINT-NARCISSE 11

2.1 RECONNAISSANCE ET CARTOGRAPHIE 11
2.1.1 Portion centrale de la vallée du Saint-Laurent 11
2.1.2 Nord de Montréal 12
2.1.3 Nord-est de Québec (Parc des Laurentides) 13
2.2 LITHOSTRATIGRAPHIE ET MISE EN PLACE 15
2.3 DATATIONS ET CORRÉLATIONS 23

CHAPITRE 3 - ARCHITECTURE AND STRATIGRAPHY OF AN UPLIFTED GLACIOMARINE BASIN: IMPLICATIONS FOR REGIONAL HYDROGEOLOGY 29

3.1 ABSTRACT 30
3.2 INTRODUCTION 31
3.3 STUDY AREA 32
3.4 PREVIOUS WORK 33
3.5 REGIONAL STRATIGRAPHIC FRAMEWORK 34
3.6 ELABORATION OF THE THREE DIMENSIONAL STRATIGRAPHIC MODEL 36
3.6.1 Stratigraphic sections 36
3.6.2 Stratigraphic Boreholes 39
3.6.3 Geological cross-sections 40

3.6.4 Interpolation techniques....41
3.7 STRATIGRAPHIC ARCHITECTURE....41
3.7.1 Bedrock topography and pre-Champlain Sea units....41
3.7.2 Saint-Narcisse Moraine....42
3.7.3 Sainte-Anne deltaic lobes geometry....43
3.8 SEDIMENTOLOGICAL DEPOSITIONAL MODEL FOR THE SAINT-RAYMOND BASIN....44
3.8.1 Glaciomarine sedimentation – Saint-Narcisse Moraine....44
3.8.2 Deltaic sedimentation – Sainte-Anne deltaic complex....46
3.9 HYDROSTRATIGRAPHIC FRAMEWORK AND HYDROGEOLOGIC APPLICATIONS....47
3.9.1 Hydrostratigraphic units....47
3.9.2 Hydraulic conductivities....48
3.9.3 Hydrogeological applications....49
3.10 CONCLUSIONS....49

CHAPITRE 4 - CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS....77

CHAPITRE 5 - RÉFÉRENCES....81

ANNEXE A - GÉOLOGIE DES FORMATIONS SUPERFICIELLES DE LA RÉGION DE SAINT-RAYMOND, MRC DE PORTNEUF, QUÉBEC....93

ANNEXE B - INFORMATIONS GÉOSCIENTIFIQUES DE SUBSURFACE DANS LA RÉGION DE SAINT-RAYMOND, MRC DE PORTNEUF, QUÉBEC....97

ANNEXE C - PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES....101

ANNEXE D - ESSAIS DE PERMÉABILITÉ....109

ANNEXE E - COUPES STRATIGRAPHIQUES....127

ANNEXE F - IMAGES DU BLOC 3D....175

Liste des figures

FIGURE 1.1 - MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR L'ÉTABLISSEMENT DU CADRE HYDROSTRATIGRAPHIQUE. 6
FIGURE 1.2 - MÉTHODOLOGIE UTILISÉE POUR LA PRODUCTION DU MODÈLE TRIDIMENSIONNEL 7
FIGURE 2.1 - LE TRACÉ DE LA MORAINE DE SAINT-NARCISSE DU LAC SIMON, EN OUTAOUAIS, JUSQU'À SAINT-SIMÉON AU SAGUENAY (D'APRÈS LASALLE ET ELSON, 1975) 12
FIGURE 2.2 - COUPE STRATIGRAPHIQUE TRANSVERSALE À LA MORAINE DE SAINT-NARCISSE DANS LA RÉGION DE SAINT-GABRIEL-DE-BRANDON (D'APRÈS DENIS, 1974) 14
FIGURE 2.3 - COUPE STRATIGRAPHIQUE TRANSVERSALE À LA MORAINE DE SAINT-NARCISSE DANS LA RÉGION DE SAINTE-ÉMILIE-DE-L'ÉNERGIE (D'APRÈS PAGÉ, 1977) 15
FIGURE 2.4 - RELATIONS STRATIGRAPHIQUES DU COMPLEXE MORAINIQUE DE SAINT-NARCISSE (D'APRÈS OCCHIETTI, 1980) 16
FIGURE 2.5 - LE CONCEPT DE MORAINE DE RÉ-ÉQUILIBRATION EXPLIQUANT LA MISE EN PLACE DE LA MORAINE DE SAINT-NARCISSE (D'APRÈS HILLAIRE-MARCEL ET OCCHIETI, 1980) 17
FIGURE 2.6 - LE STADE DE VALDERS DANS LE BASSIN DU LAC MICHIGAN (D'APRÈS SAARNISTO, 1974) . 18
FIGURE 2.7 - ESSAI DE CORRÉLATION ENTRE LES POSITIONS MARGINALES DES GLACES AU WISCONSINIEN SUPÉRIEUR (D'APRÈS DREIMANIS, 1977) 20
FIGURE 2.8 - DATATIONS ^{14}C DU COMPLEXE MORAINIQUE DE SAINT-NARCISSE DANS LA RÉGION DE TROIS-RIVIÈRES-SHAWINIGAN (D'APRÈS OCCHIETTI, 1980) 21
FIGURE 2.9 - HISTOIRE DU TAUX D'ACCUMULATION DE NEIGE À GISP2 (D'APRÈS ALLEY *ET AL.*, 1993) 23
FIGURE 2.10 - MESURE DE LA CONDUCTIVITÉ ÉLECTRIQUE À GISP2 POUR UNE PÉRIODE DE TEMPS COMPRISE ENTRE 10 500 ET 15 500 ANS (D'APRÈS TAYLOR *ET AL.*, 1993) 23
FIGURE 3.1 - REGIONAL PHYSIOGRAPHY AND LOCATION OF THE STUDY AREA 51
FIGURE 3.2 - SURFICIAL GEOLOGY ON DIGITAL ELEVATION MODEL OF THE SAINT-RAYMOND AREA. GRID USED FOR THE CONSTRUCTION OF THE GEOLOGICAL CROSS-SECTIONS OF THE 3D MODEL IS ALSO SHOWN. 53
FIGURE 3.3 - COMPOSITE QUATERNARY LITHOSTRATIGRAPHY OF THE ST. LAWRENCE LOWLAND AND POSSIBLE CORRELATIONS WITH MARINE ISOTOPIC STRATIGRAPHY 55
FIGURE 3.4 - MAIN STRATIGRAPHIC SECTIONS OF THE SAINTE-ANNE DELTA 57
FIGURE 3.5 - MAIN LITHOFACIES OF THE SAINT-RAYMOND BASIN 59
FIGURE 3.6 - STRATIGRAPHIC RELATIONSHIPS BETWEEN BOREHOLES ACROSS THE SAINT-NARCISSE MORAINE IN THE SAINT-RAYMOND AREA 61
FIGURE 3.7 - BASIS OF THE INTERPOLATION TECHNIQUE USED BY THE GEOSOLID II SOFTWARE FOR CONSTRUCTION OF THE STRATIGRAPHIC 3D MODEL 63

FIGURE 3.8 - EXAMPLES OF CROSS-SECTIONS 5 TO 9 DRAWN FOR THE ELABORATION OF THE 3D MODEL. THESE CROSS-SECTIONS SHOW THE COMPLEX SUBSURFACE GEOMETRY OF DELTAIC LOBES AND THE RELATIONSHIPS BETWEEN DIFFERENT GEOLOGICALUNITS 65
FIGURE 3.9 - TRANSVERSE STRATIGRAPHIC CROSS-SECTION OF THE SAINT-RAYMOND BASIN SHOWING THE ARCHITECTURE OF THE SAINT-NARCISSE MORAINE AND THE PRE-GENTILLY SEDIMENTS 67
FIGURE 3.10 - CONCEPTUAL MODEL OF THE SAINT-NARCISSE MORAINE SUBAQUATIC SEDIMENTATION AT THE CONTACT OF THE CHAMPLAIN SEA AND THE LAURENTIDE ICE SHEET IN THE PORTNEUF AREA 69
FIGURE 3.11 - DEPOSITIONAL MODEL FOR THE FIRST DELTAIC LOBE OF THE SAINTE-ANNE RIVER SHOWING THE ARCHITECTURE OF THE MAIN FACIES ASSEMBLAGES..... 71
FIGURE 3.12 - GRAIN-SIZE DISTRIBUTION OF THREE LAYERS FROM A PRODELTAIC SAND UNIT..... 73
FIGURE 3.13 - COMPOSITE HYDROSTRATIGRAPHIC SEQUENCE OF THE SAINT-RAYMOND BASIN.. 75

Liste des tableaux

TABLEAU 1 - MAIN LITHOFACIES IN THE SAINT-RAYMOND BASIN 38

Introduction générale

La ressource en eau souterraine représente la source privilégiée d'alimentation en eau potable pour 20% de la population du Québec (MEQ, 1999). De façon générale, l'eau souterraine est de bonne qualité et disponible en quantité suffisante pour l'approvisionnement domestique partout au Québec. Cependant, la diversification de l'usage de l'eau souterraine et son utilisation accrue au cours des 20 dernières années ont donné lieu à plusieurs conflits d'usages dans différentes sphères d'activité, notamment dans les zones rurales en relation avec la pollution diffuse d'origine agricole. Des cas sérieux de contamination de l'eau souterraine engendrant des coûts de restauration énormes ont fait prendre conscience aux autorités de l'importance d'effectuer une gestion adéquate de la ressource afin de la protéger. Pour gérer adéquatement la ressource, il faut tout d'abord bien la connaître. Or, l'état actuel des connaissances étant insuffisant, il est essentiel d'augmenter notre compréhension des formations géologiques, en surface et en subsurface, dans le but d'établir des cadres hydrostratigraphiques d'échelle régionale.

L'établissement de tels cadres représente un défi très intéressant aux géologues du Quaternaire et hydrogéologues étant donné la complexité de la stratigraphie des dépôts meubles dans plusieurs régions du Québec. Ce mémoire, qui s'inscrit dans le cadre du projet pilote de cartographie des aquifères du piémont laurentien[1], répond à ce besoin en définissant le contexte géologique des aquifères granulaires de surface de la région de Saint-Raymond, située dans la MRC de Portneuf.

Ce mémoire de type article est divisé en trois parties. La première partie présente la problématique, les objectifs généraux et spécifiques du mémoire ainsi que la méthodologie employée pour la construction du modèle hydrostratigraphique. La seconde partie consiste en une revue de littérature sur la Moraine de Saint-Narcisse alors que la troisième partie est le manuscrit de l'article qui sera soumis à la Revue canadienne des Sciences de la Terre en décembre 2000. Enfin, une série d'annexes complète ce mémoire afin de présenter certains résultats essentiels à l'élaboration de l'article mais qui ne sont discutés que de façon succinte dans ce dernier.

---

[1] Projet pilote de cartographie hydrogéologique régionale d'aquifères granulaires de surface auquel participent la Commission géologique du Canada, l'INRS-Géoressources, l'Université Laval, le ministère de l'Environnement du Québec et la MRC de Portneuf.

CHAPITRE 1 - Introduction

1.1 Problématique

Le retrait de l'Inlandsis laurentidien au Wisconsinien supérieur et à l'Holocène a laissé de grandes quantités de matériaux meubles dans tout le Québec méridional. L'invasion de la vallée du Saint-Laurent par la Mer de Champlain et l'édification de la Moraine de Saint-Narcisse pendant le refroidissement climatique du Dryas récent furent des événements marquants de la fin de la dernière déglaciation au Québec. La nature et l'agencement des différents corps sédimentaires mis en place durant ces épisodes peuvent être très complexes étant donné la succession rapide d'environnements sédimentaires de forte et de faible énergie.

À la sortie des principales rivières du piémont laurentien sur la rive nord du Saint-Laurent, d'épaisses séquences sablo-graveleuses de constructions régressives littorales et deltaïques surmontent les sédiments silto-argileux mis en place dans la Mer de Champlain. Ces différentes séquences sablo-graveleuses fournissent une grande partie des ressources en granulats et représentent une ressource non renouvelable très importante pour la société québécoise. D'autre part, ces sédiments quaternaires constituent des aquifères importants qui fournissent de l'eau potable pour une bonne partie de la population rurale incluant plusieurs petites municipalités du Québec. La caractérisation et l'évaluation régionale des ressources en eaux souterraines doivent fournir de l'information sur la disponibilité et la quantité des eaux souterraines, sur leur dynamique d'écoulement, leur recharge et enfin, sur leur qualité. Ceci nécessite la connaissance des propriétés physiques et hydrodynamiques des aquifères ainsi qu'une compréhension de leur structure spatiale et de leurs relations par rapport aux autres matériaux (Banton et Bangoy, 1997).

La cartographie des formations superficielles constitue sans contredit l'outil de base pour l'interprétation et l'identification des unités hydrogéologiques en surface (Fagnan *et al.,* 1998). Par contre, cette approche classique n'ouvre qu'un accès très imparfait à la connaissance de la distribution et de la géométrie des différents corps sédimentaires de subsurface. Ainsi, les volumes des nappes aquifères peuvent difficilement être estimés au niveau régional et il est pratiquement impossible d'identifier la présence de certaines nappes captives ou perchées au sein des différentes formations. La cartographie en trois dimensions permet d'intégrer l'ensemble des données géoscientifiques, telles les données de forage, afin de représenter et de comprendre l'architecture et la répartition spatiale des différents matériaux en subsurface. Cette technique de cartographie ouvre de nouvelles perspectives d'analyse hydrogéologique avec l'aide de nouveaux outils informatiques de compilation et de visualisation.

Une compréhension approfondie de la distribution des différents corps sédimentaires à l'intérieur d'un environnement donné est possible en alliant l'utilisation de modèles sédimentologiques aux observations géologiques régionales. Malheureusement, le recours à de tels modèles et l'utilisation de l'approche sédimentologique ne sont pas très fréquents en hydrogéologie. Une bonne connaissance des environnements sédimentaires quaternaires semble essentielle à la compréhension de la dynamique d'écoulement des eaux souterraines dans ces milieux. Les nombreuses variations latérales et verticales de faciès qui caractérisent les environnements quaternaires doivent être considérées comme autant de mises en garde quant à l'utilisation de ces modèles à l'échelle d'études locales. Par contre, l'utilisation de modèles sédimentologiques en hydrogéologie régionale est une avenue très intéressante étant donné que l'écoulement régional de l'eau souterraine est contrôlé en majeure partie par les grandes hétérogénéités ou discontinuités régionales et non par les caractéristiques locales (Anderson, 1989). Le développement de tels modèles à l'échelle régionale se fait généralement par une analyse de bassin afin de pouvoir regrouper ultérieurement des lithofaciès locaux et régionaux en faciès hydrogéologiques (Anderson, 1989) ou en unités hydrostratigraphiques (Maxey, 1964; Seaber, 1988). Une unité hydrostratigraphique correspond à une ou plusieurs unités géologiques (lithofaciès) ayant des propriétés hydrauliques similaires (Anderson et Woessner, 1992).

C'est dans cette optique que la compréhension des processus affectant les différents environnements sédimentaires et le mode de mise en place des sédiments est une source d'information significative concernant l'interprétation de l'architecture des sédiments quaternaires. L'élaboration de modèles sédimentologiques s'avère efficace pour comprendre la géométrie des différents aquifères et la variabilité spatiale des propriétés hydrauliques régissant la dynamique des eaux souterraines (Scheibe et Freyberg, 1995). Le contexte géologique et sédimentologique complexe de la région de Saint-Raymond représente un endroit idéal pour valider le recours aux modèles sédimentologiques et pour évaluer l'utilité de la cartographie en trois dimensions pour la caractérisation hydrogéologique régionale.

1.2 Objectifs généraux et spécifiques

Les objectifs généraux de la présente étude s'inscrivent à l'intérieur de ceux définis dans le cadre du projet pilote de cartographie des aquifères du piémont laurentien (Michaud *et al.*, 1999). Ces objectifs sont: 1) de définir des formats de cartes hydrogéologiques, 2) de développer une méthodologie pour la cartographie hydrogéologique régionale des aquifères granulaires, 3) de développer des outils informatiques pour faciliter l'intégration et la gestion des données géoscientifiques et enfin 4) de réaliser une étude pilote en hydrogéologie régionale d'un secteur représentatif du piémont laurentien. La présente étude s'inscrit particulièrement dans ce dernier objectif, lequel constitue en fait la base de toute étude hydrogéologique régionale, c'est-à-dire la définition du contexte géologique.

De façon plus spécifique, deux objectifs ont été fixés afin de définir le contexte géologique de la région de Saint-Raymond. Ces objectifs sont les suivants:

1) **Établir le cadre hydrostratigraphique de la région**. Cet objectif permettra de définir le contexte stratigraphique et de bien connaître la distribution, la puissance et les propriétés hydrauliques des différentes unités quaternaires présentes dans le bassin de Saint-Raymond.

2) **Définir de façon tridimensionnelle l'architecture des différents corps sédimentaires du bassin de Saint-Raymond**. Cette définition mettra en évidence les relations stratigraphiques et hydrogéologiques entre la Moraine de Saint-Narcisse, le complexe deltaïque de la rivière Sainte-Anne et les sédiments de la Mer de Champlain.

1.3 Méthodologie

1.3.1 Cadre hydrostratigraphique

La définition du cadre hydrostratigraphique d'une région demande en premier lieu une bonne connaissance des unités morphosédimentologiques et de leurs variations latérales de faciès en surface. La cartographie de la géologie des formations superficielles de la région effectuée par Cloutier *et al.* (1997) a donc servi de référence pour le cadre géologique tout au long de notre étude (ANNEXE A).

La recherche d'informations de subsurface constitue l'élément primordial dans l'établissement de la stratigraphie d'une région. Un inventaire des données géoscientifiques disponibles, particulièrement des données de forage, a donc été effectué dans le secteur de Saint-Raymond (ANNEXE B). Ces informations ont été compilées dans une base de données développée par la Commission géologique du Canada pour le projet de cartographie hydrogéologique du piémont laurentien (Boisvert et Michaud, 1998). Les informations compilées dans cette base de données proviennent principalement (80%) du système d'information hydrogéologique du ministère de l'Environnement du Québec, qui est majoritairement composé des données provenant des rapports de forage effectués par les puisatiers du Québec. Les autres données de forage proviennent du ministère des Transports du Québec, du ministère des Ressources Naturelles du Québec, d'Hydro-Québec et des divers études et rapports effectués par des firmes de consultants (Fagnan, 1998). De plus, une campagne de levés géophysiques de surface a été entreprise dans la région de Portneuf afin de compléter l'information sur les séquences quaternaires (Michaud *et al.*, 1997). Des profils de géoradar, de polarisation provoquée et des sondages de résistivité électrique ont été effectués dans la région dans le cadre des travaux de Muller (1997) et de Côté (1998) en plus des sondages au piézocône (Tech In Situ inc., 1997).

Afin de recueillir de l'information sur la stratigraphie de la région et de valider les informations existantes, des travaux de terrain ont été réalisés en 1998. A l'été 1998, il y a eu tout d'abord des travaux de reconnaissance dans le secteur d'étude. Lors de ces travaux, les affleurements rocheux ont été répertoriés le long des rivières Sainte-Anne et Bras-du-Nord pour estimer le mieux possible la topographie du roc du bassin de Saint-Raymond. De plus, étant donné l'encaissement de ces rivières dans les dépôts marins silto-argileux (aquitard), une vérification du lien hydraulique entre l'aquifère et la rivière a été effectuée. Des levés de coupes stratigraphiques ont ensuite été réalisés le long des berges de la rivière Sainte-Anne et Bras-du-Nord, le long des fossés et dans des sablières et gravières de la région. Un document photographique montrant quelques coupes stratigraphiques de la région est présenté à l'ANNEXE C. Des échantillons ont été prélevés dans les coupes en vue d'analyses granulométriques et d'essais de perméabilité. Dans le but d'ajouter à notre base de connaissances

hydrogéologiques, les lieux de résurgence de l'eau souterraine ont été notés, des sources captées ont été visitées et des niveaux d'eau ont été mesurés dans des puits de surface et dans des piézomètres.

Durant l'hiver 1998, quatre forages stratigraphiques (FR-98001, FR-98002, FR-98003 et FR-98004) ont été réalisés au voisinage de la Moraine de Saint-Narcisse pour connaître sa composition et son extension en subsurface. Ces forages ont été effectués à l'aide d'une foreuse rotative fonctionnant avec le système ODEX. Des échantillons étaient alors prélevés de façon systématique à tous les 3 mètres (± 10 pieds) ou lors d'un changement marqué de la granulométrie des sédiments.

En ce qui concerne les travaux de laboratoire, des analyses granulométriques ont été effectuées au laboratoire du Centre géoscientifique de Québec par tamisage (sec et/ou humide) pour la fraction supérieure à 63 µm et par granulomètre laser (Fritsch, modèle Analysette 22) pour la fraction fine (< 63 µm). Afin de déterminer la conductivité hydraulique verticale et horizontale des sédiments prodeltaïques, des blocs de sédiments (30 x 30 cm) ont été prélevés dans des coupes de façon à effectuer les tests sur des échantillons non remaniés. Des sous-échantillons ont été découpés de ces blocs et des essais de perméabilité ont été effectués au laboratoire de physique des sols de l'Université Laval sur perméamètre à charge variable (ANNEXE D).

1.3.2 Construction des coupes stratigraphiques

L'intégration de l'ensemble des données géoscientifiques recueillies a été réalisée au moyen de deux séries de coupes stratigraphiques orientées perpendiculairement (ANNEXE E). Le quadrillage utilisé pour l'élaboration de ces coupes est celui des coordonnées UTM (NAD 83, zone 19) de la carte topographique 21 L/13 (Saint-Raymond) à l'échelle du 1:50 000 (voir ANNEXE A). Le quadrillage des coordonnées UTM a été préféré à un quadrillage surimposé étant donné qu'il se présentait, en considérant les axes est-ouest, de façon perpendiculaire aux principaux éléments géomorphologiques du bassin de Saint-Raymond. Les 21 coupes orientées est-ouest et espacées d'un kilomètre ont été élaborées dans un premier temps, ce qui a permis de valider l'essentiel des informations de subsurface disponibles. La réalisation de vingt autres coupes, celles-ci orientées nord-sud, a permis de parfaire la validation des données de subsurface, puis de mailler l'ensemble des coupes de façon à définir le meilleur modèle stratigraphique tridimensionnel possible.

L'exagération verticale a été fixée à 20 fois afin de pouvoir représenter les unités de faible épaisseur. Par contre, les unités ayant une épaisseur inférieure à 1 mètre, telles les unités de till en couverture discontinue (Tv) et de till mince remanié (Tvr), n'ont pas été représentées sur les coupes. Ces unités ont été considérées comme étant des unités de roc. Quant aux unités de

dépôts organiques (O), elles ont été représentées sur les coupes stratigraphiques avec une épaisseur constante de 2.5 mètres.

La conception des différentes coupes a débuté par l'élaboration du profil topographique. Pour ce faire, un outil informatique a été développé dans le cadre du projet afin d'extraire les points de contrôle topographique. Cependant, le profil ne pouvait être tracé de façon automatique à partir de ces points étant donné la topographie particulière du bassin. En effet, l'interpolation des différents points de contrôle ne pouvait tenir compte des séries de terrasses étagées qui caractérisent le bassin de Saint-Raymond et qui jouent un rôle majeur dans l'écoulement des eaux souterraines. Une attention toute particulière a donc été accordée afin de représenter le plus fidèlement possible la topographie du secteur. Ce travail a été fait en partie par photo-interprétation.

Pour l'élaboration des coupes ayant un axe est-ouest (coupes 1 à 21), tous les forages présents à l'intérieur d'un corridor de 500 mètres de part et d'autre du tracé de la coupe ont été considérés. Afin de faciliter leur intégration, le module BoreHole Mapper™ de Northwood Geoscience a été utilisé pour visualiser l'ensemble des données de forage présent dans ce corridor. La qualité des différentes descriptions stratigraphiques contenues dans les rapports de forage est grandement variable étant donné leurs diverses provenances. Ainsi, une sélection des forages a dû être effectuée lors de la construction des coupes stratigraphiques de façon à tenir compte de la qualité de l'information disponible et de leur cohérence apparente. Par exemple, les forages provenant des firmes de consultants ou du ministère des Transports (ex. FIRM_2629, MTQ_459) où de l'échantillonnage en continu est souvent effectué, ont eu préséance sur les sondages provenant des puisatiers (ex. PUI_0420). Dans les secteurs où l'information disponible provenait essentiellement des données de puisatiers, les forages nous apparaissant les plus valides ont été intégrés sur la foi de leur cohérence par rapport aux différents points de contrôle obtenus lors des travaux sur le terrain. C'est sur ce travail d'analyse et d'intégration que repose la qualité du modèle géologique proposé.

Quant aux coupes longitudinales (axe nord-sud), leur élaboration a permis de parfaire la cohérence entre les différentes coupes transversales (est-ouest) et les données de subsurface disponibles. En plus d'assurer le maillage de l'ensemble des coupes, l'élaboration des coupes longitudinales a permis d'augmenter la densité de points de contrôle lors de l'interpolation informatique effectuée par le logiciel GEOSOLID II de façon à circonscrire avec beaucoup plus de précision le volume des unités stratigraphiques (extension est-ouest). Ainsi, la construction des coupes longitudinales s'est effectuée en rapportant la stratigraphie des coupes 1 à 21 aux différentes intersections; c'est ce maillage des coupes qui a permis de finaliser un modèle 3D présentant la meilleure cohérence possible entre les données et les modèles sédimentologiques de référence.

La figure 1.1 résume de façon schématique l'essentiel de la méthodologie employée.

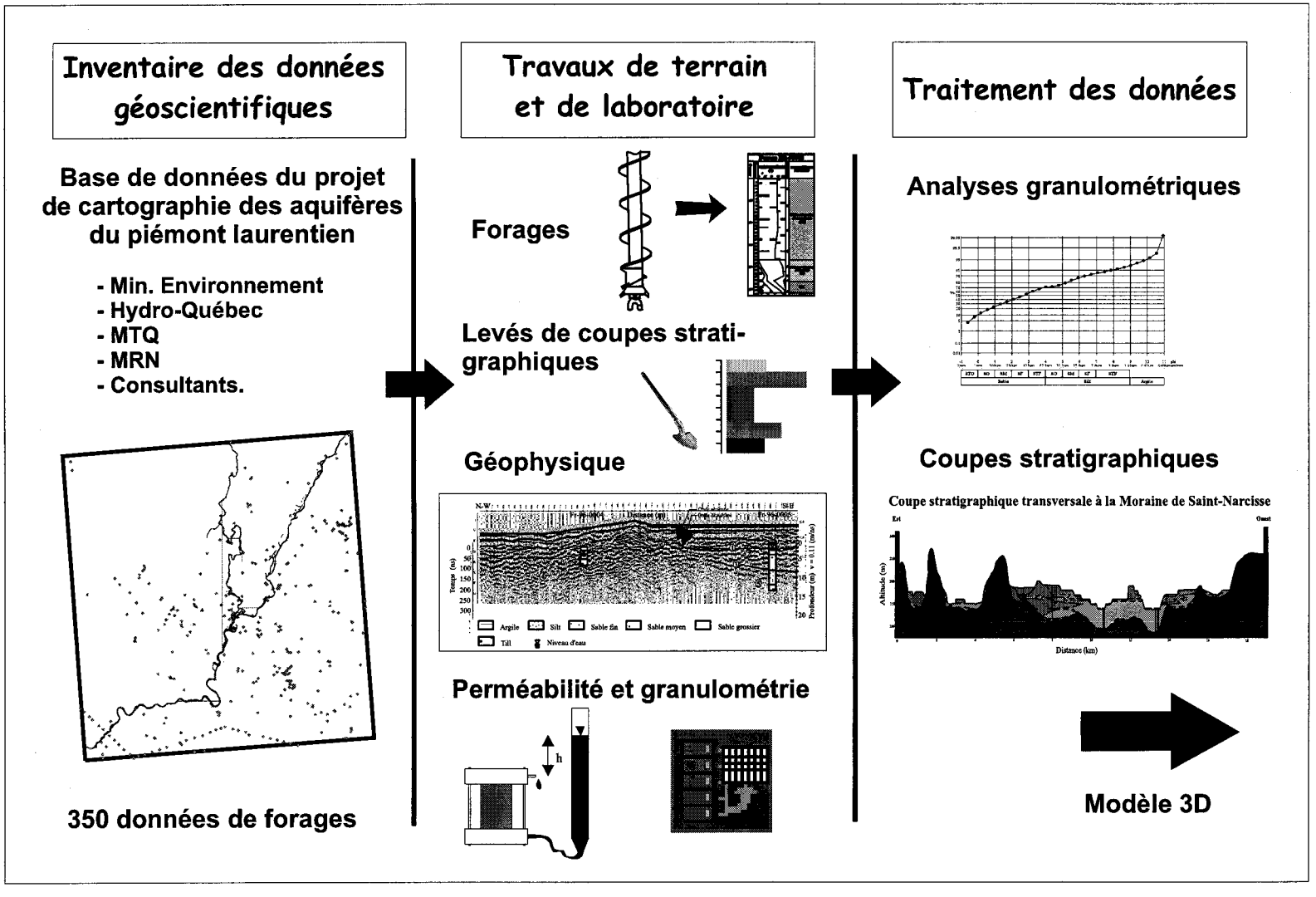


Figure 1.1 – Méthodologie utilisée pour l'établissement du cadre hydrostratigraphique.

1.3.3 Modèle conceptuel tridimensionnel

Afin de produire le bloc tridimensionnel, les 41 coupes stratigraphiques ont été numérisées à l'aide du logiciel Autocad™ (version 12) puis ensuite transférées sur ArcInfo™ pour la construction de la topologie. Le passage du format bidimensionnel (coupes stratigraphiques) au format tridimensionnel a été effectué grâce à des interpolations entre les coupes. Cette opération a été effectuée avec l'algorithme *shape base modelling* du logiciel GEOSOLID II développé par Éric Boisvert dans le cadre du projet de cartographie des aquifères du Piémont laurentien (ANNEXE F). La visualisation des différentes surfaces interpolées s'est faite, de façon préliminaire, à partir du logiciel PovRay™ (version 3.1). Par contre, l'analyse, l'interprétation et la visualisation des surfaces interpolées peuvent être effectuées à partir du logiciel Voxel™, GMS™ ou GoCad™. La figure 1.2 présente les différentes étapes qui ont conduit à la production du modèle tridimensionnel.

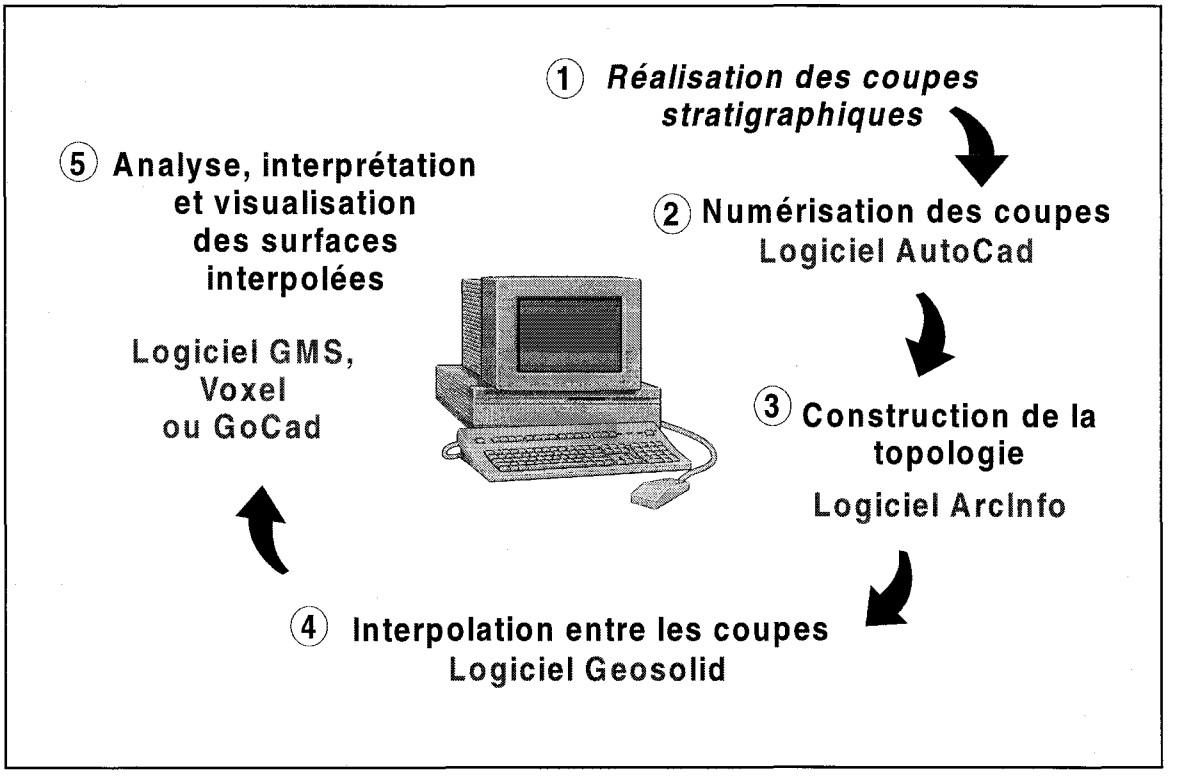


Figure 1.2 – Méthodologie utilisée pour la production du modèle tridimensionnel.

1.4 Contribution de l'auteur et des coauteurs

Ce projet de recherche s'insère à l'intérieur du projet pilote de cartographie des aquifères du piémont laurentien initié par la Commission Géologique du Canada en 1995 et dirigé par Yves Michaud et René Lefebvre du Centre géoscientifique de Québec. La définition tridimensionnelle de l'architecture des unités quaternaires a toujours été l'un des objectifs des membres du projet Portneuf tout en demeurant un défi scientifique intéressant à leurs yeux.

La définition de la problématique et des objectifs de recherche de ce mémoire a été discutée et élaborée avec mon directeur de recherche Michel Parent (CGC-Québec) et mon codirecteur René Lefebvre (INRS-Géoressources). La localisation de la région d'étude a été choisie en fonction des différents environnements sédimentaires que l'on retrouve dans la région de Saint-Raymond. La carte géologique des formations superficielles, réalisée par Marc Cloutier de COGÉO, Michel Parent et Andrée Bolduc de la CGC-Québec, a été sans contredit le document de base de l'étude. L'expérience acquise à titre d'assistant de terrain/géologue lors de la poursuite des travaux de cartographie des formations superficielles dans la région de Trois-Rivières et Shawinigan en 1997 m'a permis de m'initier aux problématiques de la stratigraphie quaternaire en plus de raffiner ma propre problématique de recherche.

Durant l'hiver 1998, une campagne de forage a été réalisée en collaboration avec mon directeur de recherche et Yves Michaud afin de déterminer l'extension de la Moraine de Saint-Narcisse en subsurface. A l'été 1998, j'ai entrepris une campagne de terrain, à laquelle Nathalie Fagnan a participé, afin de relever les différents types de lithofaciès présents dans la région dans le but d'établir leurs relations stratigraphiques. L'encadrement de ces travaux de terrain ainsi que les différentes visites sur le terrain de mon directeur de recherche ont permis de parfaire ma compréhension de la géologie du Quaternaire et d'éclairer mes différents travaux.

J'ai ensuite intégré et synthétisé l'ensemble des données recueillies sur le terrain dans une série de 41 coupes stratigraphiques. Ce travail représente le coeur de l'ensemble de ce mémoire et permet de comprendre l'architecture et le mode de mise en place des différentes unités. Eric Boisvert de la CGC-Québec a été le principal acteur en ce qui concerne les aspects informatiques, notamment en créant le logiciel d'interpolation GEOSOLID II. Enfin, la rédaction de ce présent mémoire et de l'article sont ma réalisation. Par contre, tout ce travail n'aurait été possible sans la supervision, la collaboration et les nombreuses discussions que j'ai eues avec mon directeur et mon codirecteur de recherche qui ont grandement contribué à éclairer mes réflexions.

CHAPITRE 2 - Moraine de Saint-Narcisse

Ce chapitre traitera de l'une des principales constructions sédimentaires quaternaires de la région de Saint-Raymond : la Moraine de Saint-Narcisse. Cette dernière, mise en place au front de l'inlandsis laurentidien dans des conditions subaquatiques et subaériennes, représente probablement la moraine frontale la mieux définie de tout le Québec méridional. Malgré son caractère unique et particulier, cette dernière fait toutefois partie d'une série de moraines frontales (récessionnelles) présentes sur tout le territoire québécois. Depuis les tous premiers travaux de reconnaissance et de cartographie, les connaissances sur la moraine ont considérablement évolué grâce à l'apport de nouvelles évidences de terrain et à l'amélioration des techniques de datation. C'est ainsi que de nouvelles interprétations concernant son mode de formation, sa chronologie ainsi que ses corrélations avec d'autres systèmes morainiques ont pu être postulées par différents auteurs. Une brève revue des principaux ouvrages, permettra d'exposer et de clarifier les connaissances accumulées jusqu'à ce jour concernant la Moraine de Saint-Narcisse. La description et l'interprétation de la Moraine de Saint-Narcisse dans le secteur de la présente région d'étude seront présentées au chapitre 3.

2.1 Reconnaissance et cartographie

La cartographie du complexe morainique de Saint-Narcisse tel qu'on le connaît aujourd'hui s'est déroulée sur une période d'environ 45 ans, soit jusqu'au milieu des années 1970. Bien que la première mention de la présence d'une moraine frontale sur la marge nord des mers de Champlain et de Goldthwait, ait été effectuée près de Saint-Urbain dans la région de Charlevoix (Mawdsley, 1927), la portion centrale de la vallée du Saint-Laurent a fait l'objet des premiers travaux (Mawdsley, 1927; Faessler, 1948; Gadd, 1955). Les études se sont ensuite étendues vers l'ouest, au nord de Montréal, et enfin, vers l'est entre Québec et la rivière Saguenay.

2.1.1 Portion centrale de la vallée du Saint-Laurent

Faessler (1948) semble être le premier à signaler la présence d'une moraine frontale dans la vallée de la rivière Bras-du-Nord, située au nord de Saint-Raymond dans l'actuel territoire à l'étude. L'appellation formelle de Moraine de Saint-Narcisse a quant à elle été établie par Osborne (1951) afin de décrire l'extension nord-est d'une crête d'origine glaciaire située entre Notre-Dame-du-Mont-Carmel et le village de Saint-Narcisse au nord-est de Trois-Rivières. L'interprétation faite à l'époque par Osborne (1951) semble évoquer que l'édification de cette crête s'est effectuée par des glaces (langue glaciaire dans la vallée du Saint-Laurent) venant du sud étant donné le pendage des sédiments grossiers vers le nord-ouest.

Les principaux travaux de cartographie effectués dans cette région sont ceux de Karrow (1957) et Gadd et Karrow (1959). À cette époque, rappelons que la Moraine de Saint-Narcisse se définissait comme étant une crête discontinue observable de Saint-Paulin à Saint-Léonard en passant par Saint-Narcisse. Karrow (1957) suggère par contre une possible extension de la moraine dans les régions de Lachute-Saint-Jérome et Joliette et souligne l'allure rectiligne de la moraine dans les régions à faible relief et son caractère lobé près des Laurentides où des langues de glace pouvaient sortir des vallées. Pour sa part, Gadd (1955, 1971) observe sur le terrain et à l'aide de cartes topographiques une extension de la Moraine de Saint-Narcisse vers le sud-ouest.

Occhietti (1972, 1976, 1977, 1980) cartographie la région de Trois-Rivières-Shawinigan tout en effectuant une synthèse paléogéographique de la vallée moyenne du Saint-laurent et de ses corrélations stratigraphique. Enfin, notons les récents travaux de cartographie des formations superficielles à l'échelle du 1:100 000 par Cloutier *et al.* (1997) dans la région de Portneuf. Plus à l'ouest, faisant suite à cette carte, Bolduc (1992, 1999 a,b) a cartographié, à l'échelle du 1:50 000, les feuillets de Trois-Rivières (31 I/ 07-08) et de Shawinigan (31 I/10) où la Moraine de Saint-Narcisse se présente sous une forme presque continue.

2.1.2 Nord de Montréal

Au nord de Montréal, dans la région comprise entre Saint-Gabriel-de-Brandon et le Lac Simon en Outaouais, une première série de travaux de cartographie de la Moraine de Saint-Narcisse a été effectuée par Laverdière et Courtemanche (1959, 1960), Elson (1962), Parry (1963) et Parry et Macpherson (1964). Différents travaux à échelle plus locale ont ensuite permis de mieux définir le tracé de la moraine pour certains secteurs (Denis et Prichonnet, 1973; Denis, 1974; Lamothe, 1977; Pagé, 1977).

Dans cette première série de travaux cartographiques, Laverdière et Courtmenache (1960) décrivent le complexe glaciaire de Saint-Faustin-Sommet qu'ils interprètent comme une moraine de progression. Cette description sera par contre révisée par Lamothe (1977) signalant que le "drift" décrit par ces auteurs n'appartient pas à un cordon morainique mais représente plutôt des dépôts glacio-lacustres. Pour sa part, Elson (1962), dans le cadre d'un rapport géologique, décrit l'extension de la Moraine de Saint-Narcisse de Charette à Saint-Jovite dans les Laurentides alors que Parry (1963) cartographie la Moraine de Saint-Narcisse sur plus de 100 kilomètres. L'année suivante, Parry et Macpherson (1964) délimitent, avec l'aide de couplets stéréoscopiques, diverses sections du complexe morainique se trouvant dans les Laurentides entre le Lac Simon en Outaouais et Charrette en Mauricie. Ces auteurs reconnaissent différentes crêtes morainiques secondaires dans plusieurs vallées avec des plaines d'épandage associées.

2.1.3 Nord-est de Québec (Parc des Laurentides)

La cartographie de la Moraine de Saint-Narcisse au nord-est de la ville de Québec se fait premièrement dans la région de Charlevoix par Mawdsley (1927) et par Rondot (1966, 1969). Ce dernier reconnaît premièrement quelques crêtes morainiques au nord de La Malbaie puis un ensemble de crêtes parallèles qui pourrait, à certains endroits, représenter le recul annuel du front glaciaire dans la région du Lac Sainte-Agnès. Une corrélation des ces moraines avec celle de Saint-Narcisse est suggérée par Lasalle et Rondot (1967) et une description plus détaillée de ce complexe morainique est faite par Rondot (1974).

La cartographie du front morainique se poursuit lors des travaux de cartographie morpho-sédimentologique dans la région de Charlevoix (Baie-Saint-Paul) par Dionne *et al.* (1968). Les auteurs signalent la présence de plusieurs ensembles morainiques discontinus qu'ils associent à des moraines frontales et où le principal front morainique semble être le prolongement vers l'est de la moraine d'Adrien-Robert (Laverdière et Courtemanche, 1959, 1960). Plus près de la ville de Québec, Lasalle (1970) interprète la moraine du Lac Saint-Charles comme étant une partie du système morainique de Saint-Narcisse. À cet endroit, la position stratigraphique des sédiments morainiques suggère que la moraine du Lac Saint-Charles ait été édifiée avant que la Mer de Champlain n'atteigne son plus haut niveau.

L'article publié en 1972 par Lasalle, Hardy et Poulin se veut un travail de synthèse des travaux de Mawdsley (1927), de Rondot (1966, 1969) et de Dionne *et al.* (1968). Cet article démontre la continuité de la Moraine de Saint-Narcisse de Saint-Léonard, situé dans la région de Portneuf, jusqu'à Saint-Siméon près du Saguenay, tout en décrivant les principaux dépôts qui y sont associés. Ce tracé précise que la moraine du Lac Saint-Charles, décrite ultérieurement par Lasalle (1970), ne peut être reliée au système Saint-Narcisse, puisqu'on présume qu'il représente un événement plus vieux.

En réponse à l'article de Wright (1971) qui évoque l'absence de formes glaciaires associées au stade Valders sur la marge nord de la vallée du Saint-Laurent, Lasalle et Elson (1975) exposent, par la revue des travaux effectués, le tracé de la Moraine de Saint-Narcisse long de 320 kilomètres reliant le Lac Simon en Outaouais à la région de Saint-Siméon au Saguenay (Figure 2.1).

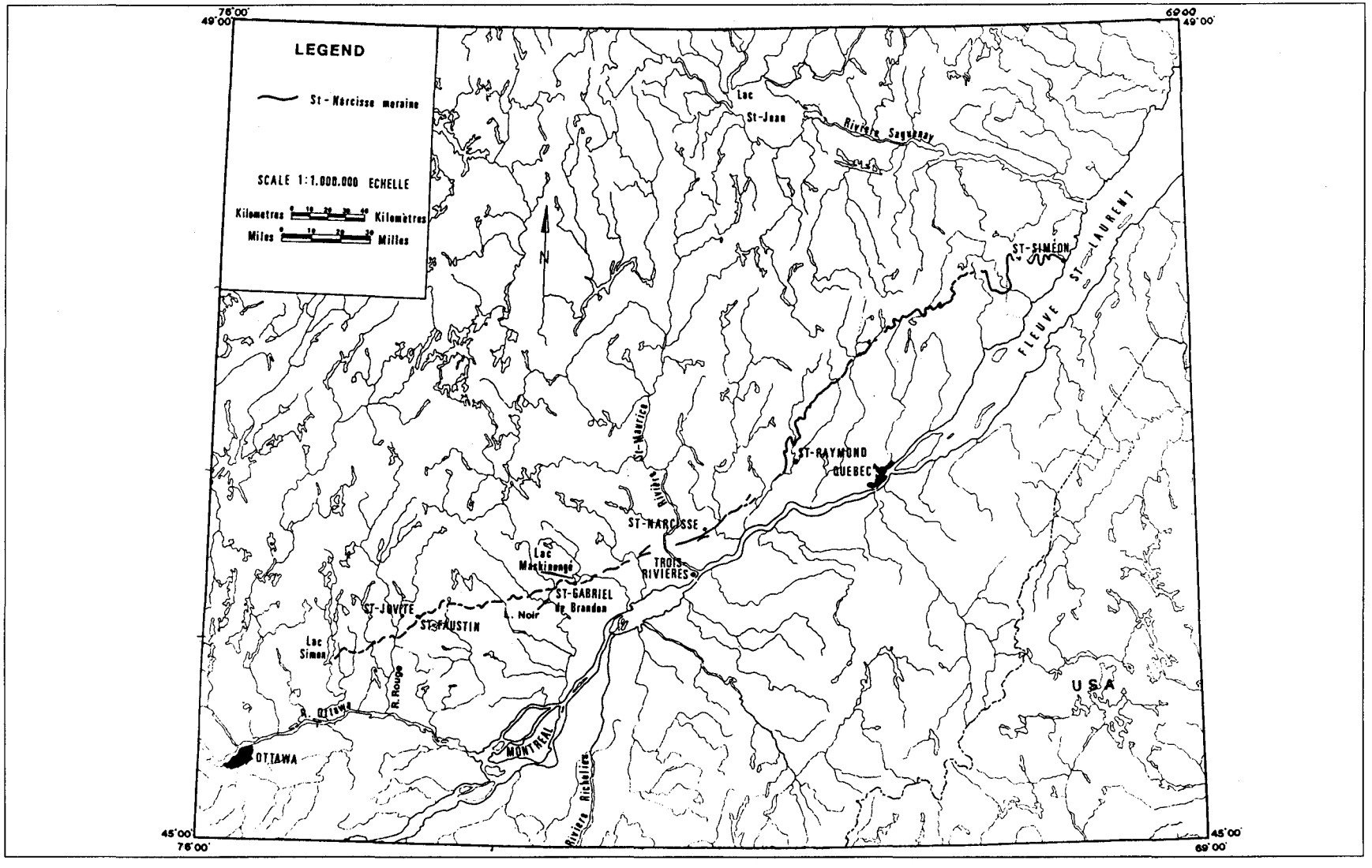


Figure 2.1 – Le tracé de la Moraine de Saint-Narcisse du Lac Simon, en Outaouais, jusqu'à Saint-Siméon au Saguenay (d'après Lasalle et Elson, 1975).

Enfin, notons que l'actuel tracé de la Moraine de Saint-Narcisse peut maintenant être suivi au-delà de l'embouchure du Saguenay grâce aux récents travaux de Dionne et Occhietti (1996) qui mettent en évidence trois arcs morainiques successifs à l'embouchure du Saguenay ainsi que des lits diamictiques intercalés dans une séquence silto-argileuse surmontant des argiles marines. Ces sédiments glaciaires auraient été mis en place entre 11 ka et 10.4 ka B.P. par une réavancée du front glaciaire sous forme de glace flottante.

2.2 Lithostratigraphie et mise en place

Les différents travaux de cartographie cités précédemment ont permis de décrire la morphologie de la moraine ainsi que la stratigraphie du complexe morainique de Saint-Narcisse donnant ainsi lieu à l'élaboration de certaines hypothèses concernant son mode de mise en place. Les preuves stratigraphiques (Béland, 1953; Gadd et Karrow, 1959; Dufour, 1969; Ochietti 1972, 1980; Denis, 1974) et glaciotectoniques (Karrow, 1957; Denis et Prichonnet, 1973; Prichonnet, 1977; Pagé, 1977) d'une oscillation (Gadd, 1971; Gadd *et al.*, 1972; Pagé, 1977; Prichonnet, 1977) ou d'une réavancée (Karrow, 1957; Occhietti, 1972; Denis, 1974; Lasalle et Elson, 1975) de la marge glaciaire sont nombreuses dans la littérature de même que la terminologie employée pour décrire la Moraine de Saint-Narcisse : moraine de progression (Laverdière et Courtemanche, 1960), « lodge or dump moraine » (Parry, 1963), moraine de poussée (Occhietti, 1972; Pagé, 1977), « ice-thrust moraine » (Denis, 1974), moraine de récession (Lamothe, 1977), moraine de ré-équilibration (Hillaire-Marcel et Occhietti, 1980) et moraine de cisaillement (Occhietti, 1980).

Cette diversité de termes utilisés au cours des années pour décrire la Moraine de Saint-Narcisse peut être interprétée de différentes façons. Malgré une synchronicité probable des différents segments morainiques, bien qu'elle ne soit toujours pas démontrée (Occhietti, 1980), la Moraine de Saint-Narcisse, de part sa construction en conditions subaériennes et subaquatiques, ne peut probablement pas être interprétée de la même façon sur l'ensemble de son tracé. On peut également penser que la grande variabilité dans la nomenclature utilisée reflète simplement une certaine difficulté dans l'interprétation de sa genèse.

Bien que plusieurs travaux aient contribué à l'avancement des connaissances sur la lithostratigraphie de la Moraine de Saint-Narcisse, les travaux effectués par Denis (1972, 1974, 1976) et Denis et Prichonnet (1973) dans la région du Lac Maskinongé (Saint-Gabriel-de-Brandon) ainsi que ceux d'Occhietti (1972, 1976, 1977, 1980) en Mauricie représentent, sans contredit, les travaux les plus approfondis concernant la stratigraphie de la Moraine de Saint-Narcisse depuis son introduction dans la littérature.

L'une des contributions significatives des travaux de Denis (1972, 1974, 1976) et Denis et Prichonnet (1973) concernant la lithostratigraphie a été la réalisation d'une coupe géologique transversale à la Moraine de Saint-Narcisse située à Saint-Gabriel-de-Brandon et réalisée à partir de données de forage et de levés géophysiques (diagraphie électrique) (Grenier et Denis, 1974) (Figure 2.2). Cette coupe démontre que la Moraine de Saint-Narcisse fut mise en place sur des sédiments de la Mer de Champlain, au front de l'inlandsis, lors d'une récurrence glaciaire. Sur cette figure, le forage 4922024 est particulièrement intéressant puisque l'on rencontre à la base une séquence de cinq unités de diamicton (till de fond) de puissance variable séparées par autant d'unités de sédiments silto-argileux. L'épaisseur totale de cet ensemble est de 72 mètres. Denis (1974) interprète ces séquences de till comme étant des dépôts morainiques largués dans la mer lors des oscillations de la ligne de contact glacio-marine soit par le front glaciaire, soit par des plates-formes flottantes ou par des icebergs détachés de l'inlandsis par vêlage. Il note de plus que l'influence de la topographie du socle rocheux semble avoir été un élément important dans la localisation de la moraine terminale.

L'interprétation proposée par Denis (1974, 1976) quant à la mise en place des sédiments et à leurs relations latérales, telles qu'elles y figurent à la figure 2.2, laisse place à plusieurs interrogations. Entre autres, l'alternance d'unités diamictiques et de sédiments fins retrouvées à la base du forage 4922024 et associées à l'épisode Saint-Narcisse, se retrouvent sous des dépôts interprétés comme étant des sédiments marins de pré-récurrence glaciaire ? Ce même ensemble, est mis en corrélation avec le till de fond régional ? Quoi qu'il en soit, les travaux de Denis (1974) exposent de façon très claire la complexité du complexe morainique de Saint-Narcisse en plus de démontrer la récurrence glaciaire associée à l'épisode de Saint-Narcisse.

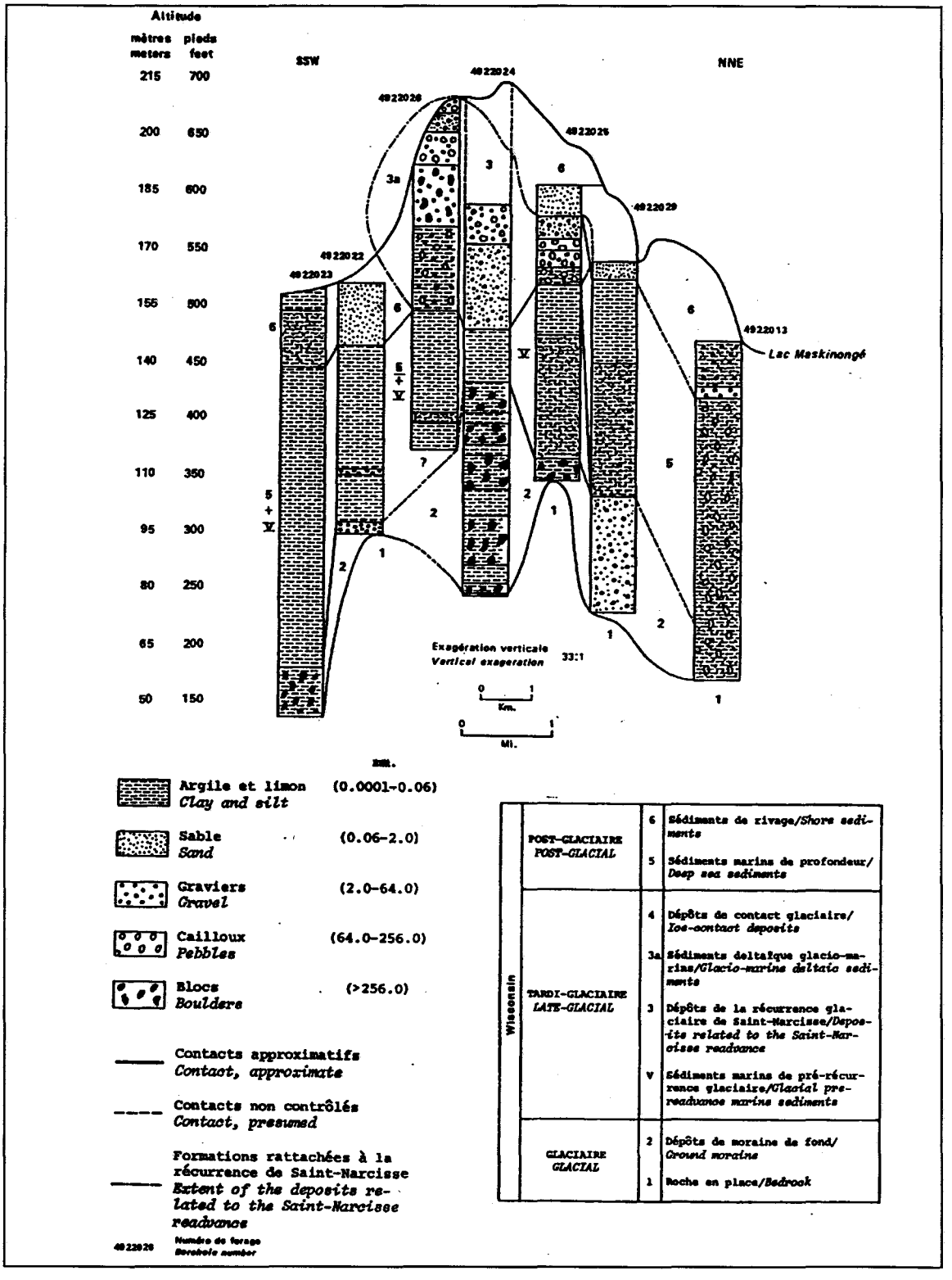


Figure 2.2 - Coupe stratigraphique transversale à la Moraine de Saint-Narcisse dans la région de Saint-Gabriel-de-Brandon (d'après Denis, 1974).

Dans la même région mais légèrement plus à l'ouest, les travaux de Pagé (1977) ont montré qu'au passage des vallées, la moraine se présente sous la forme de 5 ou 6 crêtes secondaires situées à l'intérieur d'un bourrelet majeur et que dans les dépressions, comme celle du Lac Noir, l'édification de la moraine s'est effectuée dans des conditions subaquatiques. Lors de la récurrence glaciaire, la glace a repris des sédiments marins en les déformant en même temps que les sédiments fluvioglaciaires proximaux sus-jacents (Figure 2.3). Ces structures de déformations témoignent, selon Prichonnet (1977) et Pagé (1977) d'une fluctuation mineure du front de l'inlandsis, ce qui caractérise bel et bien une moraine de poussée (Occhietti, 1972, 1973) et n'ayant pas les caractéristiques et l'importance d'une moraine de cisaillement.

Cette complexité stratigraphique est aussi retrouvée dans la région de Trois-Rivières-Shawinigan où Occhietti (1974, 1976, 1977, 1980) présente sans aucun doute l'étude la plus détaillée et la plus approfondie sur la Moraine de Saint-Narcisse. La morphologie, la lithologie, la lithostratigraphie, la chronologie et la paléogéographie de la moraine y sont traitées. Dans cette région, la Moraine de Saint-Narcisse est localisée le long du premier contrefort des Laurentides, au contact structural entre le Bouclier et la plate-forme du Saint-Laurent. Elle s'étend sur une longueur de 120 kilomètres entre Saint-Paulin à l'ouest et Saint-Raymond à l'est, chevauchant ainsi en partie la présente région d'étude.

La lithologie des différentes unités composant le complexe morainique a été définie par plusieurs levés de coupes stratigraphiques. Le complexe morainique est composé de 5 types de dépôts : 1) les dépôts glacio-marins, 2) le till à structure en écailles, 3) les dépôts de contact glaciaire, 4) le till délavé et 5) les dépôts glacio-deltaïques et de remaniement. Du point de vue lithostratigraphique, deux unités composent le complexe morainique: le Diamicton de Yamachiche et les Dépôts de Saint-Narcisse. Le Diamicton de Yamachiche est décrit comme étant une unité lithostratigraphique ayant un faciès mixte compris entre le Till de Gentilly, les Dépôts Saint-Narcisse et les argiles de la Mer de Champlain (Occhietti, 1980). La structure des ces dépôts est massive et de caractère distal à certains sites, ou encore proximal et partiellement stratifiée comme au stratotype situé à l'ouest de Saint-Étienne-des-Grès.

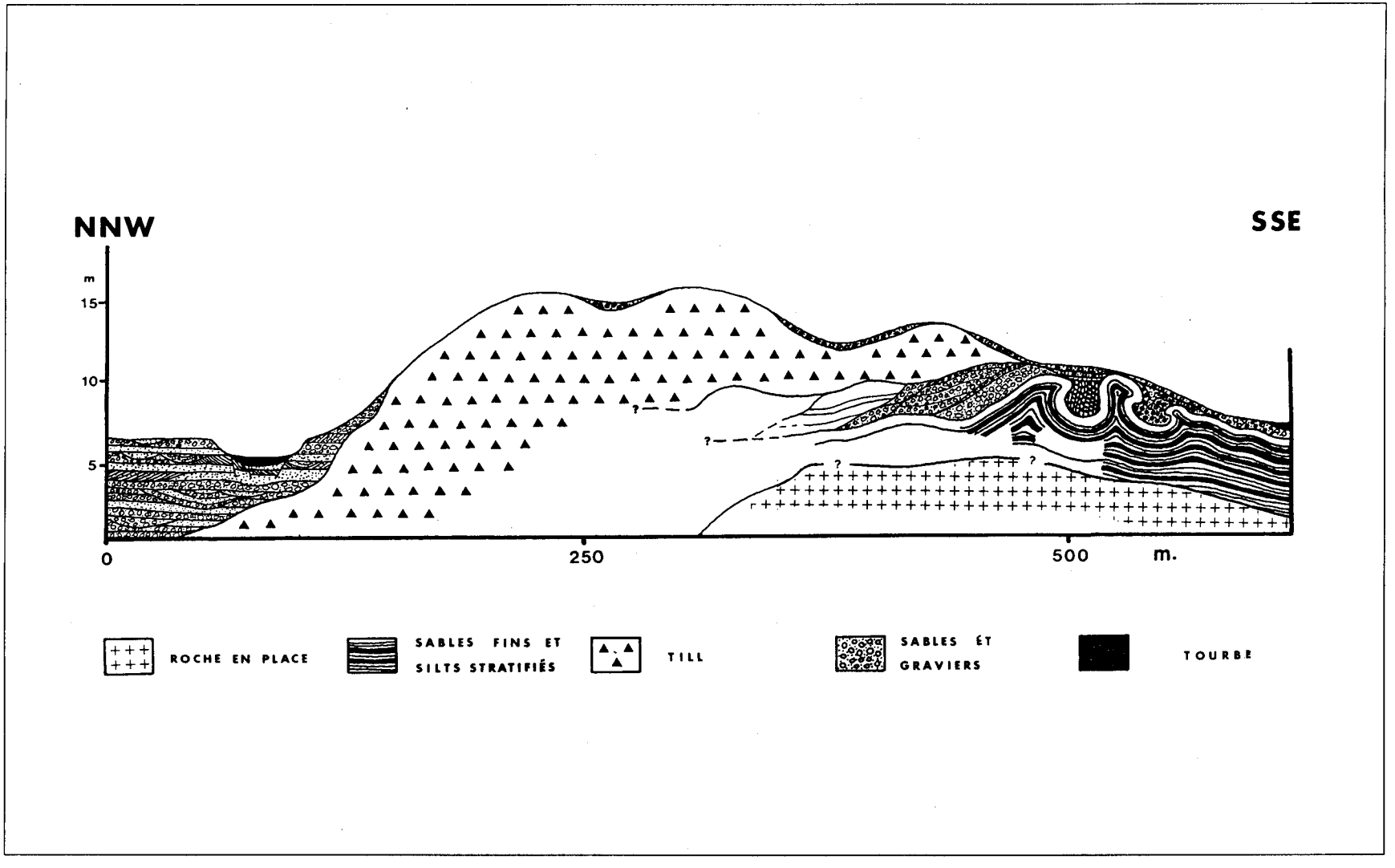


Figure 2.3 – Coupe stratigraphique transversale à la Moraine de Saint-Narcisse dans la région de Sainte-Émilie-de-l'Énergie (d'après Pagé, 1977).

Le Diamicton de Yamachiche est faiblement fossilifère, contenant communément des coquilles de *Portlandia arctica*. Il repose habituellement sur le substratum rocheux et est surmonté par du till, des épandages proglaciaires, des Dépôts de Saint-Narcisse ou est recouvert par des sédiments fins de la Mer de Champlain. Cette unité correspond à un écoulement en extension de la glace qui persiste au moins deux siècles (11.3 ka - 11.1 ka B.P.). Elle marque la fin du Stade de Trois-Rivières tel que défini par Occhietti (1980) et précède l'épisode de Saint-Narcisse. Les Dépôts de Saint-Narcisse sont constitués essentiellement des cinq types de dépôts énumérés précédemment en excluant bien entendu les dépôts glaciomarins. Ils reposent sur le roc, sur le Diamicton de Yamachiche ou sur les argiles marines tel que rapporté par d'autres auteurs (Gadd, 1971; Denis, 1974) et sont recouverts partiellement par les sédiments fins de la Mer de Champlain. Les Dépôts de Saint-Narcisse indiquent une réactivation de la glace avec un écoulement en compression. Ils forment une unité du Groupe du Till des Laurentides et représentent une variété latérale de la Formation de Matawin marquant ainsi la limite sud de cette formation (Figure 2.4).

Hillaire-Marcel et Occhietti (1980) avancent le concept de moraine de ré-équilibration pour expliquer le mode de mise en place de la Moraine de Saint-Narcisse. Selon eux, la dimension moyenne de la crête morainique implique une période relativement courte de réactivation de la glace. Ce système peut être le résultat partiel d'une réponse de la marge sud de l'inlandsis laurentidien dû à une ré-équilibration du profil glaciaire suite à un fort vêlage dans les mers de Champlain et de Goldthwait.

Le concept de ré-équilibration peut être brièvement expliqué en stipulant premièrement qu'un glacier actif conserve son profil d'équilibre lors de la récession. Un vêlage rapide dans une mer ou un lac glaciaire provoque un rapide recul du front glaciaire et donc, une position du front en retrait par rapport à la position théorique d'une récession qualifiée de « normale ». L'anomalie volumétrique engendrée provoque donc une restauration des conditions glaciaires. Pendant ce temps, une stabilisation du front glaciaire à la marge du vêlage se produit ainsi que de courtes réavancées avant de retrouver un profil d'équilibre et un taux de retrait régulier (Figure 2.5).

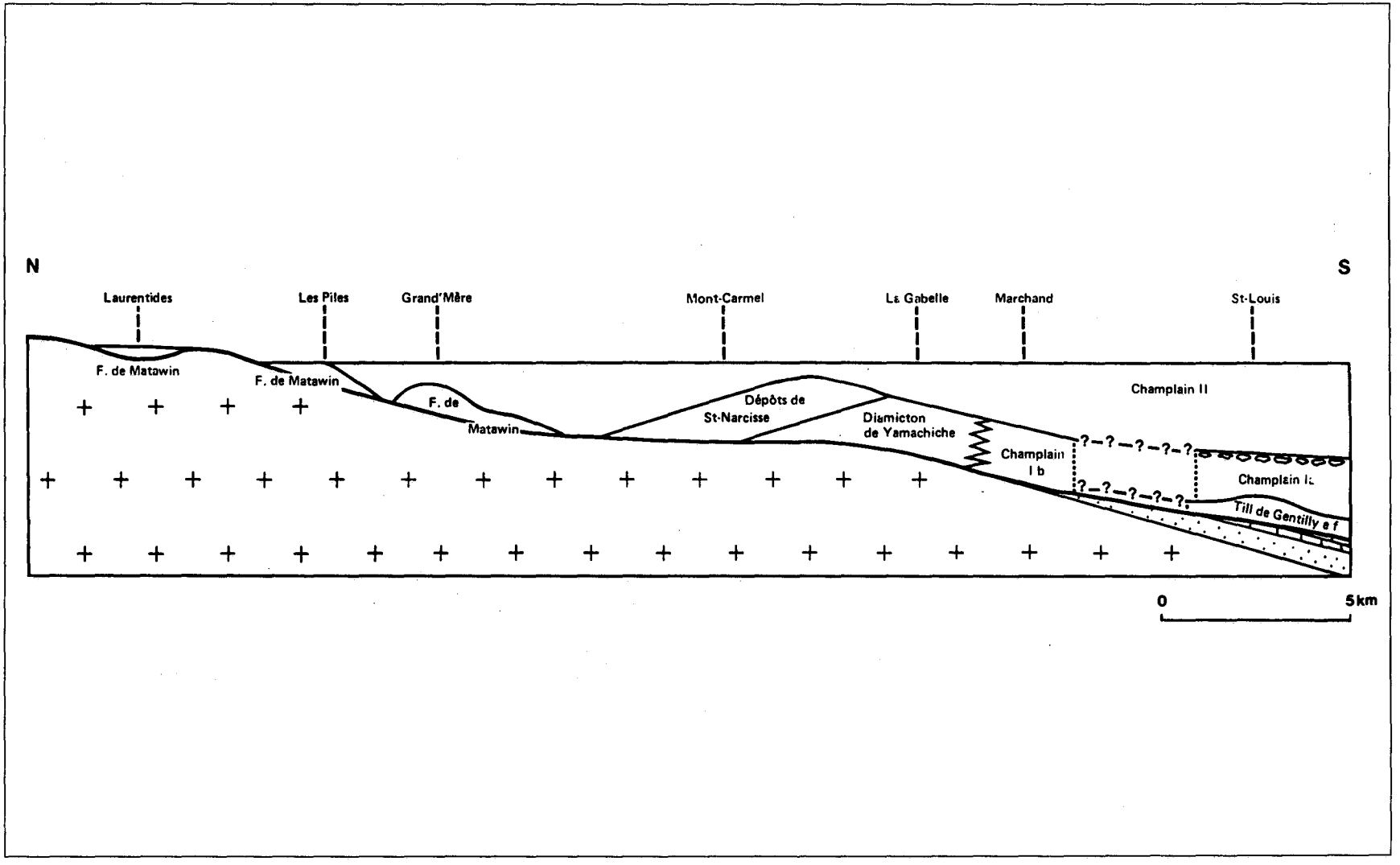


Figure 2.4 – Relations stratigraphiques du complexe morainique de Saint-Narcisse (d'après Occhietti, 1980).

Hillaire-Marcel et Occhietti (1980) prône donc ce concept pour expliquer les courtes réavancées glaciaires rapportées jusqu'à présent. Ils excluent donc une cause climatique telle qu'avancée par Lasalle (1966) et appuyés par d'autres (Denis et Prichonnet, 1973; Denis, 1974; Lasalle et Elson, 1975) faute de preuves satisfaisantes. Lasalle (1984) démontre par contre un certain scepticisme face à ce concept étant donné que seul un court segment de la Moraine de Saint-Narcisse entre Saint-Raymond et Saint-Gabriel-de-Brandon et un segment dans le vallée de la rivière Malbaie a été construit en contact avec la mer. Enfin, Bolduc *et al.* (1997) rejettent ce concept de ré-équilibration affirmant que la mise en place de la Moraine de Saint-Narcisse s'est effectuée durant un épisode froid où la sédimentation proglaciaire et la production d'eau de fonte étaient faibles.

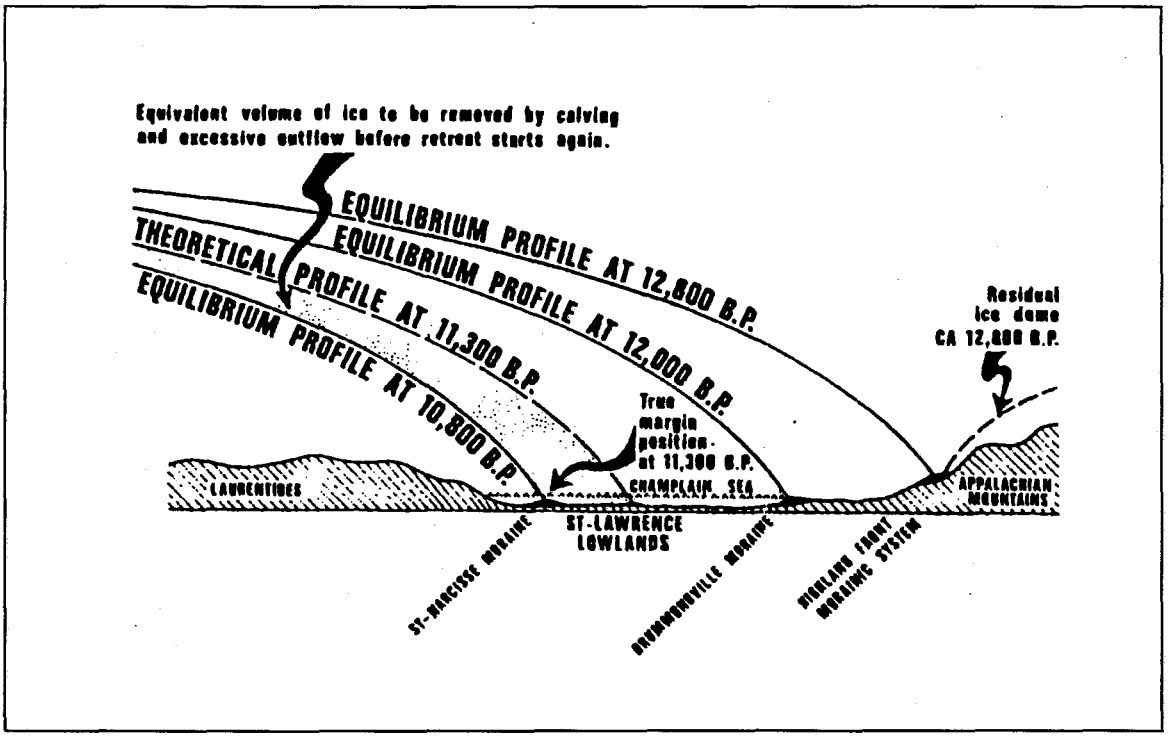


Figure 2.5 - Le concept de moraine de ré-équilibration expliquant la mise en place de la Moraine de Saint-Narcisse (d'après Hillaire-Marcel et Occhietti, 1980).

2.3 Datations et corrélations

Les datations reliées au système morainique de Saint-Narcisse et en particulier les corrélations avec les événements glaciaires de la région des Grands-Lacs semblent toujours avoir été une préoccupation importante dans la littérature concernant la Moraine de Saint-Narcisse. Une revue assez exhaustive est faite en ce sens par Lamothe (1977) et Pagé (1977).

Rappelons simplement que Terasmae (1959) suggère de corréler la Moraine de Saint-Narcisse avec le stade Valders défini dans le bassin du Lac Michigan (Figure 2.6). Cette corrélation semble être acceptée à l'époque par plusieurs auteurs (Parry, 1963; Parry et MacPherson, 1964; Lasalle, 1966; Occhietti, 1972; Denis, 1974; Lasalle et Elson, 1975) et sert de référence pendant plusieurs années. Cependant, cette corrélation au Stade Valders est particulièrement révisée suite aux travaux de Evenson *et al.* (1977) mentionnant que la réavancée Valders était d'une amplitude beaucoup plus faible à ce que l'on croyait auparavant.

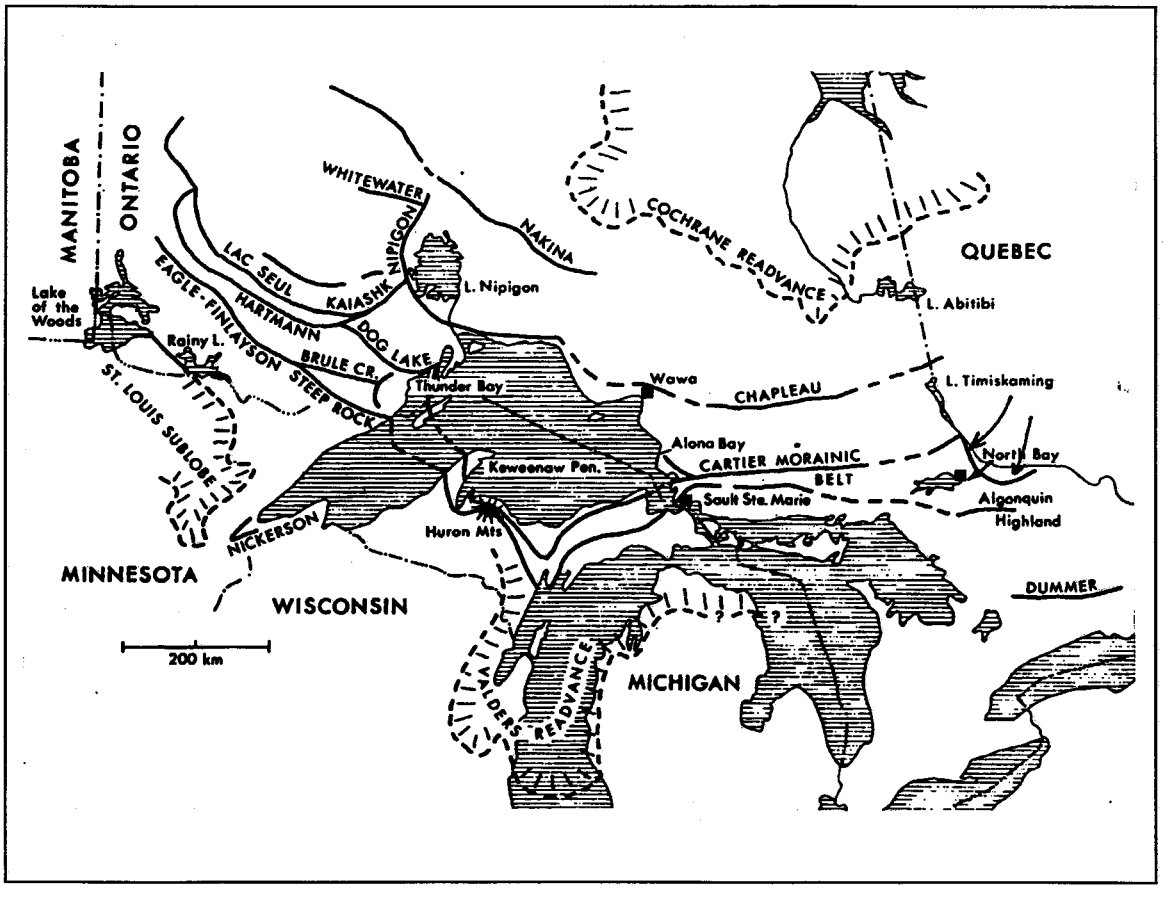


Figure 2.6 - Le Stade de Valders dans le bassin du Lac Michigan (d'après Saarnisto, 1974).

Ce sont les travaux de Saarnisto (1974) et de Dreimanis (1977) dans la région des Grands-Lacs qui mènent à de nouvelles corrélations. Le Stade Algonquin, introduit par Saarnisto (1974) représente une période froide qui semble être mise en évidence dans la vallée du Saint-Laurent par Lasalle (1966) et Terasmae et Lasalle (1968) à partir d'un diagramme pollinique d'une tourbière au Mont Saint-Hilaire montrant un refroidissement climatique entre 10 800 et 10 400 ans B.P. Ces dates suggèrent, selon Lasalle (1966), que l'épisode Saint-Narcisse est contemporain de l'épisode du Dryas Récent, reconnu alors en Europe. Sur la base des datations obtenues par Gadd *et al.* (1972) et Occhietti (1976), Dreimanis (1977) propose donc une corrélation avec le Stade Algonquin et rejette la corrélation avec l'épisode Valders si souvent suggérée auparavant (Figure 2.7).

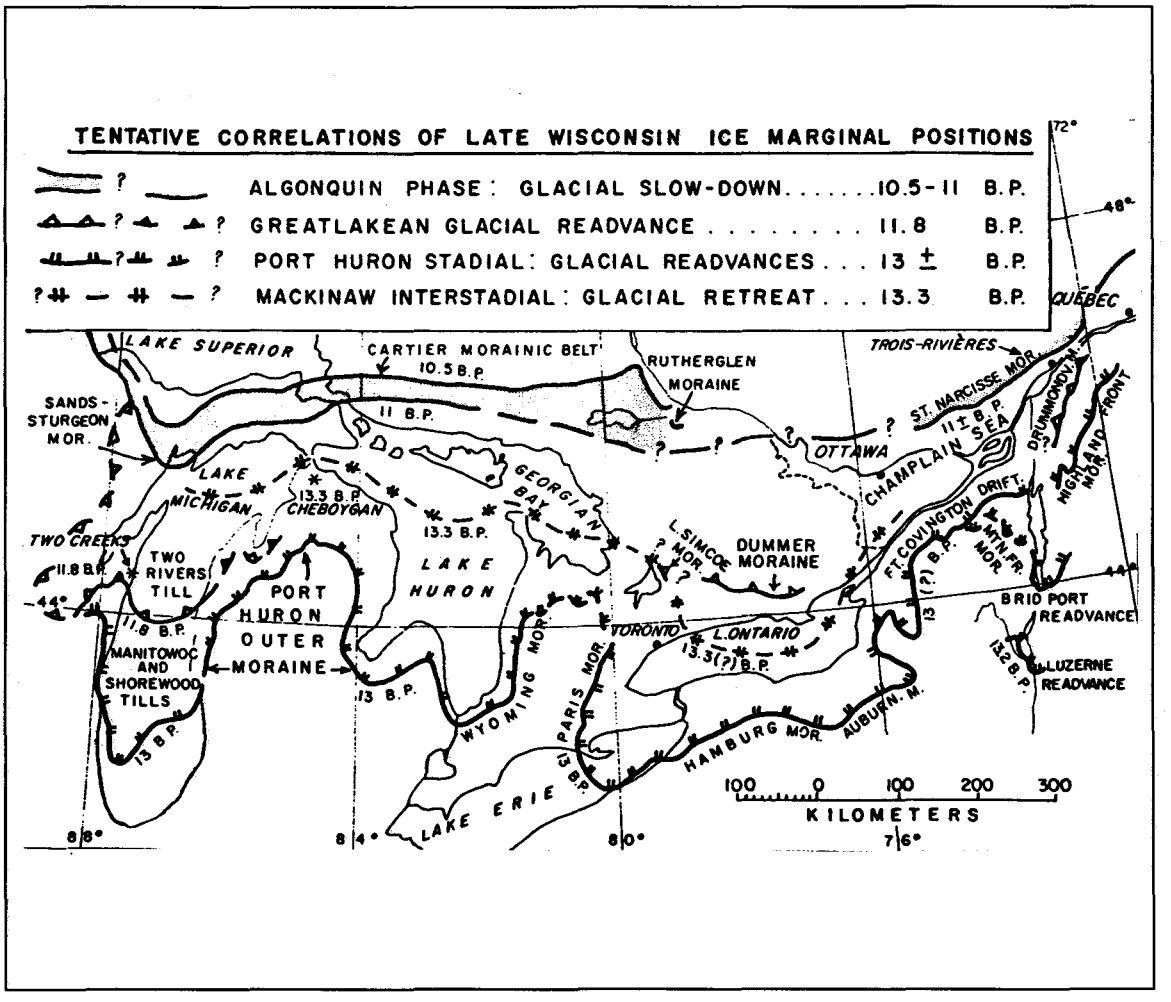


Figure 2.7- Essai de corrélation entre les positions marginales des glaces au Wisconsinien supérieur (d'après Dreimanis, 1977).

L'ensemble des corrélations discutées antérieurement est supporté en partie par des datations au radiocarbone (^{14}C) (Lasalle et Rondot, 1967; Gadd, 1971; Gadd *et al.,* 1972; Lasalle *et al.*, 1972; Lasalle et Elson, 1975; Occhietti, 1976, 1980; Lasalle et Shilts, 1993). Lasalle et Elson (1975) estiment que l'âge de la Moraine de Saint-Narcisse devrait se situer dans l'intervalle de temps compris entre 10 600 et 11 600 ans B.P. grâce à une datation de 10 250 ± 350 ans B.P. (Gif.-324) près de la limite marine des Basses-Terres du Lac Saint-Jean et d'une autre de 11 600 ± 160 ans B.P. (GSC-1235) localisée au sud Québec. Cet intervalle de temps est en accord avec la corrélation de la période froide du Dryas récent suggérée par Lasalle (1966) et Terasmae et Lasalle (1968).

Ce sont les travaux d'Occhietti (1980) en Mauricie qui réussissent à préciser l'âge de la Moraine de Saint-Narcisse. Les deux unités lithostratigraphiques signalées par Occhietti (1980) peuvent être situées dans le temps grâce à 9 dates radiocarbones (Figure 2.8). Cette figure montre qu'un épisode glaciomarin (Diamicton de Yamachiche), qui pourrait être associé à une récurrence de la glace dans l'embaiement de Shawinigan, est daté entre 11 600 ± 630 et 11 100 ± 90 ans B.P. et que l'épisode Saint-Narcisse proprement dit aurait eu lieu entre 10 910 ± 160 et 10 600 ± 160 ans B.P. Occhietti conclut donc que l'on peut estimer que le front glaciaire a stagné ou fluctué sur place pendant plusieurs siècles entre 11 300 et 10 600 et que l'épisode Saint-Narcisse peut être daté entre 11 200 et 10 800 ans B.P.

Occhietti (1980) considère donc que : « *la réactivation de la glace de l'épisode de Saint-Narcisse est une réponse globale à la tendance au refroidissement du Dryas III qui succède au réchauffement mondial du millénaire précédent* ». Cette association avec la période du Dryas Récent semble être de plus en plus évidente et acceptée dans la communauté scientifique. Par contre, il est intéressant de noter que les séquences palynologiques analysées dans le sud du Québec (Terasmae, 1959; Richard, 1973, 1977; Mott, 1977; Poulin, 1977; Savoie et Richard, 1979) et dans la région des Grand-Lacs (Saarnisto, 1974) jusqu'à tout récemment, n'ont pas montré de phases de refroidissement marquées associées à l'épisode Saint-Narcisse. Seuls les travaux de Lasalle (1966) décèlent, dans le diagramme pollinique du Mont Saint-Hilaire, une oscillation climatique corrélée à la mise en place de la moraine. Par contre, au même moment, en Europe de l'ouest, les diagrammes polliniques montrent très bien l'inversion climatique marquant le changement entre la période tempérée du Bolling/Allerod (12 000-11 000 ans B.P.) et la période froide du Younger Dryas (11 000-10 000 ans B.P.) (Saarnisto, 1974). Selon Savoie et Richard (1979), la présumée oscillation climatique reliée à l'épisode Saint-Narcisse aurait été suffisamment importante pour être enregistrée dans les formes de terrain mais trop courte ou de trop faible intensité pour avoir transformée la végétation.

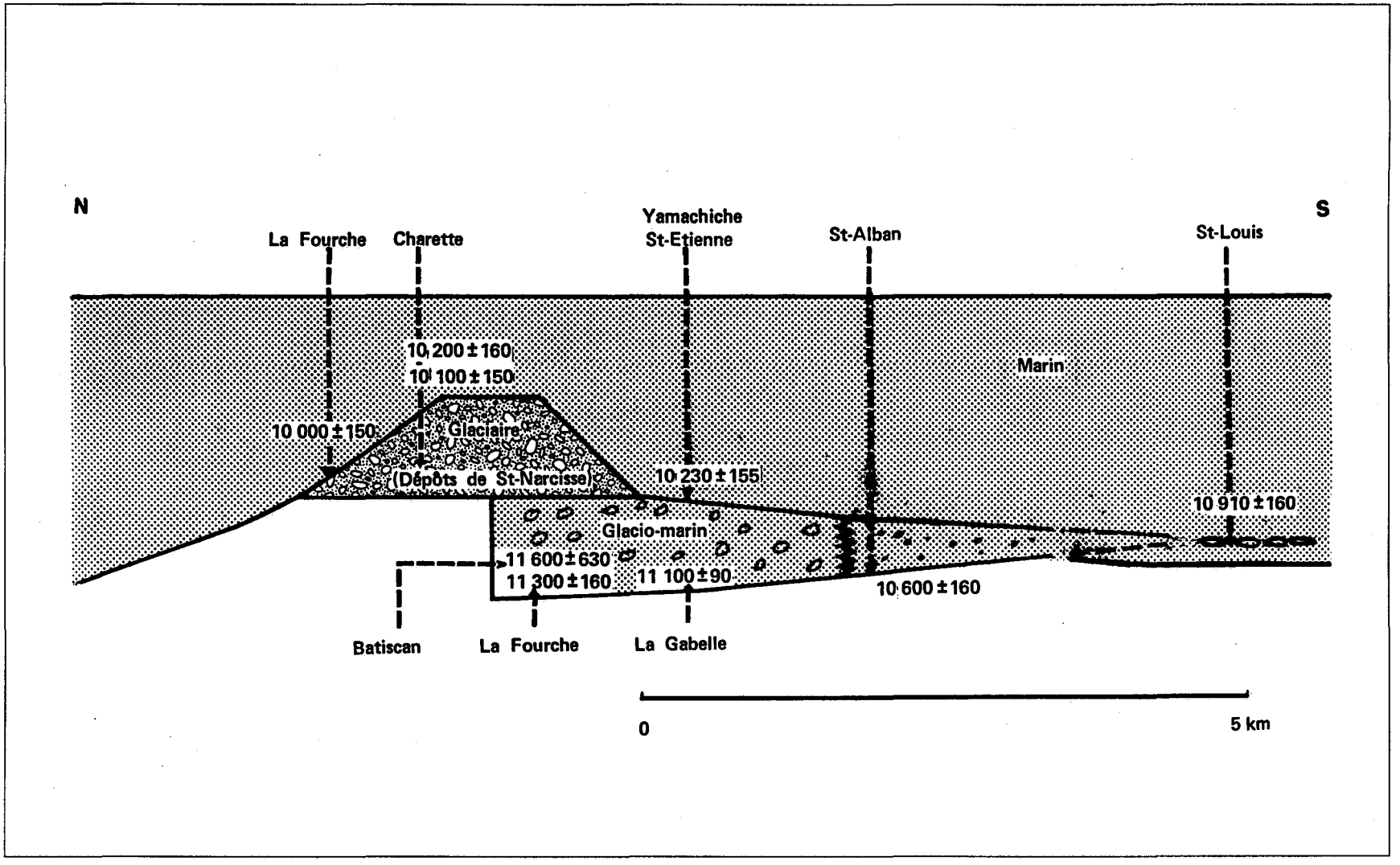


Figure 2.8 – Datations ^{14}C du complexe morainique de Saint-Narcisse dans la région de Trois-Rivières-Shawinigan (d'après Occhietti, 1980).

De récentes études palynologiques dans l'Est de l'Amérique du Nord rapportent une oscillation climatique ravivant ainsi l'intérêt des corrélations à l'événement du Younger Dryas (Mott *et al.*, 1986; Lasalle et Shilts, 1993). Mott *et al.* (1986) dévoilent leurs récents travaux palynologiques régionaux concernant les régions du Nouveau-Brunswick et de la Nouvelle-Écosse. Ils reconnaissent un événement climatique affectant les provinces de l'Atlantique. Cet événement implique une période de réchauffement avant 11 000 ans B.P. interrompue par une période froide jusqu'à un changement abrupt au réchauffement au début de l'Holocène (10 000 ans B.P.). Dans une récente publication, Lasalle et Shilts (1993) associent maintenant la réavancée Saint-Nicolas (incluant la Moraine de Saint-Édouard) et au moins quelques parties de la Moraine de Saint-Narcisse au refroidissement du Dryas Récent. Le refroidissement associé à la période du Dryas Récent est aujourd'hui reconnu mondialement et daté de façon très précise grâce, notamment, aux récents travaux de carottage glaciaire des projets GRIP et GISP2 au Groenland. Le Dryas récent se termine à 11 640 ± 250 (« calendars years ») et a une durée de 1300 ± 70 ans. Les figures 2.9 et 2.10 montrent le changement abrupt dans l'accumulation de neige au Dryas récent et la nette variation de la mesure de conductivité électrique (ECM) reflétant une oscillation dans la concentration de poussière présente dans l'atmosphère.

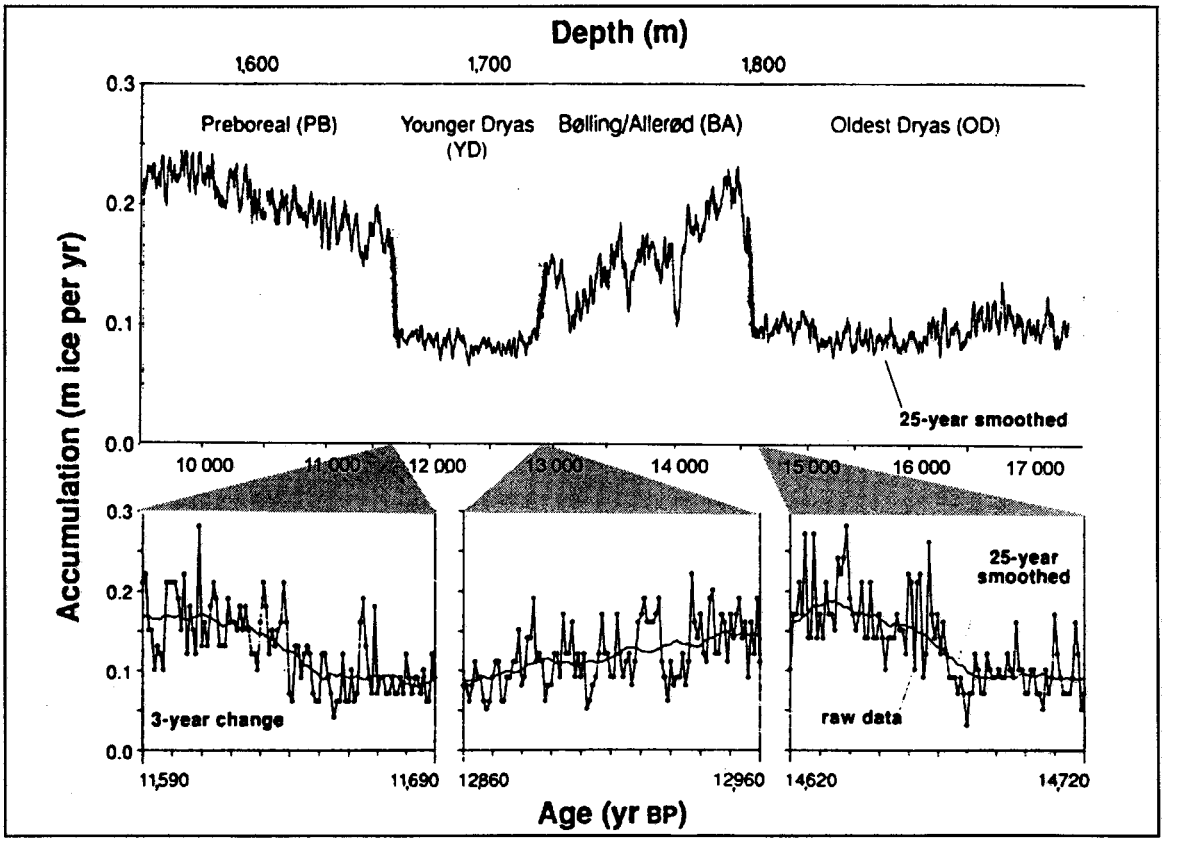


Figure 2.9 - Histoire du taux d'accumulation de neige à GISP2 (d'après Alley *et al.*, 1993).

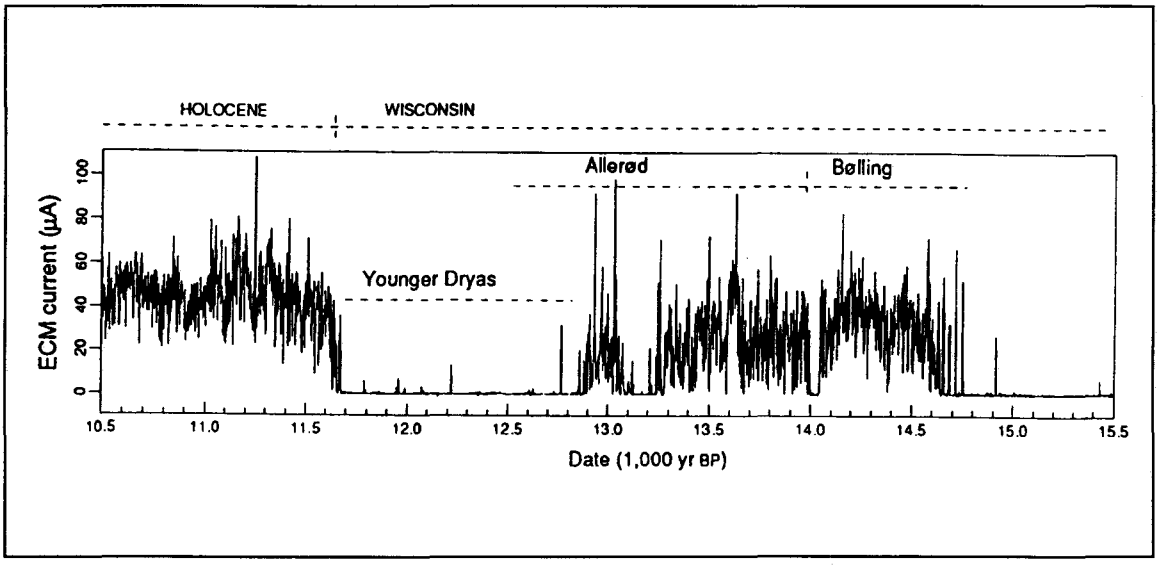


Figure 2.10 - Mesure de la conductivité électrique à GISP2 pour une période de temps comprise entre 10 500 et 15 500 ans (d'après Taylor *et al.*, 1993).

En conclusion, nous pouvons constater que plusieurs interprétations s'affrontent concernant le mode de mise en place de la Moraine de Saint-Narcisse. Plusieurs données stratigraphiques et structures glaciotectoniques indiquent qu'il y a eu durant l'épisode Saint-Narcisse des fluctuations du front glaciaire. Cette évidence semble acceptée par la communauté scientifique. Ce sont plutôt l'amplitude et les causes de ces fluctuations qui sont débattues. Certains auteurs (Lasalle, 1966; Occhietti, 1972; Denis, 1974; Lasalle and Elson, 1975) considèrent que l'événement de Saint-Narcisse implique une détérioration significative du climat pendant que d'autres (Hillaire-Marcel et Occhietti, 1980) partagent l'opinion que la moraine frontale de Saint-Narcisse tout comme celle de Sakami (Hilaire-Marcel *et al.*, 1981) et la Moraine de la Côte Nord (Dubois et Dionne, 1985) possèdent des caractéristiques de ré-équilibration du front glaciaire et ne représentent pas nécessairement une détérioration climatique significative. La détérioration climatique associée au Dryas Récent ne semblait pas être perceptible dans les diagrammes polliniques du Québec et de l'est de l'Amérique du Nord avant les années 1985 à l'exception du site du Mont Saint-Hilaire (Lasalle, 1966; Terasmae et Lasalle, 1968). Par contre, la reprise d'un climat froid vers 11 000 B.P. de niveau mondial, semble aujourd'hui très bien démontrée par de nombreuses études dont celle de Mott *et al.* (1986) dans les provinces atlantiques et par les récents travaux de GRIP et GISP2. Bref, la Moraine de Saint-Narcisse, présente sur la rive nord du Saint-Laurent, du Lac Simon en Outaouais jusqu'à la rivière Saguenay, serait un témoin de l'épisode du Dryas Récent, un refroidissement climatique mondial survenu entre 11 000 et 10 000 ans B.P.

CHAPITRE 3 - Architecture and stratigraphy of an uplifted glaciomarine basin : implications for regional hydrogeology[1]

Ce chapître correspond au manuscrit de l'article qui sera soumis à la Revue canadienne des Sciences de la Terre en mai 2001.

Frédéric Girard, Dessau-Soprin inc., 1441 boul René-Lévesque Ouest, bureau 500, Montréal, Québec, H3G 1T7[2]

Michel Parent, Geological Survey of Canada, Centre géoscientifique de Québec, 880 Chemin Ste-Foy, office 840, C.P. 7500, Sainte-Foy, Québec, G1V 4C7.

René Lefebvre, INRS-Géoressources, Centre géoscientifique de Québec, 880 Chemin Ste-Foy, office 840, C.P. 7500, Sainte-Foy, Québec, G1V 4C7.

Éric Boisvert, Geological Survey of Canada, Centre géoscientifique de Québec, 880 Chemin Ste-Foy, office 840, C.P. 7500, Sainte-Foy, Québec, G1V 4C7.

Yves Michaud, Geological Survey of Canada, Centre géoscientifique de Québec, 880 Chemin Ste-Foy, office 840, C.P. 7500, Sainte-Foy, Québec, G1V 4C7.

Nathalie Fagnan, D'Aragon, Desbiens, Halde et Associés ltée, 555 boul. René-Lévesque Ouest, 19^{e} étage, Montréal, Québec, H2Z 1B1.

---

[1]Geological Survey of Canada Contribution: XXXXXXX

[2]Corresponding author : Frédéric Girard, frederic.girard@dessausoprin.com
tel: (514) 281-1033, fax: (514) 875-2666

3.1 Abstract

A Late Quaternary deltaic complex that was emplaced in front of the Saint-Narcisse Moraine at the northern margin of the Champlain Sea was investigated in order to provide a hydrostratigraphic framework for regional unconfined aquifers. The stratigraphy and architecture of this deltaic complex emplaced by two large rivers near Saint-Raymond (Québec) was established through the integration of a wide range of information, including archival borehole data, new stratigraphic boreholes and sections, shallow geophysics and regional surficial geology. Integration of this large body of information was achieved through the construction of a series of closely spaced geological cross-sections which serve as the foundation of a regional 3D model. The 3D model of the delta complex shows that rapid meltwater-fed deltaic sedimentation in this uplifted glaciomarine basin was characterized by the progradation of distributary mouth bars rather than by simple foreslope progradation. Marine regression which was taking place during deltaic progradation led to the formation of three successive lobes which partly overlap one another both vertically and laterally. The architecture of a typical lobe is characterized by a thick central cone of sandy sediments fanning out and interfingering laterally with silty prodeltaic sediments and with intertidal sediments in adjacent shoals. The succession, migration and incision of these lobes resulted in a complex delta architecture in which the subsurface distribution of high and low permeability units can only be delineated through the integration of substantial subsurface information. Hence the geometry and connectivity of aquifers in these deltas is much more complex than anticipated; thus simple tabular stratigraphic models are not satisfactory.

3.2 Introduction

In regional and in site-specific hydrogeologic studies, detailed geologic characterization is becoming increasingly important, particularly when the aquifers are overexploited, or when contamination becomes a threat. In such cases, more accurate representations and descriptions of the shallow subsurface are necessary (de Marsily *et al.*, 1998). The characterization of the subsurface geology in site-specific studies and in regional hydrogeological studies does not require the same level of precision and details since they have different objectives. The great density of information usually needed and indeed used in local studies leads to a high resolution definition of the distribution of heterogeneities and hydraulic properties of geological materials. This wealth of information may then help to understand the effects of small-scale and intermediate-scale sedimentary features on groundwater flow. The distribution of these features can be subsequently predicted using different geostatistic, stochastic and fractal methods (de Marsily *et al.*, 1998; Scheibe and Freyberg, 1995; Koltermann and Gorelick, 1996; Fogg *et al.*, 1998).

From the broader perspective of regional groundwater flow, large scale sedimentary features are important controling factors (Anderson, 1989), particularly in Quaternary stratigraphic sequences. It follows that large-scale sedimentary patterns, as well as topography, have to be considered in regional groundwater flow studies, as demonstrated by the classical papers of Tòth (1962, 1963) and Freeze and Winterspoon (1966, 1967, 1968). Basin analysis techniques have now become standard procedures for many resource analysis, including regional groundwater analysis (Sharpe *et al.*, 1992). Basin analysis leads to an understanding of the basin stratigraphy, structure, paleogeography and depositional history. During detailed surveys, beds or groups of beds with similar sedimentological characteristics (lithofacies) can be grouped into facies assemblages. These assemblages represent various sedimentary components of a depositional environment. A depositional model can be developped and compared with other facies models (Walker, 1992). These models can be used as predictive tools to locate and characterize aquifers in glacial terrains (Fraser and Bleuer, 1987).

Although surficial geologic maps constitute one of the principal tools for basin analysis, they commonly provide little direct information on subsurface stratigraphy and architecture. Different tools to define, represent and visualize hydrostratigraphic contexts have been proposed. Pettyjohn and Randich (1966) used lithofacies maps for the direct visualization of the lithology

and areal extent of aquifers, for the delineation of areas of confining layers, water-table areas and artesian conditions. Much in the same way, Kempton and Cartwright (1984) defined stack-unit maps as stratigraphic maps that provide information on the presence and distribution of one or more geologic materials at a selected depth. This concept is still used today for land-use management and planning (Stiff, 1999) and as a basis for contamination potential maps (Berg, 1999). More recently, with the advent of powerful personal computers and the development of GIS software, 3D mapping of surficial geology has become a performing tool that enables the visualization of stratigraphic sequences (Fenton, 1999; Thorleifson, 1999; Russell, 1999; Brandon, 1999). Voss (1999) states that three-dimensional visualization in hydrogeology is no longer a mere extravagance and will soon become the norm.

The objectives of this paper are (1) to produce a regional 3D model integrating the stratigraphy and architecture of Quaternary sediments in the Saint-Raymond basin, (2) to propose a depositional model and (3) to define the hydrostratigraphic context. This paper also attempts to demonstrate the importance of basin analysis as part of a regional hydrogeological mapping program and to show that knowledge of sedimentary environments in glaciated terrains is essential to the understanding of regional groundwater flow. The proximity of many different sedimentary environments in the Saint-Raymond basin provides a good challenge and offers an opportunity to validate this methodology as well as to evaluate the feasibility of 3D mapping in the context of a complex architecture with discontinuous units.

3.3 Study area

The study area is located on the north shore of the St. Lawrence River between Trois-Rivières and Québec City around the Saint-Raymond municipality in the Portneuf region (Figure 3.1). This region is characterized by a large Precambrian bedrock basin which was filled by thick Quaternary marine sediments. This uplifted glaciomarine basin, called here the Saint-Raymond basin for convenience, covers an area of about 400 km^2. It is bordered by rock knolls to the east, south and west sides and by the Laurentian Highlands to the north (Figure 3.2).

The northern part of the region is characterized by hilly bedrock-controlled terrain with a thin, discontinuous veneer of till and with large areas of rock outcrops. In the major valleys and in most large bedrock depressions, tills can form relatively thick and laterally extensive sheets that are locally overlain by discontinuous bodies of glaciofluvial sand and gravel. In the southern

part of the region, below the Champlain Sea limit, the discontinuous till veneer on rock knolls has been extensively winnowed and reworked by wave action (Gadd,1971; Cloutier *et al.*, 1997).

Below the elevation of 160 m, till sheets, subaqueaous outwash and ice-contact sediment bodies are mostly overlain by a thick sequence of fine grained sediments deposited during the Champlain Sea episode (12.0 - 9.8 ka; Parent and Occhietti, 1988). The Bras-du-Nord River outwash plain grades into a vast deltaic complex that caps much of the marine sequence in the Saint-Raymond basin. This large deltaic complex, adjacent to the Saint-Narcisse Moraine, contains the most productive water-table aquifers of the area. The deltaic complex is generally characterised by meltwater-fed coarsening-upward sandy sequences overlying fine-grained marine sediments. The progradation and migration of deltaic lobes during Champlain Sea regression resulted in a series of terraces covered by thin alluvial sediments. On some terrace levels, thick (>5 m) peat deposits overlie alluvial sediments (Richard, 1973). In the central axis of the Saint-Raymond basin, prodeltaic silty sands underlie the deltaic sediments while silty intertidal sediments cap many of the sequences along the margins of the basin.

The Saint-Narcisse Moraine extends northeastward across the study area (Figure 3.2). It forms a regular concave arc below the marine limit and extends in the Laurentian Highlands, forming a distinctive morainic arc in the Bras-du-Nord River valley, where it displays a non-classical morphology characterized by a relatively gentle ice-proximal side and a steep ice-distal side, much as observed in other regions (Denis, 1974).

3.4 Previous work

A wealth of papers have been published on the Quaternary geology of the St. Lawrence Lowlands and the Champlain Sea basin (see Elson, 1988). However, very few studies have focused on establishing relationships between Quaternary sedimentary units in a hydrogeological perspective. The sole study with that perspective in the Champlain Sea basin was undertaken by Grenier and Denis (1974) in the Lac Maskinongé area, Québec. The goals of this hydro-geomorphologic study were to determine the location and areal extent of aquifers in surficial deposits and to establish the relationships betweeen physical and hydrodynamic properties of sediments. This study combined many types of surveys including detailled surveys of stratigraphic sections, drilling, borehole electric logs and pumping tests. The Lac Maskinongé

region resembles the Saint-Raymond basin: a silty clayey plain extents south of a large glaciomarine delta abutting the Saint-Narcisse terminal moraine.

A study with a similar perspective, but in a different geological context, was conducted in the region north of Toronto (Sharpe *et al.*, 1996); it focused on surface and subsurface investigations to map geological and hydrogeological features, with the aim of developping a regional geological model (Barnett *et al.*, 1998). Also, a large geologic mapping program initiated a series of pilot projects in the Great Lakes region where Quaternary sediments are mapped in 3-dimensions with the principal aims of groundwater resource identification and resource protection (Berg and Shilts, 1999). In the Portneuf area, the « Cartographie des aquifères du Piémont Laurentien » project led to the mapping (Cloutier *et al.*, 1997) and characterization of the Quaternary stratigraphic sequences (Parent *et al.*, 1998). Within this project, hydrogeological mapping of surficial granular aquifers has been described by Fagnan *et al.* (1999). Different hydrogeologic maps such hydrogeochemical, isopach, piezometric and hydrogeological limits maps of the surficial permeable aquifers have been produced (Fagnan *et al.*, 1998; Parent *et al.*, 1998; Bourque *et al.*, 1998). These investigations form the basis of the present study.

3.5 Regional stratigraphic framework

The Pleistocene stratigraphic framework of the St. Lawrence Lowland can be subdivided into lower and upper groups, where the lower group consists of units predating the last regional glacial advance. The first stratigraphic framework of the central St. Lawrence Lowlands was established by Gadd (1971) and has prevailed for about two decades. In essence, it consisted a nonglacial fluvial and lacustrine units deposited during non glacial events predating and postdating each of two main Laurentide ice advances (Bécancour and Gentilly) (Lamothe *et al.*, 1992). Lamothe (1989) revised the Quaternary depositional sequence of the St. Lawrence Lowland and recognized three glacial advances separated by two non glacial events. Since the introduction of this new stratigraphic framework, a few other papers have added a few new formal units (Ferland and Occhietti, 1990; Besré and Occhietti, 1990; Bernier and Occhietti, 1990) and discussed their age and correlation. Better correlations have emerged from new dating methods such as thermoluminescence and the infrared stimulated luminescence techniques, U/Th desequilibrium and amino-acid epimerization in addition to the existing radiocarbon (^{14}C) dating method (Lamothe and Huntley, 1988; Occhietti *et al.*, 1996; Hardy and Lamothe, 1997).

The two main hypotheses concerning the correlation of the St. Lawrence Lowlands stratigraphic sequence with marine isotopic stages are shown in Figure 3.3. In both cases, the Bécancour Till is correlated with stage 6 (Illinoian Glaciation). The major point of contention concerns the age and correlation of the intermediate units and, consequently, the age and duration of the Gentilly Till episode in the St. Lawrence Valley. In hypothesis A, the last glacial unit is correlated with isotopic stages 2, 3 and 4 while in hypothesis B, it is correlated only with stage 2. In the Portneuf area, the lower group of units consist mainly of erosional remnants whose regional distribution is difficult to assess; surficial mapping has shown that their areal extent is limited (Cloutier *et al.*, 1997).

The upper stratigraphic sequence represents the last glacial-deglacial hemicycle and begins with the Gentilly Till defined by Gadd (1971). The Gentilly Till forms a discontinuous unit overlying igneous and metamorphic Precambrian rocks of the Grenville Province in the Saint-Raymond area (Parent *et al.*, 1998). In the present study, the definition of the Gentilly Till unit corresponds to the definition given by Karrow (1957) and Gadd (1971) and is not restricted to the definition given by Occhietti (1980) who fixed the northern limit of this unit to the geological contact between the Precambrian and the Paleozoic rocks of the St. Lawrence Lowlands, a restriction that would not be practical in the study area.

The Gentilly Till is overlain by Champlain Sea deposits which consist of an offlap sequence of deltaic and littoral sands and gravels overlying fine-grained sediments (Parent and Occhietti, 1988). During the second half of the Champlain Sea episode, the Saint-Narcisse Moraine was built (11.1-10.6 ka.) as the ice-front remained locally in contact with marine waters. The base of the Saint-Narcisse Moraine corresponds to a glaciomarine diamicton named Diamicton de Yamachiche dated at 11.3-11.1 ka (Occhietti, 1980). The morainic ridge is composed of different types of sediments ranging from debris flows, flow tills and basal tills to stratified ice-contact sediments.

3.6 Elaboration of the three dimensional stratigraphic model

The development of a 3D stratigraphic model requires the integration of surface and subsurface geologic information. Although the surficial geology map represents a keystone source of information, it is insufficient to construct a truly 3D model unless it is fully supported by subsurface data. Since subsurface information such as water well borehole record is unevenly and sparsely distributed, it must be complemented by new stratigraphic investigations. These were needed to define vertical lithofacies sequences and assemblages and their lateral relationships, as well as to validate the existing data.

3.6.1 Stratigraphic sections

Sediments exposed in stratigraphic sections of the Saint-Raymond basin were classified in 13 different lithofacies and then grouped into 9 facies assemblages reflecting their main properties and their position in the stratigraphic sequence (Table 1). Using an adapted version of lithofacies codes proposed by Miall (1977) and Eyles *et al.* (1983), detailed sedimentological investigation of sections exposed along river banks, roads and sand pits was carried out mainly within the morainic and deltaic complexes. Four measured stratigraphic sections, all located on the right bank of the Bras-du-Nord and Sainte-Anne Rivers (see Figure 3.2), are shown in Figure 3.4.

General observations in numerous small exposures as well as at the four main vertical sections of the Sainte-Anne delta led to the recognition of a relatively straightforward sedimentary sequence : a generally coarsening-upward deltaic sequence prograding over marine muds. The upper part of the coarsening-upward sequence is largely eroded by the fluvial channels (At) as a result of progradation and incision of Sainte-Anne and Bras-du-Nord Rivers during the Champlain Sea regression. In the Colbert, Cayer and Malette sections, deltaic sands (Md) have been entirely eroded, as well as the prodeltaic sand unit (Mdp) in the Colbert section.

At the Cayer section, located about 2.5 kilometers east of the Saint-Narcisse Moraine, fine-grained marine sediments show intense penecontemporaneous deformation, ranging from broad folds to tightly folded and faulted structures (Figure 3.5a). The north-trending axial plane of these deformations suggests that the subaqueous slumps occurred along a ramp sloping east toward the central axis of the Sainte-Anne Valley. The Pointe-Basse section is definitely the most interesting and complete vertical exposure of the Saint-Raymond basin, showing the progradational deltaic sequence, the transitional prodeltaic sediments and the underlying fine-

grained marine mud. At the base of this section, the marine mud consists of fossiliferous (*Portlandia arctica* dated at 10 900 ± 140 BP; GSC-6362) horizontal graded silty clay beds, 1 to 3.5 cm in thickness with occasional sandy partings. No evidence for turbidity or bottom currents was found in the graded silty clay beds; these diffusely graded beds were deposited mainly by rainout (Photo 3.5b).

The thickness of the prodeltaic silty sand unit (Mdp) found in these stratigraphic sections and elsewhere in the study area does not exceed 7 meters, which is much less than in the nearby Trois-Rivières region where Occhietti (1980) reported as much as 19 meters of prodeltaic sand. These vertical exposures mapped in the Saint-Raymond basin combined with other observations allow the determination of the areal extent and elevation of the fine-grained marine sediment facies associated to the regional aquitard (Fagnan *et al.*, 1999). The elevation reached by these sediments in the southern Saint-Raymond basin is about 130 meters near the Pointe-Basse section, rises to 149 meters at the Cayer section and reaches 160 meters in northern Saint-Raymond basin in a meander bend. The surface of the fine-grained marine unit dips southward at a rate of about 2.75 m / km.

Table 1 - Main lithofacies in the Saint-Raymond basin.

Facies	Lithofacies Codes	Description	Interpretation	Environment	Facies Assemblages	Related geological mapping unit (s)
Facies 13	SGxt - SGxp	Gravel to medium sand, trough or plane cross bedding	High terraces sediments	Fluvial	**F**	**At**
Facies 12	Gc	Crudely imbricated, clast-supported gravel	Subaerial outwash	Proglacial	**E**	**Go**
Facies 11	Sxt - Sh	Plane and cross-stratified medium to coarse sand	Deltaic sand	Deltaic	**D2**	**Md**
Facies 10	Sr - Sl	Ripple and plane laminated fine sand	Deltaic sand	Deltaic		
Facies 9	Sl - Fl	Laminated sand and coarse silt	Prodeltaic sand Intertidal sediments	Deltaic	**D1**	**Mdp - Mi**
Facies 8	Fm(f) - Fl(f)	Massive mud to fine laminated mud with marine shells	Offshore sediments	Marine	**C**	**Ma**
Facies 7	Fg(f)	Fine-grained gradded mud (fossiliferous)	Glaciomarine muds	Distal/ Proximal Glaciomarine	**B2**	
Facies 6	Fld	Deformed laminated fine-grained mud	Slumped/slided sediments on sloping morainal banks	Distal/ Proximal Glaciomarine		
Facies 5	Sm	Massive fine sand	Sediments gravity flows	Proximal Glaciomarine	**B1**	
Facies 4	SGxt – SGxp Gh - GSh	Plane and cross-bedded gravelly to medium sand	Ice-contact sediments	Ice proximal	**A3**	**Gx**
Facies 3	Dmm - Dms	Massive to stratified matrix-supported diamicton	Melt-out till	Mainly supra-glacial	**A2**	**T - Tv**
Facies 2	Dmmz	Sheared, massive, matrix supported sandy diamicton	Morainic sediments	Subglacial	**A1**	**GxT**
Facies 1	Dmmz	Sheared, massive, matrix supported sandy silt diamicton	Basal till	Subglacial		**T - Tv**

Lithofacies codes : modified from Miall (1977) and Eyles *et al.*(1983)

3.6.2 Stratigraphic Boreholes

In order to develop the information base needed to develop a 3D model of the study area, hundreds of boreholes were integrated and archived in a database (Boisvert and Michaud, 1998). Coupled with Quaternary surficial mapping, these data form the basis for establishing the subsurface distribution of Quaternary sediments of the Saint-Raymond basin. Most of the information comes from water well records compiled by the Québec Ministry of Environment. The remaining data were obtained from the Québec Ministry of Transportation, from Hydro-Quebec files and from the private sources (Fagnan, 1998).

To establish the nature and subsurface distribution of the Saint-Narcisse Moraine and associated sediments, three (3) stratigraphic boreholes were drilled along a transect across the moraine (see Figure 3.2) and one was drilled in a small marine sub-basin upglacier from the Saint-Narcisse Moraine in the Saint-Léonard area (Figure 3.6). These boreholes were drilled with an air rotary drill rig (Odex system) and the stratigraphic sequence was established through logging and grain-size analysis of cuttings and through slip spoon sampling at critical intervals. Borehole FR-98001 is located on the morainic ridge and it is composed of 30 meters of gravelly sand lying directly on the Precambrian basement. A series of fining-upward sequences consisting of 0.75 m thick beds of bouldery to cobbly gravel (30% > 256 mm) grading upward into medium to fine sand beds make up the lowermost part of the drillhole. Fragments of marine shells and foraminifers (*Elphidium excavatum*) were observed between 22 and 24 m depth.

Boreholes FR-98002 and FR-98004 were drilled respectively on the downglacier and upglacier flanks of the Saint-Narcisse Moraine (see Figure 3.2) in order to better understand the architecture of the moraine and to evaluate the stratigraphic relationships and hydraulic connectivity between units composing the morainic complex. A silty sand unit which was encountered in the top 16 meters of FR-98002 borehole is interpreted as intertidal sediments. The connectivity between the eastern and western part of the moraine has been recognized in the borehole FR-98002 by a prodeltaic sand unit 2.5 meters thick lying at an elevation around 160 meters in between two diamictic units; the upper one is correlated to the Saint-Narcise Moraine while the bottom one is thought to represent the regional basal till. Borehole FR-98004 unexpectedly drilled through a sequence of pre-Gentilly sediments. The upper 37 meters of the borehole consist of deltaic sand and prodeltaic sediments while the next 7 meters consist of coarse to very coarse sand associated to the subsurface extension of the Saint-Narcisse Moraine

deposits including the regional till unit (Gentilly) at its base. The lower 40 meters of the borehole consist of fine to silty sand lacustrine sediments predating the last glacial advance and containing some degraded plant material and fragments of gyttja (Larouche, 2000).

Borehole FR-98003 was drilled trough 24 meters of soft silty-clayey marine sediments and trough a 6 m thick sandy unit before reaching a diamict unit interpreted as basal till. Artesian conditions were observed at this site where the piezometric surface is at least 5 meters above ground surface. The microfaune analysis revelead interresting features for this sub-basin where marine species (*Islandiella helenae, Islandiella* sp. and *Recurvoides* cf. *turbinatus*) observed in lowermost silty clay were replaced by fresh water species (*Difflugia bacillariarum*) in the upper part of the unit (Guilbault, 2000; Larouche, 2000).

3.6.3 Geological cross-sections

Two series of closely spaced (1 km) cross-sections, with the UTM grid of the 21 L/13 topographic map (1:50 000) serving as guidelines, were prepared from archived and newly acquired information. The first series of 20 cross-sections are oriented east-west, approximately perpendicular to the principal geomorphic and stratigraphic features of the region; the second series consits of 21 cross-sections oriented from North to South (see Figure 3.2).

A manual procedure was used to trace the topographic surface in the geological cross-sections, because automated drafting procedure using a digital elevation model (DEM) could not reproduce the series of low, sharply defined terrace scarps that characterize the region. However, to facilite the work and save time, a computer utility was created to extract the topographic control points. The surface topography was easily drawn with the help of aerial photographs. These cross-sections provide a more realistic estimation of the sediment total thickness that a standard automatic interpolation technique (Parent *et al.*, 1998). These series of geological cross-sections not only provide a powerful validation tool for archived borehole data but also allow us to establish the subsurface architecture and geometry of Quaternary units. Surficial geology mapping units were integrated in these cross-sections, except for the till veneer unit which was lumped with bedrock because of scale limitations.

3.6.4 Interpolation techniques

These 41geological cross-sections were subsequently digitized and integrated in a GIS software (ArcInfo ™) in order to construct the 3D model. This was achived through a *shape base modelling* technique used in medical imagery (Brett *et al.*, 1997; Hill *et al.*, 1997). However, because these cross-sections are not close enough to produce a smooth 3D image, a space-filling software GEOSOLID II was needed. The 3D space between these sections is filled using a straightforward calculation: pixels from parallel planes are matched and form end members of linear series, then the space between two corresponding pixels is filled with intermediate values.

This method is capable of producing 3D views of solid volumes in geologically and geometrically complex areas. Shades of gray, used in medical imagery, are replaced by a value indicating whether a pixel lies inside or outside a geological body. This value is simply the calculated distance from a point to the polygon's border. Points lying outside the body end up with negative distances while points lying inside have positive distances. The space between planes is filled by linear interpolation of distances from plane to plane, the border of a calculated volume being distance = 0 (Figure 3.7). Since the number of planes available is very low in comparaison to the many sudden changes in the spatial distribution of geological volumes, the procedure has been modified to include parrallel planes and surface information in the calculation.

3.7 Stratigraphic architecture

The analysis of the stratigraphic cross-sections, which constitute the cornerstone of the 3D geological framework, and the visualization of the 3D model lead to a better understanding of the depositional history of the Saint-Raymond basin. Construction of the 3D model is based on in-depth knowledge of the architecture, lateral and altitudinal relations of the different sedimentary units that control regional groundwater flow. Discussion will be restricted to the three main aspects of the 3D model: 1) bedrock topography and Pre-Champlain Sea units, 2) Saint-Narcisse Moraine architecture and 3) the geometry of the Sainte-Anne deltaic lobe.

3.7.1 Bedrock topography and pre-Champlain Sea units

Bedrock topography, or depth to bedrock, is a key consideration in regional hydrogeology since it usually defines the lower limit of the regional groundwater flow system in surficial sediments. In the Saint-Raymond basin, the Precambrian bedrock surface, which lies beneath a thick covers

of Quaternary sediments displays the same irregular topography in the subsurface as in the nearby uplands (Figure 3.8). Bedrock depressions are locally filled by pre-Champlain Sea units such as till, ice contact sediments or subaqueous outwash bodies. In the Saint-Raymond basin, these sediments are largely overlain by thick fine-grained marine sediments and represent potentially very good confined aquifers with good transmissivity values ($5x10^{-3}$ m^2/s) and low vulnerability to contamination. Artesian conditions occur in some of these confined aquifers, in the vicinity of Saint-Léonard for instance. The areal extent of these aquifers has been clearly defined by the 3D model and their recharge is assumed to occur through glacial sediments overlapping the flanks of rock knolls. In the southern parts of the Saint-Raymond basin, many of these confined aquifers may not be in hydraulic connection with outcropping units, in which case their annual recharge and their potential for exploitation would be significantly reduced.

3.7.2 Saint-Narcisse Moraine

In the southern part of the study area, the Saint-Narcisse Moraine consists of a single morainic ridge lying on Precambrian bedrock (see borehole FR-98001) and buried in part by deltaic and littoral sand. Ice front oscillations and penecontemporaneous sedimentation of the marine fine-grained sediments are recorded by interfingering contacts on the eastern side of the morainic ridge (Figure 3.8). The regional aquitard, represented by the silty clay facies of Champlain Sea sediments, is divided by the Saint-Narcisse Moraine into two distinctive areas in the Saint-Raymond basin. The Allen's Mills-Saint-Léonard aquitard is located on the western side of the moraine wheras the Saint-Raymond aquitard is located on the eastern side. In spite of their difference in age and depositional history, these two aquitards have similar hydrogeological properties. The silty clays which make up the Saint-Raymond aquitard were deposited mainly during the Saint-Narcisse event. These sediments are dated at 10 900 ± 140 B.P. (GSC-6362) on a *Portlandia arctica* fauna at the Pointe-Basse section. This is consistent with the commonly accepted age of the Saint-Narcisse Moraine (Parent and Occhietti, 1988) and with the Younger Dryas cooling observed around the world during this period (e.g. Mott *et al.,* 1986; Lasalle and Shilts, 1993). The Allen's Mills-Saint-Léonard aquitard represents sedimentation in post-Saint-Narcisse time in an embayment where marine waters were gradually replaced by fresh water, as revealed by the microfauna analysis in borehole FR-98003 (Guilbault, 2000).

At the center of the Saint-Raymond basin, at the node between two morainic arcs, the Saint-Narcisse Moraine presents a more complex stratigraphy. To interpret and understand this

architecture, the local deglaciation history must be reassessed. Prior to the Saint-Narcisse event, the front of the Laurentide Ice Sheet, in contact with the Champlain Sea, had probably receeded at least to the area of the Bédard River valley (see Figure 3.2) about 3 km west of the morainic ridge. This is demonstrated by the occurrence of fossiliferous laminated fine-grained marine sediments at the anomalously high elevation of 200-210 meters a.s.l. These stiff, fine-grained sediments lie stratigraphically below glaciotectonically deformed sand and till emplaced during a glacial readvance. This suggests that the valley was first invaded by the Champlain Sea and that its lower part was subsequently blocked by the readvancing ice sheet, presumably during the Saint-Narcisse event. During this readvance, deltaic and prodeltaic sediments were being deposited in the embayment at the mouth of the Sainte-Anne River. Readvance of the Laurentide Ice Sheet onto prodeltaic silty sand is recorded in borehole FR-98002. The architecture of the Saint-Narcisse Moraine and its complex relationships with the adjacent deltaic complex are shown in Figures 3.8 and 3.9.

3.7.3 Sainte-Anne deltaic lobes geometry

The 3D model shows that the Sainte-Anne River delta consists of three large lobes that were formed in succession and at progressively lower elevations. The first deltaic lobe was built at the level of the local marine limit, about 200 meters a.s.l.. This lobe prograded southward past the present-day confluence of the Sainte-Anne and Bras-du Nord Rivers and abutted onto the Saint-Narcisse Moraine at its western side. The relative contribution of each of the three main streams (Mauvaise, Sainte-Anne and Bras-du-Nord Rivers) to the construction of this lobe is not easily deciphered, especially in the case of the Sainte-Anne and Bras-du-Nord Rivers (Figure 3.2). The lithofacies sequence of this first deltaic lobe is quite characteristic of classical progradational deltaic sequences. Early regression of the Champlain Sea caused the dissection of previously deposited deltaic sediments, resulting in a first series of terraces at elevations ranging from 180 to 170 meters a.s.l.

The second deltaic lobe was emplaced when relative sea level had fallen to about 160 meters a.s.l.; this lobe prograded southeastward direction until abutting the rock knoll in the southern part of the study area where it became nearly coalescent with the Jacques-Cartier River delta. In the central axis of this lobe, approximately at the position of the present-day Sept-Îles River valley, a thick sand unit extending from surface to bedrock can be observed in many boreholes. The areal subsurface extent of this sandy body reaches up to 3 km in length and 4 km in width;

its thickness reaches 55 meters locally (Figure 3.8). This highly permeable unit can be considered as a water-table aquifer in the middle of the lobe and as a semi-confined aquifer in its western side near the terrace scarp bordering Sainte-Anne River.

The avulsion of this second lobe occurred when the water level dropped below 155 m. At this time, the level of Sainte-Anne River was lower than the base of the deltaic sands of the previously deposited lobes and it had begun eroding the underlying prodeltaic and fine-grained marine sediments. The westward migration of the Sainte-Anne River led to the emplacement of a third deltaic lobe which buried part of the Saint-Narcisse Moraine. This third lobe, whose elevation ranges from 150 to 115 m. a.s.l., prograded southwestward to the vicinity of Saint-Alban, just outside of the study area. The 3D architecture of the Sainte-Anne River delta shows that sedimentation in the three successive lobes was controlled by two simultaneous processes: delta progradation and marine regression.

3.8 Depositional model for the Saint-Raymond basin

A depositional model for two of the main sedimentary environments of the Saint-Raymond basin is discussed in this section. These models are based on the surface and subsurface distribution of the main lithofacies groups observed in the basin.

3.8.1 Glaciomarine sedimentation – Saint-Narcisse Moraine

A conceptual model of the Laurentide Ice Sheet in contact with the Champlain Sea during the formation of the Saint-Narcisse Moraine in the Portneuf area (Figure 3.10) shows the associated sediment facies assemblages. From a glaciologic stand point, the terminus of the Laurentide Ice Sheet can be considered as an active temperate tidewater glacier (Anderson and Ashley, 1991) during the formation of the Saint-Narcisse Moraine. The fairly steep slope (≈17 degrees) of till sheets observed within the ridge at Saint-Léonard as well as the high relief of the morainic ridge troughout the region indicate that the ice was grounded and was not buttressed by an ice shelf. If the level of Champlain Sea during the Saint-Narcisse episode is assumed to be around 200-210 m (Occhietti, 1980), the maximum water depth varied between 60 and 100 meters near the glacial terminus in the Saint-Raymond basin, which is much less than the 200 to 400 m required for the formation of stable floating margins (Thomas, 1977; Croosen, 1991).

The molluscan fauna consisting mainly of *Balanus hameri* in contemporary sediments at the base of the Saint-Alban section located 4 km southwest of the study area (Occhietti, 1977; Hillaire-Marcel, 1980) indicates cold ($\approx 0^{o}C$), high salinity (30-34$^{o}/_{oo}$) marine waters during the formation of the Saint-Narcisse Moraine. Allowing for some dilution of seawater by meltwater influx, the salinity of the Champlain Sea in the Saint-Raymond basin can be estimated at about $30^{o}/_{oo}$ or slightly less. The density of ambiant water is a key parameter controlling in large part whether the meltwater influx is likely to generate underflows, overflows or interflows.

The section at Pointe-Basse, located about 2 km down-ice from the moraine, provides a response to this question. There, interlaminated sediments (Table 1; facies 6) are well exposed over a thickness of 7 meters (Figure 3.4). These couplets are composed of diffusely graded beds of silty clay (3.5 cm thick) and of silty sand (1 cm thick) (Figure 3.5b). No partings nor tractive current features were observed in these sediments. The nature of the diffusely graded silty clays shows that the couplets were produced mainly by differential settling of particles within a turbid plume. The occurrence of *Portlandia arctica* as a common fauna in these glaciomarine rhythmites provides additional support for an ice-marginal environment. The oscillations of the turbid overflow and interflow plumes are an important process in the production of cyclopel and cyclopsam couplets (Mackiewick *et al.*, 1984). Oscillations of these turbid plumes can be produced by seasonal processes, such as high meltwater disharge during summer, or by episodic processes, ranging from high runoff events to jokulhlaups.

Although there are several small surface exposures within the Saint-Narcisse moraine ridge in the region, borehole FR-98001 provides the only sedimentary record across the entire ridge. The lower part of the borehole shows an alternating sequence of bouldery to cobbly gravel beds grading upward into medium to fine sand beds. This lower sequence is interpreted as sediment gravity flows and may be fairly representative of proximal glaciomarine environments in the region of Saint-Raymond. Such subaqueous mass movements along a morainal bank are usually generated by sediment slumps, by ice front oscillations, by iceberg calving impacts and by underflows (Mackiewicz *et al.*, 1984; Powell and Domack, 1995). Usually, a downslope transition occurs along the morainal bank: the coarse-grained gravity flows deposited on the upper slopes commonly grade into proximal sandy turbidites on the lower slopes.

3.8.2 Deltaic sedimentation - Sainte-Anne deltaic complex

The patterns of deltaic sedimentation at the mouth of the major rivers along the north shore of the Champlain Sea, both at its highest level and during the ensuing regression, have received little attention in the classical literature (e.g. Elson, 1988). However recent marine surveys have documented the deltaic structure and characteristics of forced regression deltas, particularly at the lowstand stage of relative sea level along the north shore of the Gulf of St. Lawrence (Sala and Long, 1989; Michaud, 1990; Hart and Long, 1996; Hill and Long, 1998). In the Mauricie area, Occhietti (1980) suggested the term « delta d'épigradation » for deltas formed during the Champlain Sea regression and characterized by a series of terraces.

The Sainte-Anne delta began to form at the maximum limit of the Champlain Sea as a prograding extension of a subaerial outwash that once filled the Bras-du-Nord River valley. Deposition of the first deltaic lobe is sketched in Figure 3.11 along with the architecture of the main facies assemblages. The kettled outwash train fronting a major glacial lobe descending the Bras-du-Nord valley was the initial feeding system of the Sainte-Anne delta. This outwash, composed of particles ranging from fine gravel to fine sand, prograded on fine-grained sediments deposited in the basin prior to the Saint-Narcisse event. The nearly equal size and the geometry of the three successive lobes indicate that the meltwater-derived sediment supply remained high for several hundred years following the Saint-Narcisse readvance. Facies architecture within each lobe suggests that coarser sandy sediments deposited near river mouth formed deltaic crest bars while the silt-dominated suspended load was transported in plane turbulent jets further into the basin where settling from the turbid buoyant plume led to the deposition of diffuse graded beds. The interbedded silt and fine sand facies of the prodeltaic unit reflects episodic fluctuations at the base of the turbulent jet (Figure 3.12). As sea level fell, deltaic crest bars prograded into the basin where sediment gravity flows redistributed sandy sediments from the low-angle front slope of the delta to deeper parts of the basin (see Figure 3.8; sections 5, 6 and 7). This is why sandy sediments deposited during construction of the first lobe underlie sandy sediments deposited during progradation of the second deltaic lobe.

3.9 Hydrostratigraphic framework and hydrogeologic applications

3.9.1 Hydrostratigraphic units

Since hydrostratigraphic units were first introduced by Maxey (1964) who defined them as «*bodies of rock with considerable lateral extent that compose a geologic framework for a reasonably distinct hydrologic system* », the concept has been in constant evolution. Seaber (1988) redefined a hydrostratigraphic unit as a « *body of rock distinguished and characterized by its porosity and permeability* ». This definition had the advantage of excluding the concept of hydrological dynamics, since this had caused rejection of the term by the North American Commission on Stratigraphic Nomenclature. Another attempt was made by Anderson (1989) who defined the term hydrogeologic facies as a « *homogenous but anisotropic unit that is hydrogeologically meaningful for purposes of field expirements and modelling* ». Although, the concept of hydrostratigraphic units has yet to find an established definition, it seems clear that hydrostratigraphic units defined in the context of a hydrogeological mapping project should be practical, useful, mappable and that they must contribute to the understanding of regional groundwater flow.

In the broader regional study (Fagnan *et al.*, 1998), water table granular aquifers have been divided into five *hydrogeologic contexts* : 1) deltaic sand and gravel, 2) high terraces sands on deltaic sand and gravel, 3) fluvioglacial sand and gravel, 4) littoral sand and 5) Saint-Narcisse Moraine unit. This classification is mostly based on surficial geology mapping and on the inferred subsurface extent of the aquifers. The definition of the hydrostratigraphic context of the Saint-Raymond basin presented in this paper can be considered as a « second step » in the definition and delineation of hydrostratigraphic units in surficial sediments. The same genetic terminology as the one used in Quaternary mapping has been used for the definition of these hydrostratigraphic units. This classification avoids the proliferation of nomenclature and facilitates the interpretation of aquifer architecture. However, the terminology used in the definition of the hydrostratigraphic unit must not be the same or must be revised for naming aquifers. The attribution of a specific name to an aquifer formation must be chosen with attention and precaution (Laney and Davidson, 1986; Jorgensen and Rosenshein, 1987). In the present study, no specific names have been attributed to the aquifers of the Saint-Raymond basin. However, Fagnan *et al.*, (1998) named surficial aquifers in reference to the hydrological basins and to the administrative boundaries where the aquifers are located. In the study area, five

aquifers were named by Fagnan *et al.* (1998): Sainte-Anne Nord, Sainte-Anne Ouest, Sainte-Anne Est, Sainte-Anne Centre and Lac Sergent aquifers.

3.9.2 Hydraulic conductivities

Determining quantitative values of hydraulic conductivities for each of the hydrostratigraphic units is often problematic. Vertical and lateral facies variations and several genetic factors appear to influence the range of values. However, values of hydraulic conductivity can be estimated for several of these units.

To better assess the role of prodeltaic silty sand units as a possible base boundary for deltaic aquifers, laboratory tests were carried out. Unreworked samples of prodeltaic silty sands were collected along vertical exposures and permeability tests (falling-head permeameter) were conducted on these samples. Measured hydraulic conductivity ranges from $7.7x10^{-8}$ to $2.2x10^{-8}$ m/s with a mean ratio of horizontal to vertical conductivity of 13. This high anisotropy was expected considering the rhythmic nature and the strong vertical grain-size variations of this unit (Figure 3.12). Unit Mdp represents an unmappable unit since it can be observed only in a few vertical sections. In many sites however, springs occur at the contact within the overlying deltaic sand (Md) and many of these springs are used for domestic or municipal water supplies. The hydraulic conductivity of the deltaic sands ranges between $2,8x10^{-5}$ and $1,4x10^{-4}$ m/s in the Portneuf area (Fagnan *et al.*, 1998; Paradis, 2000; Martel *et al.,* 2000). For example, part of the water supply of Saint-Raymond, a town with a 8 000 population, comes from two such springs and the volume of extracted groundwater exceeds slightly 1000 m^3/d (Fagnan, 1998).

As shown in Figure 3.13, the hydrostratigraphic framework of the Saint-Raymond basin is relatively simple. Pre-Champlain Sea units, as discussed previously, represent very good local buried aquifers and are sometimes under artesian conditions (ex. Saint-Léonard sector). The silty-clay marine sediments of the Champlain Sea represent the regional aquitard formation with hydraulic conductivities ranging between $3x10^{-10}$ and $5x10^{-9}$ m/s with an anisotropy ratio of 1.1 (Leroueil *et al.*, 1983). The present study has placed some emphasis on the identification of the base of the regional deltaic sand aquifer. Our investigation demonstrates that it is the prodeltaic silty-sand unit which represents the base of the regional aquifer rather than the marine fine-grained sediments, as assumed previously. This finding can probably be extended to most of the

deltaic complexes that were formed in late-glacial and postglacial seas of the St. Lawrence valley.

3.9.3 Hydrogeological applications

One of the practical applications of our 3D stratigraphic model is groundwater modelling, one of its basic precepts being that the closer the conceptual model approximates the field situation, the more accurate is the numerical model (Anderson and Woessner, 1992). The 3D stratigraphic model gives a much more realistic representation of the complex subsurface stratigraphy and a much more precise definition of hydrostratigraphic units. The contribution of a 3D stratigraphic model in the Saint-Raymond basin is particularly appreciated in situations where the hydraulic links between the deltaic sediments and the Bras-du-Nord and Sainte-Anne rivers are discontinuous.

One of the other applications for this hydrostratigraphic model lies in the development of groundwater vulnerability maps. Many vulnerability assessment methods or techniques are currently available (e.g. Drastic, GOD, etc) and have been tested in the region by Murat (2000). The type of information required by these methods is quite variable. However, the establishment of the three-dimensional framework of geological materials and the delineation of aquifer and non-aquifers materials are a requirement in almost all of these methods. The highly specific information which is required in many cases, the type of material at the water table (Minnesota technique, for instance), can be very difficult to obtain without an hydrostratigraphic model.

3.10 Conclusions

New insights on the stratigraphy and architecture of a Late Quaternary deltaic complex deposited on the north shore of the Champlain Sea basin were gained from the integration of surface and subsurface data. Lithofacies sequences show that meltwater-fed deltaic sedimentation in this uplifted glaciomarine basin was characterized by the progradation of distributary mouth bars rather than by simple foreslope progradation. Marine regression which was taking place during deltaic progradation led the formation of three successive lobes which partly overlap one another both vertically and laterally. The architecture of a typical lobe is characterized by a thick central cone of sandy sediments fanning out and interfingering laterally with silty prodeltaic and with intertidal sediments in adjacent shoals. The succession, migration and incision of these lobes

resulted in a complex delta architecture in which the subsurface distribution of high and low permeability units can only be delineated through the integration of substantial subsurface information. Hence the geometry and connectivity of aquifers in these deltas is much more complex than anticipated; simple tabular stratigraphic models are not satisfactory.

New stratigraphic sections and borehole data have not only confirmed that the Saint-Narcisse Moraine was emplaced during a Younger Dryas glacial readvance but they also show (1) that the moraine splits the regional sheet of marine silt and clay into two distinct aquitards and (2) that it constitutes a zone of significant groundwater recharge for burried granular and bedrock aquifers. A new borehole near Saint-Léonard records pre-Gentilly silty lacustrine sediments at an elevation several tens of meters above that reported from possible correlative units.

ACKNOWLEDGMENTS

This research was part of the first author M.Sc thesis at INRS-Géoressources and is part of a regional hydrogeological mapping project (Cartographie des aquifères du Piémont Laurentien) conducted and funded in part by the Geological Survey of Canada, INRS-Géoressources, Québec Ministry of Environment, Portneuf MRC and Laval University. I sincerily thank my advisor Dr. Michel Parent and Dr. René Lefebvre, Dr. Yves Michaud, Eric Boisvert and Nathalie Fagnan. Thanks are also extented to Jean-Pierre Guilbault (BRAQ-Stratigraphie) for the extraction and identification of the micropaleontological fauna in borehole samples and to Alayn Larouche from Université de Montréal (Geography Department) for the identification of fossil plant material.

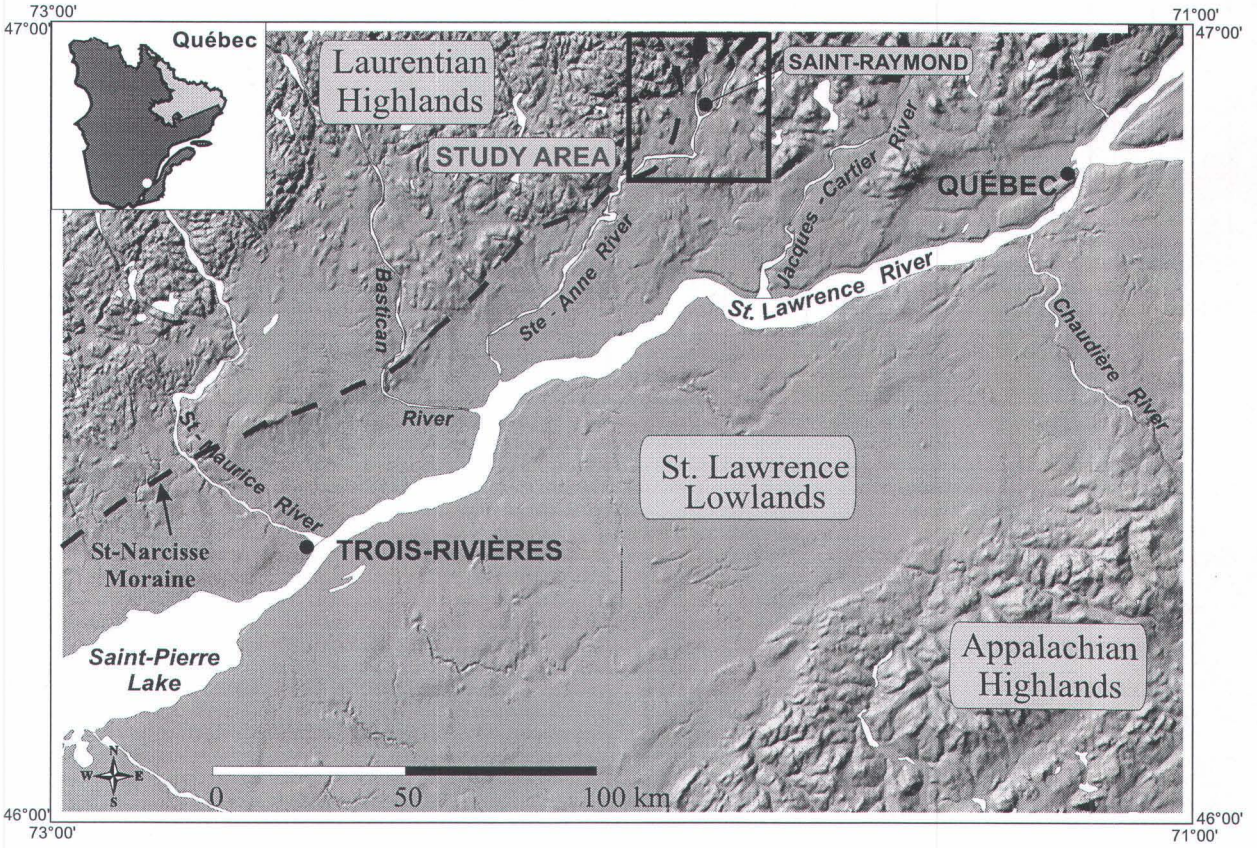


Figure 3.1 - Regional physiography and location of the study area.

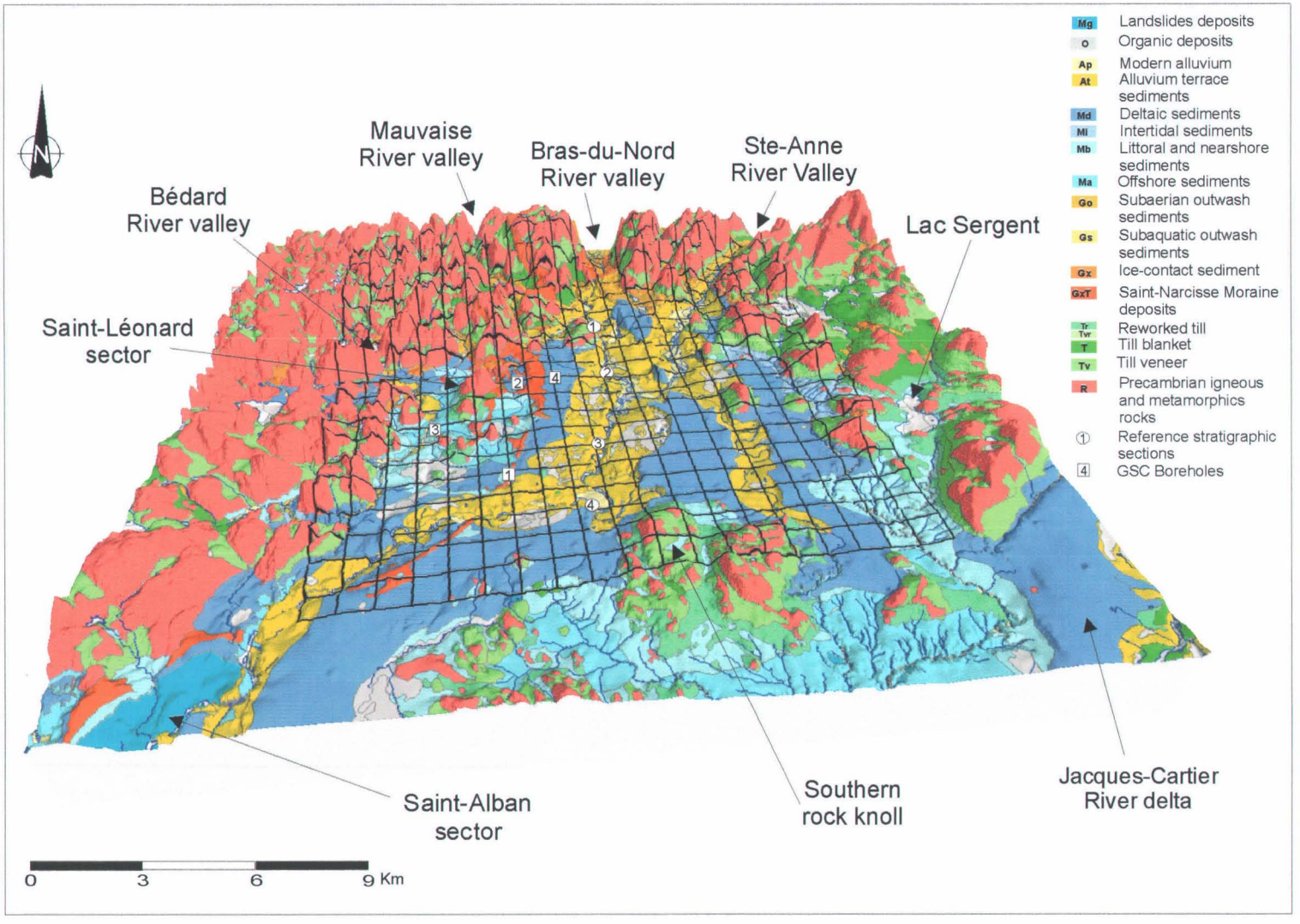


Figure 3.2 - Surficial geology draped on Digital Elevation Model of the Saint-Raymond area. Grid used for the construction of geological cross-sections of the 3D model is also shown.

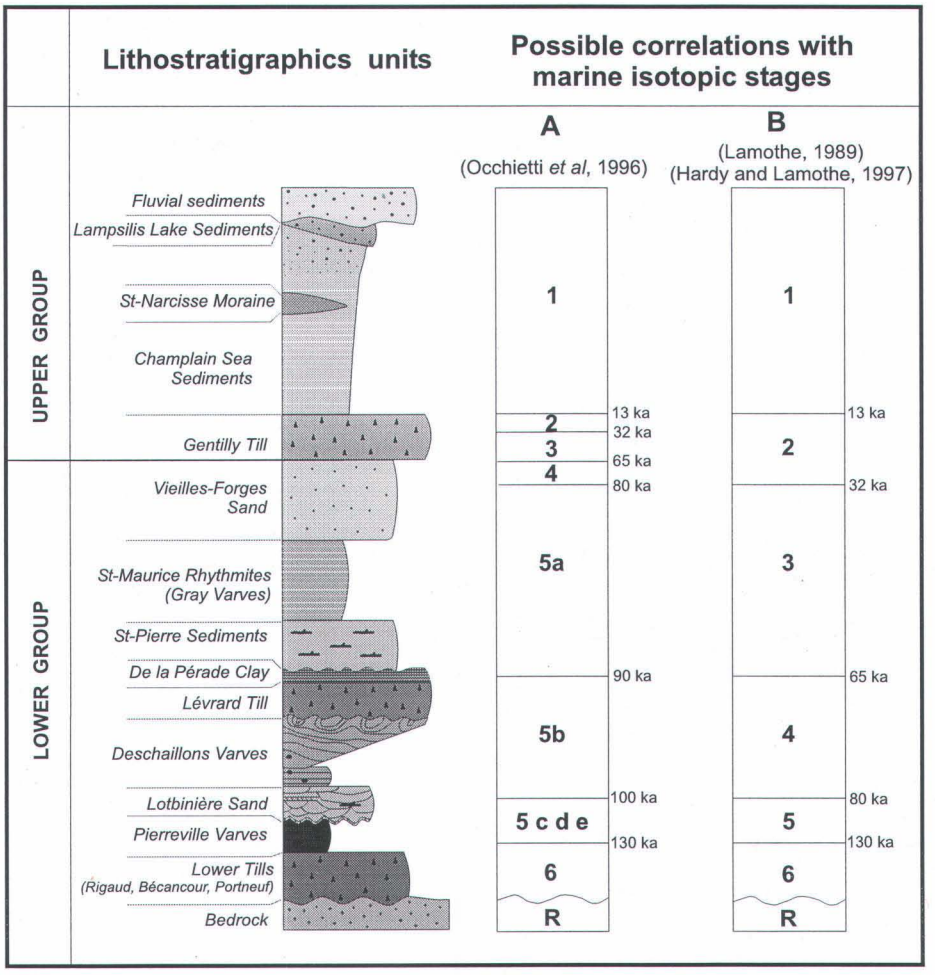


Figure 3.3 - Composite Quaternary lithostratigraphy of the St.Lawrence Lowlands and possible correlations with marine isotopic stratigraphy.

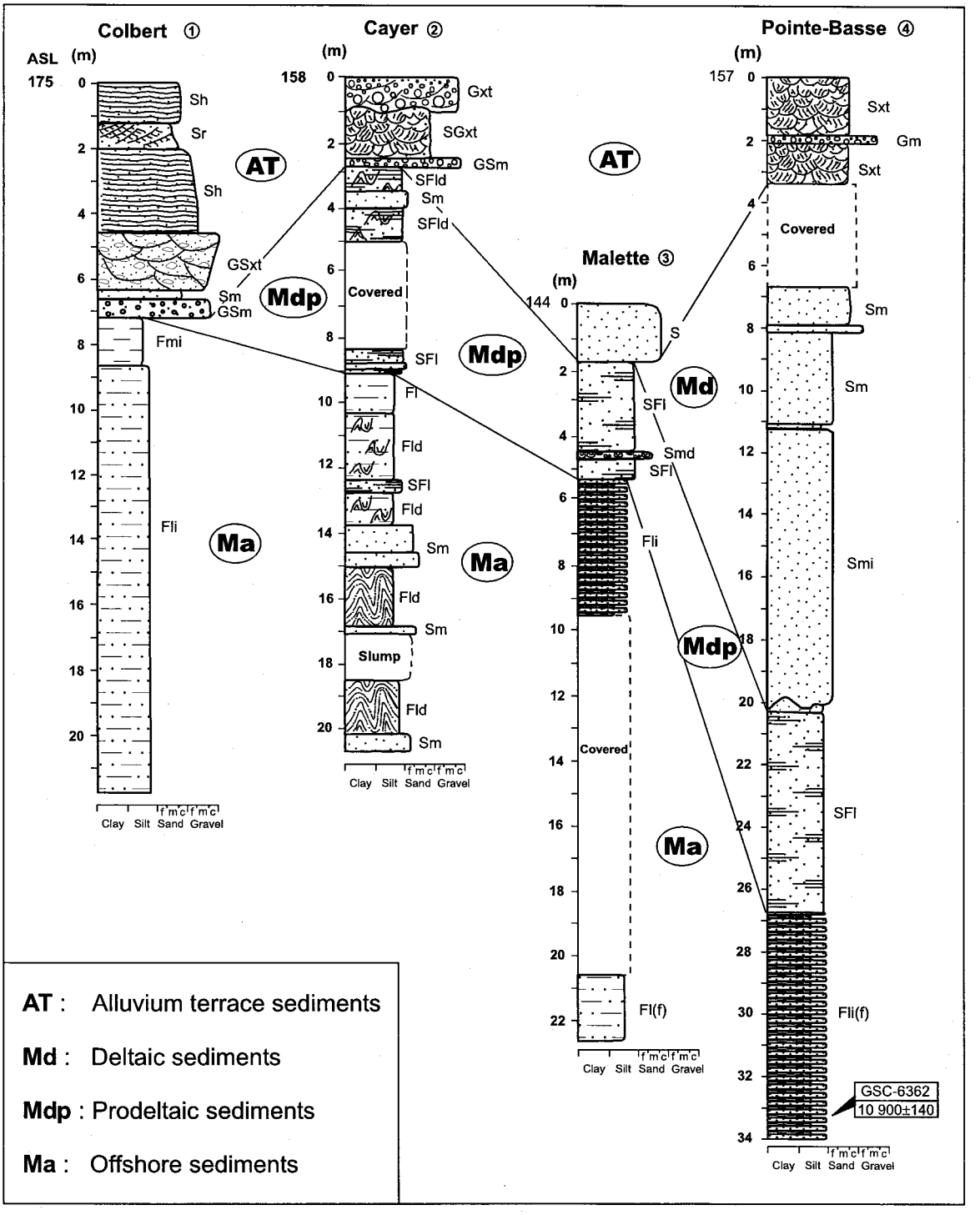


Figure 3.4 - Main stratigraphic sections of the Sainte-Anne delta (lithofacies codes are summurized in Table 1).

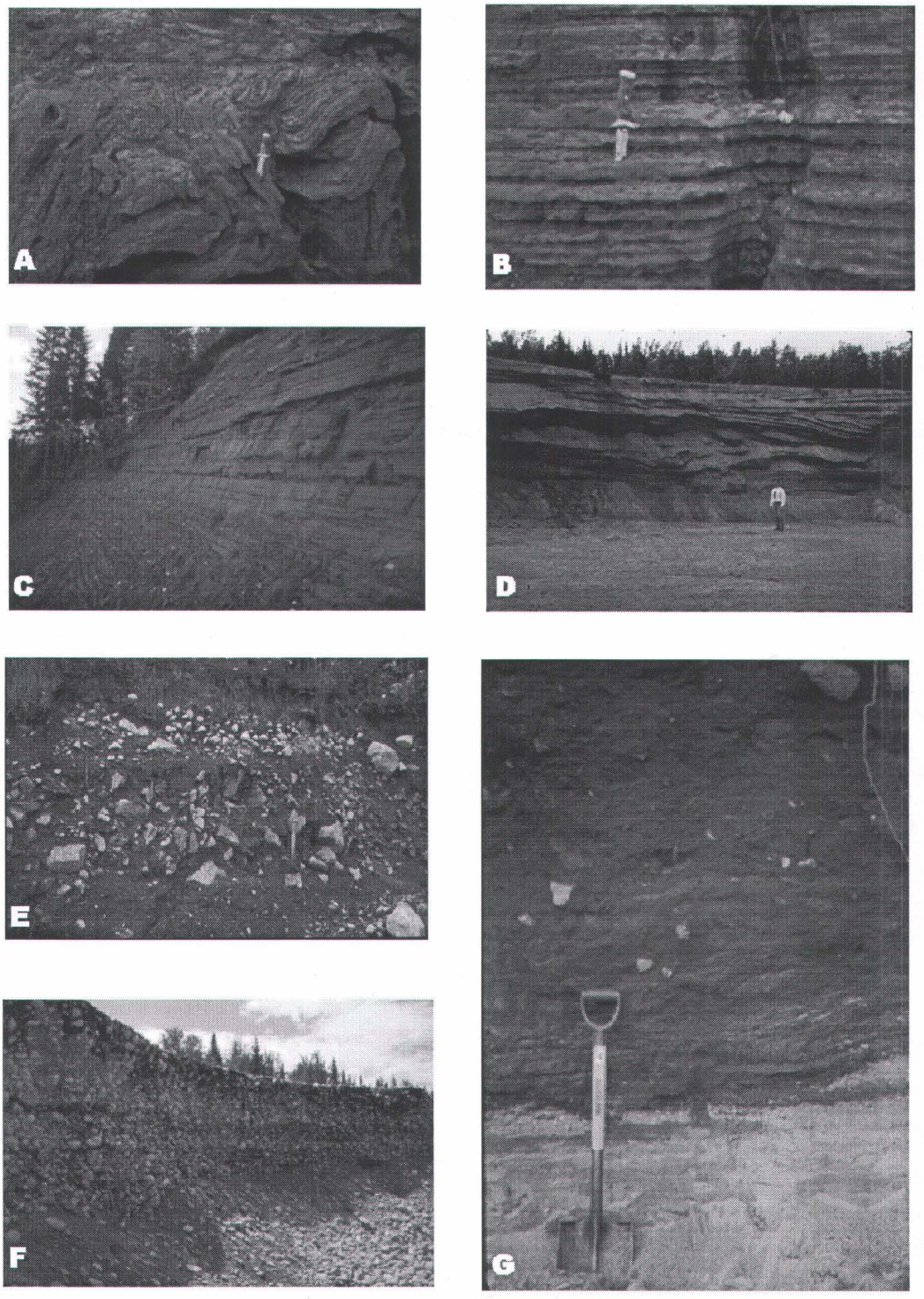


Figure 3.5 - Main lithofacies of the Saint-Raymond basin. (A) Deformed glaciomarine fine-grained mud (Fld) at the Cayer section. **(B)** Glaciomarine rhythmites (Fg(f)) at the Pointe-Basse section. **(C)** Prodeltaic silty sand (SFl) overlying glaciomarine rhythmites (Fg(f)) at the Pointe-Basse section. **(D)** Deltaic crest bar (Sxt) overlying plane-bedded sand (Sh). **(E)** Loose massive matrix sandy diamicton interpreted as supraglacial melt-out till (Dmm); notice clast angularity. **(F)** Crudely imbricated, clast supported gravel (Gc) interpreted as a glaciofluvial outwash in the upper Sainte-Anne River valley. **(G)** Sheared, massive matrix-dominated sandy diamicton (Dmmz) overlying plane-stratified sand (Sh) in the Saint-Narcisse Moraine at Saint-Léonard.

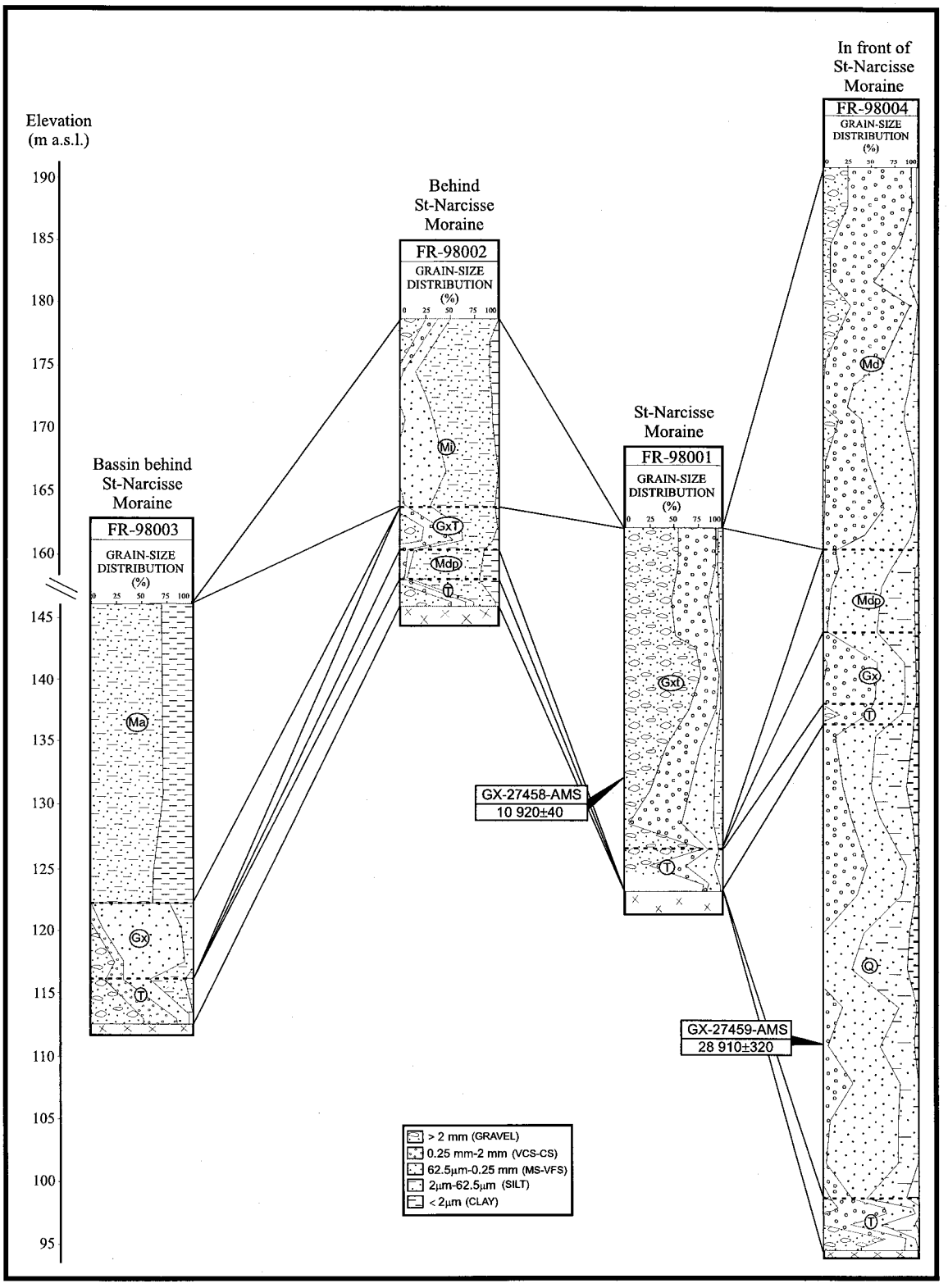


Figure 3.6 - Stratigraphic relationships between boreholes across the Saint-Narcisse Moraine in the Saint-Raymond area (Units labelled as in Figure 3.9).

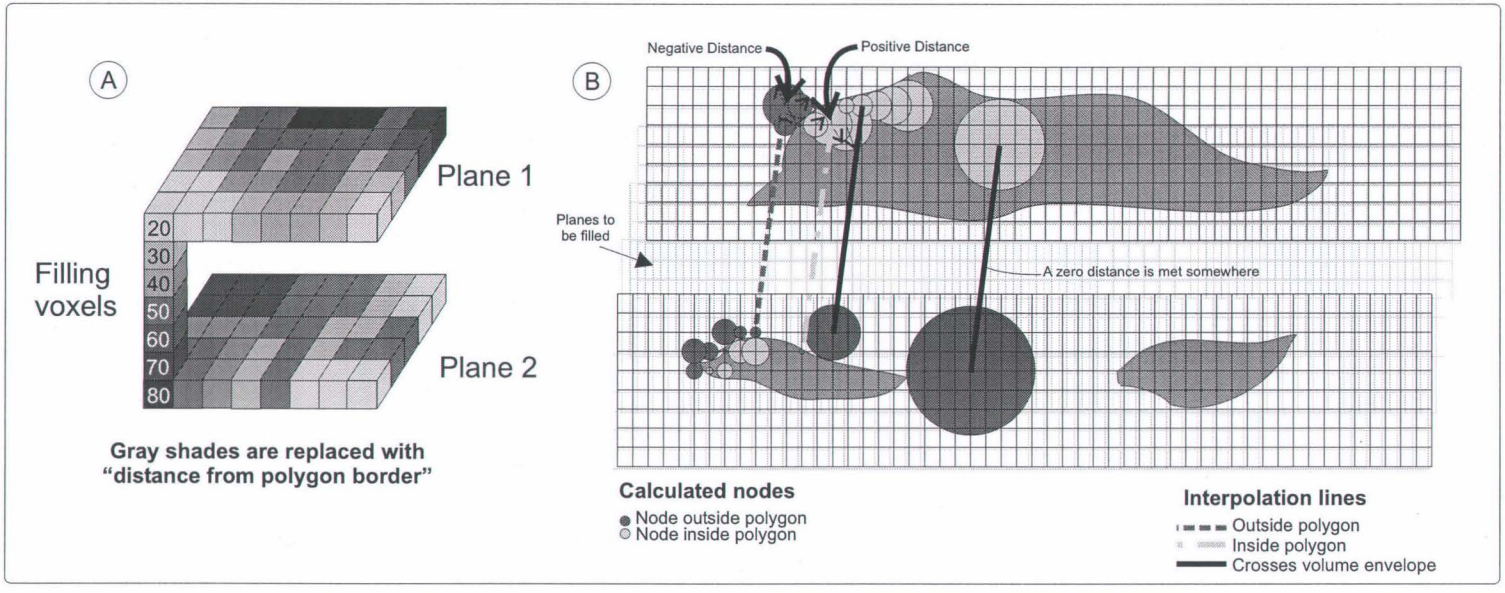


Figure 3.7 – Basis of the interpolation technique used by the GEOSOLID II software for construction of the stratigraphic 3D model.

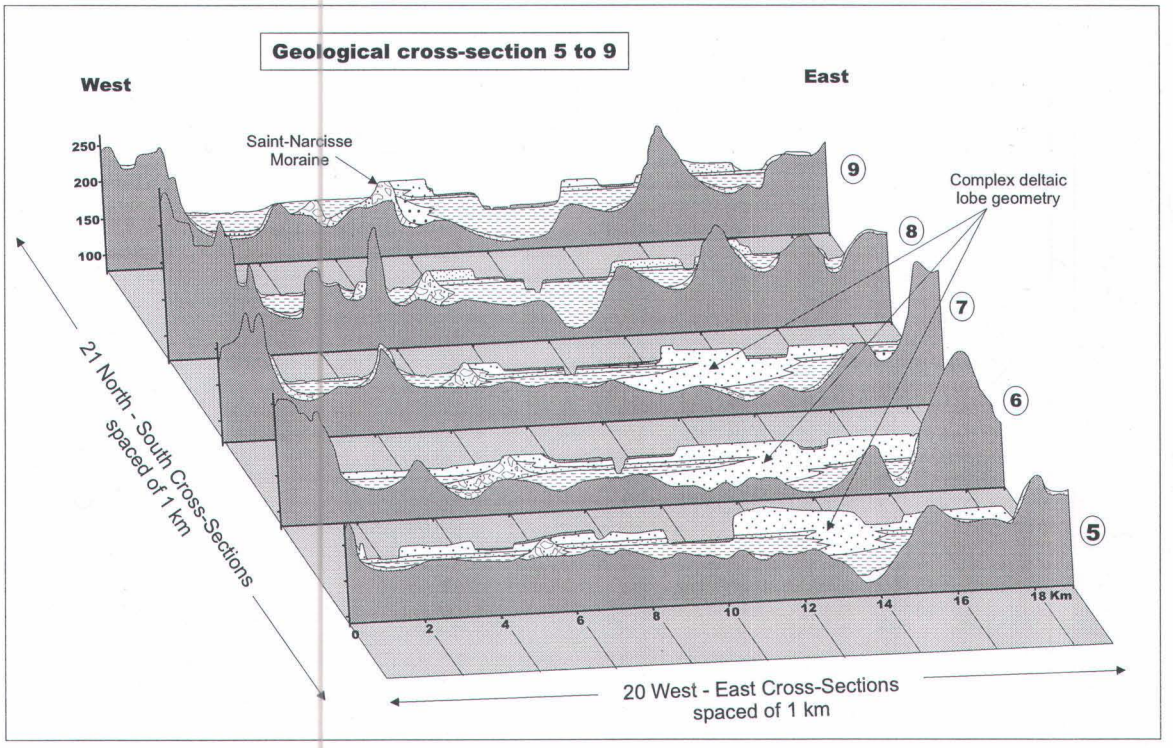


Figure 3.8 – Examples of cross-sections 5 to 9 drawn for the elaboration of the 3D model. These cross-sections show the complex subsurface geometry of deltaic lobes and the relationships between different geological units.

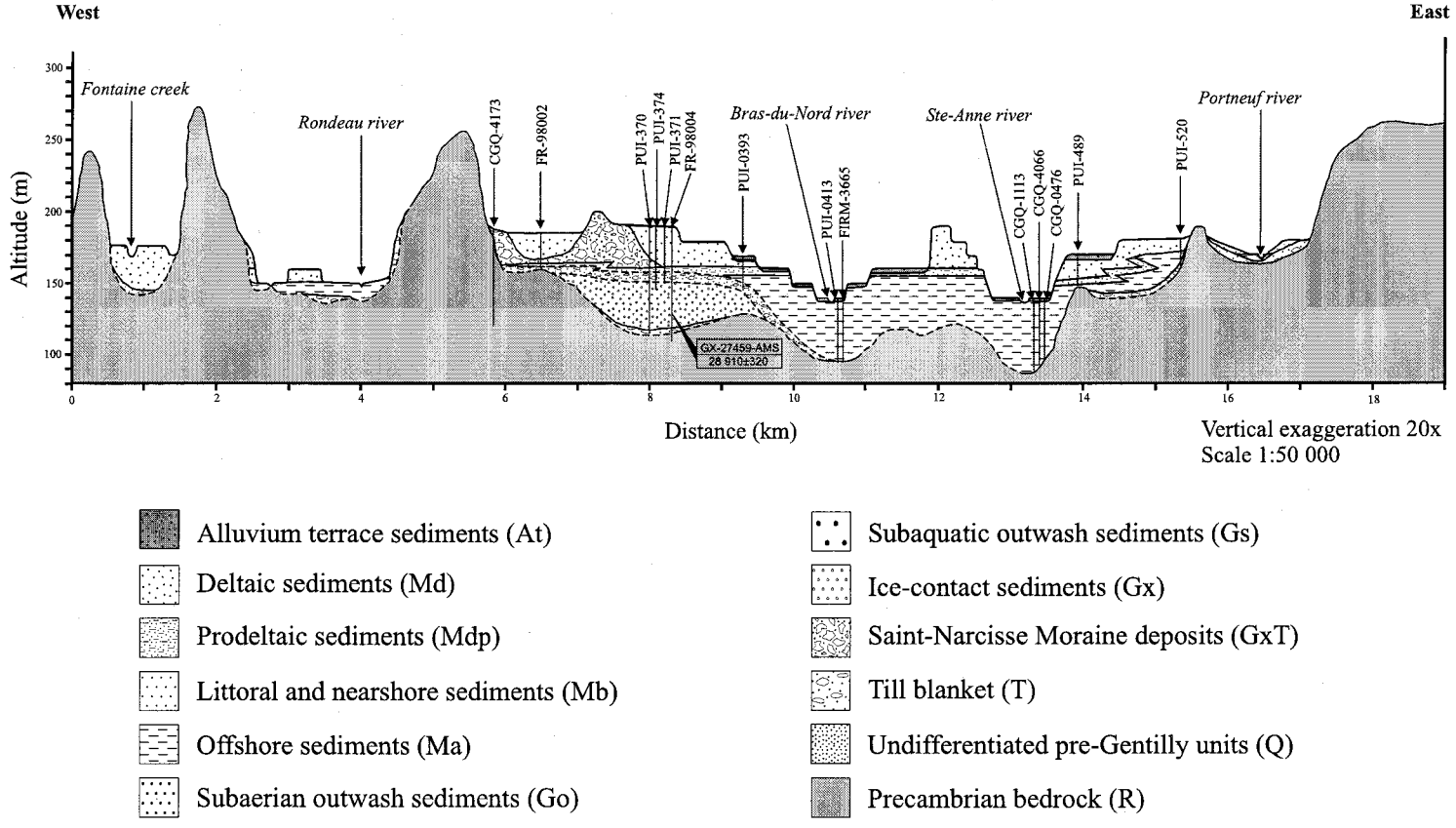


Figure 3.9 – Transverse stratigraphic cross-section of the Saint-Raymond basin showing the architecture of the Saint-Narcisse Moraine and pre-Gentilly sediments.

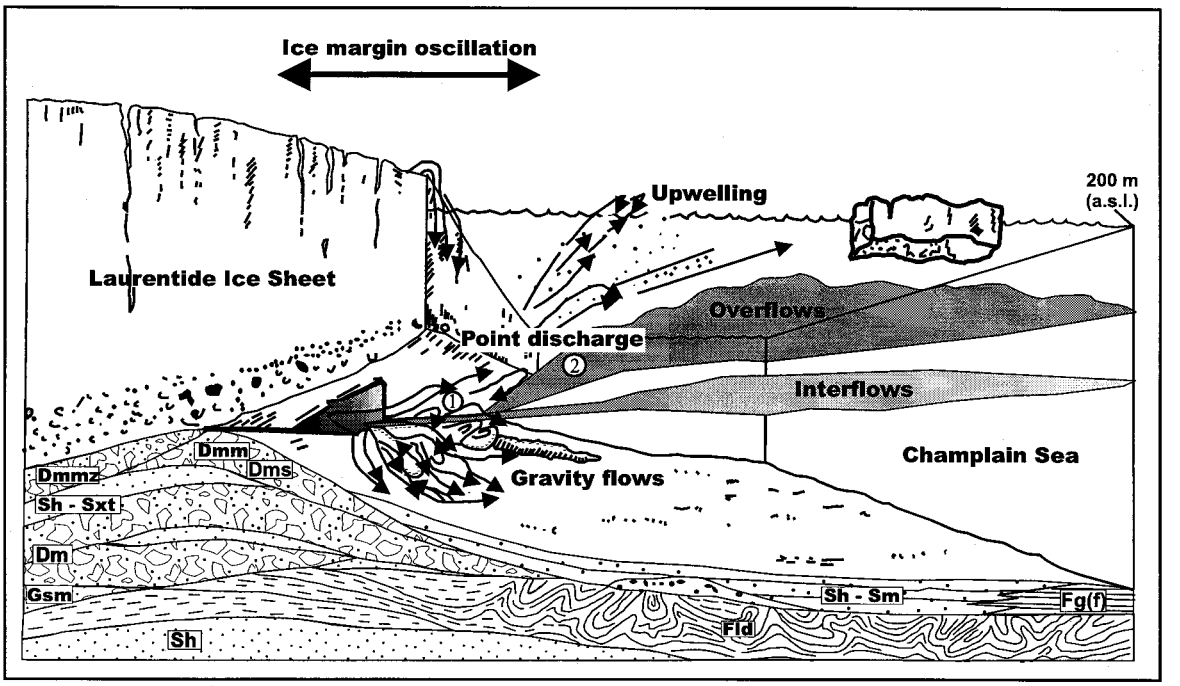


Figure 3.10 - Conceptual model of the Saint-Narcisse Moraine subaquatic sedimentation at the contact of the Champlain Sea and the Laurentide Ice Sheet in the Portneuf area (modified from Sharpe, 1988) (1-zone of flow establishment 2-zone of established flow).

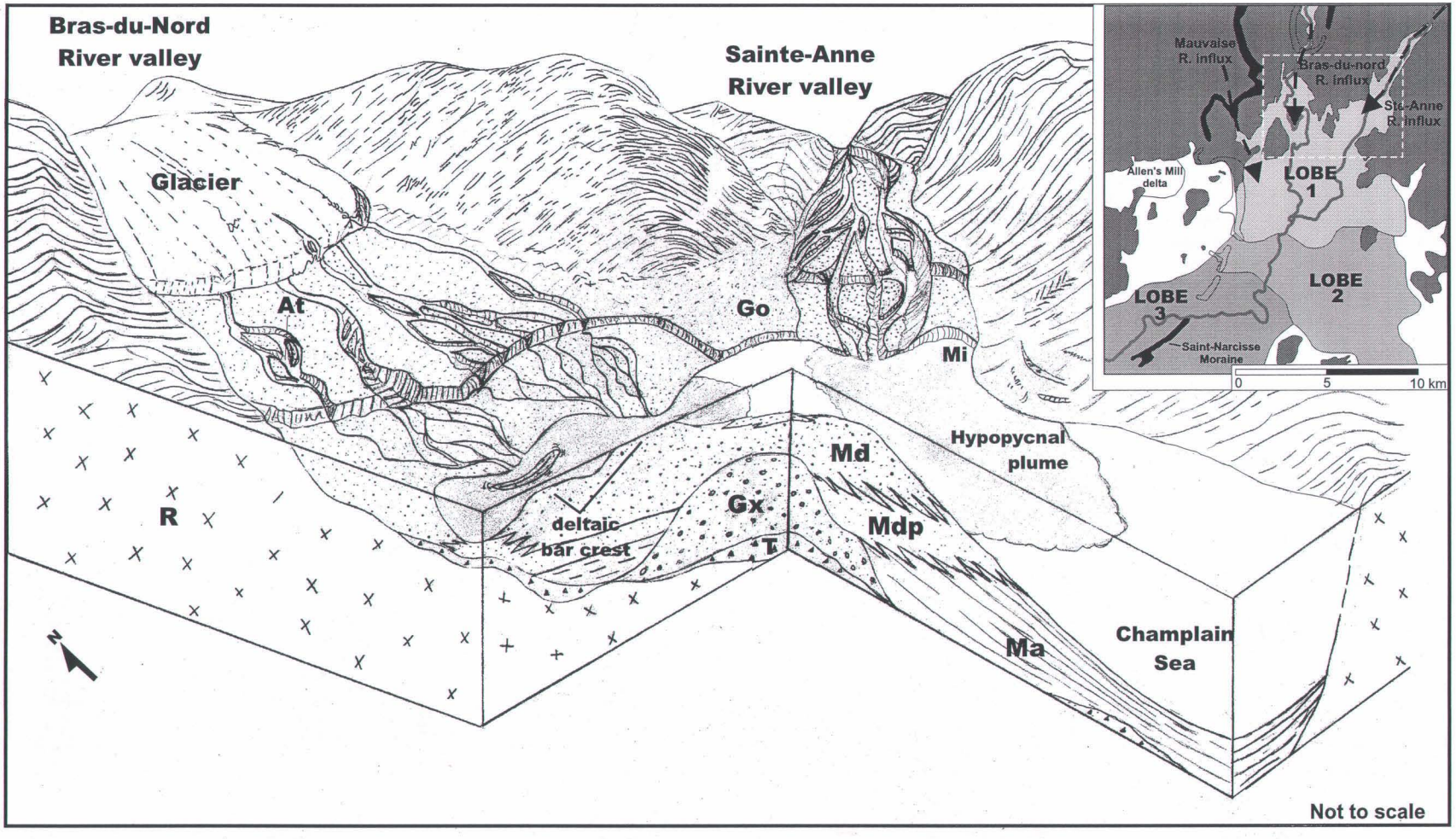


Figure 3.11 – Depositional model for the first deltaic lobe of the Saint-Anne River showing the architecture of the main facies assemblages. Insert shows the areal extent of the three deltaic lobes in the study area along with the position of the Saint-Narcisse Moraine (Md : Deltaic sand and gravel; Mdp : Prodeltaic silty sand; Ma: Offshore silty clay; Mi : Intertidal silt; T : Till blanket; Gx : Ice-contact gravel and sand; Go : Glacioflucial sand and gravel; At : Alluvial terrace sediments; R : Precambrian bedrock).

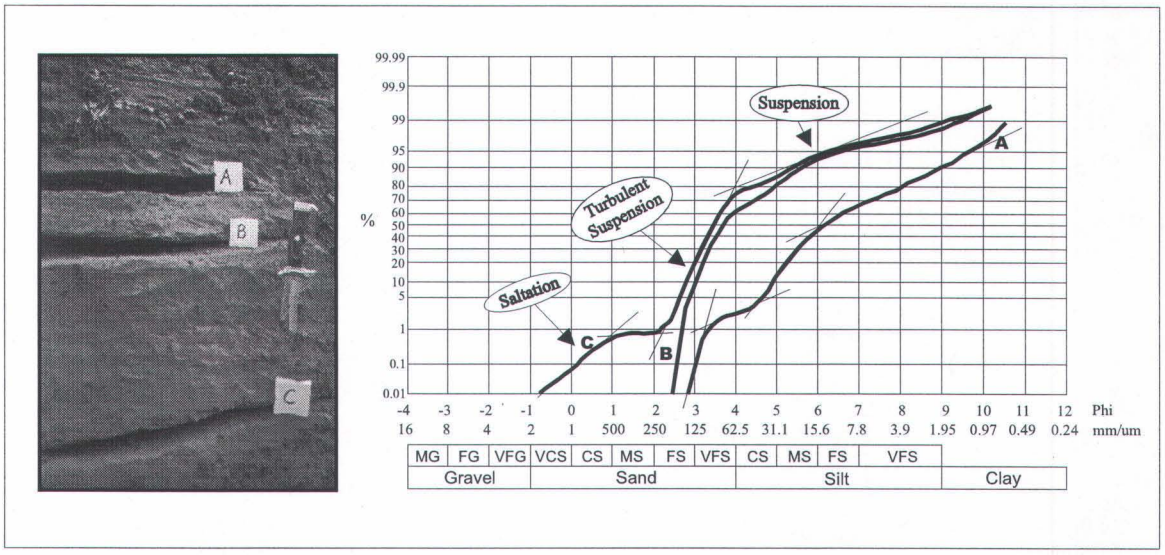


Figure 3.12 – Grain-size distribution of three layers from prodeltaic silty-sand unit. Different grain size subpopulations are shown, along with the inferred mode of sediment transport.

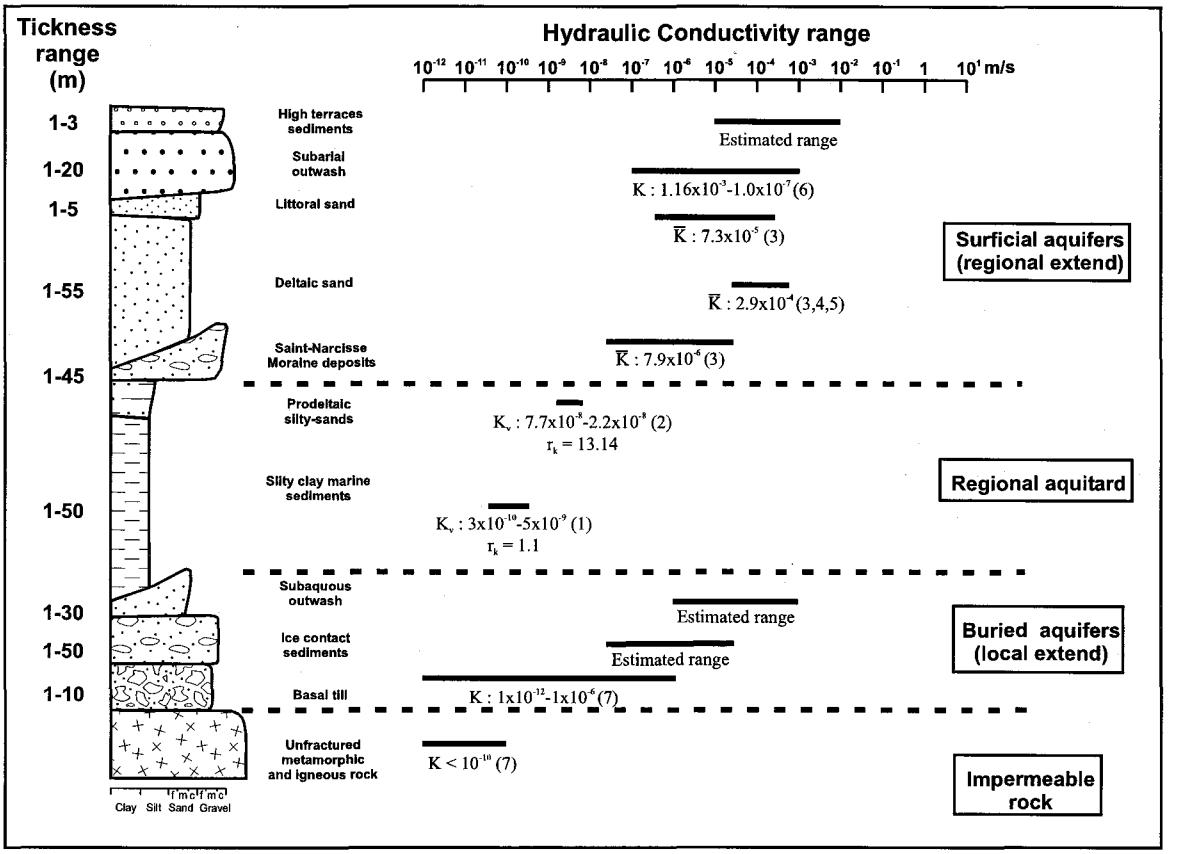


Figure 3.13 - Composite hydrostratigraphic sequence in the Saint-Raymond Basin; hydraulic conductivity values compiled from various sources (The number in parenthesis refers to the source of data : (1) Leroueil *et al.*, 1983; (2) Girard *et al.*, this paper; (3) Fagnan *et al.*, 1998; (4) Martel *et al.*, 2000; (5) Paradis, 2000; (6) Stephenson *et al.*, 1988; (7) Freeze and Cherry, 1979).

CHAPITRE 4 – Conclusions générales et recommandations

Les différents travaux effectués dans le cadre de ce mémoire ont permis d'établir le cadre hydrostratigraphique de la région de Saint-Raymond de même que de définir de façon tridimensionnelle l'architecture des différents corps sédimentaires du bassin de Saint-Raymond. Une approche originale intégrant des données géologiques multi-sources très discontinues couplée à une analyse de bassin mettant de l'avant diverses investigations géologiques a été effectuée pour construire ce modèle hydrostratigraphique. Ce modèle représente une vue généralisée de la géologie de subsurface, cette vue étant tributaire autant de la qualité et de la distribution des données utilisées que de la disponibilité de modèles sédimentologiques adéquats.

Sans contredit, la qualité intrinsèque d'un modèle dépend de la qualité des informations de base qui ont servi à l'élaborer. Dans le cas présent, une grande partie des informations provient du système hydrogéologique du ministère de l'Environnement du Québec, communément désigné par le vocable « banque des puisatiers ». Cette base de données constitue vraisemblablement la plus importante source de données stratigraphiques de subsurface disponible au Québec. La qualité de l'information contenue dans cette base de données est par contre relativement inégale et peu fiable. De plus, une quantité significative de forages possède des descriptions stratigraphiques très sommaires (ex. dépôt ou terre sur roc) et fréquemment ambiguës. Il va de soi que cette base de données ne peut être utilisée seule pour établir le cadre stratigraphique quaternaire d'une région donnée. Cependant, le présent mémoire démontre que l'utilisation de ces données s'applique très bien à la définition d'un cadre hydrostratigraphique régional. Par exemple, il est possible de dégager l'altitude des contacts entre les sédiments granulaires (ex : sable et graviers deltaïques), les sédiments fins (sédiments prodeltaïques et silt et argile marine) et le substratum rocheux, à partir des ces données. Ces dernières, bien qu'indispensables, ne sont toutefois pas suffisantes pour produire un modèle géologique fiable. Par conséquent, des données d'une fiabilité supérieure (forages de firme privées, d'Hydro-Québec et ministère des Ressources naturelles, levés de terrain, etc.) ont dû être mises en relation avec les informations provenant des puisatiers.

Un des éléments contraignant à l'utilisation de la banque de données des puisatiers est que la répartition géographique des forages est très inégale. En effet, les données stratigraphiques disponibles sont habituellement localisées près des territoires habités ou le long des principales

voies d'accès et de communication. Des secteurs ayant une très forte densité d'information apparaissent donc au détriment du reste du territoire pratiquement vide de données. Les travaux de terrain effectués dans le cadre de ce mémoire ont, par conséquent, principalement été effectués dans les secteurs exempts de données.

Le modèle élaboré dans le cadre de ce mémoire n'a pas fait l'objet d'une validation exhaustive. Bien que coûteux et fastidieux, des tests permettant de valider le modèle devraient néanmoins être entrepris. Les deux principales avenues de validation sont des levés géophysiques et des forages. Une couverture géophysique continue suivant le maillage utilisé pour les différentes coupes serait idéale, mais de tels levés étaient irréalisables dans le cadre du présent mémoire. En plus de valider les informations contenues dans les différents forages et d'augmenter la quantité d'information, ces levés auraient permis de mieux évaluer la géométrie des différentes unités de subsurface, de préciser l'existence de corps sableux perméables sous les séquences argileuses, et surtout, d'évaluer avec plus de précision la topographie du socle rocheux. Par exemple, dans le sous-bassin de Saint-Léonard, la technique de sismique réfraction serait la méthode idéale à utiliser étant donné l'épaisse séquence argileuse. Par ailleurs, le géoradar constituerait sans aucun doute la méthode de choix pour la caractérisation de la Moraine de Saint-Narcisse. L'utilisation du géoradar est cependant délicate lorsque des sédiments fins sont présents puisqu'ils contribuent à atténuer les signaux géophysiques.

D'autres tests de validité pourraient être effectués à l'aide de forages dans des secteurs où l'interprétation est plus délicate. Par exemple, un forage pourrait très bien être effectué au contact entre deux lobes deltaïques afin de mieux discerner les relations verticales en subsurface. De plus, un forage pourrait être positionné au sud de Saint-Raymond, dans le secteur de la rivière des Sept-Îles, afin de confirmer la présence et la nature des corps sableux présents sous les sédiments marins. De plus, afin de confirmer les relations altitudinales entre les différentes unités hydrostratigraphiques illustrées dans le modèle, des travaux d'arpentage des contacts stratigraphiques pourraient être effectués dans les coupes facilement accessibles. Ainsi, ces travaux permettraient de mieux comprendre la dynamique de l'écoulement des eaux souterraines et de mieux identifier les liens hydrauliques entre la nappe de surface et les différents cours d'eau.

En plus de valider le modèle, ces travaux de forage et de géophysique permettraient de répondre aux questions restées en suspend dans ce mémoire. Par exemple, le potentiel hydrogéologique de la Moraine de Saint-Narcisse demeure encore incertain. Cette incertitude pourrait être clarifiée par l'installation de puits d'observation à partir desquels pourraient être effectués des essais de perméabilité. Du même coup, il serait intéressant de poursuivre les investigations stratigraphiques concernant l'extension en subsurface de la moraine de même que les sédiments anciens retrouvés lors des forages en aval de la moraine. Des corrélations chronostratigraphique et stratigraphiques avec les sédiments anciens actuellement connus du cadre stratigraphique quaternaire du Québec méridional pourraient alors être suggérées. Nous réalisons fort bien que même si ces travaux sont souhaitables du point de vue scientifique, ils sont très difficiles à justifier et à financer. Cependant, la meilleure connaissance et description des relations tridimensionnelles entre les unités quaternaires de la région fournit un cadre à l'intérieur duquel de nouvelles données peuvent s'intégrer et être comprises. Nos travaux fournissent donc un moyen d'interpréter les données d'études locales, études qui à leur tour pourront servir à vérifier l'interprétation fournie par nos travaux.

Enfin, cet exercise de synthèse, d'intégration, de manipulation et d'interprétation de données géoscientifiques multi-souces, démontre à quel point la construction d'un modèle géologique des formations quaternaires peut être complexe. Bien que la méthodologie employée soit relativement lourde et fastidieuse, il y a lieu de croire qu'elle puisse être appliquée à plus grande échelle. Cependant, pour ce faire, deux conditions s'imposent, soit 1 – la finalisation du développement de l'outil informatique et 2 - sa production sous une forme conviviale.

CHAPITRE 5 - Références

Alley, R.B., Meese, D.A., Shuman, C.A., Gow, A.J., Taylor, K.C., Grootes, P.M., White, J.W.C., Ram, M., Waddington, E.D., Mayewski, P.A. et Zielinski, G.A. 1993. Abrupt increase in Greenland snow accumulation at the end of the Younger Dryas event. Nature, vol. 362, p. 527-529.

Anderson, M.P. 1989. Hydrogeologic facies models to delineate large-scale spatial trends in glacial and glaciofluvial sediments. Geological Society of America Bulletin, vol. 101, p. 501-511.

Anderson, J.B. et Ashley, G.M. 1991. Glacial marine sedimentation; paleoclimatic significance; A discussion. *In* Glacial marine sedimentation; Paleoclimatic significance. *Édité par* J.B. Anderson et G.M. Ashley. Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper 261, p. 223-226.

Anderson, M. P. et Woessner, W.W. 1992. Applied Groundwater Modeling; Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, Toronto, 381 p.

Banton, O. et Bangoy, L. M. 1997. Hydrogéologie, Multiscience environnementale des eaux souterraines. Presse de l'Université du Québec / AUPELF, Sainte-Foy, 460 p.

Barnett, P.J., Sharpe, D.R., Russell, H.A.J., Brennand, T.A., Gorrell, G., Kenny, F. and Pugin, A. 1998. On the origin of the Oak Ridges Moraine. Journal canadien des Sciences de la Terre, vol. 35, p. 1152-1167.

Béland, 1953. Geology of the Shawanigan map-area, Champlain and St-Maurice counties, Québec. Thèse de Doctorat, Université Princeton.

Berg, R.C. 1999. The use of stack-unit mapping to predict pathways of contaminant throught tertiary-age strata - A / M areas, Savannah River, SC. *In* Abstract with Programs of the Geological Society of America 1999, Annual meeting and exposition, 25-28 octobre 1999, Denver, Colorado, p. A-79.

Berg, R.C. et Shilts, W.W. 1999. Three-dimensional geologic mapping of glacial sediments: Illinois and the Central Great lakes geologic mapping coalition. *In* Abstract of the New England Intercollegiate Geological Conference 91st Annual meeting, 1-3 octobre 1999, Burlington, Vermont, p. 366-367.

Bernier, F. et Occhietti, S. 1990. Le complexe glaciaire du Cap Charles, vallée moyenne du Saint-Laurent, Québec. Géographie physique et Quaternaire, vol. 44, n° 2, p. 173-180.

Besré, F. et Occhietti, S. 1990. Les Varves de Deschaillons, Les Rythmithes du Saint-Maurice et les Rythmithes de Leclercville, Pléistocène supérieur, vallée du Saint-Laurent, Québec. Géographie physique et Quaternaire, vol. 44, n° 2, p. 181-198.

Boisvert, É. et Michaud, Y. 1998. Gestion des données de forage à l'aide d'une approche topologique : application au projet de cartographie hydrogéologique du piémont

laurentien, Québec; *In* Recherches en cours 1998-E, Commission géologique du Canada, p. 117-124.

Bolduc, A.M. 1992. Compilation cartographique et caractérisation des dépôts de surface de la région de Shawanigan – Trois-Rivières, Québec. *In* Recherches en cours, Partie D, Commission géologique du Canada, Étude 92-1D, p. 155-164.

Bolduc, A. M. 1999a. Géologie des formations superficielles, région de Trois-Rivières, Québec. Commission géologique du Canada, Dossier public 2994, Échelle 1:50 000.

Bolduc, A. M. 1999b. Géologie des formations superficielles, région de Shawinigan, Québec. Commission géologique du Canada, Dossier public 2995, Échelle 1:50 000.

Bolduc, A.M., Parent, M., Michaud, Y., Doiron, A. et Boisvert, É. 1997. Architecture et mise en place de la Moraine de Saint-Narcisse dans la région de Portneuf (Québec). *In* 8ième Rencontre bisannuelle, Association canadienne pour l'étude du Quaternaire, 22-25 mai 1997, Montréal, Québec, p. 7.

Bourque, É., Michaud, Y., Lefebvre, R. et Boisvert, É. 1998. Cartographie hydrogéologique régionale du piémont laurentien dans la MRC de Portneuf : hydrogéochimie des eaux souterraines. Commission géologique du Canada , Dossier public 3664-b.

Brandon, C. 1999. Three-dimensional mapping of Quaternary glacial successions in areas of Urban growth in NE Illinois. *In* Abstract with Programs of the Geological Society of America 1999, Annual meeting and exposition, 25-28 octobre 1999, Denver, Colorado, p. A-78.

Brett, A.D., Hill, A. et Taylor, C.J. 1997. A Method of 3D Surface Correspondence for Automated Landmark Generation. *In* 8th British Machine Vision Conference Proceeding, Septembre 1997, Colchester, England, p. 709-711.

Cloutier, M., Parent, M. et Bolduc, A. 1997. Géologie des formations superficielles, région de Saint-Marc-des-Carrières, Québec. Commission Géologique du Canada, Dossier public 3544, Échelle 1: 100 000.

Côté, P. 1998. Caractérisation des unités aquifères de la MRC de Portneuf par des méthodes géophysiques. Essai de Baccalauréat, Département de géologie et de génie géologique, Québec, Université Laval, 71 p.

Croosen, K., J. 1991. Structural control of deposition by Pleistocene tidewater glaciers, Gulf of Maine. *In* Glacial marine sedimentation; Paleoclimatic significance. *Edité par* J.B. Anderson et G.M. Ashley. Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper 261, p. 127-135.

De Marsily, G., Delay, F., Teles, V. et Schafmeister, M.T. 1998. Some current methods to represent the heterogeneity of natural media in hydrogeology. Hydrogeology Journal, vol 6, p. 115-130.

Denis, R. 1972. Commentaires relatifs à une coupe transversale de la Moraine de Saint-Narcisse à St-Gabriel-de-Breton, Québec. *In* La géographie internationale 1972. *Édité par* W.P.

Adams et F.M. Helleiner, 22e Congrès International de Géographie, Montréal. University of Toronto Press, Toronto, vol. 1, p. 79-82.

Denis, R. 1974. Late Quaternary geology and geomorphology in the Lake Maskinongé area, Québec. Université d'Uppsala, Département de géographie physique, Suède, Rapport 28, 125 p.

Denis, R. 1976. Région de Saint-Gabriel-de-Brandon. Ministère des Richesses naturelles, Direction Générale des Mines, Québec. RG-168, 56 p.

Denis, R. et Prichonnet, G. 1973. Aspects du Quaternaire dans la région au nord de Joliette. *In* Le Quaternaire du Québec, 2e Colloque de l'Association Québécoise pour l'étude du Quaternaire, Montréal, livret-guide d'excursion, 54 p.

Dionne, J.C. et Occhietti, S. 1996. Aperçu du Quaternaire à l'embouchure du Saguenay, Québec. Géographie physique et Quaternaire, vol. 50, n°1, p. 5-34.

Dionne, J.C., Jurdant, M. et Beaubien, J. 1968. Moraines frontales dans le Parc des Laurentides et régions avoisinantes. *In* Annales de L'ACFAS (année 1967-1968), section géomorphologie et Quaternaire, vol. 35, p. 130-131.

Dreimanis, A. 1977. Correlation of Wisconsinian glacial events between the eastern Great Lakes and the St. Lawrence Lowlands. Géographie physique et Quaternaire, vol. 31, nos 1-2, p. 37-51.

Dubois, J.-M.M. et Dionne, J.-C. 1985. The Québec North Shore Moraine System : A major feature of Late Wisconsin deglaciation. Geological Society of America, Special Paper 197, p. 125-133.

Dufour, J. 1969. Géomorphologie du bassin de Saint-Raymond : sa portée sur les modes d'utilisation du sol. Mémoire de maîtrise, Québec, Université Laval, 211 p.

Elson, J. A. 1962. Pleistocene geology of the St. Lawrence Lowland (Ste. Therese - Ste. Ursule Falls area). *In* Guide Book of the 54th New England Intercollegiate Geological Conference, 5-7 Octobre 1962, Université McGill, Montreal, p. 15-24.

Elson, J.A. 1988. The Champlain Sea: Evolution of concepts, and bibliography. *In* The Late Quaternary Develpment of the Champlain Sea Basin. *Edité par* N.R. Gadd, Association Géologique du Canada, Special paper 35, p 1-13.

Evenson, E.B., Mickelson, D.M. et Farrand, W.R. 1977. Stratigraphy and correlation of the late Wisconsinien glacial events in the lake Michigan basin. Géographie physique et Quaternaire, vol. 31, nos 1-2, p. 53-59.

Eyles, N., Eyles, C. et Miall, A.D. 1983. Lithofacies types and vertical profile models; an alternative approach to the description and environmental interpretation of glacial diamict and diamictite sequences. Sedimentology, vol. 30, p. 393-410.

Faessler, C. 1948. L'extension maximum de la Mer Champlain au nord du Saint-Laurent, de Trois-Rivières à Mosie. Université Laval, Québec, Géologie et Minéralogie, Contribution n° 88, p. 16-28.

Fagnan, N. 1998. Cartographie hydrogéologique régionale et vulnérabilité des aquifères de la MRC de Portneuf. Mémoire de maîtrise, Québec, INRS-Géoressources, 215 p.

Fagnan, N., Michaud, Y., Lefebvre, R., Boisvert, É., Parent, M., Martel, R., Paradis, D. et Larose-Charrette, D. 1998. Cartographie hydrogéologique régionale du piémont laurentien dans la MRC de Portneuf: hydrostratigraphie et piézométrie des aquifères granulaires de surface. Commission géologique du Canada, Dossier public #3664-b.

Fagnan, N., Bourque, É., Michaud, Y., Lefebvre, R., Boisvert, É., Parent, M. et Martel, R. 2000. Hydrogéologie des complexes deltaïques sur la marge nord de la Mer de Champlain. Hydrogéologie, BRGM.

Fenton, M.M. 1999. Use of three-dimensional mapping for surficial aquifer delineation and management : sand River region (NTS 73L), Alberta, Canada. *In* Abstract with Programs of the Geological Society of America 1999, Annual meeting and exposition, 25-28 octobre 1999, Denver, Colorado, p. A-82.

Ferland, P. et Occhietti, S. 1990. L'Argile de la Pérade : Nouvelle unité marine antérieure au Wisconsinin supérieur, Valléee du Saint-Laurent, Québec. Géographie physique et Quaternaire, vol. 44, n° 2, p. 159-172.

Fogg, G.E, Noyes, C.D et Carle, S.F. 1998. Geologically based model of heterogeneous hydraulic conductivity in alluvial setting. Hydrogeology Journal, vol. 6, p. 131-143.

Fraser, G.S. and Bleuer, N.K. 1987. Use of facies models as predictive tools to locate and characterise aquifers in glacial terrains. *In* Proceedings of the NWWA Focus Conference on Midwestern Ground Water Issues, Dublin, Ohio, National Water Well Association, p. 123-143.

Freeze, R.A. et Witherspoon, P.A. 1966. Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow: 1. Analytical and Numerical Solutions to the Mathematical Model. Water Resources Research, vol. 2, n° 4, p. 641-656.

Freeze, R.A. et Witherspoon, P.A. 1967. Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow: 2. Effect of Water-Table Configuration and Subsurface Permeability Variation. Water Resources Research, vol. 3, n° 2, p. 623-634.

Freeze, R.A. et Witherspoon, P.A. 1968. Theoretical Analysis of Regional Groundwater Flow: 3. Quantitative Interpretations. Water Resources Research, vol. 4, n° 3, p. 581-590.

Freeze, A.R. et Cherry, J.A. 1979. Groundwater. Prentice-Hall, New-Jersey, 604 p.

Gadd, N.R., 1955. Pleistocene geology of the Bécancour map area, Québec. Thèse de doctorat, Urbana, Illinois, Université d'Illinois, 181 p.

Gadd, N.R 1971. Pleistocene Geology of the St. Lawrence Lowland. Commission géologique du Canada, Mémoire 359, 153 p.

Gadd, N.R. et Karrow, P.F. 1959. Surficial Geology of Trois-Rivières area, Québec. Commission géologique du Canada, carte 54-1959.

Gadd, N.R., McDonald, B.C. et Shilts, W.W. 1972. Deglaciation of Southern Québec. Commission géologique du Canada, Paper 71-47, 19 p.

Grenier, C. et Denis, R. 1974. Étude hydrogéomorphologique dans la région du lac Maskinongé, Québec. Journal canadien des Sciences de la Terre, vol. 11, n° 6, p.733-754.

Guilbault, J.P., 2000. Analyse micropaleontologique d'échantillons de forage quaternaires de la région de Saint-Raymond-de-Portneuf, Qc. BRAQ-Stratigraphie, Montréal, Rapport interne, 10 p.

Hardy, F. et Lamothe, M. 1997. Quaternary basin analysis using infrared stimulated luminescence on borehole cores and cuttings. Quaternary Science Reviews (Quaternary Geochronology), vol. 16, p. 417-426.

Hart, B.S. et Long, B.F. 1996. Forced regressions and lowstand deltas: Holocene Canadian examples. Journal of Sedimentary Research, vol. 66, p. 820-829.

Hill, A., Brett, A.D. et Taylor, C.J. 1997. Automatic landmark identification using a new method of non-rigid correspondence. *In* 15th Conference on Information Processing in Medical Imaging, Poultney, Vermont, p. 483-488.

Hill, P.R. et Long B. 1998. Morphodynamics and internal architecture of coastal facies during a regressive regime: Holocene analogs. *In* Field Trip B2 Guidebook.of the Geological Association of Canada -Mineralogical Association of Canada, Association Professionnel des Géologues et Géophysiciens du Québec, International Association of Hydrogeologists and Canadaian Geophysical Union Joint Annual Meeting, 21-24 mai 1998, Québec, 36 p.

Hillaire-Marcel, C. 1980. Les faunes des Mers Post-Glaciares du Québec: Quelques considérations paléoécologiques. Géographie physique et Quaternaire, vol. 34, n° 1, p. 3-59.

Hillaire-Marcel, C. et Occhietti, S. 1980. Chronology, paleogeography and paleoclimatic signifiance of late and post-glacial events in eastern Canada. Zeitschrift für Geomorphologie, vol. 24, n° 4, p. 373-392.

Hillaire-Marcel, C., Occhietti, S. et Vincent, J.-S. 1981. Sakami moraine, Quebec : A 500-km-long moraine without climatic control. Geology, vol. 9, p. 210-214.

Jorgensen, D.G. et Rosenshein, J.S. 1987. Naming aquifers. EOS Transactions of the American Geophysical Union, vol. 68, p. 207-211.

Karrow, P.F. 1957. Pleistocene geology of the Grondines map-area, Québec. Thèse de Doctorat, Université d'Illinois, 96 p.

Kempton, J.P. et Cartwright, K. 1984. Three-Dimensional Geologic Mapping : A Basis for Hydrogeologic and Land-Use Evaluations. Bulletin of the Association of Engineering Geologist, vol. 21, n° 3, p. 317-335.

Koltermann, C.E. et Gorelick, M. 1996. Heterogeneity in sedimentary deposits : A review of structure-imitating, process-imitating, and descriptive approaches. Water Resources Research, vol. 32, n° 9, p. 2617-2658.

Lambe, T.W. 1951. Soil testing for engineers. The Massachusetts Institute of Technology, John Wiley and Sons, New-York, 165 p.

Lamothe, M. 1977. Les dépôts meubles de la région de Saint-Faustin - Saint-Jovite, Québec, Cartographie, Sédimentologie et Stratigraphie. Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec à Montréal, 118 p.

Lamothe, M. 1989. A new framework for the Pleistocene stratigraphy of the St. Lawrence Lowland, southern Québec. Géographie physique et Quaternaire, vol. 43, n° 2, p. 119-129.

Lamothe, M. et Huntley, D.J. 1988. Thermoluminescence dating of late Pleistocene sediments, St.Lawrence Lowland, Québec. Géographie physique et Quaternaire, vol. 42, n° 1, p. 33-44.

Lamothe, M., Parent, M. et Shilts, W. W. 1992. Sangamonian and early Wisconsinian events in the St. Lawrence Lowland of southern Quebec, Canada. *In* The Last Interglacial-Glacial Transition in North America. *Edité par* P.U. Clark et P.D. Lea, Boulder, Colorado, Geological Society of America, Special Paper 270, p. 171-184.

Laney, R.L et Davidson, C.R. 1986. Aquifer-Nomenclature Guidelines. United States Geological Survey, Open File Report 86-534, 46 p.

Larouche, A.C. 2000. Identification des restes végétaux contenus dans cinq échantillons provenant d'un forage effectué dans le secteur de Saint-Raymond-de-Portneuf. Laboratoire de paléobiogéographie et de palynologie, Département de géographie, Université de Montréal, 9 p.

Lasalle, P. 1966. Late Quaternary vegetation and glacial history in the St. Lawrence Lowlands, Canada. Leidse Geologische Mededelingen, vol. 38, p. 91-128.

Lasalle, P. 1970. Notes on the St-Narcisse morainic system north of Quebec City. Journal canadien des Sciences de la Terre, vol. 7, p. 516-521.

Lasalle, P. 1984. Quaternary stratigraphy of Québec: A review. *In* Quaternary Stratigraphy of Canada . A Canadian Contribution to IGCP Project 24. *Édité par* R.J. Fulton, Commission géologique du Canada, Paper 84-10, p. 155-171.

Lasalle, P. et Rondot, J. 1967. New ^{14}C dates from the Lac St-Jean area, Québec. Journal canadien des Sciences de la Terre, vol. 4, n° 3, p. 568-71.

Lasalle, P., Hardy, L. et Poulin, P. 1972. An Ice Frontal Position in the Northwest Part of the Parc des Laurentides, and Northeast of Quebec City. Ministère des Richesses Naturelles du Québec, Direction générale des Mines, Rapport S-135, 8 p.

Lasalle, P. et Elson, J.A. 1975. Emplacement of the St-Narcisse moraine as a climatic event in eastern Canada. Quaternary Research, vol. 5, p. 621-625.

Lasalle, P. et Shilts, W. W. 1993. Younger Dryas-age readvance of Laurentide ice into the Champlain Sea. Boreas, vol. 22, n° 1, p. 25-37.

Laverdière, C. et Courtemanche, A. 1959. La géomorphologie glaciaire de la région du Mont-Tremblant. Revue canadienne de géographie, vol. 13, n^{os} 3-4, p. 102-134.

Laverdière, C. et Courtemanche, A. 1960. La géomorphologie glaciaire de la région du Mont-Tremblant. Cahiers de Géographie de Québec, n° 9, p. 5-32.

Leroeuil, S., Tavenas, F. et Le Bihan, J.P. 1983. Propriétés caractéristiques des argiles de l'est du Canada. Journal canadien de Géotechnique, vol. 20, p. 681-705.

Mackiewicz, N.E., Powell, R.D., Carlson, P.R. et Molnia, B.F. 1984. Interlaminated ice-proximal glacimarine sediments in Muir Inlet, Alaska. Marine Geology, vol. 57, p. 113-147.

Martel, R., Parent, M., Lefebvre, R., Carrier, M.-A., Paradis, D., Mailloux, M., Hardy, F., Michaud, Y. et Boutin, A. 2000. Caractérisdation complémenatire des contextes géologiques et hydrogéologiques des terrains du CRDV et de l'USS Valcartier, Rapport final- Phase I. Rapport interne, INRS-Géoressources, 124 p.

Mawdsley, J.B. 1927. La région de St-Urbain, district de Charlevoix, Québec, Commission géologique du Canada, Mémoire 152, 58 p.

Maxey, G.B. 1964. Hydrostratigraphic units. Journal of Hydrology, vol. 2, p. 124-129.

Miall, A.D. 1977. A review of the braided river depositional environment. Earth Science Review, vol. 13, p. 1-62.

Michaud, L. 1990. Structure d'un lobe deltaïque en milieu regressif. Mémoire de maîtrise, Rimouski, Université du Québec à Rimouski, 209 p.

Michaud, Y., Fortier, R, Parent, M. et Pilon, J. 1997. L'utilisation du géoradar et des méthodes électriques pour la cartographie des formations aquifères du piémont laurentien, Québec. *In* Recherches en cours 1997-E, Commission géologique du Canada, p. 73-82.

Michaud, Y., Lefebvre, R., Fagnan, N., Parent, M., Martel, R., Bourque, É., Bolduc, A., Boisvert, É., Bolduc, A.M., Paradis, D., Murat, V., Girard, F., Larose-Charette, D., Fortier, R., Therrien, R., Vitali, F. et Savard, M.M. 1999. Rapport d'activités du projet piémont laurentien. Rapport d'étape soumis au Comité d'hydrogéologie de la Commission géologique du Canada, 30 p.

Ministère de l'Environnement du Québec, 1999. La gestion de l'eau au Québec, Document de consultation publique, Gouvernement du Québec, 71 p.

Mott, R.J. 1977. Late-Pleistocene and Holocene palynology in southearstern Québec. Géographie physique et Quaternaire, vol. 31, n^{os} 1-2, p. 139-149.

Mott, R.J., Douglas, R.G., Stea, R. et Occhietti, S. 1986. Late-glacial climatic oscillation in Atlantic Canada equivalent to the Allerθd/Younger Dryas. Nature, vol. 323, p. 247-250.

Muller, N. 1997. Application des méthodes électriques à l'exploration hydrogéologique, MRC de Portneuf. Rapport de stage de maîtrise, Département de Physique et Applications, Université Joseph Fourier Gronoble I, 32 p.

Murat, V. 2000. Étude comparative des méthodes d'évaluation de la vulnérabilité des aquifères à la pollution: Applications aux aquifères granulaires du piémont laurentien. Mémoire de maîtrise, Québec, INRS-Géoressources.

Occhietti, S. 1972. Moraine de poussée valders (dryas supérieur) à Saint-Narcisse, Québec. *In* La géographgie internationale 1972. *Édité par* W.P. Adams et F.M. Helleiner, 22^{e} Congrès International de Géographie, Montréal. University of Toronto Press, Toronto, vol. 1, p. 117-119.

Occhietti, S. 1973. Les structures de déformations engendrées par les glaciers - Essai de mise au point. Revue de Géographie de Montréal, vol. 27, n^{o} 4, p. 365-380.

Occhietti, S. 1974. Dépôts et faits quaternaires du bas Saint-Maurice, Québec. Commission géologique du Canada, Rapport des Activités, Paper 74-1, Part B, p. 217.

Occhietti, S. 1976. Dépôts et faits quaternaires du bas Saint-Maurice, Québec. Commission géologique du Canada, Rapport des Activités, Paper 76-1, Part C, p. 217-220.

Occhietti, S. 1977. Stratigraphie du Wisconsinien de la région de Trois-Rivières-Shawinigan, Québec, Géographie physique et Quaternaire, vol. 31, n^{os} 3-4, p. 307-322.

Occhietti, S. 1980. Le Quaternaire de la région de Trois-Rivières - Shawinigan, Québec; Contribution à la paléogéographie de la vallée moyenne du Saint-Laurent et corrélations stratigraphiques. Paléo-Québec, n^{o}19, 223 p.

Occhietti, S., Balescu, S., Lamothe, M., Clet, M., Cronin, T., Ferland, P. et Pichet, P. 1996. Late Stage 5 Glacio-isostatic Sea in the St. Lawrence Valley, Canada and United States. Quaternary Research, vol. 45, p. 128-137.

Osborne, F.F. 1951. Parc des Laurentides Ice Cap and the Quebec sea. Le Naturaliste Canadien, vol. 78, n^{os} 7-8, p. 221-225.

Pagé, P. 1977. Les dépôts meubles de la région de Saint-Jean-de-Matha - Sainte-Émilie-de-l'Énergie, Québec, Cartographie, Sédimentologie et Stratigraphie. Mémoire de maîtrise, Montréal, Université du Québec à Montréal, 118 p.

Paradis, D. 2000. Comparaison des méthodes de détermination des périmètres de protection des ouvrages de captage d'eau souterraine dans les aquifères granulaires du piémont laurentien. Mémoire de maîtrise, Québec, INRS-Géoressources.

Parent, M. et Occhietti, S. 1988. Late Wisconsinan deglaciation and Champlain Sea invasion in the St. Lawrence valley, Québec. Géographie physique et Quaternaire, vol 42, n° 3, p. 215-246.

Parent, M., Michaud, Y., Boisvert, É., Bolduc, A.M., Fagnan, N., Fortier, R., Cloutier, M. et Doiron, A. 1998. Cartographie hydrogéologique régionale du piémont laurentien dans la MRC de Portneuf : géologie et stratigraphie des formations superficielles. Commission géologique du Canada, Dossier Public 3664a.

Parry, J. T. 1963. The Laurentians : A study in geomorphological development. Thèse de Doctorat, Montréal, Université McGill, 222 p.

Parry, J. T. et Macpherson, J.C. 1964. The St. Faustin – St. Narcisse Moraine and the Champlain Sea. Revue de Géographie de Montréal, vol. 18, p. 235-248.

Pettyjohn, W.A. et Randich, P.G. 1966. Geohydrologic Use of Lithofacies maps in Glaciated Areas. Water Resources Research, vol. 2, n° 4, p. 679-689.

Poulin, P. 1977. Le complexe Morainique de Saint-Narcisse dans le secteur sud de la rivière Malbaie. Interprétation paléoclimatique par l'analyse pollinique. Mémoire de maîtrise, Québec, Université Laval, 83 p.

Powell, R.D. et Domack, E. 1995. Modern glaciomarine environments. *In* Modern Glacial Environments, Processes, Dynamics and Sediments; Glacial Environments : Volume 1. *Édité par* J. Menzies. Butterworth-Heinemann. p. 445-486.

Prichonnet, G. 1977. La déglaciation de la vallée du Saint-Laurent et l'invasion marine contemporaine. Géographie physique et Quaternaire, vol. 31, n^{os} 3-4, p. 323-345.

Richard, P. 1973. Histoire post-Glaciaire de la végétation dans la région de Saint-Raymond de Portneuf, telle que révélée par l'analyse pollinique d'une tourbière. Le Naturaliste Canadien, vol. 100, n° 6, p. 561-575.

Richard, P. 1977. Végétation tardiglaciaire au Québec méridional et implications paléoclimatiques. Géographie physique et Quaternaire, vol. 31, n^{os} 1-2, p. 161-176.

Rondot, J. 1966. Géologie de la région de La Malbaie, Québec. Ministère des Richesses naturelles, rapport préliminaire, n° 544.

Rondot, J. 1969. Géologie de la région de la rivière Malbaie, Québec. Ministère des Richesses naturelles, rapport préliminaire, n° 576, 31 p.

Rondot, J. 1974. L'épisode glaciaire de Saint-Narcisse dans Charlevoix, Québec. Revue de Géographie de Montréal, vol. 28, n° 4, p. 375-388.

Russel, H.A.J. 1999. Conceptual and data-driven models in 3D surficial geological mapping: examples from the Oak Ridges Moraine, Southern Ontario, Canada. *In* Abstract with Programs of the Geological Society of America 1999, Annual meeting and exposition, 25-28 octobre 1999, Denver, Colorado, p. A-81.

Saarnisto, M. 1974. The Deglaciaition History of the Lake Superior Region and its Climatic Implications. Quaternary Research, vol. 4, p. 316-339.

Sala et Long, 1989. Évolution des structures deltaïques du delta de la rivière Natashquan, Québec. Géographie physique et Quaternaire, vol. 43, n° 3, p. 311-323.

Savoie, L. et Richard, P. 1979. Paléophytogéographie de l'épisode Saint-Narcisse dans la région de Sainte-Agathe, Québec. Géographie physique et Quaternaire, vol.33, n° 2, p. 175-188.

Scheibe, T.D. et Freyberg, D.L. 1995. Use of sedimentological information for geometric simulation of natural porous media structure. Water Resources Research, vol. 31, n° 12, p. 3259-3270.

Seaber, P.R. 1988. Hydrostratigraphic units, *In* Hydrogeology. *Édité par* W. Back, J.S. Rosenshein et P.R. Seaber, The Geology of North America, v. 0-2, The Geological Society of America, p. 9-14.

Sharpe, D.R. 1988. Glaciomarine fan deposition in the Champlain Sea. *In* The Late Quaternary Development of the Champlain Sea Basin. *Édité par* N.R. Gadd. Association géologique du Canada, Special paper 35, p. 63-82.

Sharpe, D., Pullan, S.E. et Warman, T.A. 1992. A basin analysis of the Waigoon area of Lake Agassiz, A Quaternary clay basin in northwestern Ontario. Géographie physique et Quaternaire, vol. 46, n° 3, p. 295-309.

Sharpe, D.R., Dyke, L.D., Hinton, M.J., Pullan, S.E., Russel, H.A.J., Brennand, T.A., Barnett, P.J. et Pugin, A. 1996. Groundwater prospects in the Oak Ridges Moraine area, southern Ontario : application of regional geological models. *In* Recherches en cours 1996-E; Commission géologique du Canada, p. 181-190.

Stephenson, D.A., Flemming, A.H. et Mickelson, D.M. 1988. Glacial deposits, *In* Hydrogeology. *Édité par* W. Back, J.S. Rosenshein et P.R. Seaber, The Geology of North America, vol. 0-2, The Geological Society of America, p 301-314.

Stiff, B.J. 1999. Mapping surficial sequences in the Green River Lowland of Illinois. *In* Abstract with Programs of the Geological Society of America 1999, Annual meeting and exposition, 25-28 octobre 1999, Denver, Colorado, p. A-79.

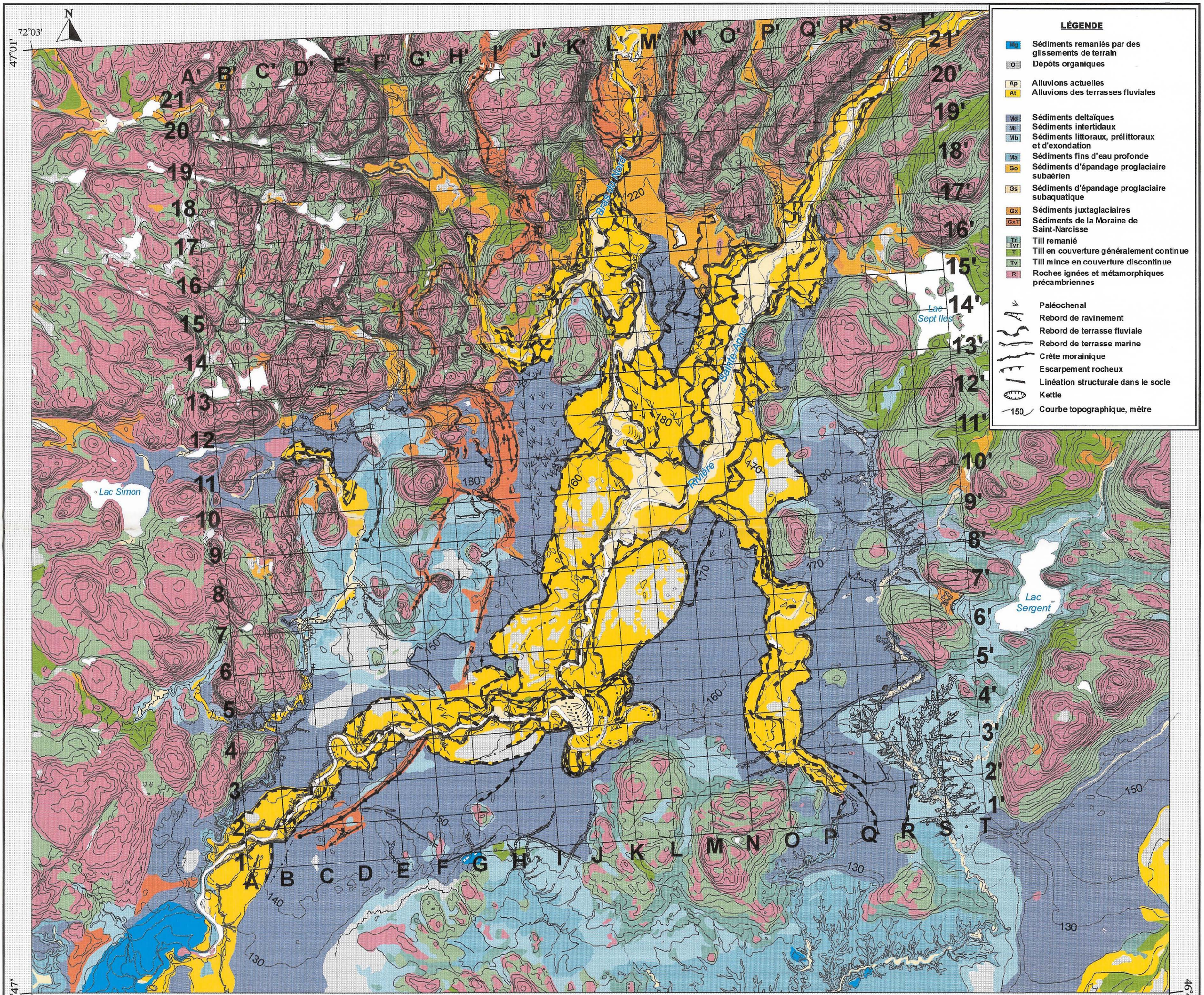
Taylor, K.C., Lamoreu, G.W., Doyle, G.A., Alley, R.B., Grootes, P.M., Mayewski, P.A., White, J.W.C., Barlow, L.K. 1993. The "flickering switch" of late Pleistocene climate change. Nature, vol. 361, 432-436.

Tech In Situ inc. 1997. Sondage au piézocône dans le piémont laurentien, MRC de Portneuf. no. dossier 5009606, 8 p.

ANNEXE A

GÉOLOGIE DES FORMATION SUPERFICIELLES
DE LA RÉGION DE SAINT-RAYMOND, MRC DE PORTNEUF, QUÉBEC.
(Cloutier *et al.*, 1997)

Géologie des formations superficielles
Région de Saint-Raymond, MRC de Portneuf, Québec



LÉGENDE

- Mg — Sédiments remaniés par des glissements de terrain
- O — Dépôts organiques
- Ap — Alluvions actuelles
- At — Alluvions des terrasses fluviales
- Md — Sédiments deltaïques
- Mi — Sédiments intertidaux
- Mb — Sédiments littoraux, prélittoraux et d'exondation
- Ma — Sédiments fins d'eau profonde
- Go — Sédiments d'épandage proglaciaire subaérien
- Gs — Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique
- Gx — Sédiments juxtaglaciaires
- GxT — Sédiments de la Moraine de Saint-Narcisse
- Tr — Till remanié
- Tvr — Till en couverture généralement continue
- T — Till mince en couverture discontinue
- Tv — Till mince en couverture discontinue
- R — Roches ignées et métamorphiques précambriennes

- Paléochenal
- Rebord de ravinement
- Rebord de terrasse fluviale
- Rebord de terrasse marine
- Crête morainique
- Escarpement rocheux
- Linéation structurale dans le socle
- Kettle
- 150 — Courbe topographique, mètre

Géologie : Cloutier *et al.*, 1997

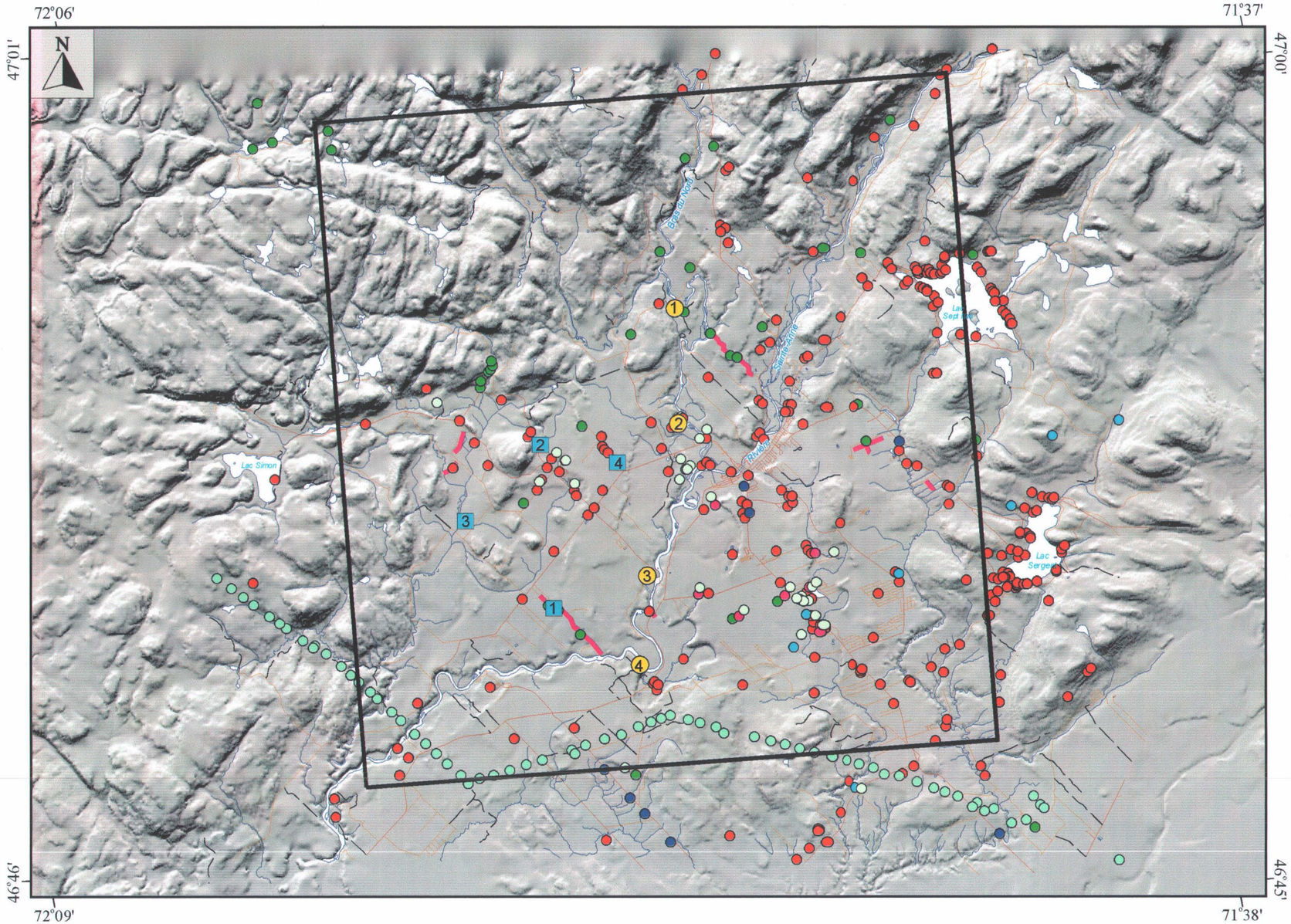
0 5 10

Kilomètres

ANNEXE B

INFORMATIONS GÉOSCIENTIFIQUES DE SUBSURFACE
DANS LA RÉGION DE SAINT-RAYMOND, MRC DE PORTNEUF, QUÉBEC.

Informations géoscientifiques de subsurface dans la région de Saint-Raymond, MRC de Portneuf, Québec.



LÉGENDE

SOURCES DES DONNÉES UTILISÉES ET TERMINOLOGIE EMPLOYÉE

- **Système d'information hydrogéologique** (Puisatiers)
  - PUI_0566, CGQ_4177
- **Hydro-Québec**
  - HQ_2526
- **Ministère de l'Environnement**
  - MEF_2657
- **Ministère des Transports**
  - MTQ_459
- **Ministère des Ressources Naturelles**
  - MRN_488
- **Études Hydrogéologiques (firmes privées)**
  - FRM_2629
- **Relevés de terrain CGQ** (Équipe Piémont laurentien)
  - 98BZA001
- **Coupes stratigraphiques de référence**
  1. Colbert
  2. Cayer
  3. Malette
  4. Pointe-Basse
- **Forages CGQ**
  1. FR-98001
  2. FR-98002
  3. FR-98003
  4. FR-98004
- **Ligne de géophysique**
- **Territoire étudié**

0 2.5 5

Kilomètres

ANNEXE C

PLANCHES PHOTOGRAPHIQUES

Photographie 1

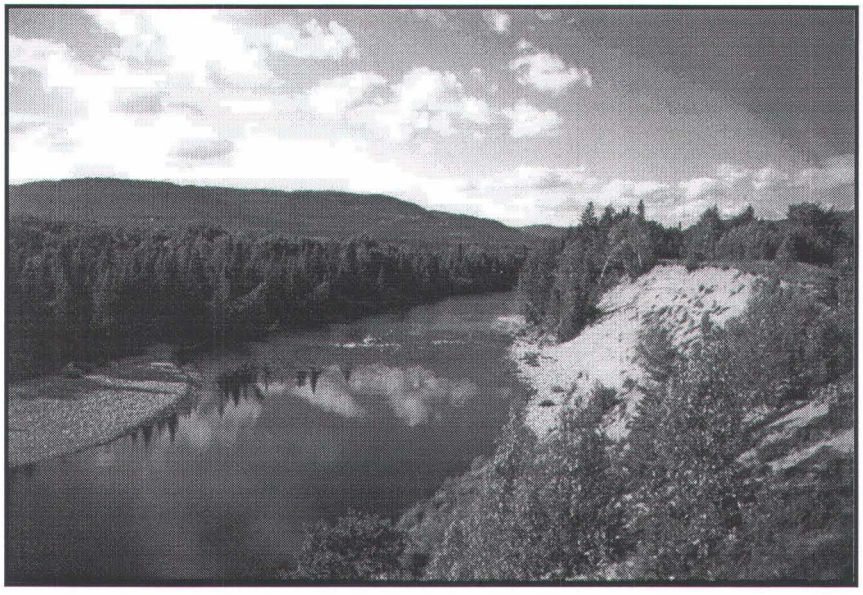
Déformation glaciotectonique affectant des sables moyens à fins. Une couche discordante de till silto-sableux (1.5 m d'épaisseur) surmonte ces sables. La direction du pli (plan axial 308° 06°NW - 030° 16°NE) suggère la présence d'une langue de glace venant du nord (droite) canalisée dans la vallée de la rivière Bédard (19 276 873 E - 52 00 430 N).

Photographie 2

Diamicton sableux compact à blocs surmontant un lit de sable grossier à très grossier massif interprété comme étant un flot gravitaire (grain flow). Photo prise à la Coupe de la scierie d'Allen's Mill (19 276 200 E - 51 99 650 N).

Photographie 3

Dissection des sédiments deltaïques (Md) par la rivière Bras-du-Nord. Cette dernière coule actuellement sur des sédiments marins silto-argileux (Ma) où des alluvions récents (Ap) s'accumulent, de façon préférentielle, sur la rive concave du méandre. Photo prise à proximité de la coupe de référence Colbert avec une vue vers le nord-nord-est. (19 282 500 E - 52 01 500 N)



Photographie 4

Déformations synsédimentaires (structures de charge) au sein des sables deltaïques (Md) résultant d'une sédimentation rapide. Domaine des Bouleaux (19 285 800 E - 51 93 750 N)

Photographie 5

Coupe dans la Moraine de Saint-Narcisse exposant une unité de sable proglaciaire (moyen à très grossier) surmontée d'un till sableux cisaillé (Voir Figure X pour une vue rapprochée). Une fabrique de till a été effectuée montrant une direction d'écoulement vers le sud-est.
(19 279 500 E - 51 95 750 N)

Photographie 6

Excavation dans la Moraine de Saint-Narcisse à l'extrémité du rang Moisan, Saint-Raymond. Les unités diamictictes sont fortement hétérométriques. Elles comportent quelques gros blocs disséminés ainsi que de nombreux blocs et graviers subarondis. Ce matériel repose dans une matrice sablo-silteuse. (19 279 500 E - 51 98 250 N)

Photographie 7

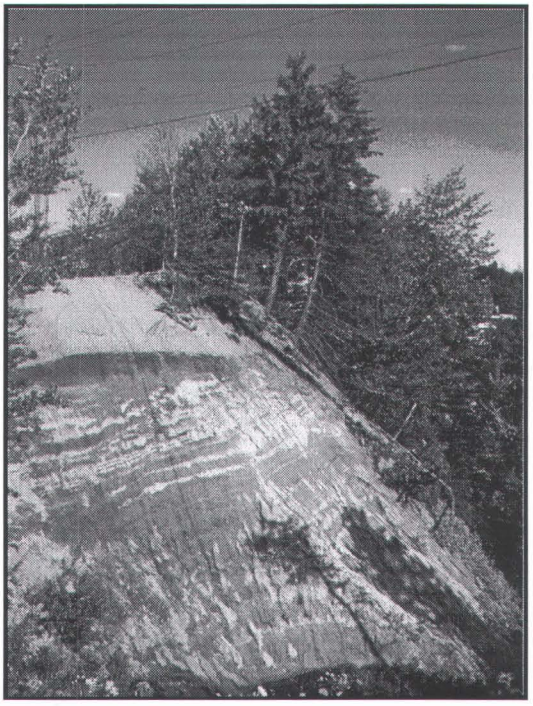
Vue de la coupe Pointe-Basse située sur la rive droite de la rivière Sainte-Anne d'une hauteur totale de 34 mètres. Cette coupe montre une séquence de progradation où les sédiments sableux deltaïques recouvrent les sédiments prodeltaïques et les rythmites glacio-marines. (voir Figure X pour une description plus exhaustive) (19 91 000 E – 51 80 500 N).

Photographie 8

Vue rapprochée de la Coupe Pointe-Basse montrant les rythmites glacio-marines fossilifères (Portlandia arctica) d'une hauteur de 7 mètres, surmontées par des sédiments prodeltaïques (Mdp)

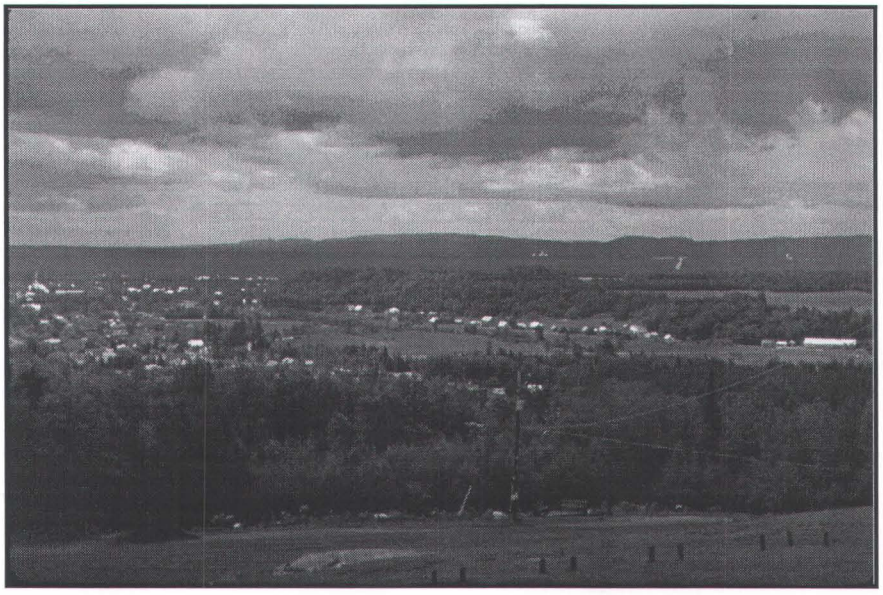
Photographie 9

Vue de la partie supérieure de la coupe Mallette située sur la rive droite de la rivière Sainte-Anne en aval du barrage des Chutes Panet (19 280 800 E – 51 93 675 N). Une séquence similaire à celle de la coupe Pointe-Basse est observée sur cette photo. Notons le contact érosif séparant les sédiments alluviaux (At) des sédiments prodeltaïque (Mdp).



Photographie 10

Vue en direction sud-ouest du bassin de Saint-Raymond à partir du sommet du Mont Laura-Plamondon. On aperçoit le village de Saint-Raymond à l'extrémité gauche de la photo ainsi que la rivière Sainte-Anne ayant provoquée une série de terrasses deltaïques (190 m, 180 m).



ANNEXE D

ESSAIS DE PERMÉABILITÉ

Essais de perméabilité

Cet annexe présente les résultats des essais de perméabilité effectués sur des sables prodeltaïques non remaniés sur perméamètre à charge variable au laboratoire de physique des sols du Département des sols de l'Université Laval. Ces essais avaient pour but de déterminer des valeurs de conductivité hydraulique horizontale (K_h) et verticale (K_v) pour ainsi évaluer le coefficient d'anisotropie (r_k).

La préparation de l'échantillon a été légèrement modifiée par rapport au protocole standard afin de conserver l'échantillon dans un état non remanié et préserver les structures sédimentaires primaires. Des cylindres de sédiment, d'environ 6 cm de hauteur et de diamètre, étaient tout d'abord sous-échantillonnés et insérés dans un tubage métallique (photos a, b et c). Afin d'éviter un écoulement préférentiel de l'eau le long des parois du tubage, de la paraffine était coulée dans l'espace annulaire. Le cylindre métallique contenant l'échantillon était ensuite mis en colonne et déposé dans une chambre à vide afin de faire le vide à l'intérieur du cylindre. L'échantillon était ensuite saturé d'eau distillée par la base en quatre paliers afin de produire une saturation uniforme. Une charge initiale (h_o) était appliquée au début de l'essai (t_o) et différentes lectures de la charge étaient prises au cours de l'essai jusqu'à une charge finale (h_1). Pour valider l'essai, Lambe (1951) suggère que le temps écoulé entre la charge initiale (h_o) et une charge de valeur ($\sqrt{h_o h_1}$) doit être égal, à environ 2-3% près, au temps écoulé entre la charge ($\sqrt{h_o h_1}$) et la charge finale (h_1).

La conductivité hydraulique est calculée à l'aide des formules suivantes (Freeze et Cherry, 1979):

$$K = \frac{d_t^{\,2} \bullet L}{d_c^{\,2} \bullet t} \bullet \ln \frac{h_o}{h}$$

$$K = \frac{d_t^{\,2} \bullet L}{d_c^{\,2}} \bullet m$$

où d_t diamètre du tube d'alimentation;
L longueur de l'échantillon;
d_c diamètre de l'échantillon;
t temps;
h_o charge initiale
h charge

Photo a – Échantillon de sédiments prodeltaïques

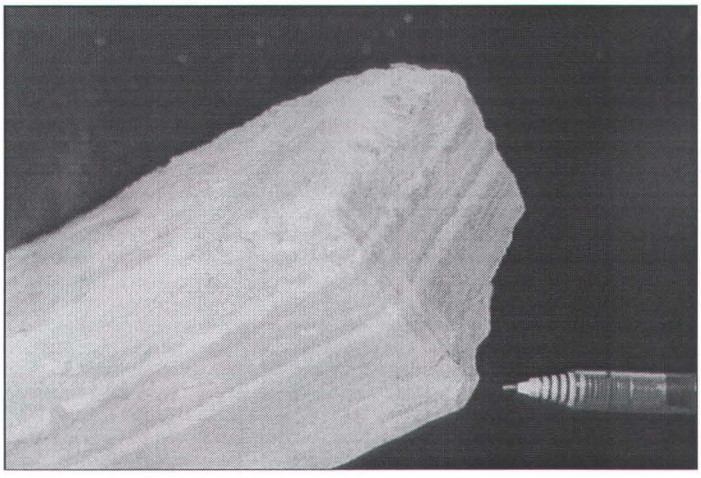


Photo b – Laminations horizontales (silt - sable fin à très fin) des sédiments prodeltaïques

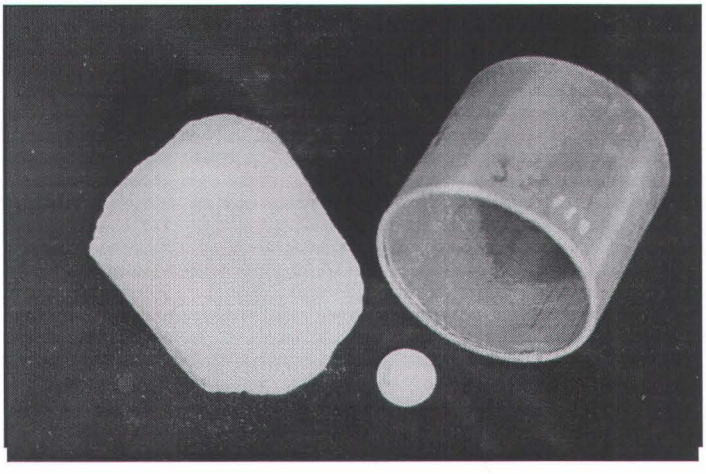


Photo c – Échantillon de sédiments prodeltaïques et cylindre métallique pour la mise en colonne.

Tableau 2 - Synthèse des résultats des essais de perméabilité sur des sédiments prodeltaïques silto-sableux.

ÉCHANTILLON	CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE HORIZONTALE (K_h) (m/s)	CONDUCTIVITÉ HYDRAULIQUE VERTICALE (K_v) (m/s)	COEFFICIENT D'ANISOTROPIE ($r = K_h / K_v$)
SAINT-RAYMOND 1	------- -------	4.67×10^{-8} 3.54×10^{-8} n = 49 %	------- -------
SAINT-RAYMOND 2	2.05×10^{-6} 2.71×10^{-6} n = 45 %	7.76×10^{-8} 7.08×10^{-8} n = 41 %	26.41 38.28
MALETTE 1	7.35×10^{-8} 2.24×10^{-8} n = 43 %	2.97×10^{-8} 5.00×10^{-8} n = 39 %	2.47 0.45
MALETTE 2	2.10×10^{-7} 1.86×10^{-7} n = 45 %	3.53×10^{-8} 3.52×10^{-8} n = 44 %	5.95 5.28
SERGENT 1	------- -------	2.22×10^{-8} ------- n = 41 %	------- -------
MOYENNE	8.74×10^{-7}	4.48×10^{-8}	13.14

Conductivité hydraulique verticale (Saint-Raymond - Échantillon 1)

Longueur (L) (cm): 6
Diamètre (d_c) (cm) : 5
Diamètre intérieur du tube d'alimentation (d_t) (cm): 0.9

POROSITÉ:
Assiette = 14,74
Assiette + Éch. Hum. = 289.8
Assiette + Éch. Sec. = 231.83
Volume Éch. = 117.81
Masse de l'eau = 57.97
Porosité Totale (%) = 49.20634921

ESSAI 1 **Ho = 84.5**

Temps (s)	Charge (cm)	ln (ho/h)
0	84.5	0
1080	82	0.030032287
1440	81	0.04230238
1680	80.5	0.04849435
5760	64.3	0.273191903
20280	44.7	0.636778033
28740	36.3	0.844933793
84180	12.1	1.943546082
89280	10.1	2.124216111

K (cm/s) = 4.66774E-06

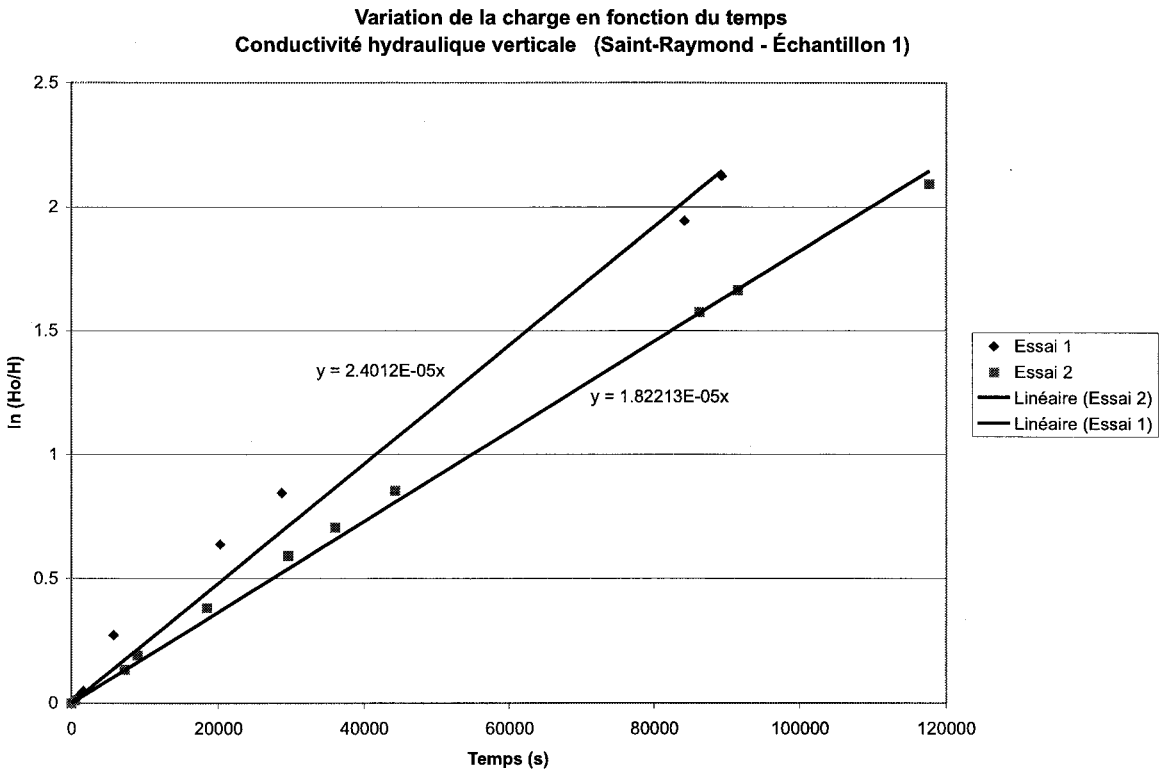
VALIDATION:
Ho = 84.5
H1 = 12.1
Hx = 31.97577208
LN(Ho/Hx) = 0.971773041
t1 = 40470.30822
t2 = 43709.69178
% erreur = 7.411133403

ESSAI 2 **Ho = 85**

Temps (s)	Charge (cm)	ln (ho/h)
0	85	0
540	84	0.011834458
7260	74.3	0.134540305
9000	70.1	0.192728462
18540	58.1	0.380485593
29640	47	0.592503655
36060	42	0.704981638
44280	36.2	0.853592138
86220	17.6	1.574752354
91560	16.1	1.663831984
117720	10.5	2.091275999

K (cm/s) = 3.54222E-06

VALIDATION:
Ho = 85
H1 = 16.1
Hx = 36.99324263
LN(Ho/Hx) = 0.831915992
t1 = 45656.23705
t2 = 45903.76295
% erreur = 0.539227885


Variation de la charge en fonction du temps
Conductivité hydraulique verticale (Saint-Raymond - Échantillon 1)
2.5
2
1.5
1
0.5
0
ln (Ho/H)
y = 2.4012E-05x
y = 1.82213E-05x
0
20000
40000
60000
80000
100000
120000
Temps (s)
Essai 1
Essai 2
Linéaire (Essai 2)
Linéaire (Essai 1)

Conductivité hydraulique horizontale (Saint-Raymond - Échantillon 2)

POROSITÉ:
Assiette = 14,74
Assiette + Éch. Hum. = 281.95
Assiette + Éch. Sec. = 229.42
Volume Éch. = 117.81
Masse de l'eau = 52.53
Porosité Totale (%) = 44.58874459

Longueur (L) (cm): 6
Diamètre (d_c) (cm) : 5
Diamètre intérieur du tube d'alimentation (d_t) (cm): 0.9

ESSAI 1 **Ho = 84.7**

Temps (s)	Charge (cm)	Charge (cm) Corrigée	ln (ho/h)
0	86.5	84.7	0
16	85	83.2	0.017868254
45	82	80.2	0.054592087
65	80	78.2	0.079845954
87	78	76.2	0.105754139
108	76	74.2	0.132351451
130	74	72.2	0.159675556
154	72	70.2	0.187767291
180	70	68.2	0.216671037
205	68	66.2	0.246435139
231	66	64.2	0.277112391
285	62	60.2	0.341443249
311	60	58.2	0.375230247
339	58	56.2	0.410198845
371	56	54.2	0.446434693
397	54	52.2	0.484033107
428	52	50.2	0.523100575
460	50	48.2	0.563756581
493	48	46.2	0.606135804
529	46	44.2	0.650390813
565	44	42.2	0.696695381
604	42	40.2	0.745248606
646	40	38.2	0.796280086
691	38	36.2	0.850056483
740	36	34.2	0.906889958
790	34	32.2	0.967149149
846	32	30.2	1.031273677
906	30	28.2	1.099793624
971	28	26.2	1.173356191
1044	26	24.2	1.252762968
1125	24	22.2	1.339023313
1212	22	20.2	1.433432997
1314	20	18.2	1.537694008
1434	18	16.2	1.654104359
1649	15	13.2	1.858898772
1735	14	12.2	1.93767965
1945	12	10.2	2.116727881
2202	10	8.2	2.334981447
2765	7	5.2	2.790456976
3242	5.5	3.7	3.130782782
4152	3	1.2	4.256794045
5530	2.1	0.3	5.643088406

K (cm/s) = 2.0457E-04

VALIDATION:
Ho = 84.7
H1 = 8.2
Hx = 26.35412681
LN(Ho/Hx) = 1.167490724
t1 = 1109.465669
t2 = 1092.534331
% erreur = 1.526080424

ESSAI 2 **Ho = 84.7**

Temps (s)	Charge (cm)	Charge (cm) corrigée	ln (ho/h)
0	86.5	84.7	0
12	85	83.2	0.017868254
37	82	80.2	0.054592087
55	80	78.2	0.079845954
73	78	76.2	0.105754139
94	76	74.2	0.132351451
113	74	72.2	0.159675556
135	72	70.2	0.187767291
156	70	68.2	0.216671037
178	68	66.2	0.246435139
200	66	64.2	0.277112391
222	64	62.2	0.308760602
245	62	60.2	0.341443249
269	60	58.2	0.375230247
293	58	56.2	0.410198845
319	56	54.2	0.446434693
344	54	52.2	0.484033107
399	50	48.2	0.563756581
429	48	46.2	0.606135804
459	46	44.2	0.650390813
491	44	42.2	0.696695381
524	42	40.2	0.745248606
561	40	38.2	0.796280086
598	38	36.2	0.850056483
637	36	34.2	0.906889958
679	34	32.2	0.967149149
725	32	30.2	1.031273677
773	30	28.2	1.099793624
825	28	26.2	1.173356191
884	26	24.2	1.252762968
942	24	22.2	1.339023313
1008	22	20.2	1.433432997
1080	20	18.2	1.537694008
1207	17	15.2	1.717820174
1256	16	14.2	1.785873637
1500	12	10.2	2.116727881
1724	9.5	7.7	2.397895273
2047	7	5.2	2.790456976
2266	5.8	4	3.052821241

K (cm/s) = 2.7081E-04

VALIDATION:
Ho = 84.7
H1 = 10.2
Hx = 29.39285627
LN(H0/Hx) = 1.058363941
t1 = 759.7349313
t2 = 740.2650687
% erreur = 2.562717826

Conductivité hydraulique verticale (Saint-Raymond - Échantillon 2)

Longueur (L) (cm): 5.5
Diamètre (d_c) (cm) : 5.5
Diamètre intérieur du tube d'alimentation (d_t) (cm): 0.9

POROSITÉ:
Assiette = 15.06
Assiette + Éch. Hum. = 282.2
Assiette + Éch. Sec. = 228.56
Volume Éch. = 130.67
Masse de l'eau = 53.64
Porosité Totale (%) = 41.04997321

ESSAI 1 **Ho = 86.5**

Temps (s)	Charge (cm)	Charge (cm) Corrigée	ln(ho/h)
0	88	86.5	0
80	87	85.5	0.011628038
193	82	80.5	0.07188723
398	78.5	77	0.116338992
500	77	75.5	0.136011758
695	75	73.5	0.162859008
985	72.5	71	0.197464537
1454	69	67.5	0.248016816
2006	66.5	65	0.285757144
2564	62.5	61	0.34927055
3105	60	58.5	0.39111766
3550	58	56.5	0.425903776
4158	55.5	54	0.471160367
4650	53.5	52	0.508900695
5440	50	48.5	0.578580616
5770	49	47.5	0.599414703
6350	47	45.5	0.642432088
7240	44	42.5	0.710640338
8175	41	39.5	0.783843742
9080	39	37.5	0.835803481
14610	29.6	28.1	1.124374838
33352	13.3	11.8	1.992044882
70590	4.8	3.3	3.266221945

K (cm/s) = 7.7622E-06

VALIDATION:
Ho = 86.5
H1 = 37.5
Hx = 56.95392875
LN(H0/Hx) = 0.41790174
t1 = 5594.40081
t2 = 3485.59919
% erreur = -60.50040478

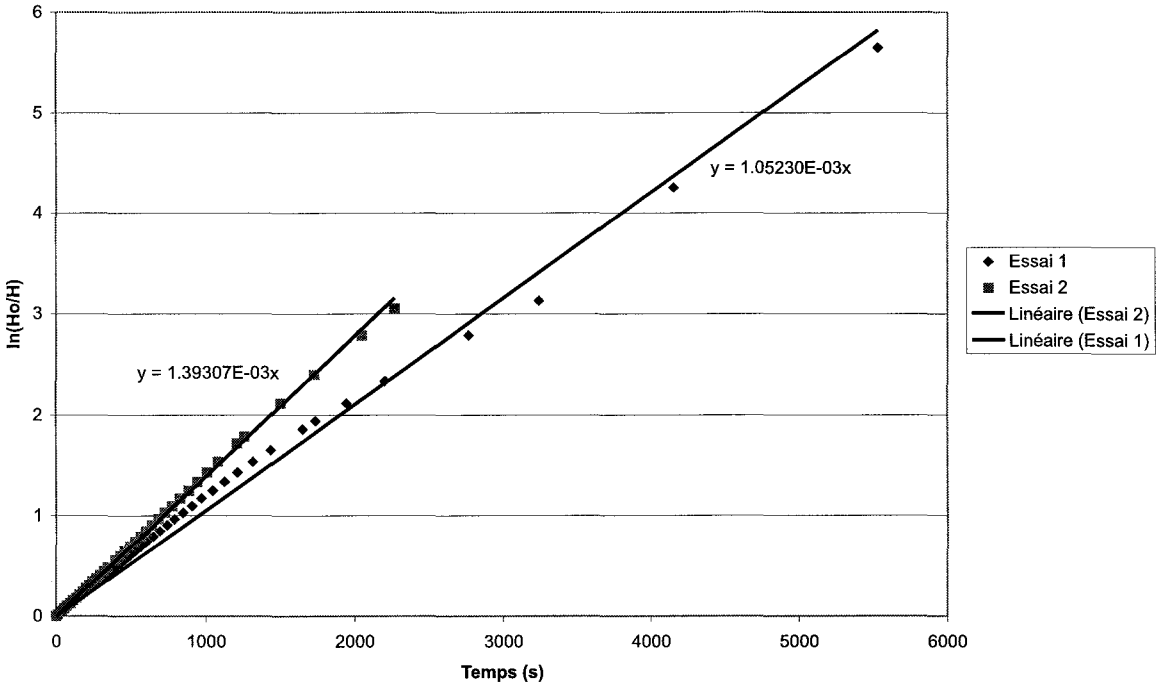
ESSAI 2 **Ho = 87.5**

Temps (s)	Charge (cm)	Charge (cm) Corrigée	ln(ho/h)
0	89	87.5	0
874	82.5	81	0.077189639
1278	80	78.5	0.108540169
1817	77	75.5	0.147506137
2310	74.5	73	0.181179352
3076	71	69.5	0.230312041
3565	69	67.5	0.259511195
4449	66	64.5	0.30497357
4790	65	63.5	0.320598887
5650	63	61.5	0.352601619
6080	62	60.5	0.368995428
7507	58.5	57	0.428587526
8124	57	55.5	0.455255773
17745	37.5	36	0.888119855
30875	23.7	22.2	1.371546504
38361	19.4	17.9	1.586838081
49342	8.3	6.8	2.554716181

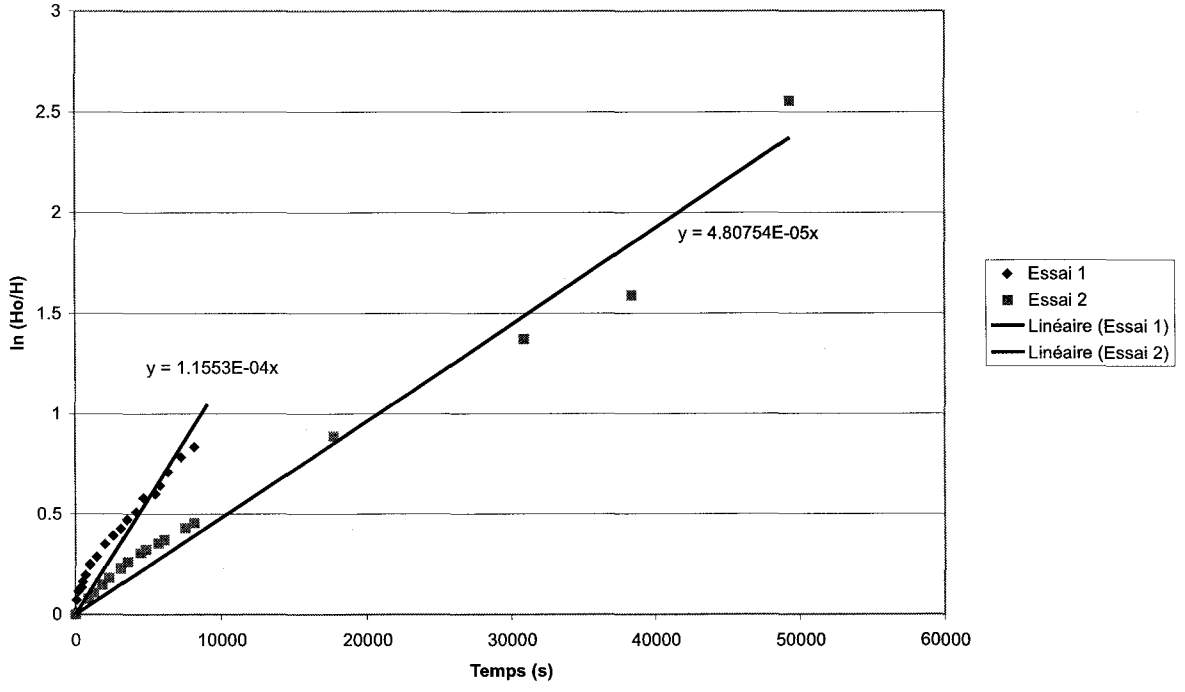
K (cm/s) = 7.0802E-06

VALIDATION:
Ho = 87.5
H1 = 17.9
Hx = 39.57587649
LN(H0/Hx) = 0.79341904
t1 = 16503.63887
t2 = 21857.36113
% erreur = -32.43964738

Variation de la charge en fonction du temps
Conductivité hydraulique horizontale (Saint-Raymond - Échantillon 2)



Variation de la charge en fonction du temps
Conductivité hydraulique verticale (Saint-Raymond - Échantillon 2)



Conductivité hydraulique verticale (Coupe Malette - Échantillon 1)

Longueur (L) (cm): 5.5
Diamètre (d_c) (cm) : 6
Diamètre intérieur du tube d'alimentation (d_t) (cm): 0.9

POROSITÉ:
Assiette = 19.67
Assiette + Éch. Hum. = 314.1
Assiette + Éch. Sec. = 258.27
Volume Éch. = 142.55
Masse de l'eau = 55.83
Porosité Totale (%) = 39.16520519

ESSAI 1 **Ho = 86**

Temps (s)	Charge (cm)	Charge (cm) Corrigée	ln(ho/h)
0	87	86	0
1575	83	82	0.047628049
2480	81	80	0.072320662
2942	80	79	0.084899444
3870	78	77	0.110541874
4284	77	76	0.123613956
4807	76	75	0.136859183
5088	75.4	74.4	0.144891354
11580	64.5	63.5	0.30330739
14910	60	59	0.376809852
35540	38.7	37.7	0.824687202
82560	15.7	14.7	1.766499802

K (cm/s) = 2.9727E-06

VALIDATION:
Ho = 86
H1 = 59
Hx = 71.23201527
LN(Ho/Hx) = 0.188404926
t1 = 7843.015826
t2 = 7066.984174
% erreur = 9.894556754

ESSAI 2 **Ho = 86.5**

Temps (s)	Charge (cm)	Charge (cm) Corrigée	ln(ho/h)
0	88	86.5	0
325	86	84.5	0.02339288
1100	81.5	80	0.078117779
1492	79.5	78	0.103435587
2160	76.5	75	0.1426563
3044	73	71.5	0.190446964
3465	71.5	70	0.211649172
3930	70	68.5	0.233310669
6285	63.5	62	0.333010029
9056	57.5	56	0.434792723
9876	56	54.5	0.461943712
12130	52	50.5	0.538171078
19090	42.5	41	0.746572347
25775	35.5	34	0.933783889
62074	15.3	13.8	1.835475822
68090	13.6	12.1	1.966938961

K (cm/s) = 5.0043E-06

VALIDATION:
Ho = 86.5
H1 = 50.5
Hx = 66.09273788
LN(Ho/Hx) = 0.269085539
t1 = 5597.156526
t2 = 6532.843474
% erreur = -16.71718389

Conductivité hydraulique horizontale (Coupe Mallette - Échantillon 1)

Longueur (L) (cm): 5.5
Diamètre (d_c) (cm) : 6
Diamètre intérieur du tube d'alimentation (d_t) (cm): 0.9

POROSITÉ:
Assiette = 19.68
Assiette + Éch. Hum. = 305.76
Assiette + Éch. Sec. = 251.36
Volume Éch. = 127.423
Masse de l'eau = 54.4
Porosité Totale (%) = 42.69244956

ESSAI 1 **Ho = 85.5**

Temps (s)	Charge (cm)	Charge (cm) Corrigée	ln(ho/h)
0	87	85.5	0
124	83	81.5	0.047913356
1077	80	78.5	0.085417751
1585	77	75.5	0.12438372
1940	75	73.5	0.15123097
2526	72	70.5	0.192903666
2942	70	68.5	0.221682631
3697	66.5	65	0.274129106
4037	65	63.5	0.29747647
4653	62.5	61	0.337642512
5052	61	59.5	0.362540063
11550	42	40.5	0.747214402
13161	38.5	37	0.837598463
14945	35	33.5	0.936970937
35485	13	11.5	2.006169341
82530	3.3	1.8	3.860729711

K (cm/s) = 7.3506E-06

VALIDATION:
Ho = 85.5
H1 = 11.5
Hx = 31.35681744
LN(Ho/Hx) = 1.00308467
t1 = 16887.23161
t2 = 18597.76839
% erreur = 9.197537833

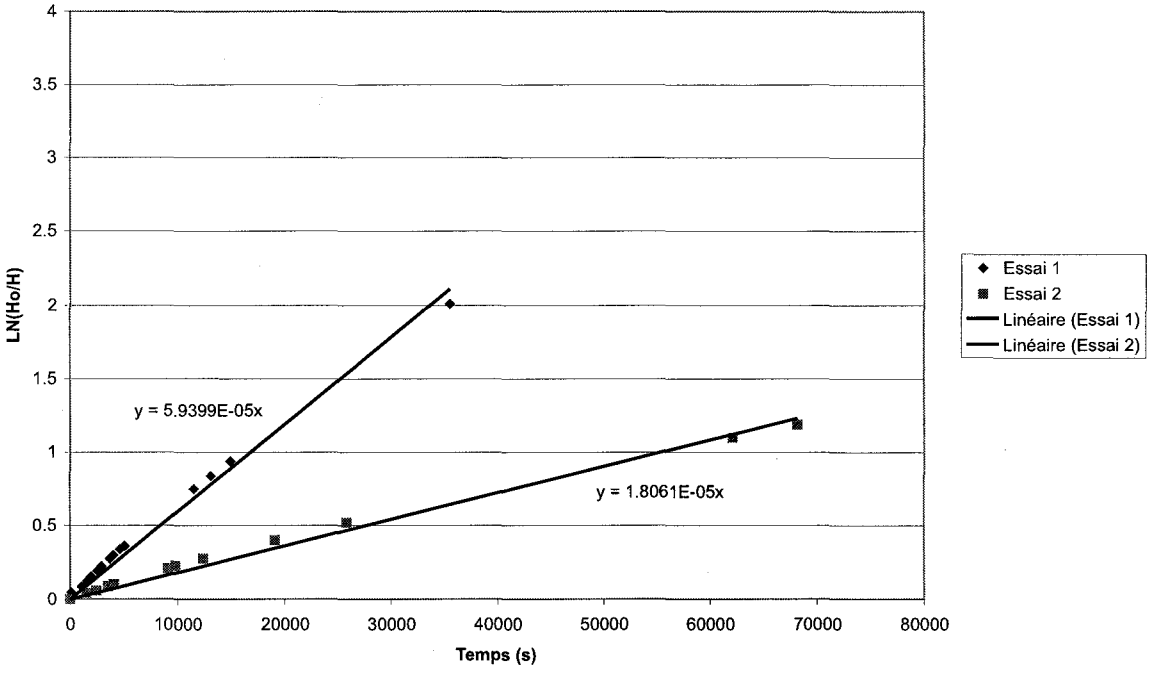
ESSAI 2 **Ho = 87**

Temps (s)	Charge (cm)	Charge (cm) Corrigée	ln(ho/h)
0	88	87	0
1523	84.5	83.5	0.041061487
2410	83	82	0.059188871
3500	80.5	79.5	0.090151097
4044	79.5	78.5	0.102809494
9082	71.5	70.5	0.210295409
9790	70.5	69.5	0.224581366
12420	67	66	0.276253377
19110	59.3	58.3	0.400306025
25804	52.7	51.7	0.520450337
62097	30	29	1.098612289
68124	27.5	26.5	1.188763386

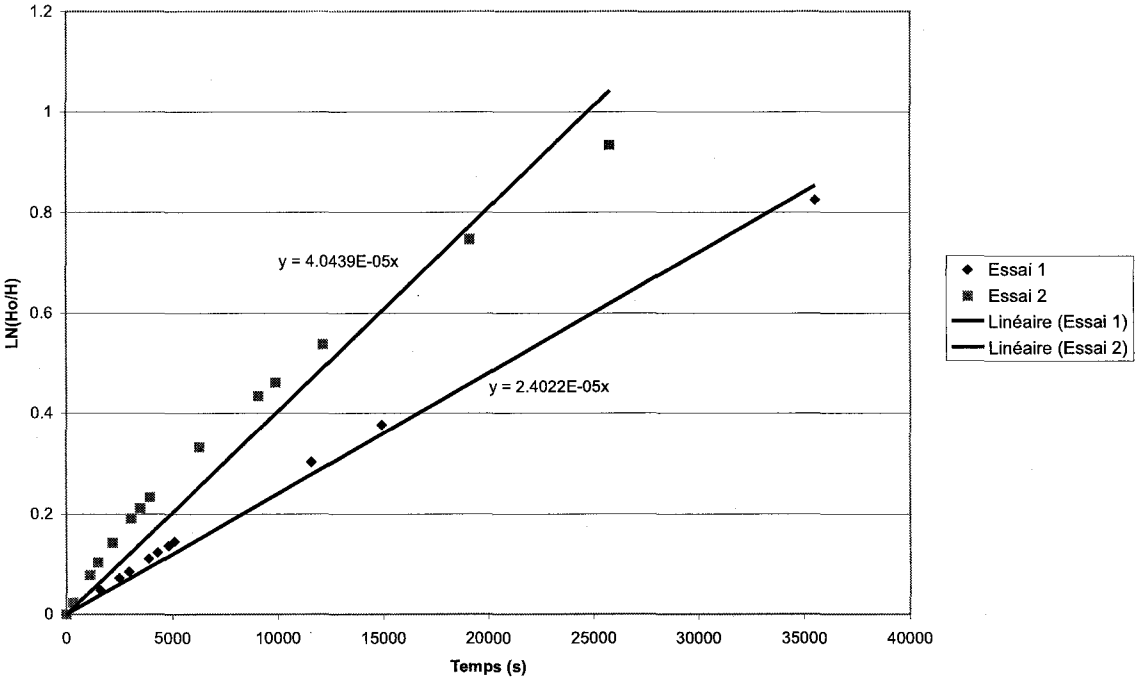
K (cm/s) = 2.2350E-06

VALIDATION:
Ho = 87
H1 = 29
Hx = 50.22947342
LN(Ho/Hx) = 0.549306144
t1 = 30413.93856
t2 = 31683.06144
% erreur = 4.005682602

Variation de la charge en fonction du temps
Conductivité hydraulique horizontale (Coupe Malette - Échantillon 1)



Variation de la charge en fonction du temps
Conductivité hydraulique verticale (Coupe Mallette - Échantillon 1)



Conductivité hydraulique horizontale (Coupe Mallette - Échantillon 2)

Longueur (L) (cm): 5.5
Diamètre (d_c) (cm) : 5.5
Diamètre intérieur du tube d'alimentation (d_t) (cm): 0.9

POROSITÉ:
Assiette = 19.7
Assiette + Éch. Hum. = 322.81
Assiette + Éch. Sec. = 264.44
Volume Éch. = 130.67
Masse de l'eau = 58.37
Porosité Totale (%) = 44.66977883

ESSAI 1 **Ho = 86.5**

Temps (s)	Charge (cm)	Charge (cm) Corrigée	ln(ho/h)
0	88	86.5	0
123	86	84.5	0.02339288
206	85	83.5	0.035297782
311	83.5	82	0.053425167
501	81	79.5	0.084387392
742	78	76.5	0.122853673
1048	74.5	73	0.169684973
1297	72	70.5	0.204531704
1559	69.5	68	0.240636709
1841	67	65.5	0.278094271
2064	65	63.5	0.309104508
2496	61.5	60	0.365799852
3205	55.5	54	0.471160367
3684	52	50.5	0.538171078
3828	51	49.5	0.558171744
4059	49.5	48	0.588943403
4360	47.5	46	0.631503017
4605	46	44.5	0.664655225
4844	44.5	43	0.698944298
5100	43	41.5	0.734450987
5355	41.5	40	0.77126496
6215	37	35.5	0.890611717
6540	35.5	34	0.933783889
6865	34	32.5	0.978904325
7340	32	30.5	1.04241773
7970	29.5	28	1.127939904
8691	27	25.5	1.221465962
9144	25.5	24	1.282090584
24940	5.4	3.9	3.099167861

K (cm/s) = 2.1035E-05

VALIDATION:
Ho = 86.5
H1 = 24
Hx = 45.563143
LN(H0/Hx) = 0.641045292
t1 = 4488.169795
t2 = 4655.830205
% erreur = 3.601085155

ESSAI 2 **Ho = 87.5**

Temps (s)	Charge (cm)	Charge (cm) Corrigée	ln(ho/h)
0	89	87.5	0
179	86.5	85	0.028987537
217	86	84.5	0.034887259
296	85	83.5	0.046792162
375	84	82.5	0.0588405
455	83	81.5	0.071035773
580	81.5	80	0.089612159
848	78.5	77	0.127833372
893	78	76.5	0.134348053
1082	76	74.5	0.160839668
1178	75	73.5	0.174353387
1435	72.5	71	0.208958916
1494	72	70.5	0.216026084
1601	71	69.5	0.230312041
1824	69	67.5	0.259511195
2045	67	65.5	0.289588651
2166	66	64.5	0.30497357
2522	63	61.5	0.352601619
2905	60	58.5	0.402612039
3682	54.5	53	0.50134688
4390	50	48.5	0.590074995
4540	49	47.5	0.610909082
4877	47	45.5	0.653926467
5600	43	41.5	0.745945366
5809	42	40.5	0.770336819
6220	40	38.5	0.820980552
6524	38.5	37	0.860720881
7466	34.5	33	0.975131232
7710	33.5	32	1.005902891
8675	30	28.5	1.121734706
9255	28	26.5	1.19449406
9620	27	25.5	1.232960341
9930	26	24.5	1.272965676
11255	22.5	21	1.427116356
11696	21.5	20	1.47590652
12354	20	18.5	1.553868061
12832	19	17.5	1.609437912
19967	9.7	8.2	2.367504639

K (cm/s) = 1.8618E-05

VALIDATION:
Ho = 87.5
H1 = 17.5
Hx = 39.13118961
LN(H0/Hx) = 0.804718956
t1 = 6365.440249
t2 = 6466.559751
% erreur = 1.563729508

Conductivité hydraulique verticale (Coupe Malette - Échantillon 2)

Longueur (L) (cm): 5.5
Diamètre (d_c) (cm) : 5.5
Diamètre intérieur du tube d'alimentation (d_t) (cm): 0.9

POROSITÉ:
Assiette = 19.77
Assiette + Éch. Hum. = 306.84
Assiette + Éch. Sec. = 249.87
Volume Éch. = 130.67
Masse de l'eau = 56.97
Porosité Totale (%) = 43.59837759

ESSAI 1 **Ho = 87.5**

Temps (s)	Charge (cm)	Charge (cm) Corrigée	ln(ho/h)
0	89	87.5	0
228	88.5	87	0.005730675
441	88	86.5	0.011494379
920	87	85.5	0.023122417
1164	86.5	85	0.028987537
1904	85	83.5	0.046792162
2910	83	81.5	0.071035773
3871	81	79.5	0.095881772
4412	80	78.5	0.108540169
6320	76.5	75	0.15415068
7730	74	72.5	0.188052232
8817	72	70.5	0.216026084
9484	71	69.5	0.230312041
10110	70	68.5	0.244805048
10742	69	67.5	0.259511195
11286	68	66.5	0.274436846
11955	67	65.5	0.289588651
12900	65.5	64	0.31275571
19996	55.4	53.9	0.484508315
53550	25.6	24.1	1.289426953
60070	22.2	20.7	1.441505093
67451	18.8	17.3	1.620932292
78017	15.1	13.6	1.861569001

K (cm/s) = 3.5337E-06

VALIDATION:
Ho = 87.5
H1 = 13.6
Hx = 34.49637662
LN(Ho/Hx) = 0.9307845
t1 = 38792.38561
t2 = 39224.61439
% erreur = 1.101932519

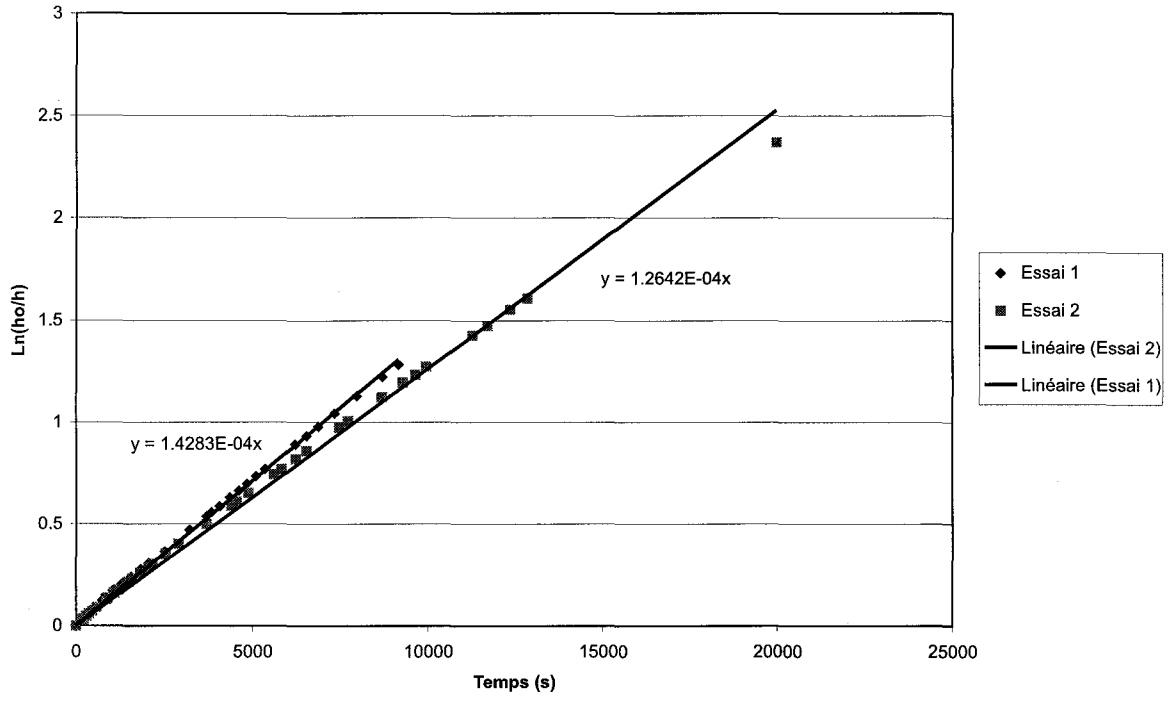
ESSAI 2 **Ho = 87.5**

Temps (s)	Charge (cm)	Charge (cm) Corrigée	ln(ho/h)
0	89	87.5	0
862	87	85.5	0.023122417
3023	82.3	80.8	0.079661828
3171	82	80.5	0.083381609
3720	80.8	79.3	0.098400665
4137	80	78.5	0.108540169
4858	78.5	77	0.127833372
5370	77.5	76	0.140905453
5880	76.5	75	0.15415068
6422	75.5	74	0.1675737
7220	74.5	73	0.181179352
7501	73.5	72	0.194972674
7772	73	71.5	0.201941344
8037	72.5	71	0.208958916
17597	57.5	56	0.446287103
18375	56.5	55	0.464305608
19124	55.5	54	0.482654747
20278	54	52.5	0.510825624
21870	52	50.5	0.549665457
23550	50	48.5	0.590074995
24836	48.5	47	0.621491192
27175	46	44.5	0.676149604
27759	45.4	43.9	0.689724473
64595	20.3	18.8	1.537781924
66788	19.3	17.8	1.592440336
67650	19	17.5	1.609437912
69144	18.4	16.9	1.644325171
70160	18	16.5	1.668278412
70695	17.7	16.2	1.686627551
80961	14.3	12.8	1.922193622
83901	13.4	11.9	1.995100393
88304	12.2	10.7	2.101395052

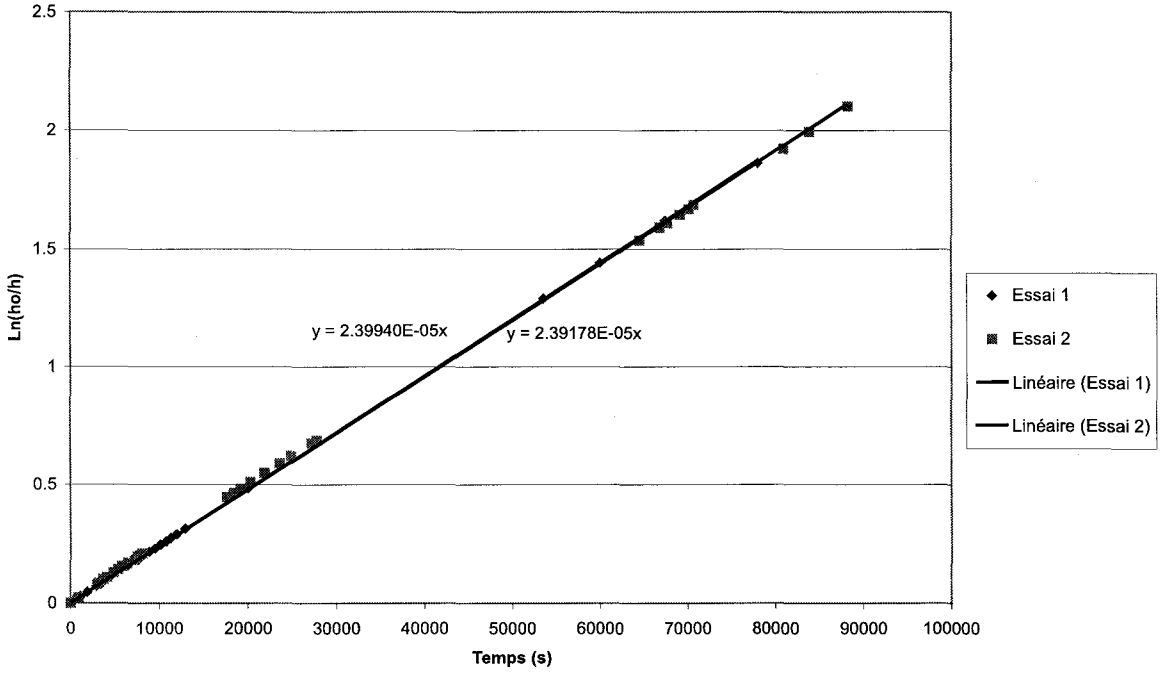
K (cm/s) = 3.52244E-06

VALIDATION:
Ho = 87.5
H1 = 12.8
Hx = 33.46640106
LN(Ho/Hx) = 0.961096811
t1 = 40183.32837
t2 = 40777.67163
% erreur = 1.457521339

Variation de la charge en fonction du temps
Conductivité hydraulique horizontale (Coupe Malette - Échantillon 2)



Variation de la charge en fonction du temps
Conductivité hydraulique verticale (Malette - Échantillon 2)



Conductivité hydraulique verticale (Route Sergent - Échantillon 1)

Longueur (L) (cm): 6
Diamètre (d_c) (cm) : 5.3
Diamètre intérieur du tube d'alimentation (d_t) (cm): 0.9

POROSITÉ:

Assiette =	19.69
Assiette + Éch. Hum. =	306.78
Assiette + Éch. Sec. =	252.21
Volume Éch. =	132.37
Masse de l'eau =	54.57
Porosité Totale (%) =	**41.22535318**

ESSAI 1 **Ho = 87.5**

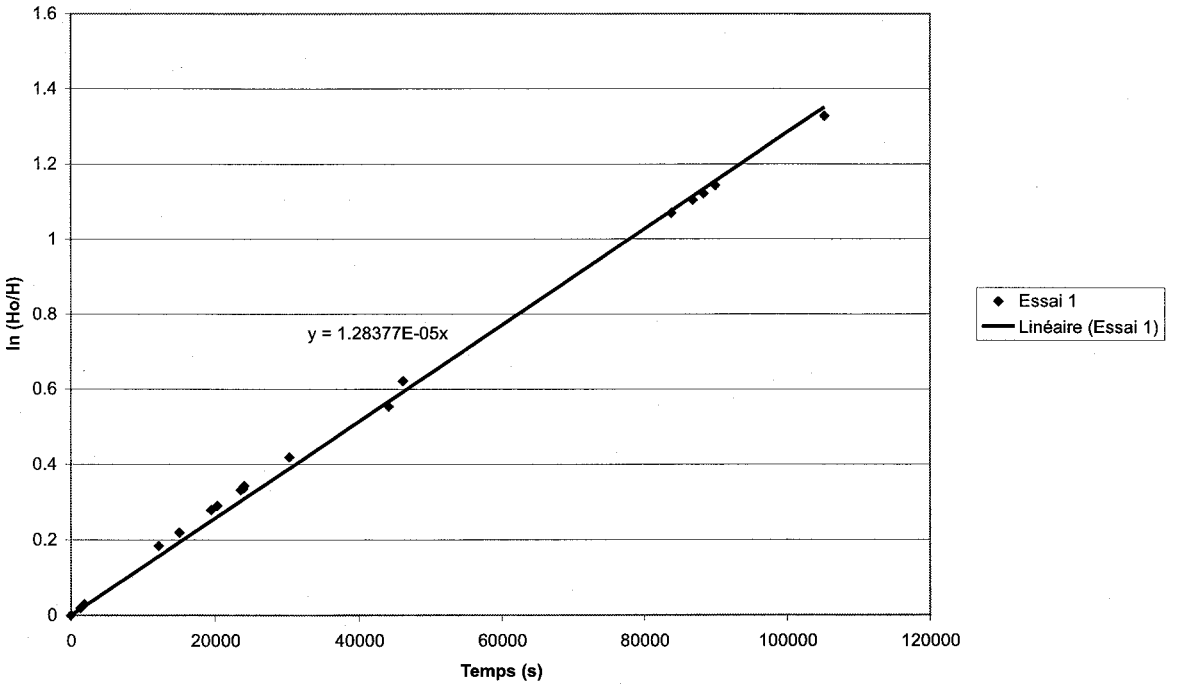
Temps (s)	Charge (cm)	Charge (cm) Corrigée	ln(ho/h)
0	89	87.5	0
1297	87.3	85.8	0.019619787
1845	86.5	85	0.028987537
12177	74.3	72.8	0.183922838
15071	71.8	70.3	0.218866995
19467	67.7	66.2	0.27895833
20260	67	65.5	0.289588651
23550	64.3	62.8	0.33168372
23876	64	62.5	0.336472237
24041	63.6	62.1	0.342892804
30308	59	57.5	0.419853846
44185	51.8	50.3	0.553633716
46165	48.5	47	0.621491192
83792	31.5	30	1.070441412
86775	30.5	29	1.104342963
88270	30	28.5	1.121734706
89938	29.4	27.9	1.143012105
105227	24.7	23.2	1.327486515

K (cm/s) = 2.22112E-06

VALIDATION:

Ho = 87.5
H1 = 28.5
Hx = 49.93746089
LN(Ho/Hx) = 0.560867353
t1 = 43689.08395
t2 = 44580.91605
% erreur = -2.041315625

Variation de la charge en fonction du temps
Conductivité hydraulique verticale (Route Sergent - Échantillon 1)



ANNEXE E

COUPES STRATIGRAPHIQUES

COUPES STRATIGRAPHIQUES

Une série de 41 coupes stratigraphiques (20 nord-sud; 21 est-ouest) a été élaborée dans la région d'étude. L'espacement entre chacune des coupes était de 1 kilomètre en ayant comme référence les coordonnées UTM de la carte 21 L/13 (Saint-Raymond) à l'échelle du 1:50 000 (voir Annexe A). L'exagération verticale a été fixé à 20 fois afin de pouvoir représenter les unité de faibles épaisseur et de bien illustrer la topographie du roc. Par contre, les unités ayant une épaisseur inférieure à 1 mètre, telles que les unités de till en couverture discontinue (Tv) et de till mince remanié (Tvr), n'ont pas été représentées sur les coupes étant donné leur trop faible épaisseur. Ces unités ont été amalgamées aux unités de roc. Les unités de dépôts organiques (O) ont quant à elles été représentées sur les coupes stratigraphiques avec une épaisseur constante de 2.5 mètres.

Il est à noter que les forages utilisés pour l'élaboration des coupes (voir Annexe B) n'ont pas tous été reportés sur ces dernières, particulièrement pour les coupes stratigraphiques ayant un axe nord-sud. Cette deuxième série de coupes a principalement été élaborée en rapportant, à chacune des intersections du quadrillage, la stratigraphie présente aux coupes est-ouest. Enfin, il est à noter que les contacts entre les diverses unités sont des contacts approximatifs, à l'exception des endroits où des données de forage, d'une bonne fiabilité, étaient disponibles à proximité.

LÉGENDE DES COUPES STRATIGRAPHIQUES

HOLOCÈNE

SÉDIMENTS DE VERSANT

- Mg — Sédiments remaniés par des glissements de terrain

SÉDIMENTS ORGANIQUES

- O — Dépôts organiques

SÉDIMENTS ALLUVIAUX

- Ap — Alluvions actuelles
- At — Alluvions des terrasses fluviales

WISCONSINIEN SUPÉRIEUR

SÉDIMENTS MARINS

- Md — Sédiments deltaïques
- Mb — Sédiments littoraux, prélittoraux et d'exondation
- Mdp — Sédiments prodeltaïques
- Ma — Sédiments fins d'eau profonde

SÉDIMENTS FLUVIOGLACIAIRES

- Go — Sédiments d'épandage proglaciaire subaérien
- Gs — Sédiments d'épandage proglaciaire subaquatique
- Gx — Sédiments juxtaglaciaires

SÉDIMENTS GLACIAIRES

- GxT — Sédiments de la Moraine de Saint-Narcisse
- T — Till en couverture généralement continue

WISCONSINIEN MOYEN ET INFÉRIEUR; SANGAMINIEN; ILLINOIEN

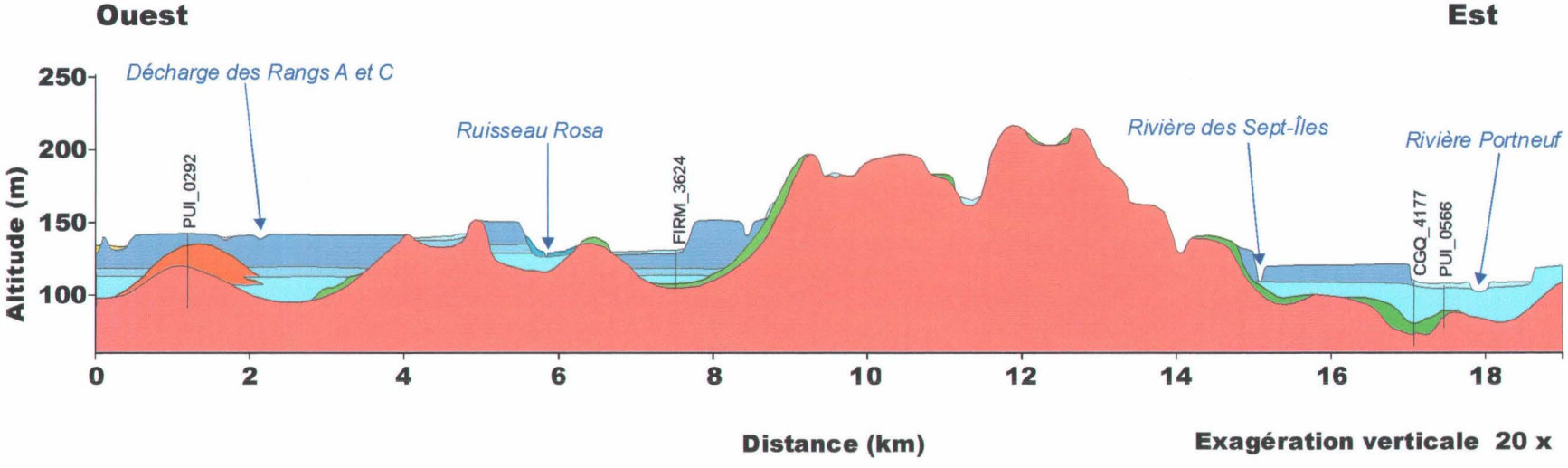
- Q — Formations quaternaires non différenciées

PRÉ-QUATERNAIRE

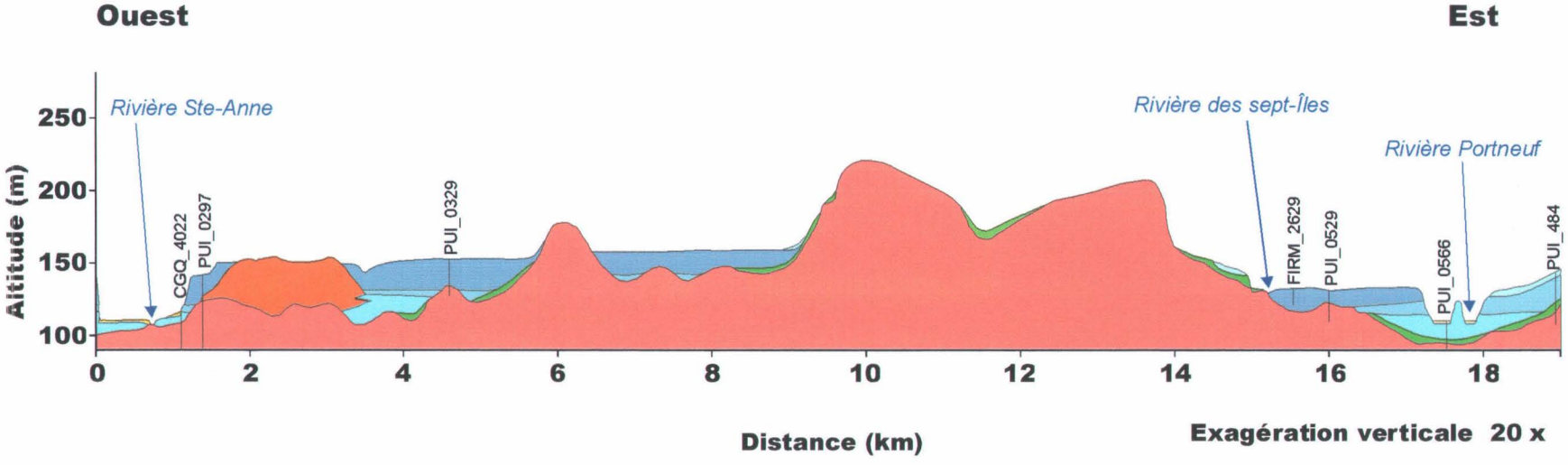
SUBSTRATUM ROCHEUX

- R — Roches métamorphiques et magmatiques précambrienne (Grenville)

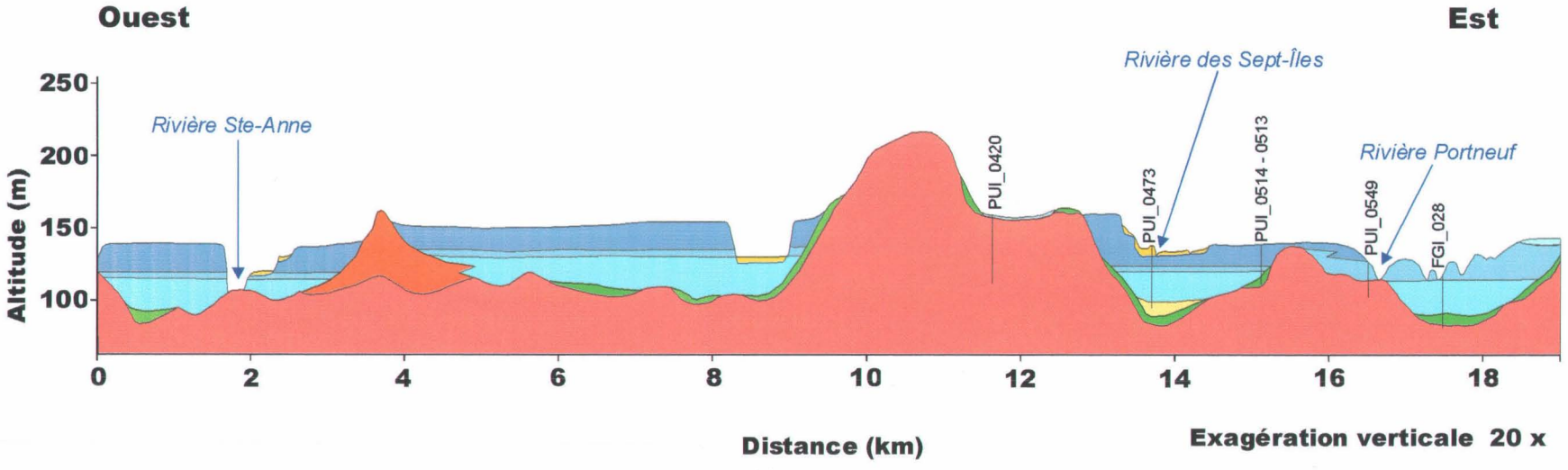
COUPE STRATIGRAPHIQUE 1 - 1'



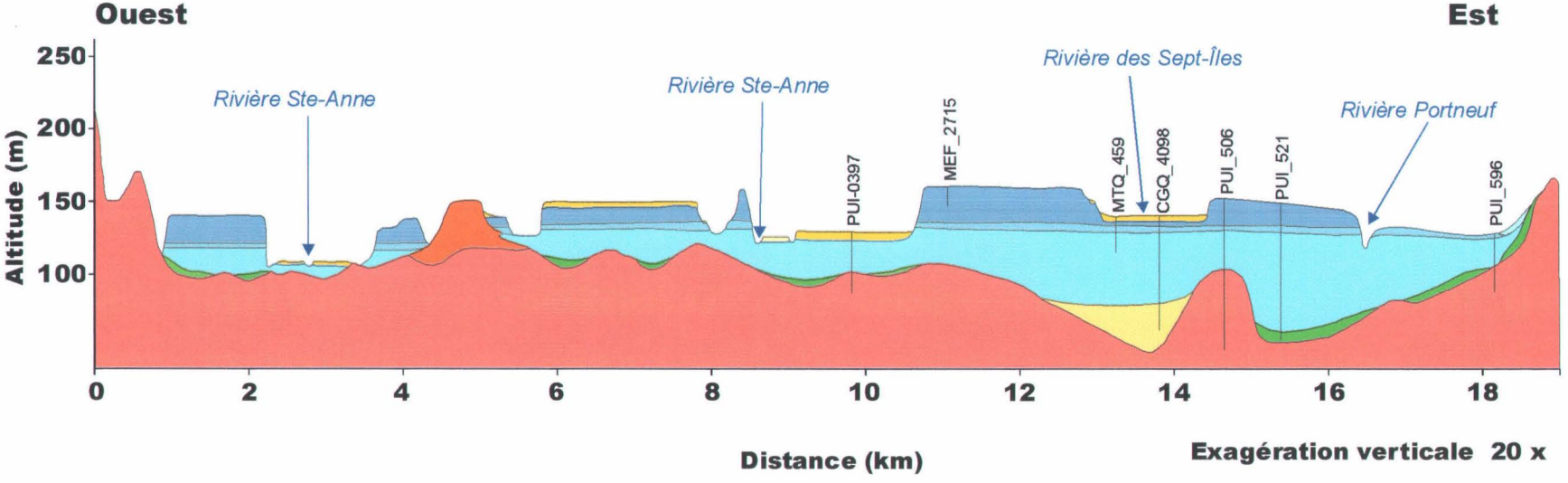
COUPE STRATIGRAPHIQUE 2 - 2'



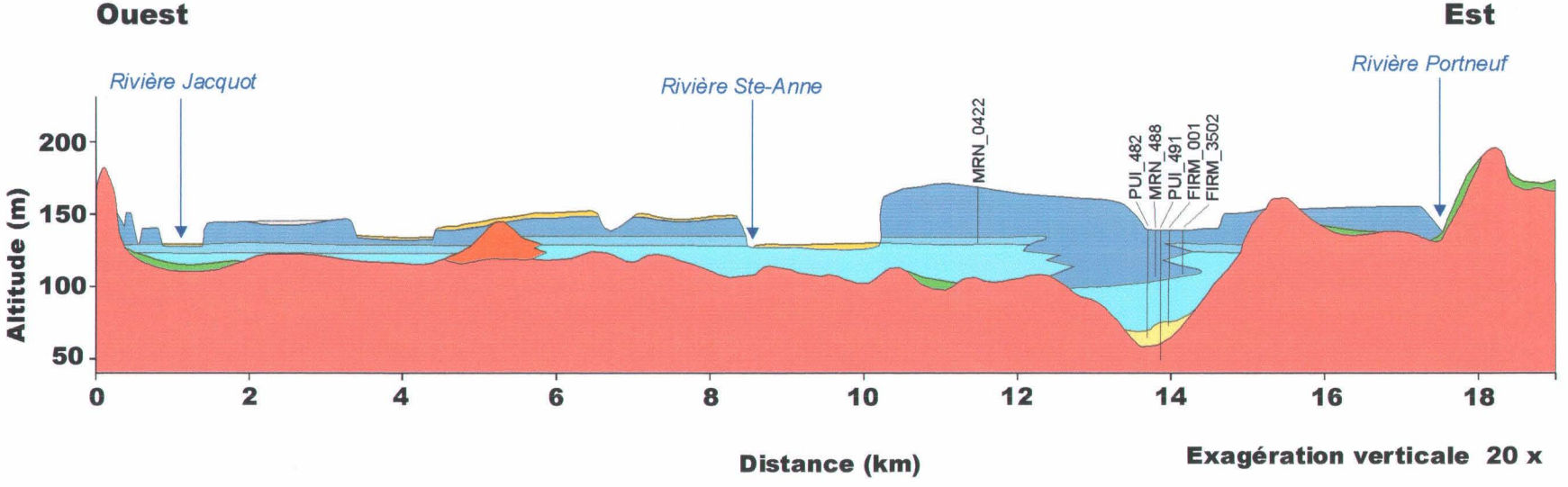
COUPE STRATIGRAPHIQUE 3 - 3'



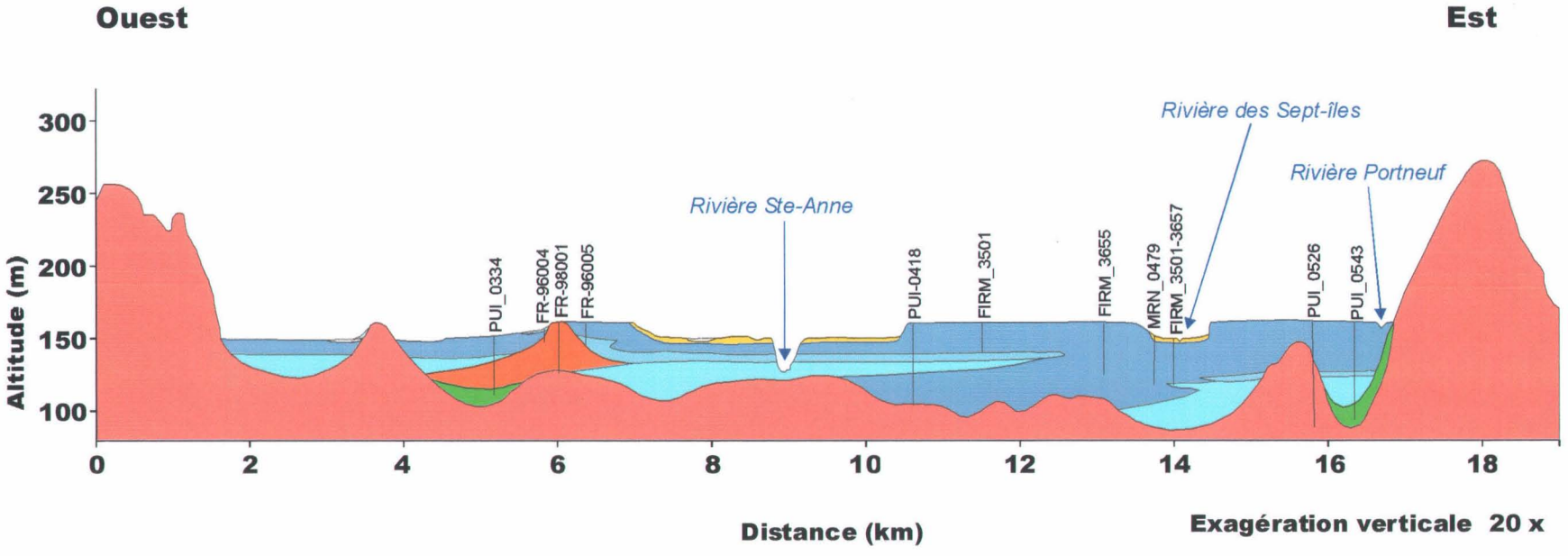
COUPE STRATIGRAPHIQUE 4 - 4'



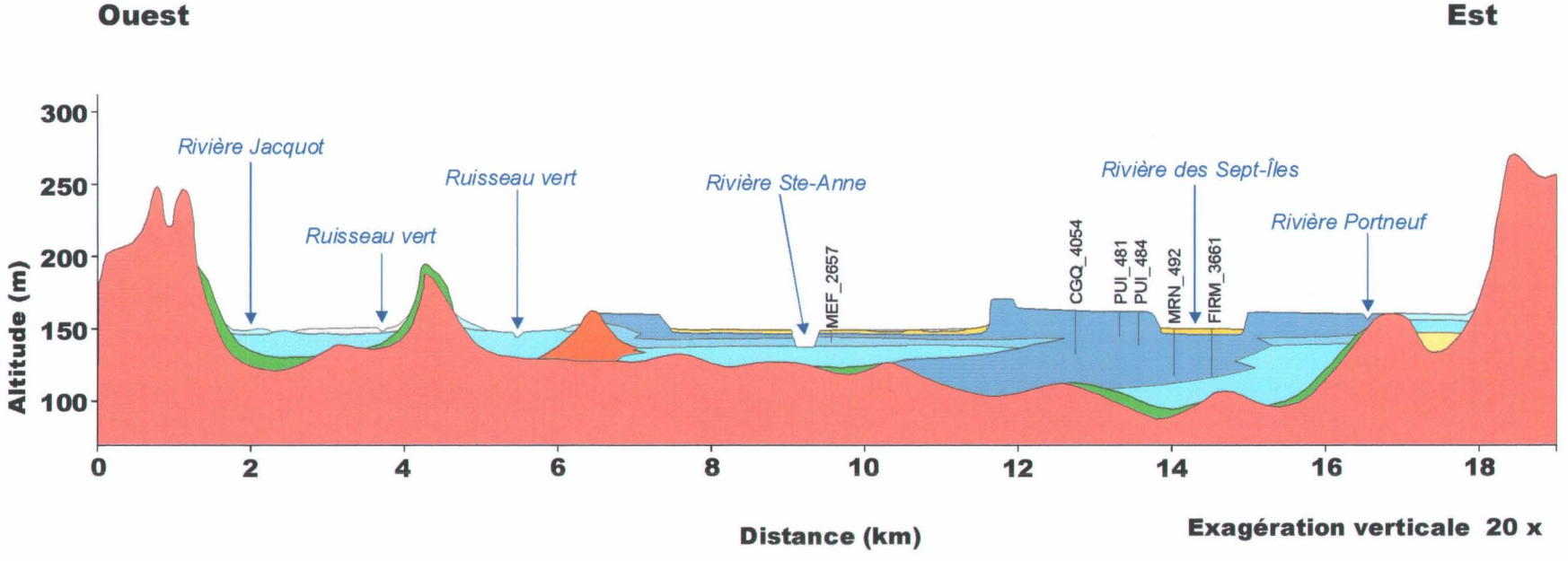
COUPE STRATIGRAPHIQUE 5 - 5'



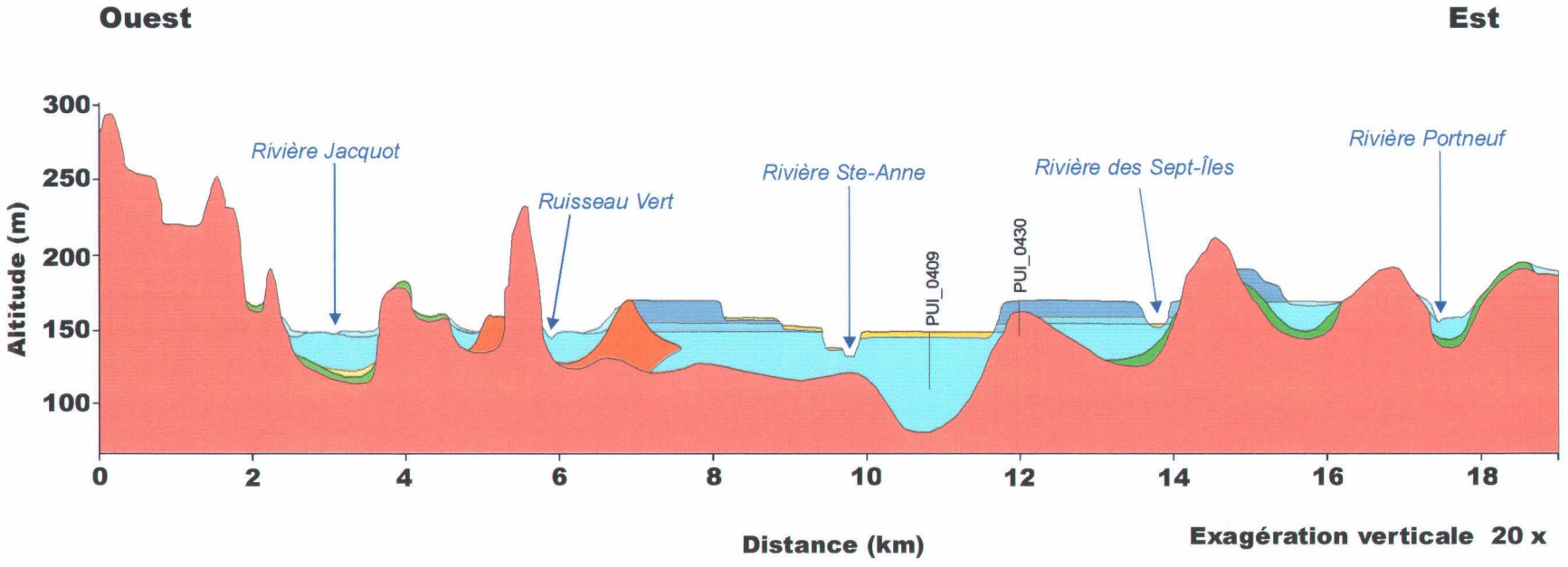
COUPE STRATIGRAPHIQUE 6 - 6'



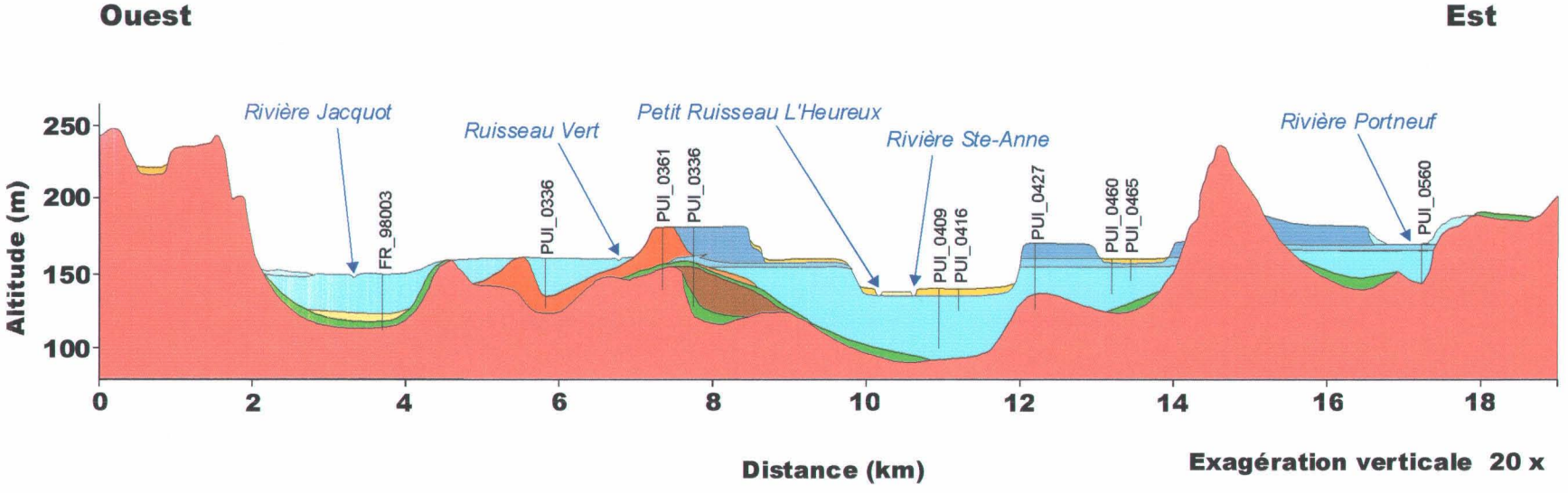
COUPE STRATIGRAPHIQUE 7 - 7'



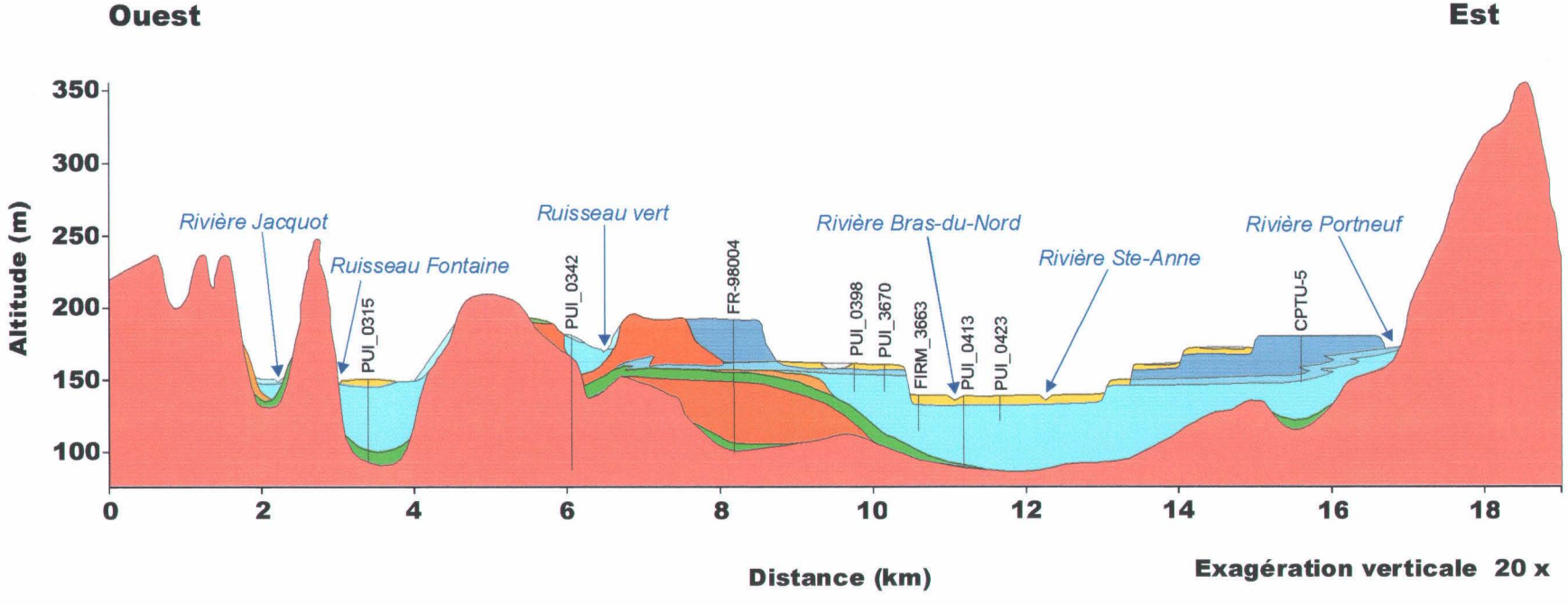
COUPE STRATIGRAPHIQUE 8 - 8'



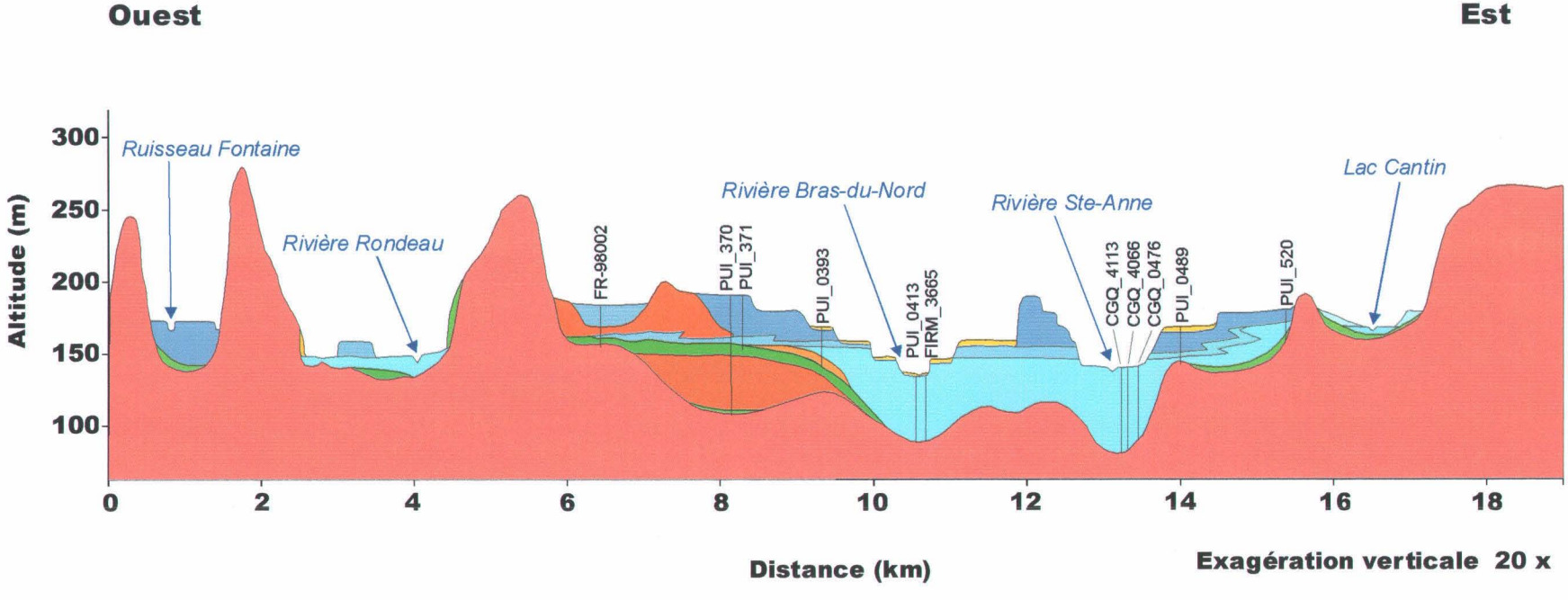
COUPE STRATIGRAPHIQUE 9 - 9'



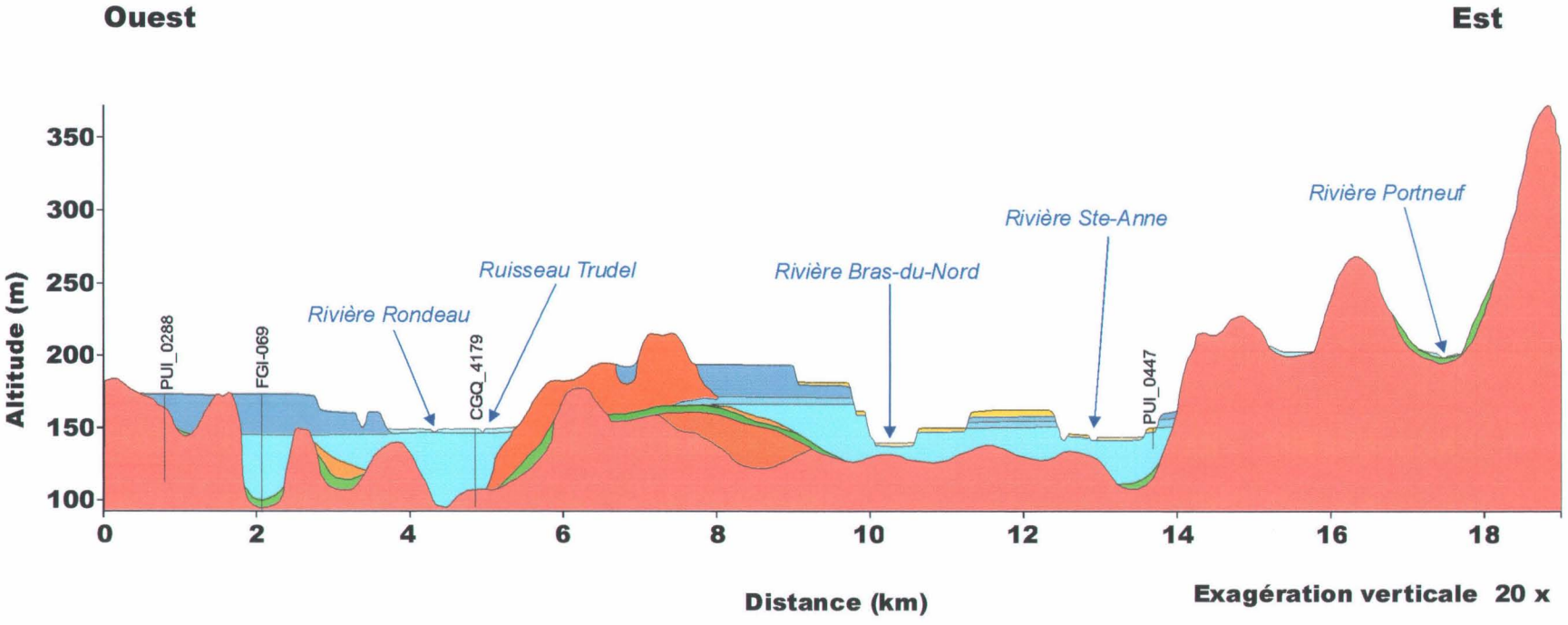
COUPE STRATIGRAPHIQUE 10 - 10'



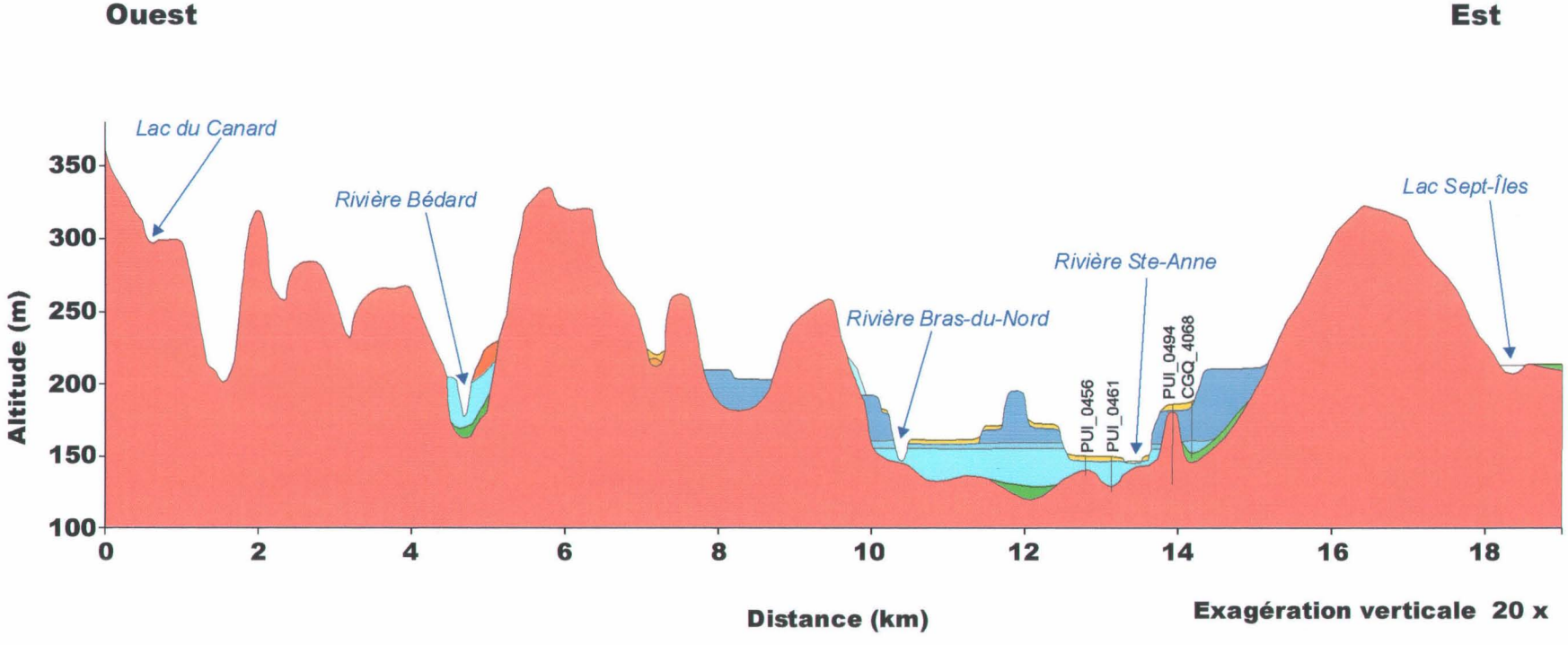
COUPE STRATIGRAPHIQUE 11 - 11'



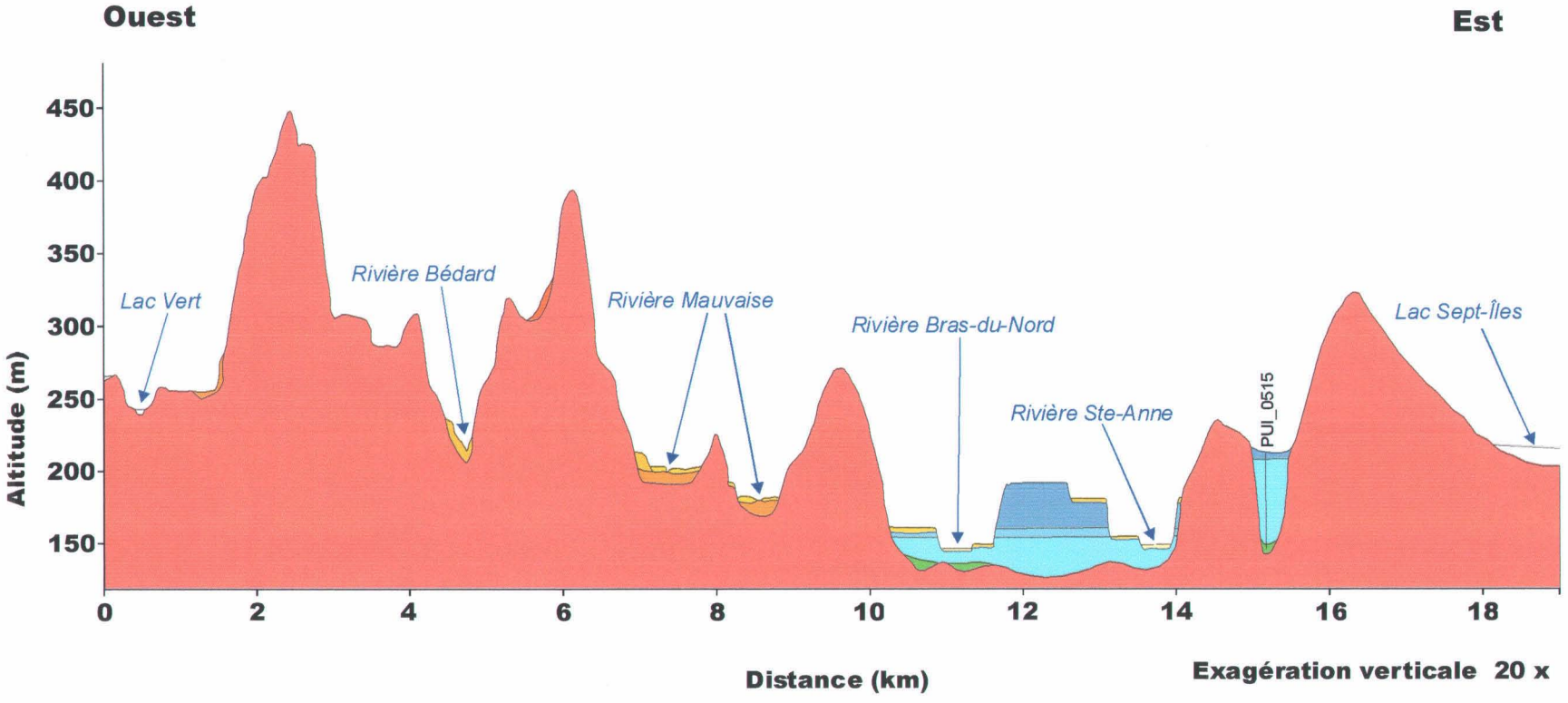
COUPE STRATIGRAPHIQUE 12 - 12'



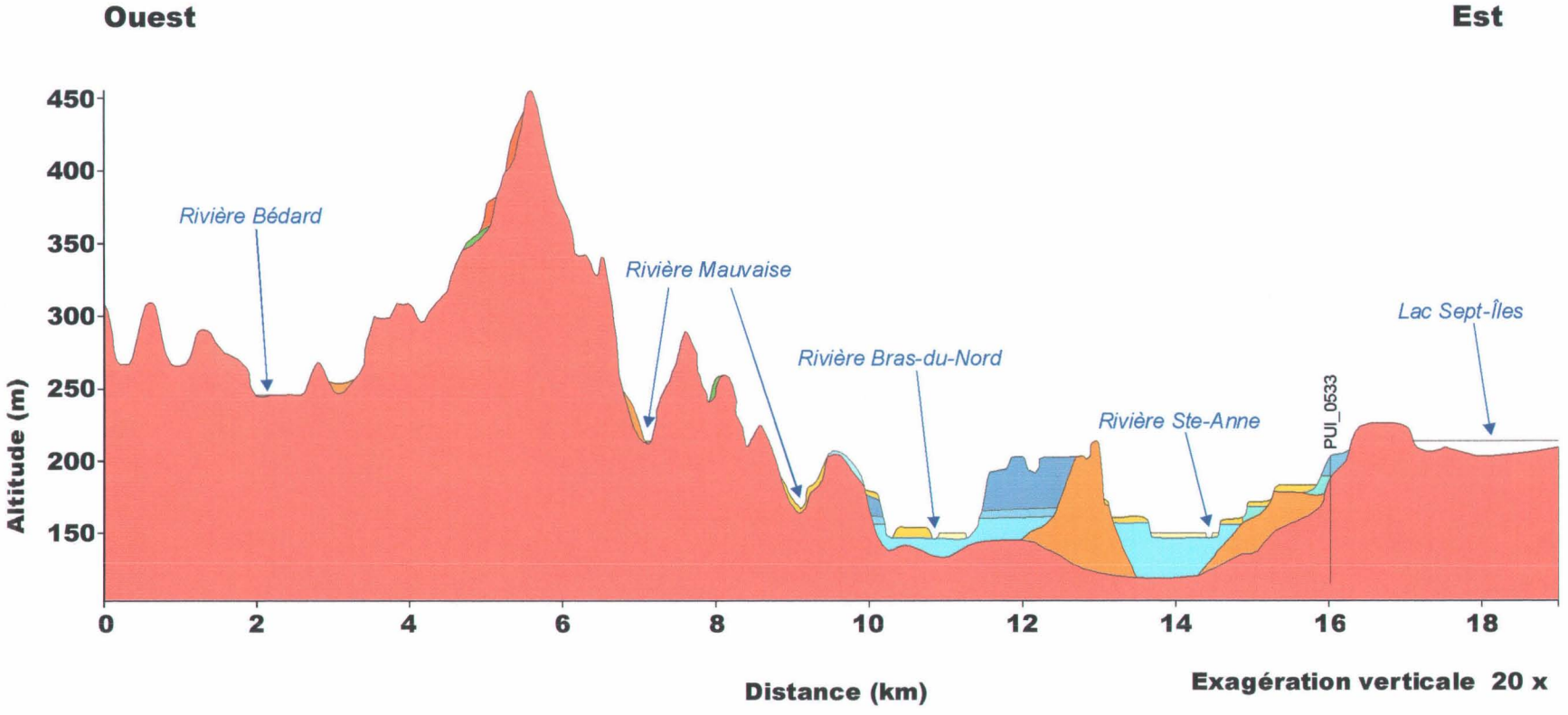
COUPE STRATIGRAPHIQUE 13 - 13'



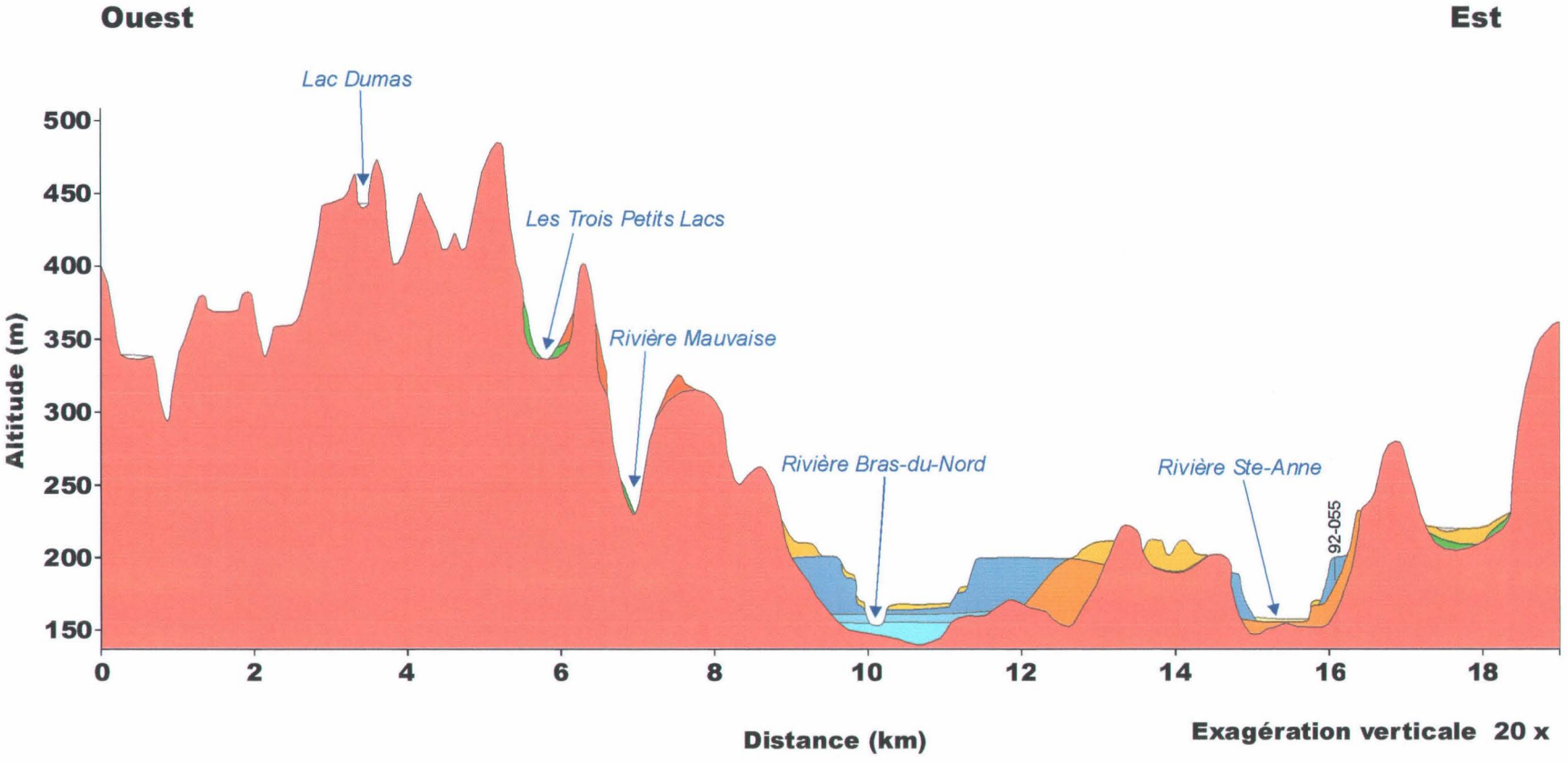
COUPE STRATIGRAPHIQUE 14 - 14'



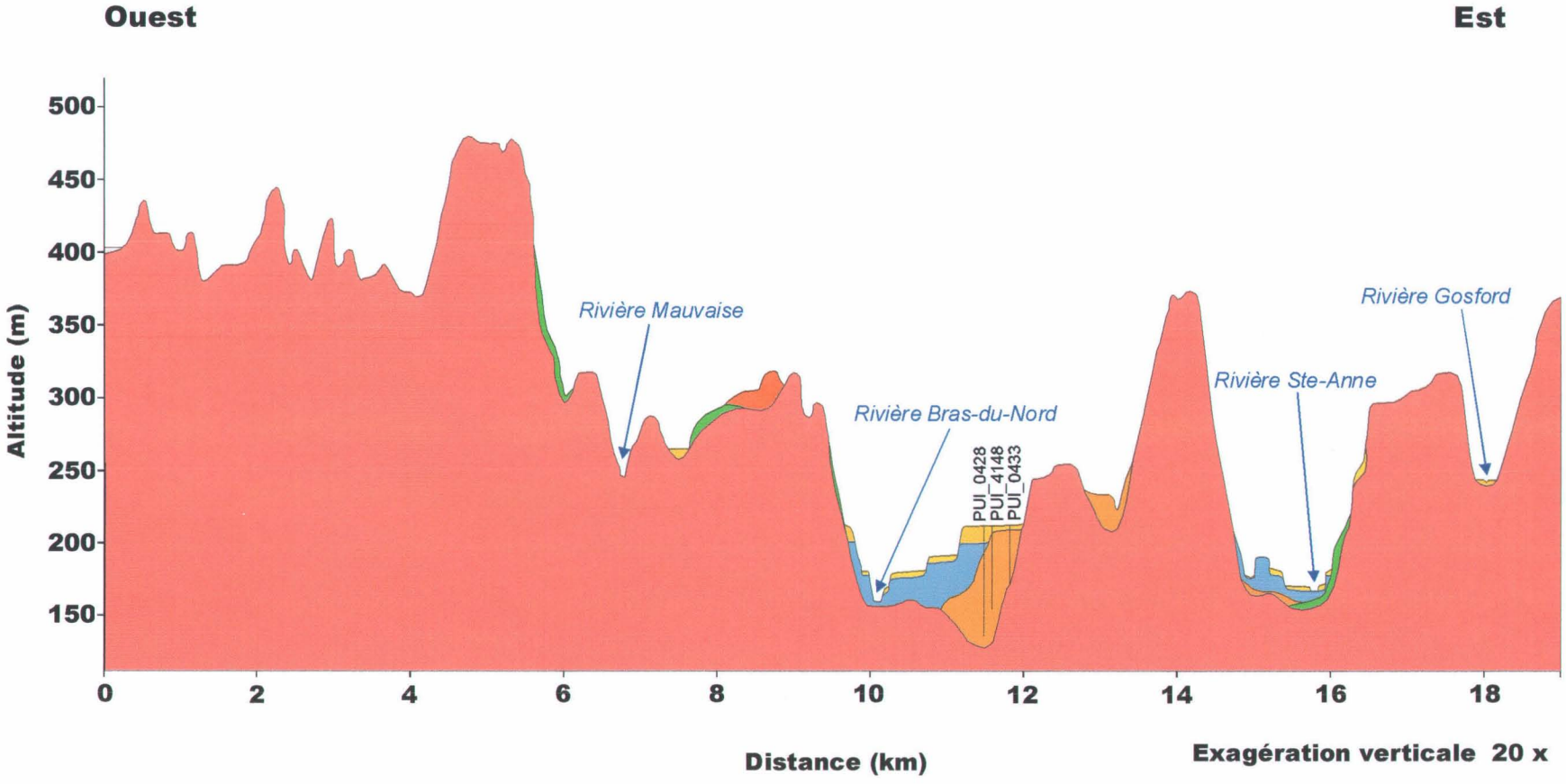
COUPE STRATIGRAPHIQUE 15 - 15'



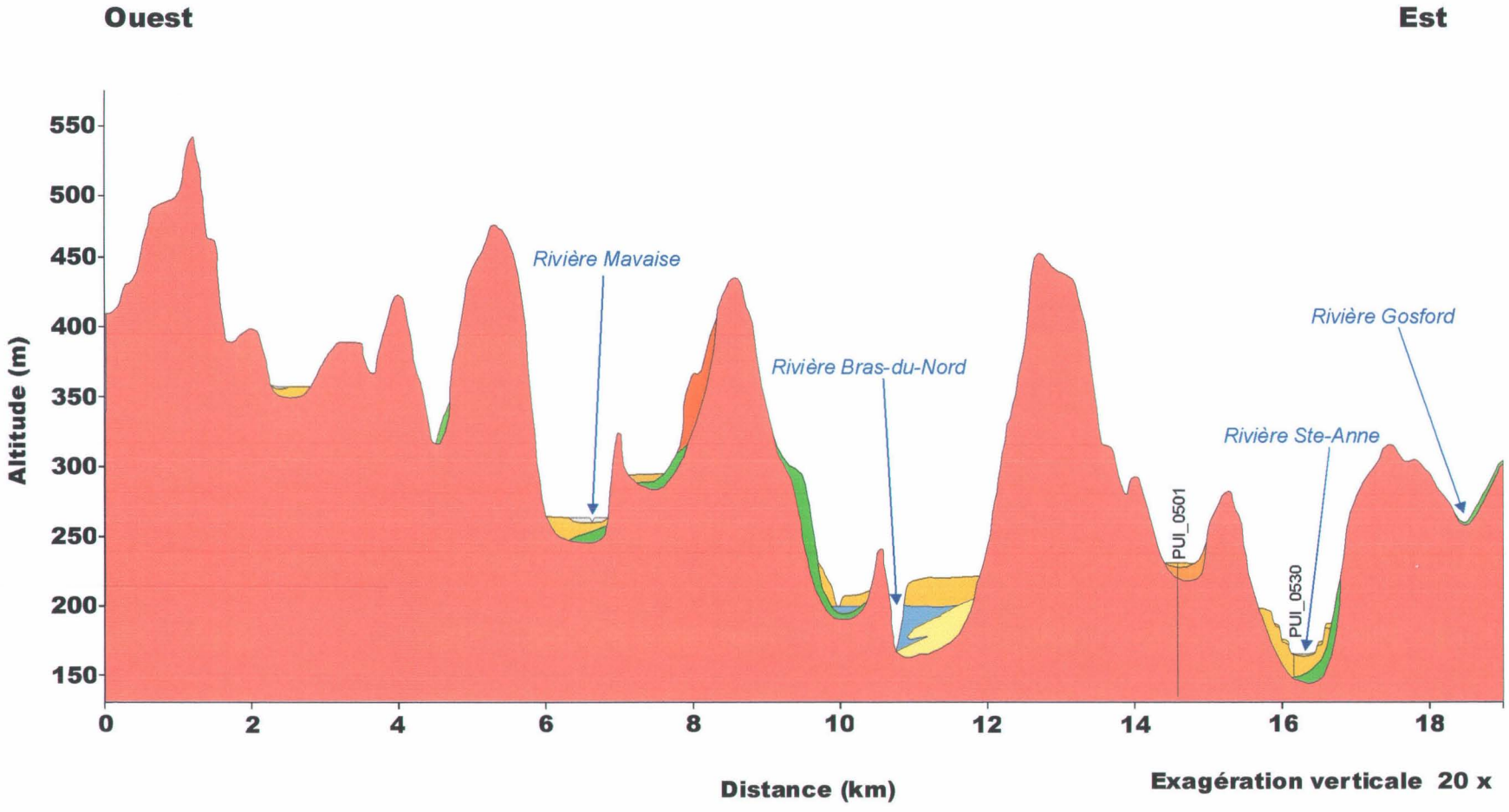
COUPE STRATIGRAPHIQUE 16 - 16'



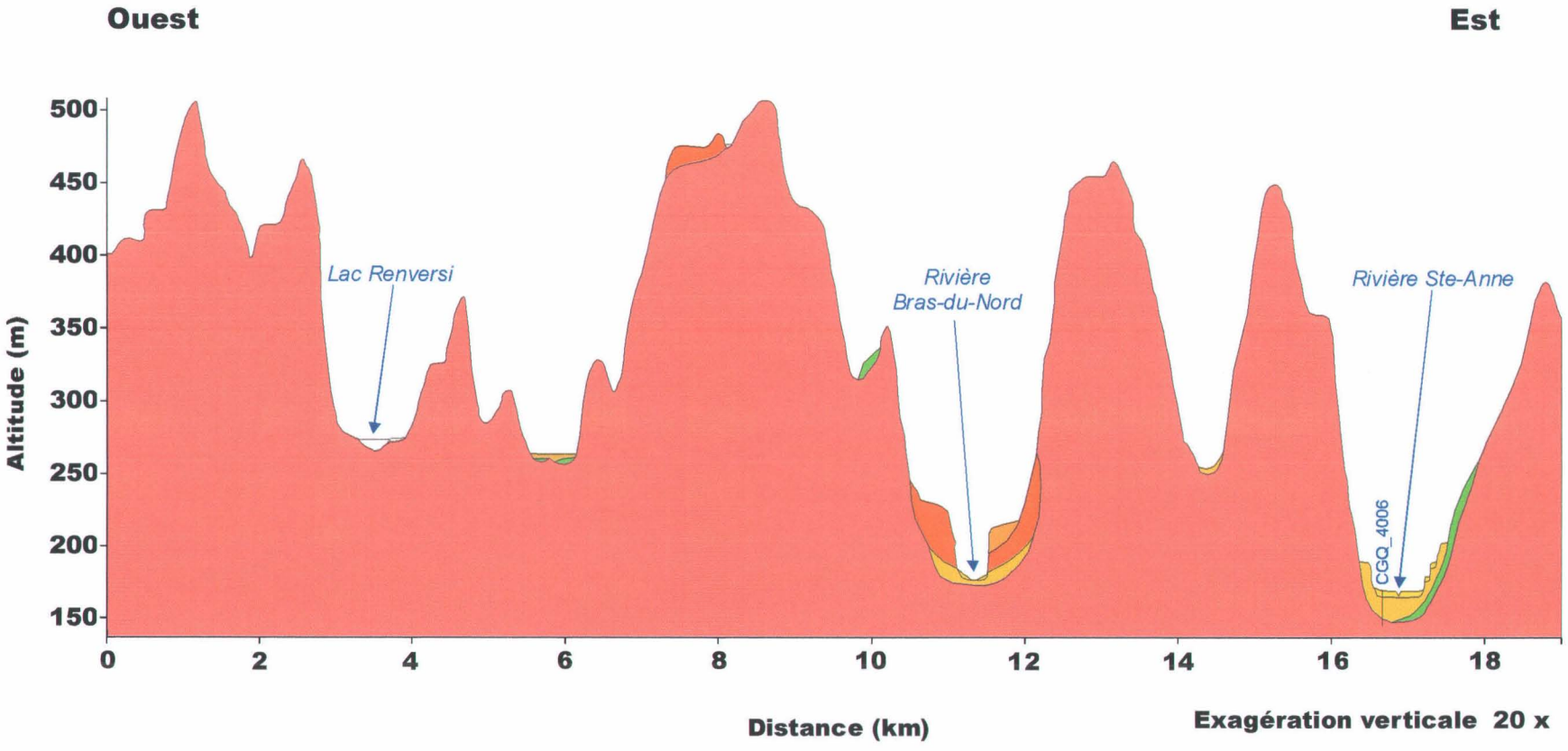
COUPE STRATIGRAPHIQUE 17 - 17'



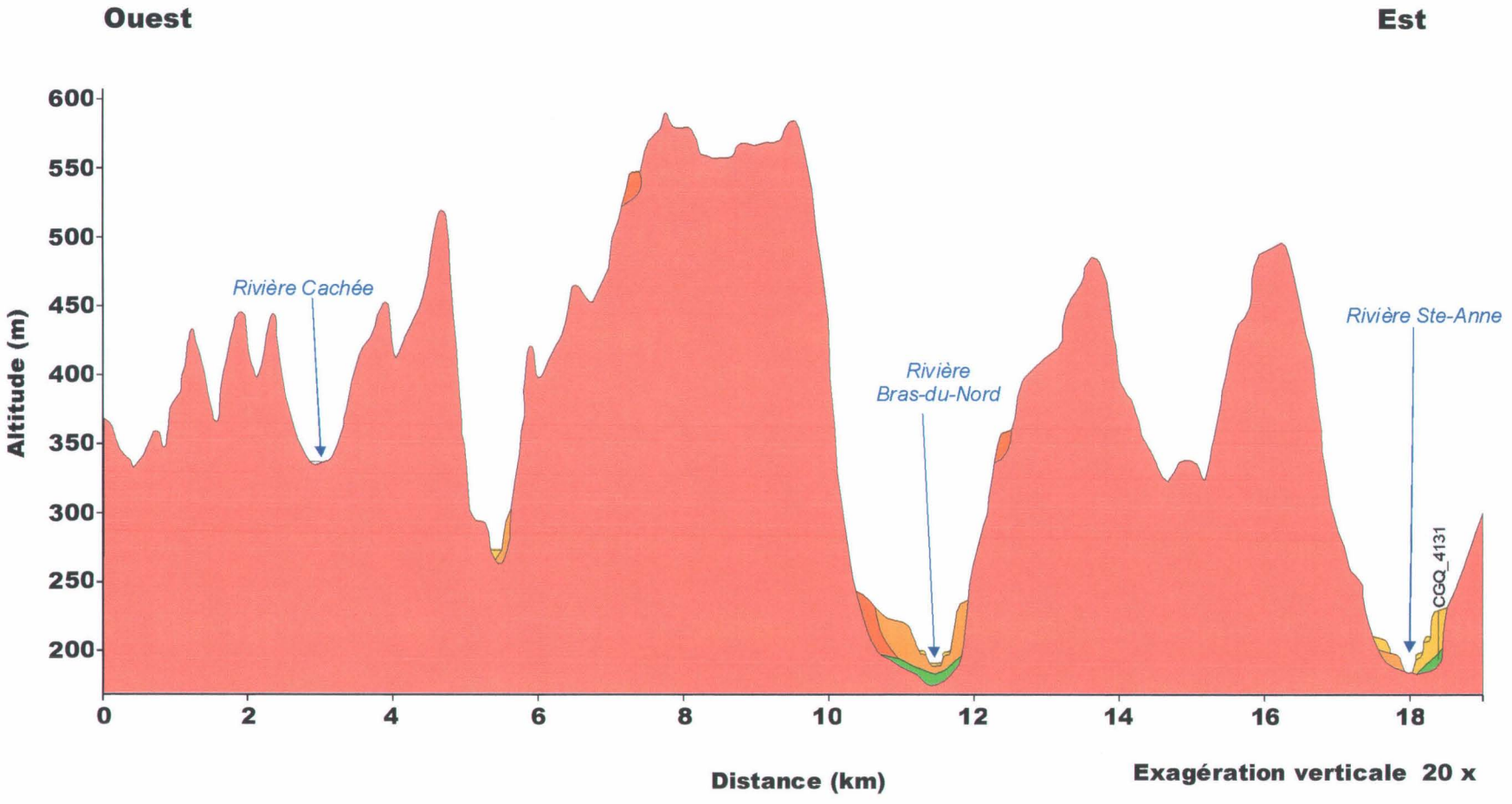
COUPE STRATIGRAPHIQUE 18 - 18'



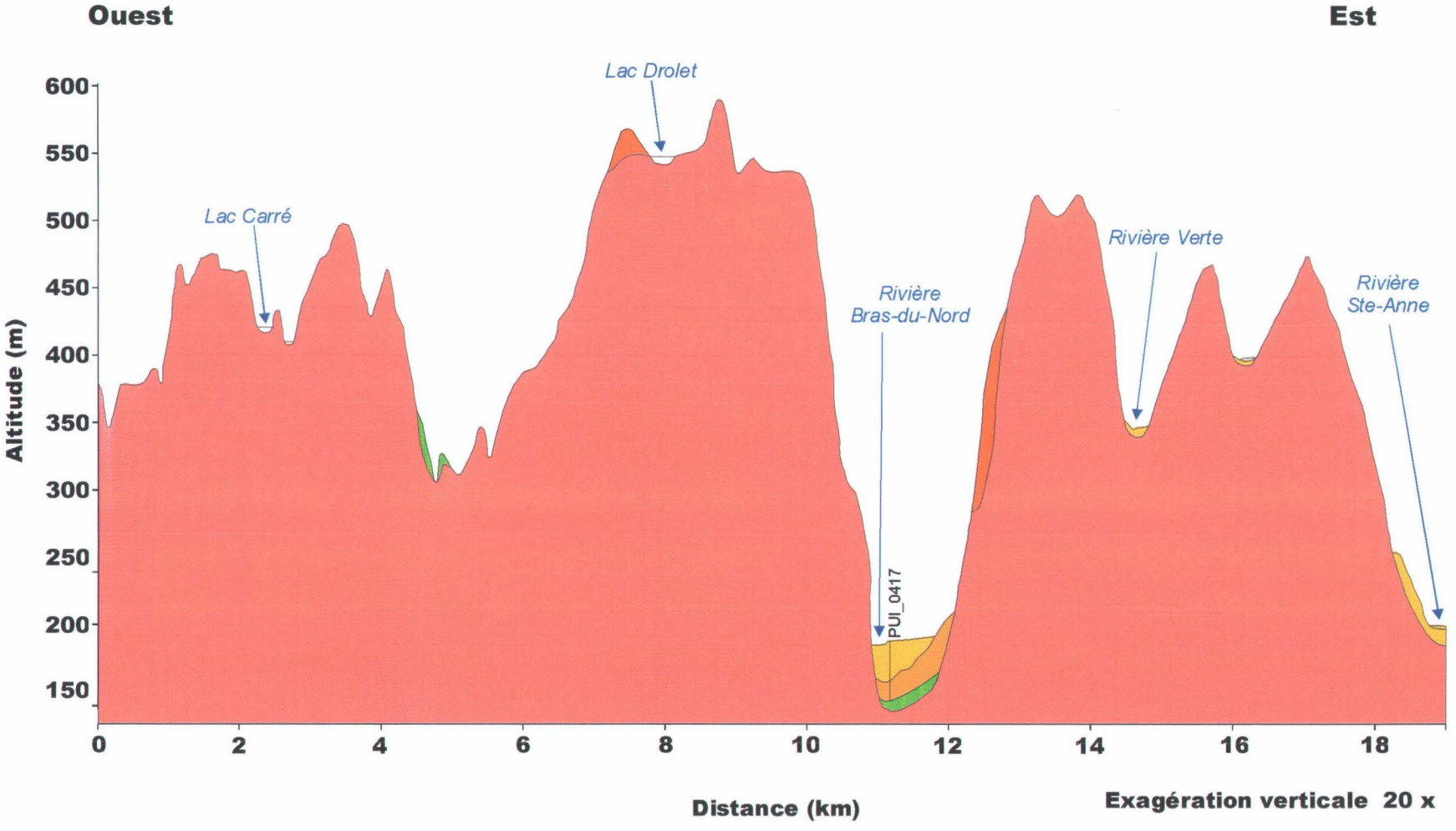
COUPE STRATIGRAPHIQUE 19 - 19'



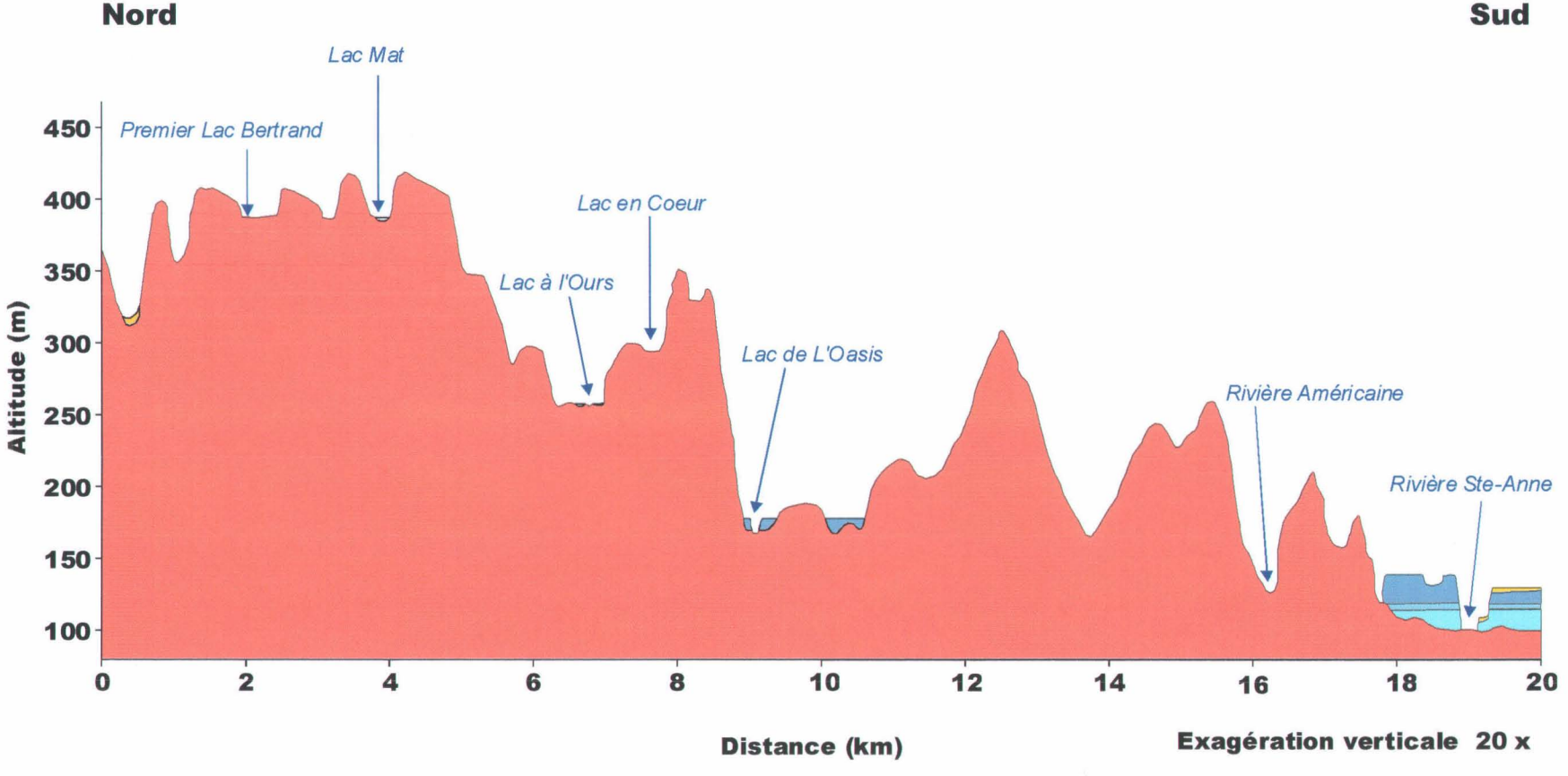
COUPE STRATIGRAPHIQUE 20 - 20'



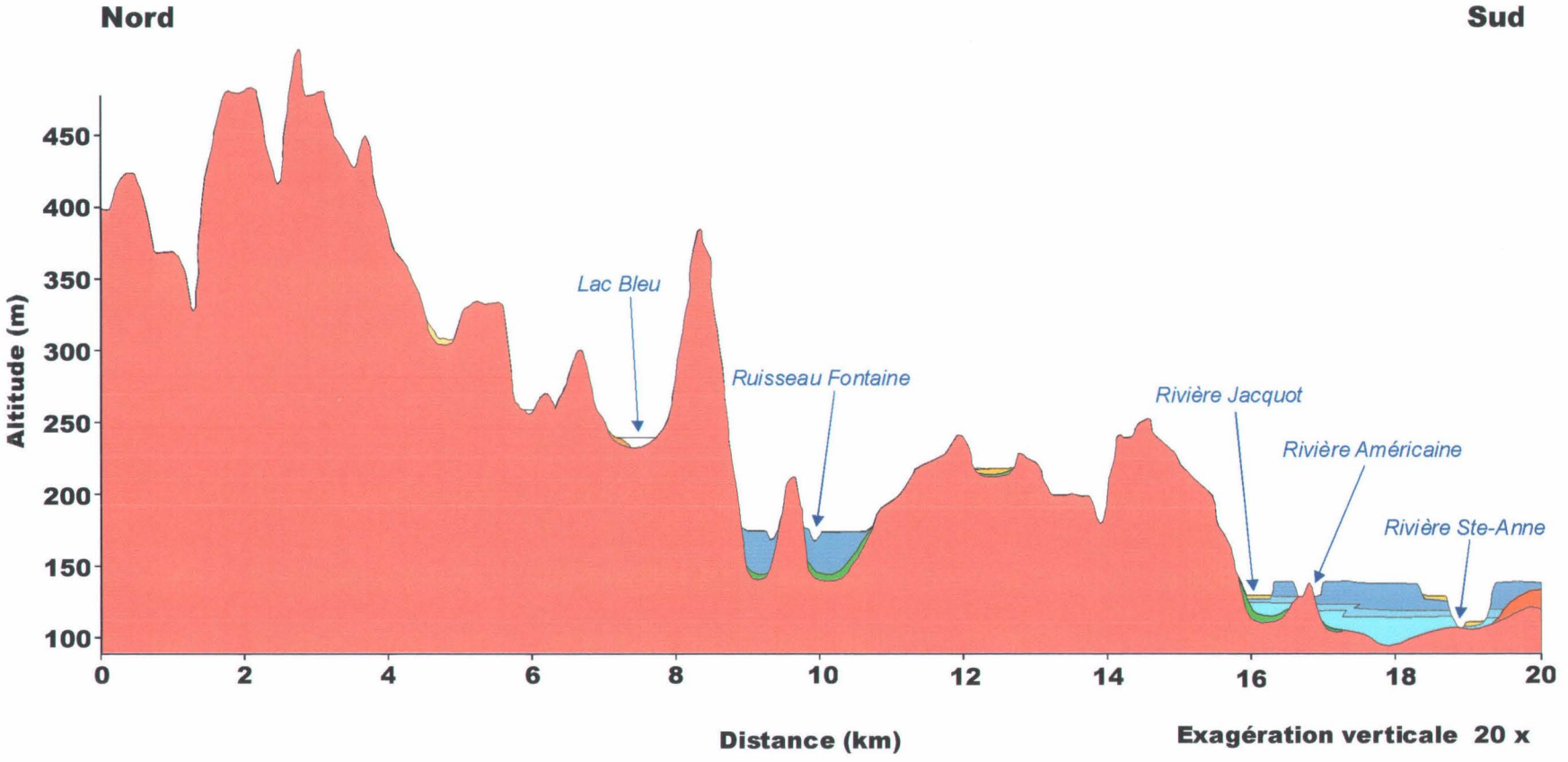
COUPE STRATIGRAPHIQUE 21 - 21'



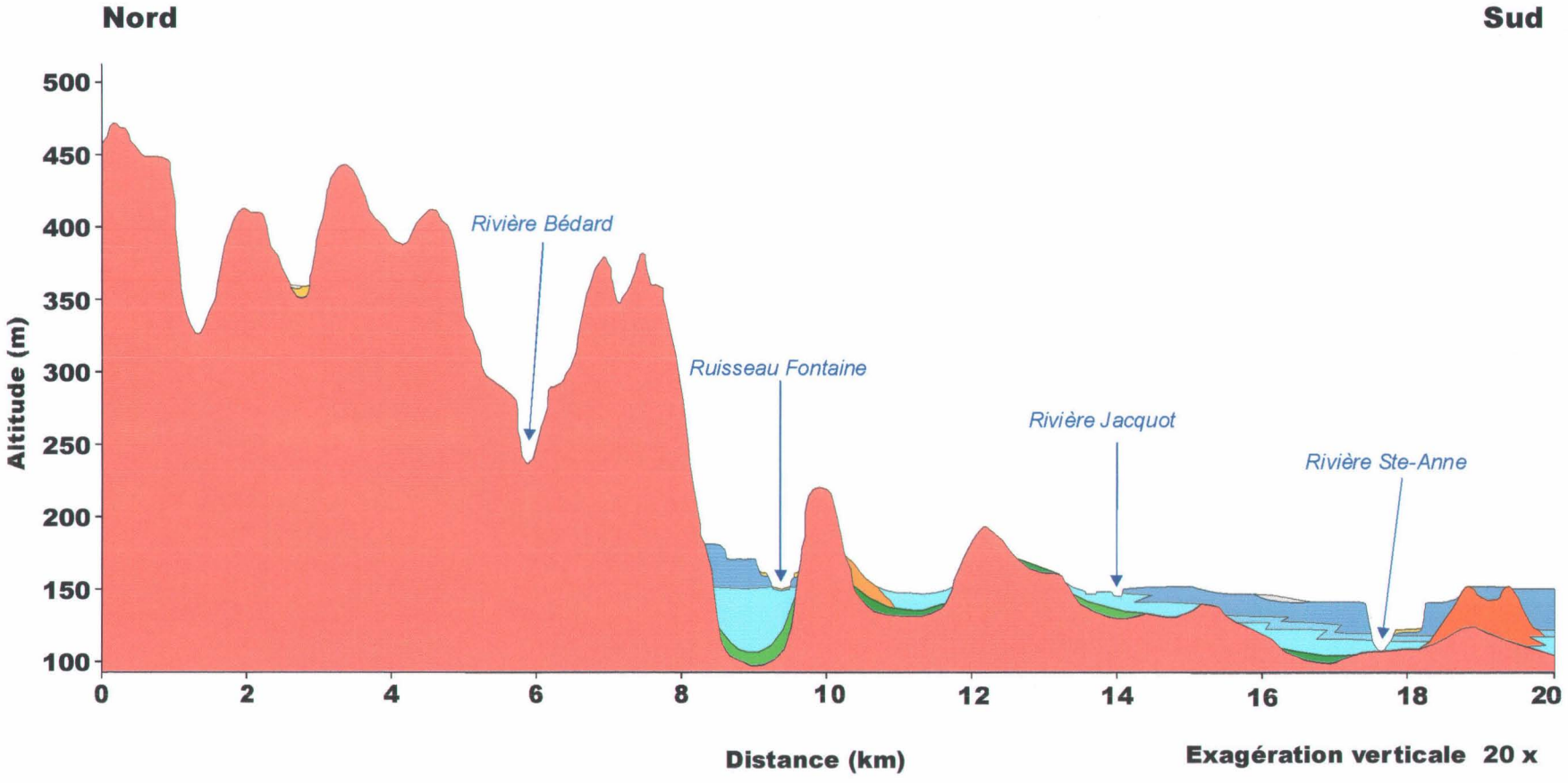
COUPE STRATIGRAPHIQUE A - A'



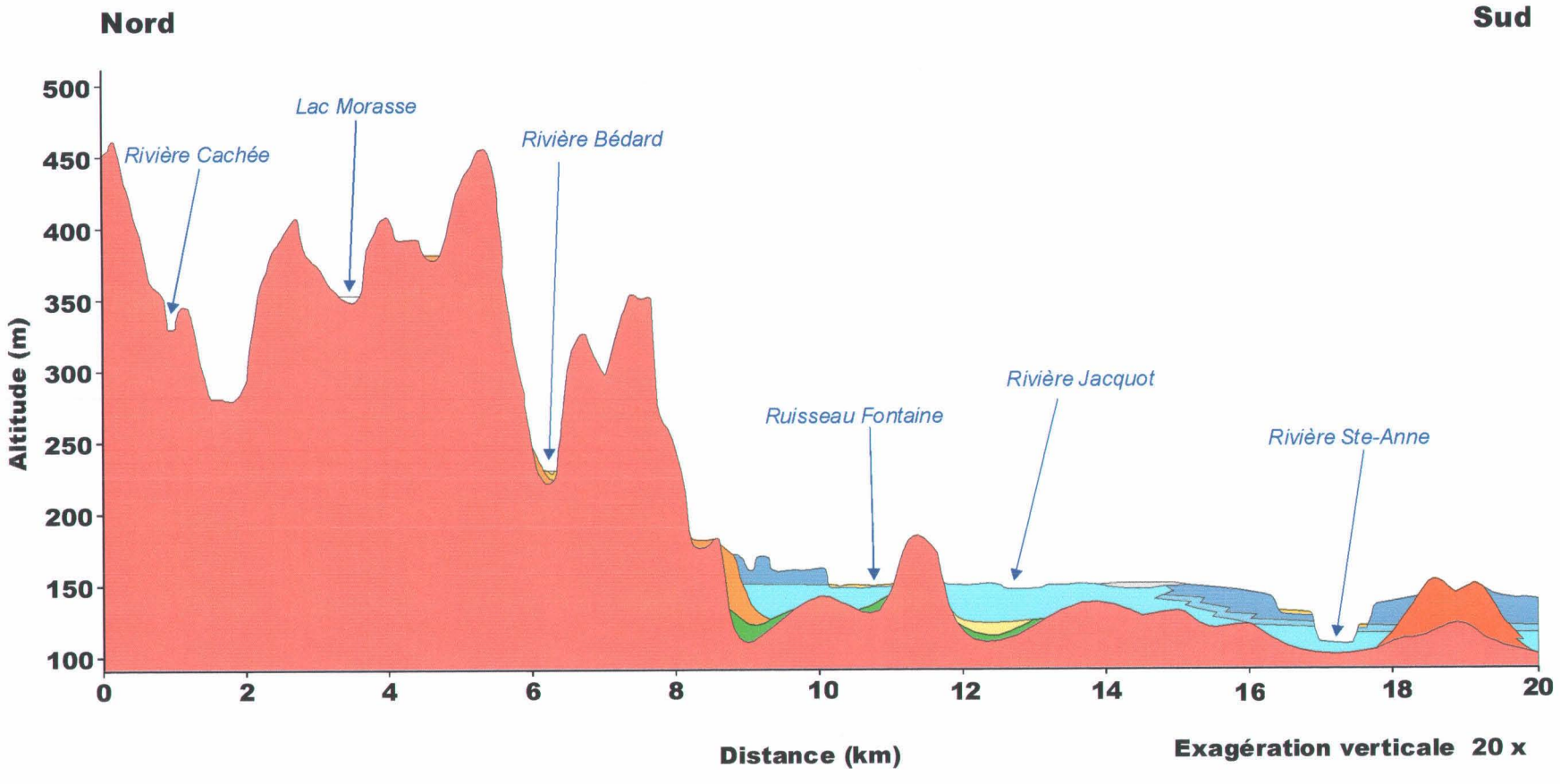
COUPE STRATIGRAPHIQUE B - B'



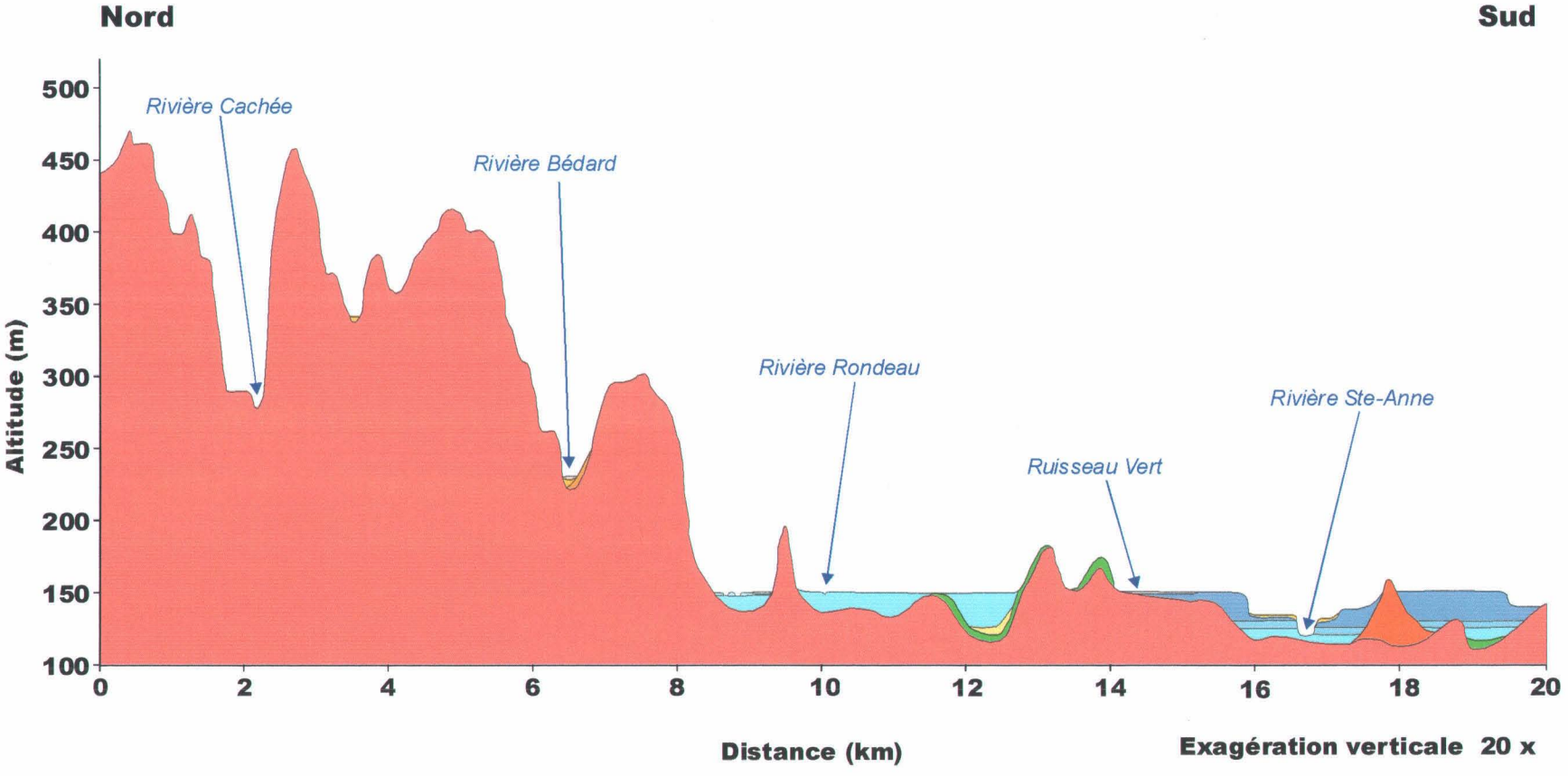
COUPE STRATIGRAPHIQUE C - C'



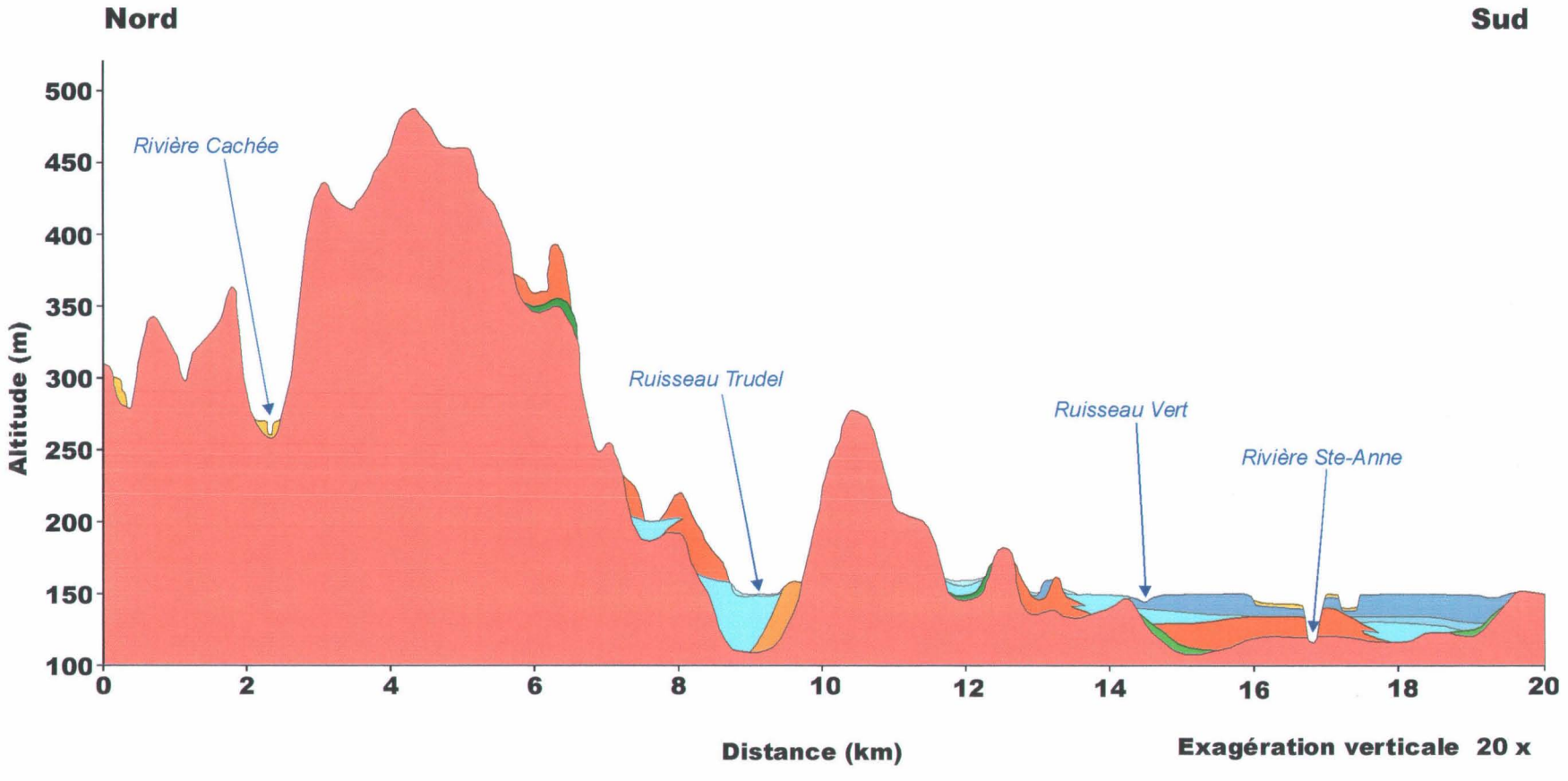
COUPE STRATIGRAPHIQUE D - D'



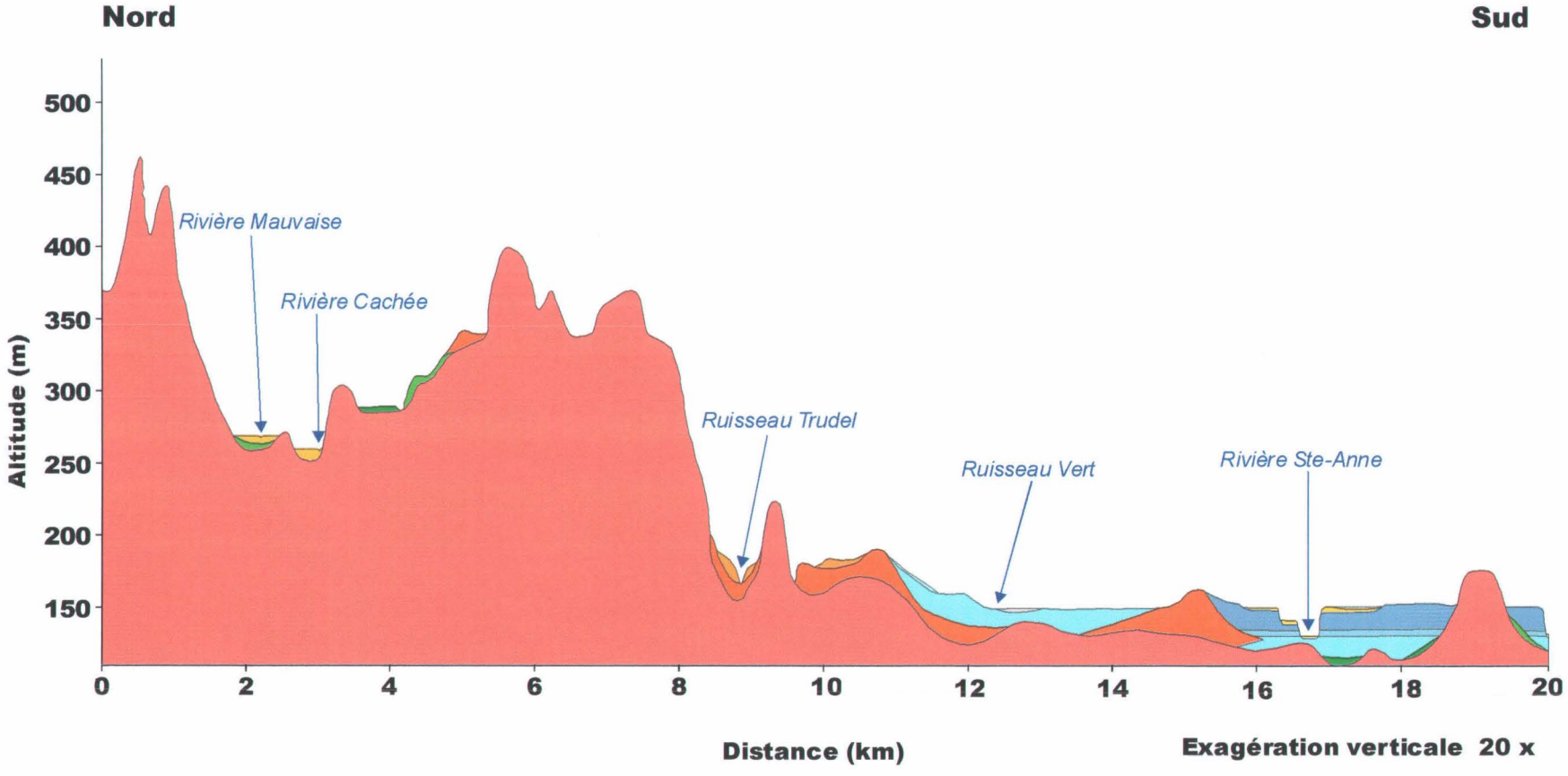
COUPE STRATIGRAPHIQUE E - E'



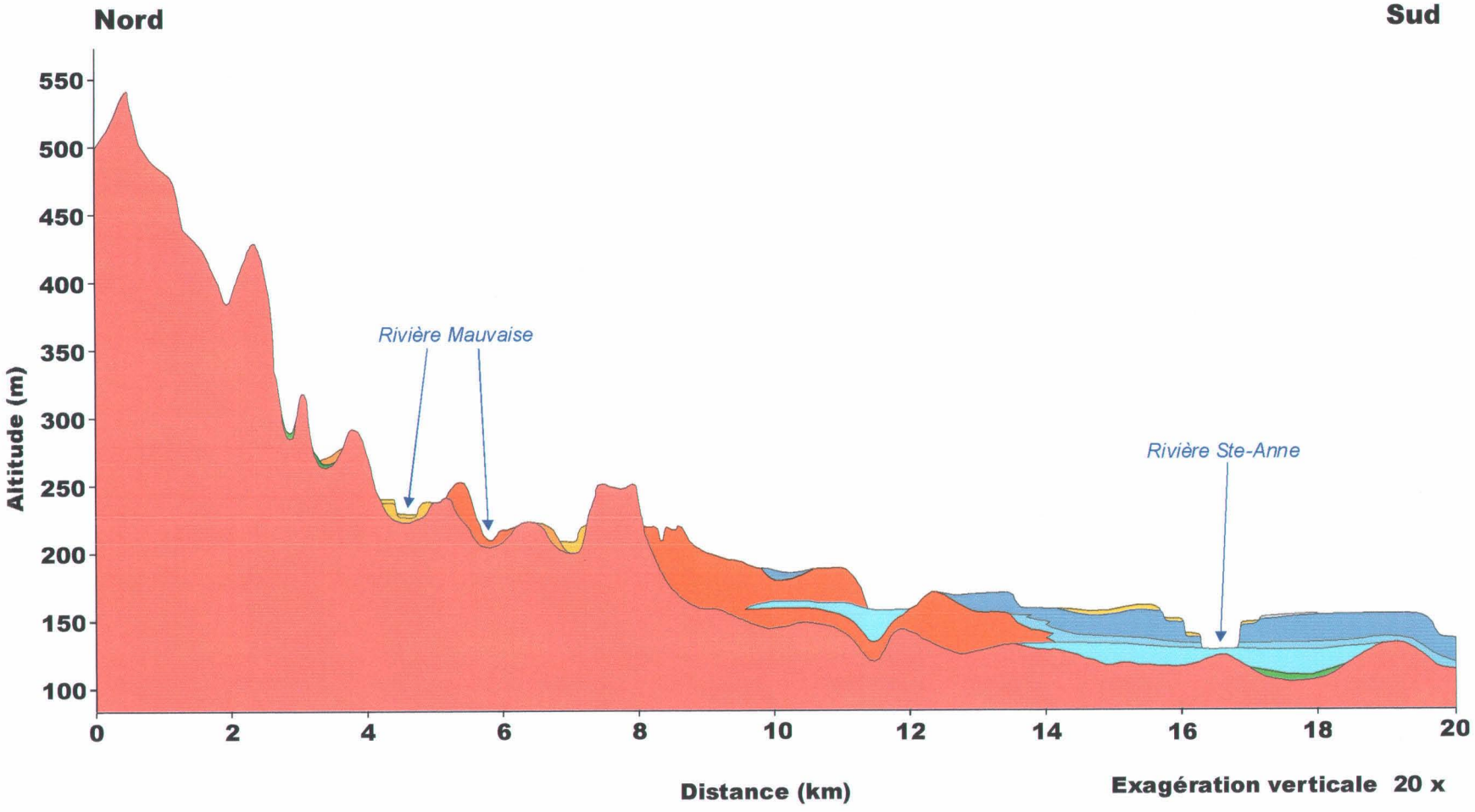
COUPE STRATIGRAPHIQUE F - F'



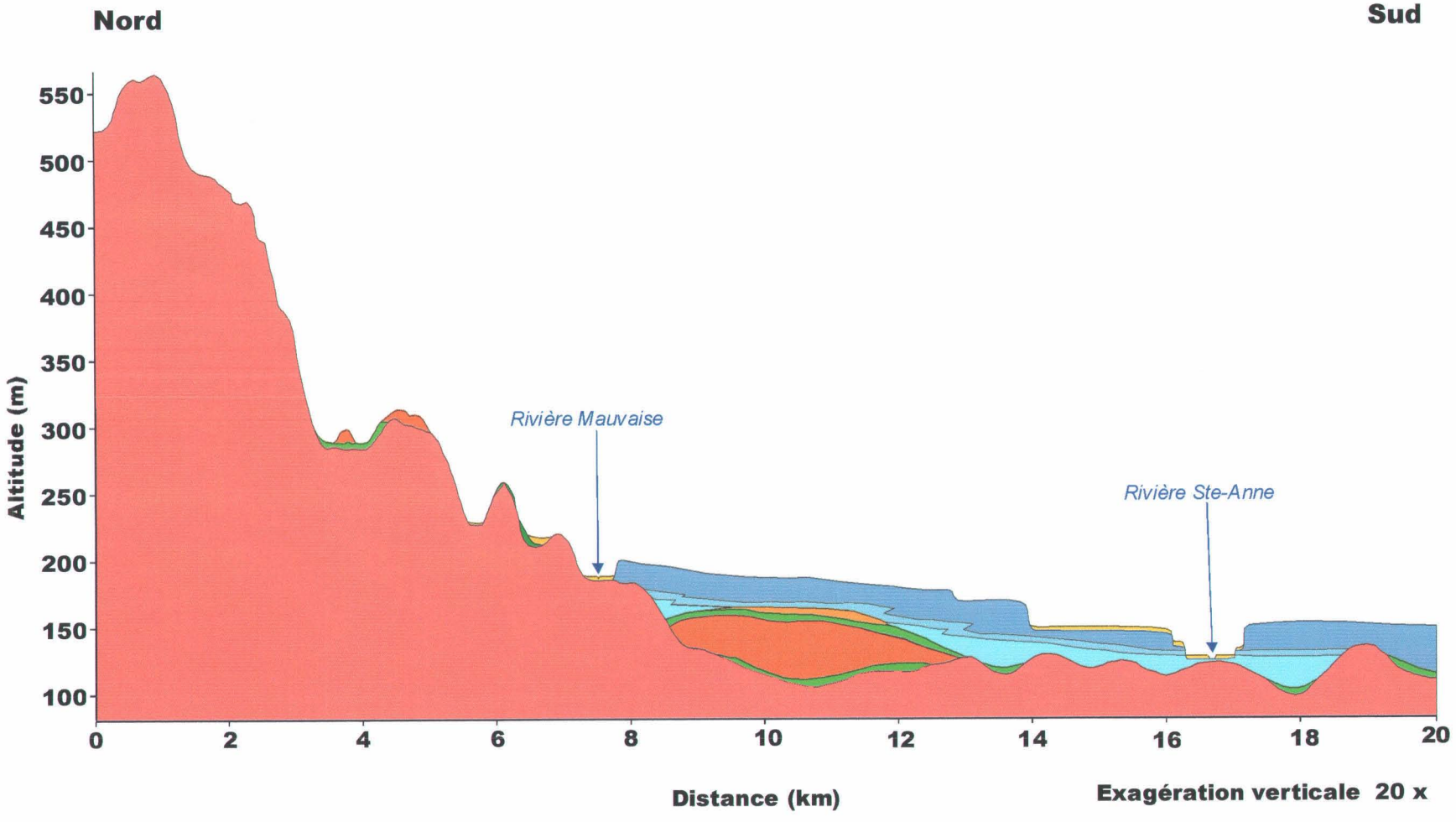
COUPE STRATIGRAPHIQUE G - G'



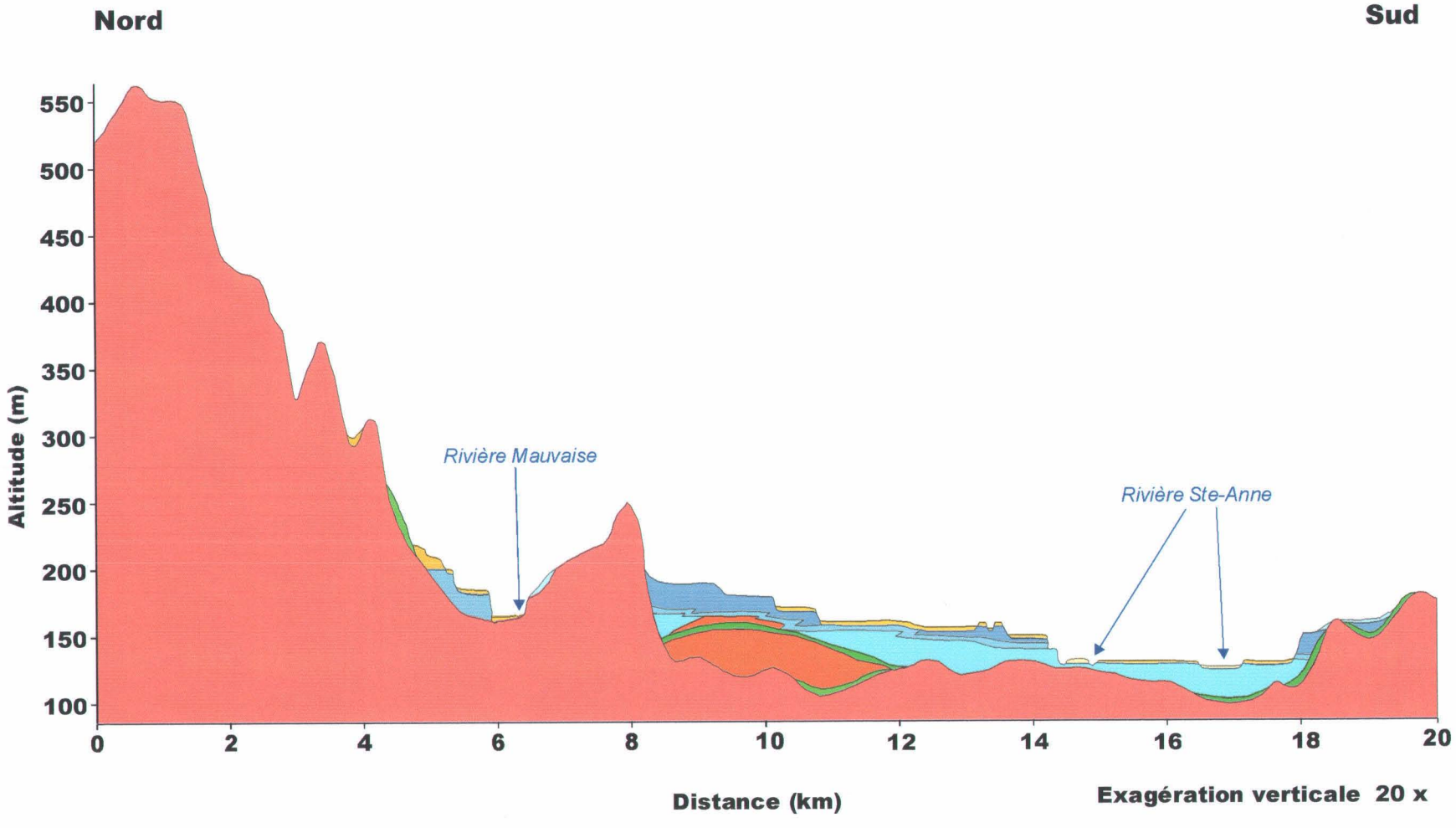
COUPE STRATIGRAPHIQUE H - H'



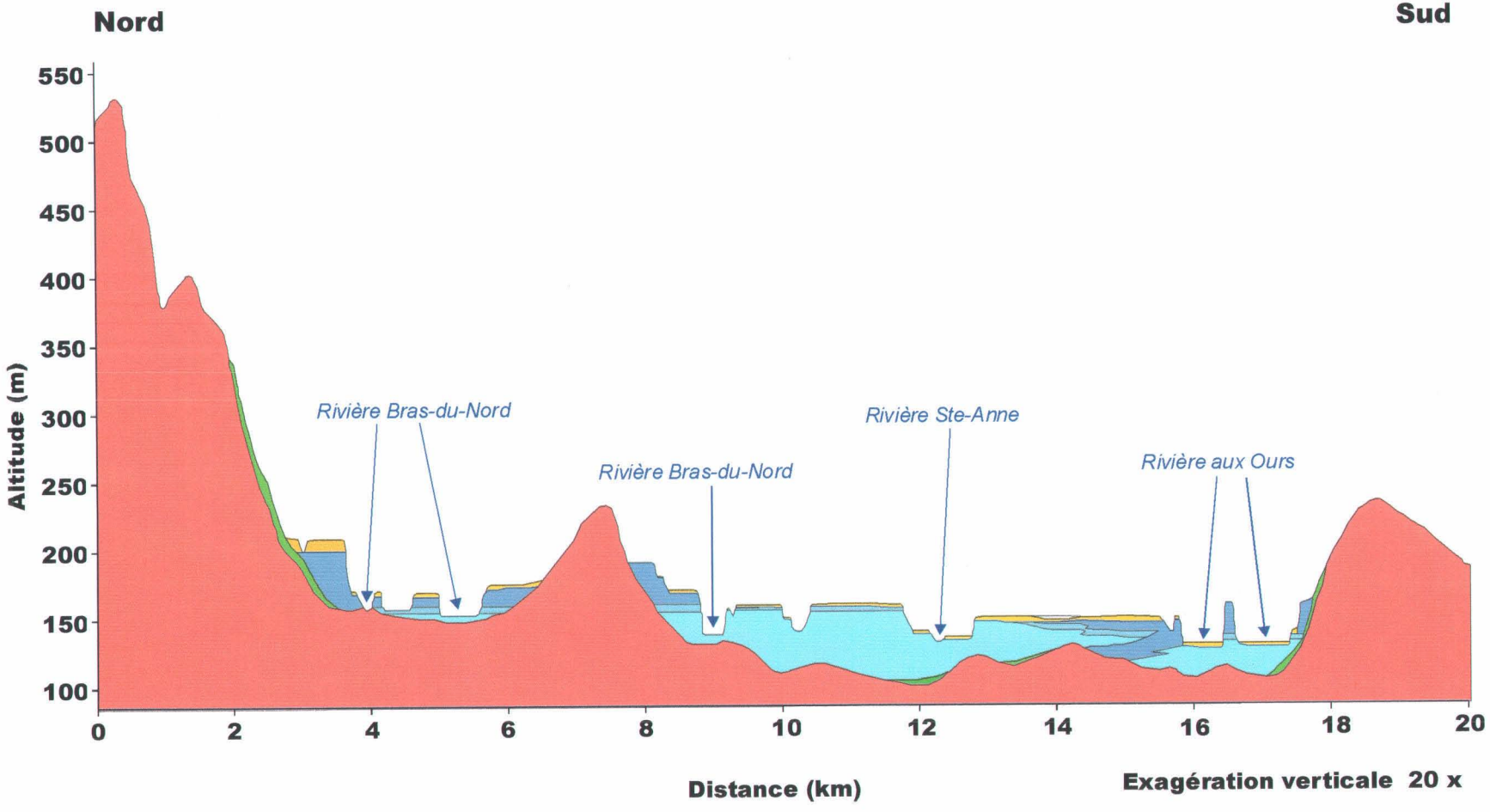
COUPE STRATIGRAPHIQUE I - I'



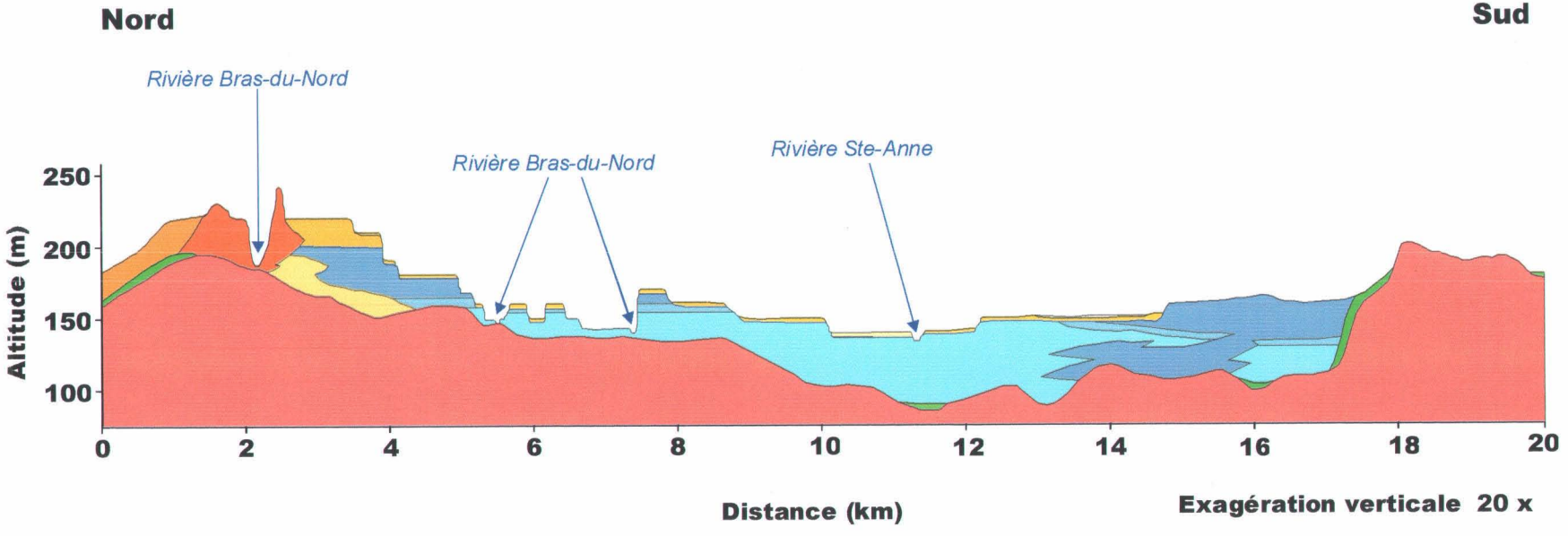
COUPE STRATIGRAPHIQUE J - J'



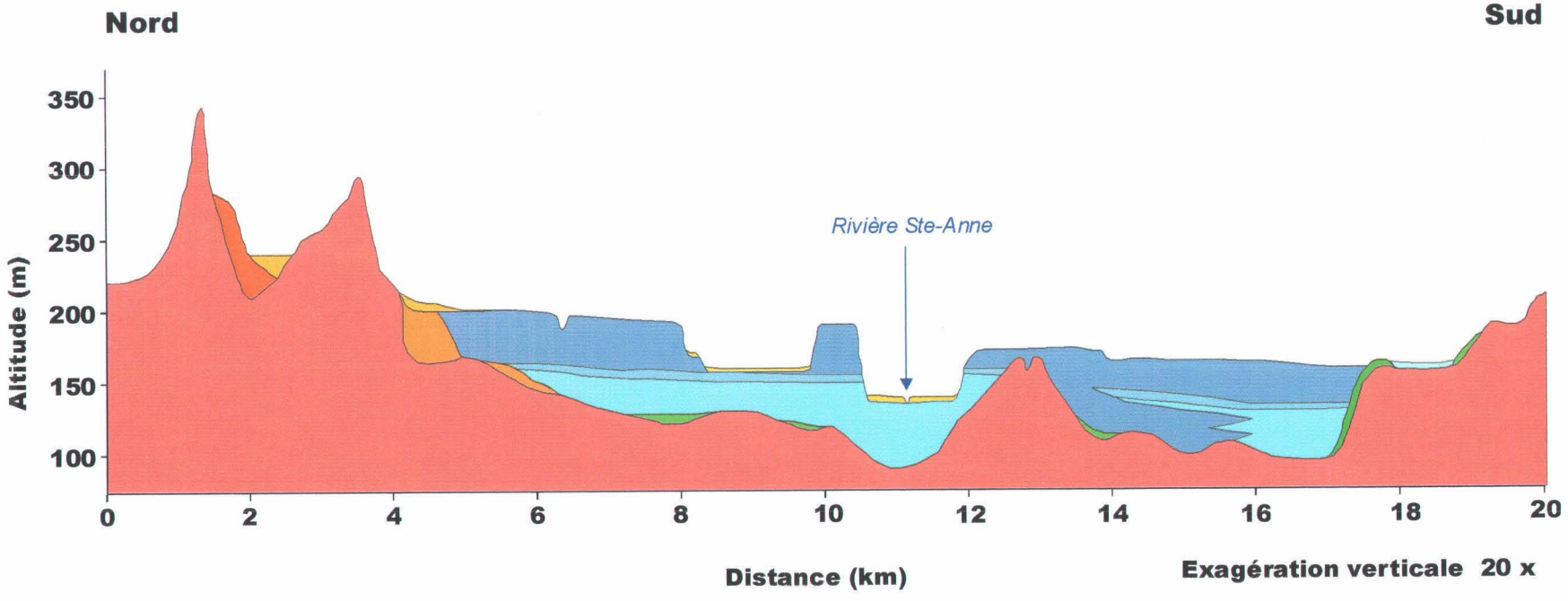
COUPE STRATIGRAPHIQUE K - K'



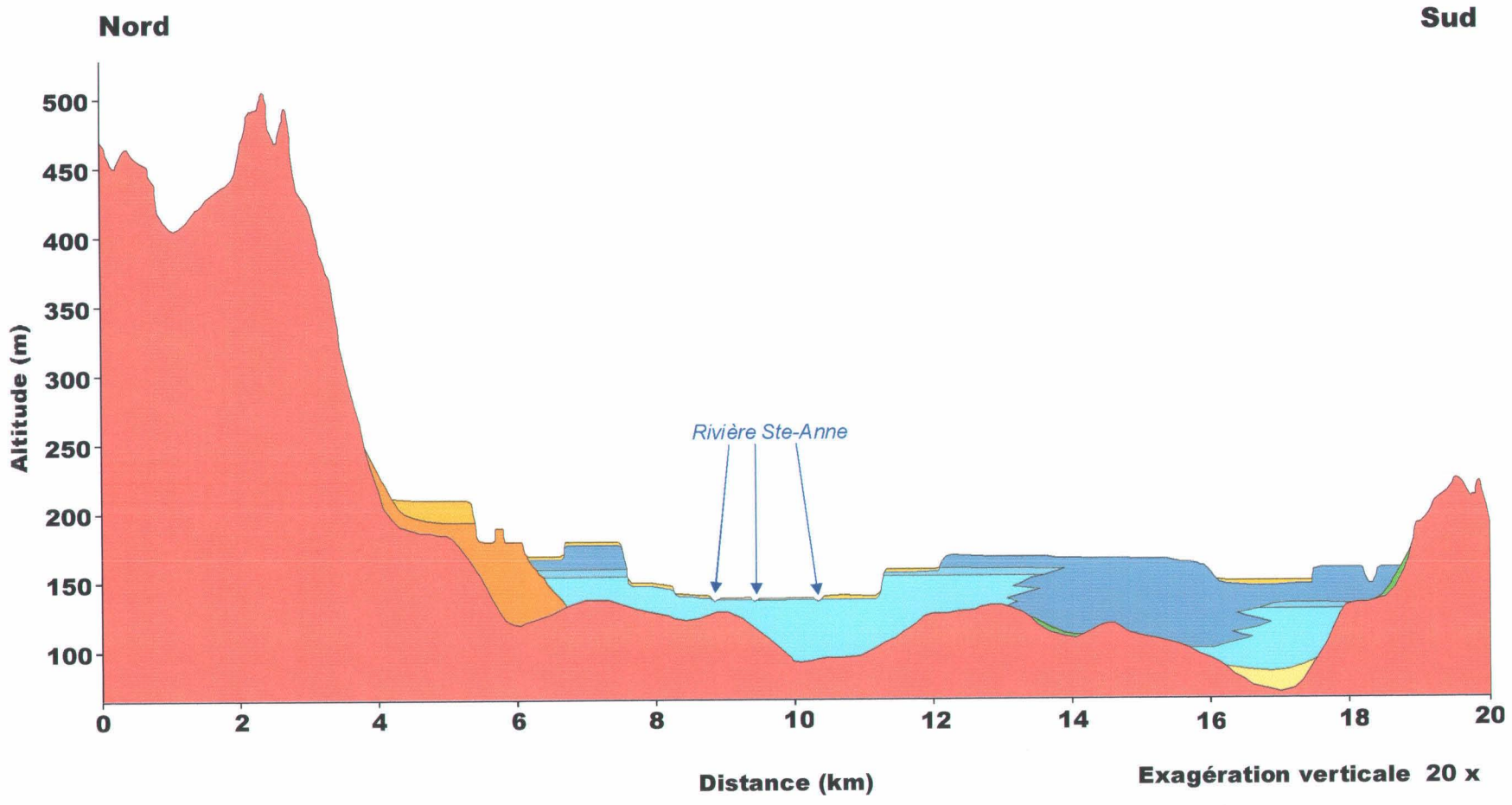
COUPE STRATIGRAPHIQUE L - L'



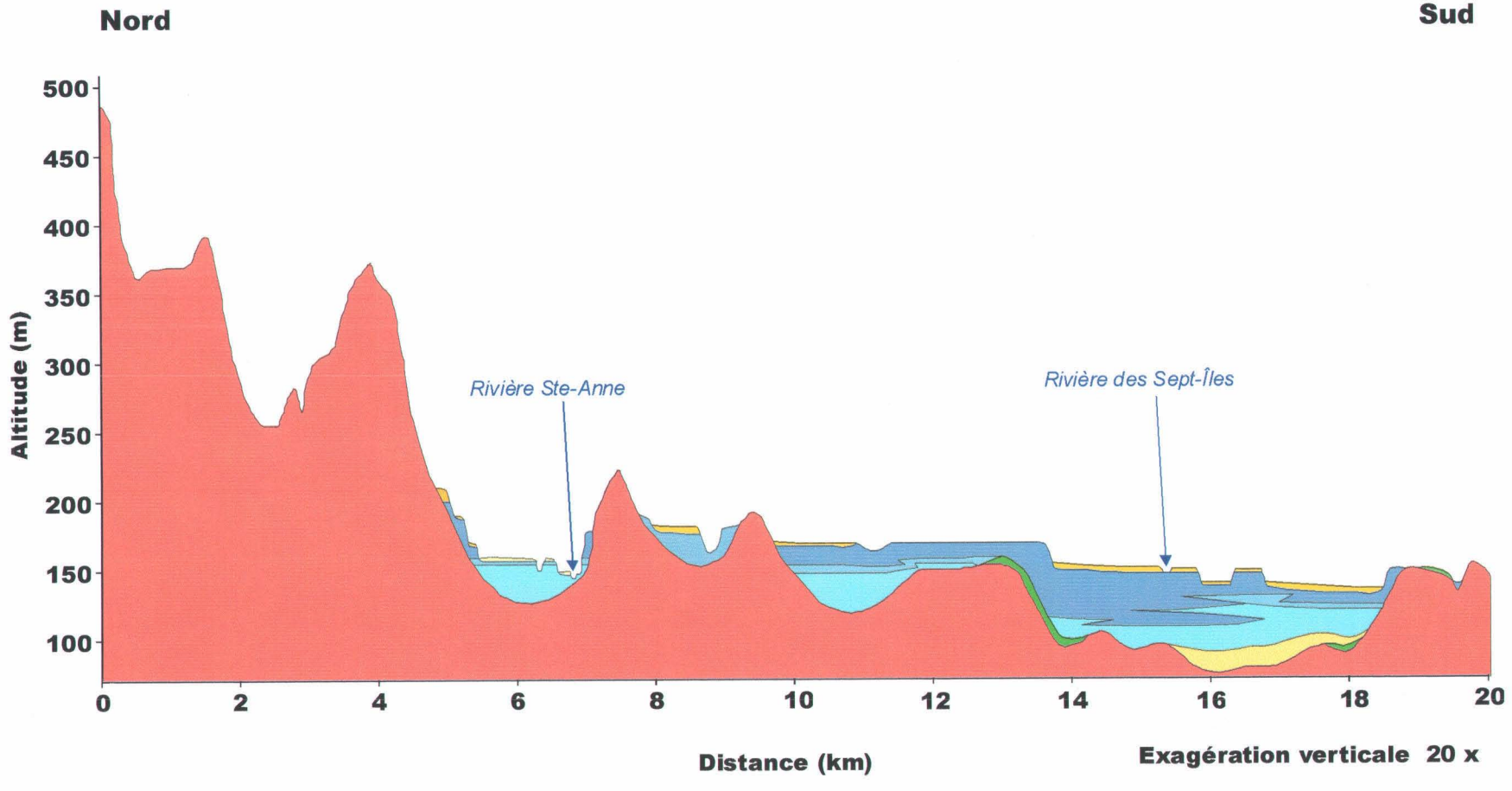
COUPE STRATIGRAPHIQUE M - M'



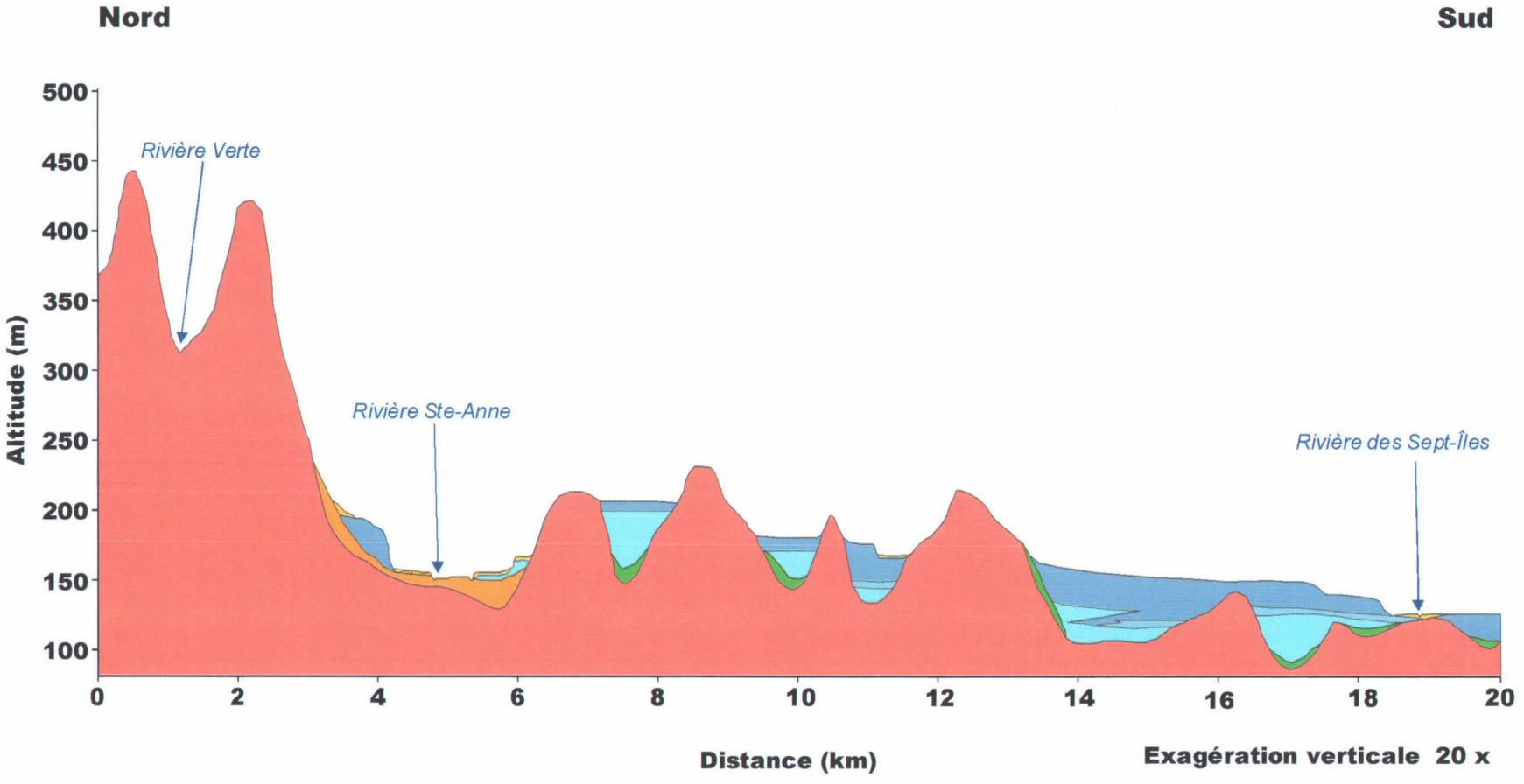
COUPE STRATIGRAPHIQUE N - N'



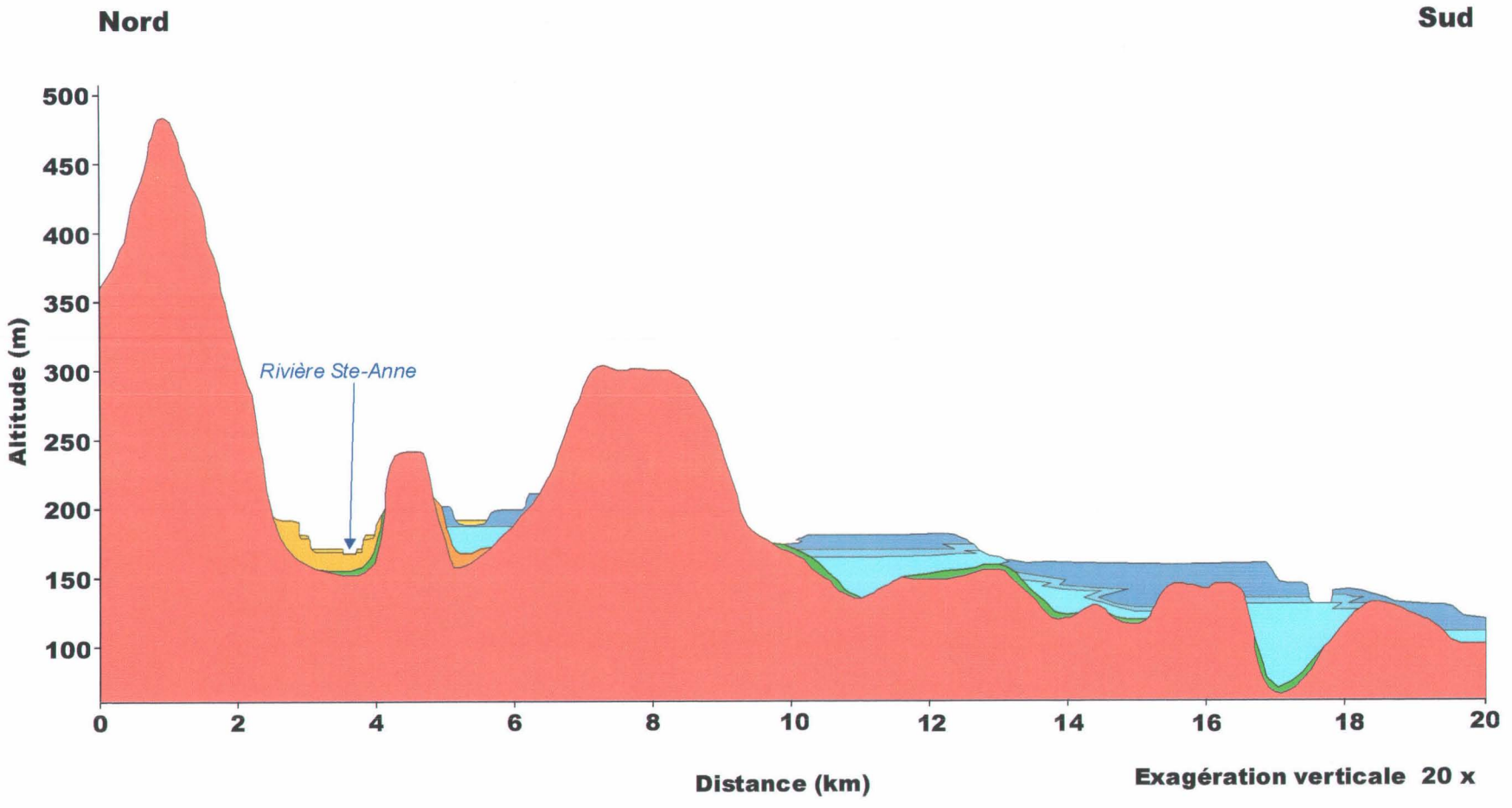
COUPE STRATIGRAPHIQUE O - O'



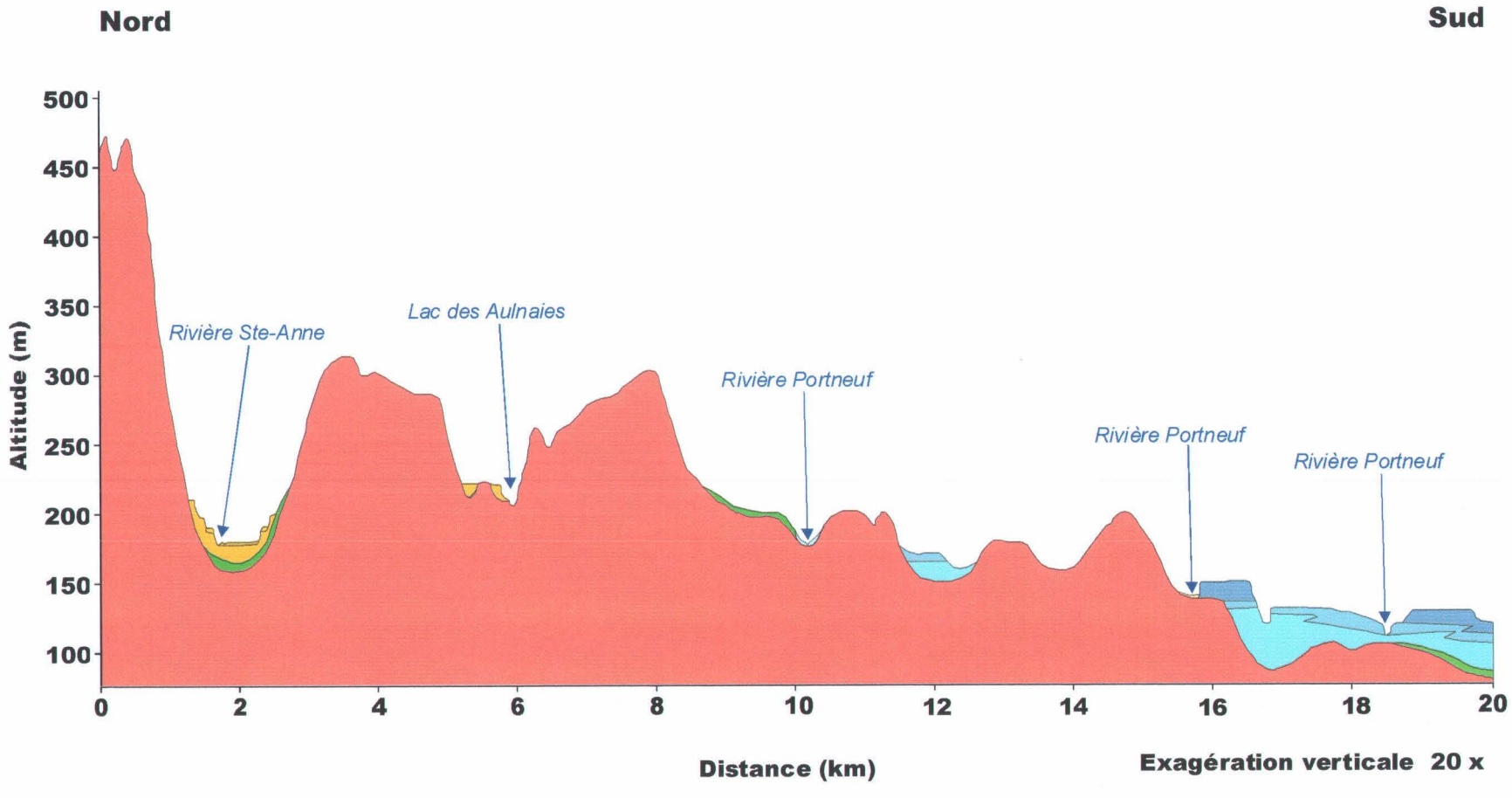
COUPE STRATIGRAPHIQUE P - P'



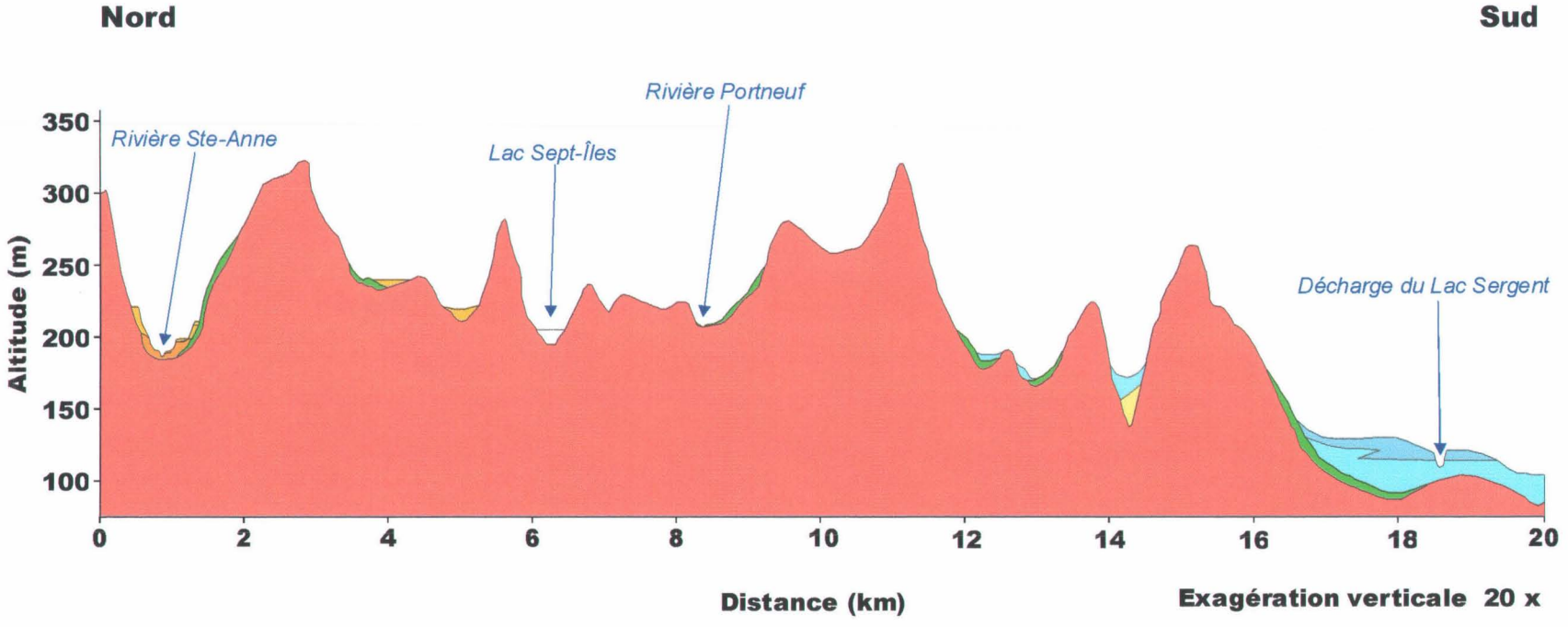
COUPE STRATIGRAPHIQUE Q - Q'



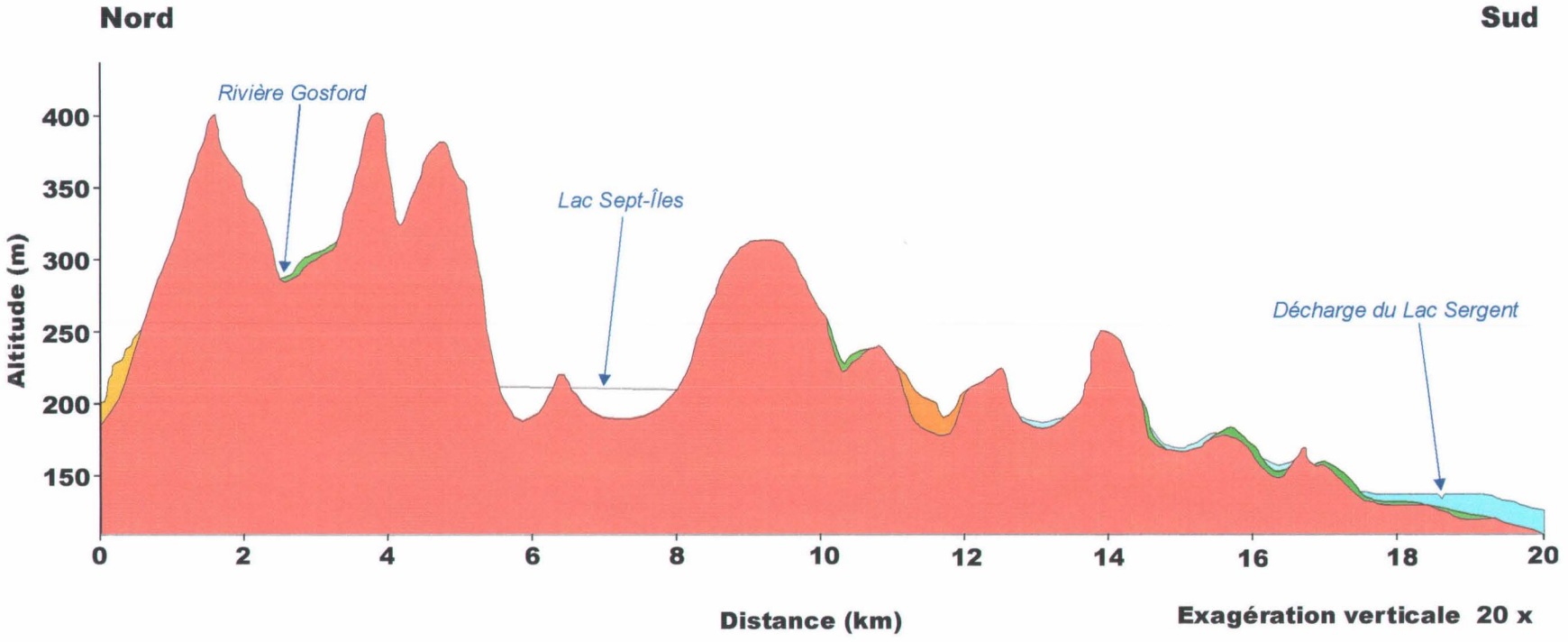
COUPE STRATIGRAPHIQUE R - R'



COUPE STRATIGRAPHIQUE S - S'

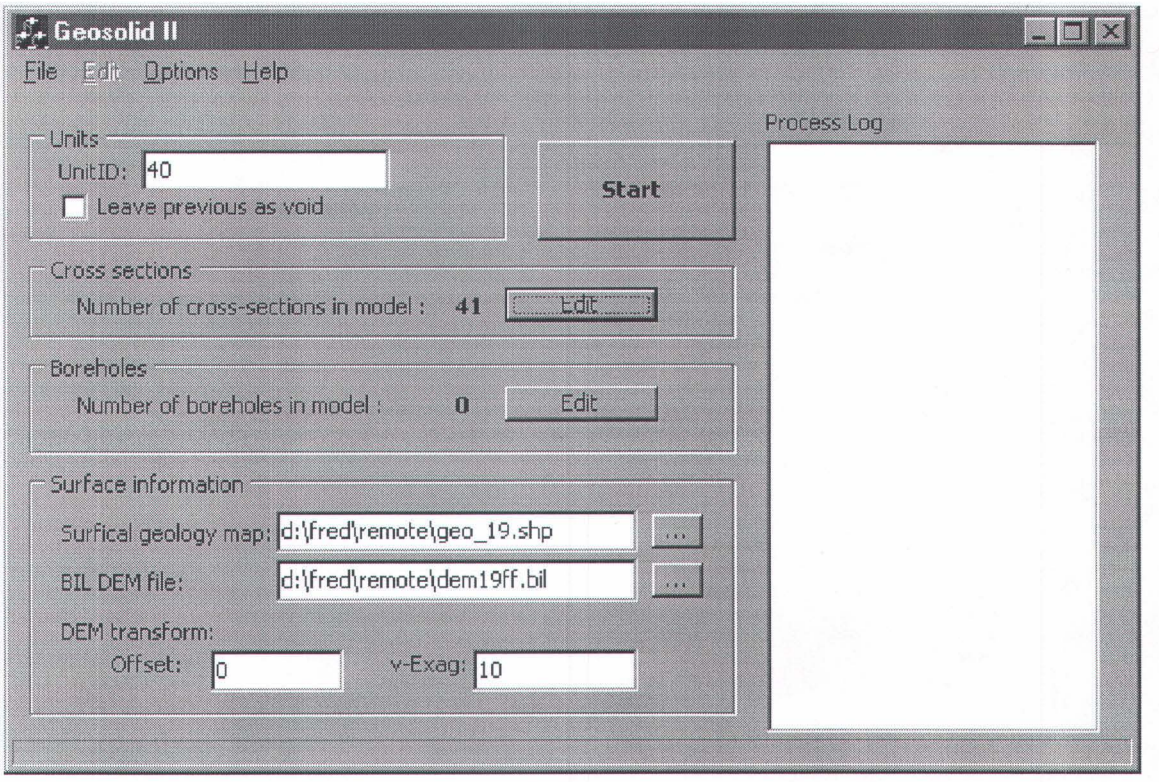


COUPE STRATIGRAPHIQUE T - T'

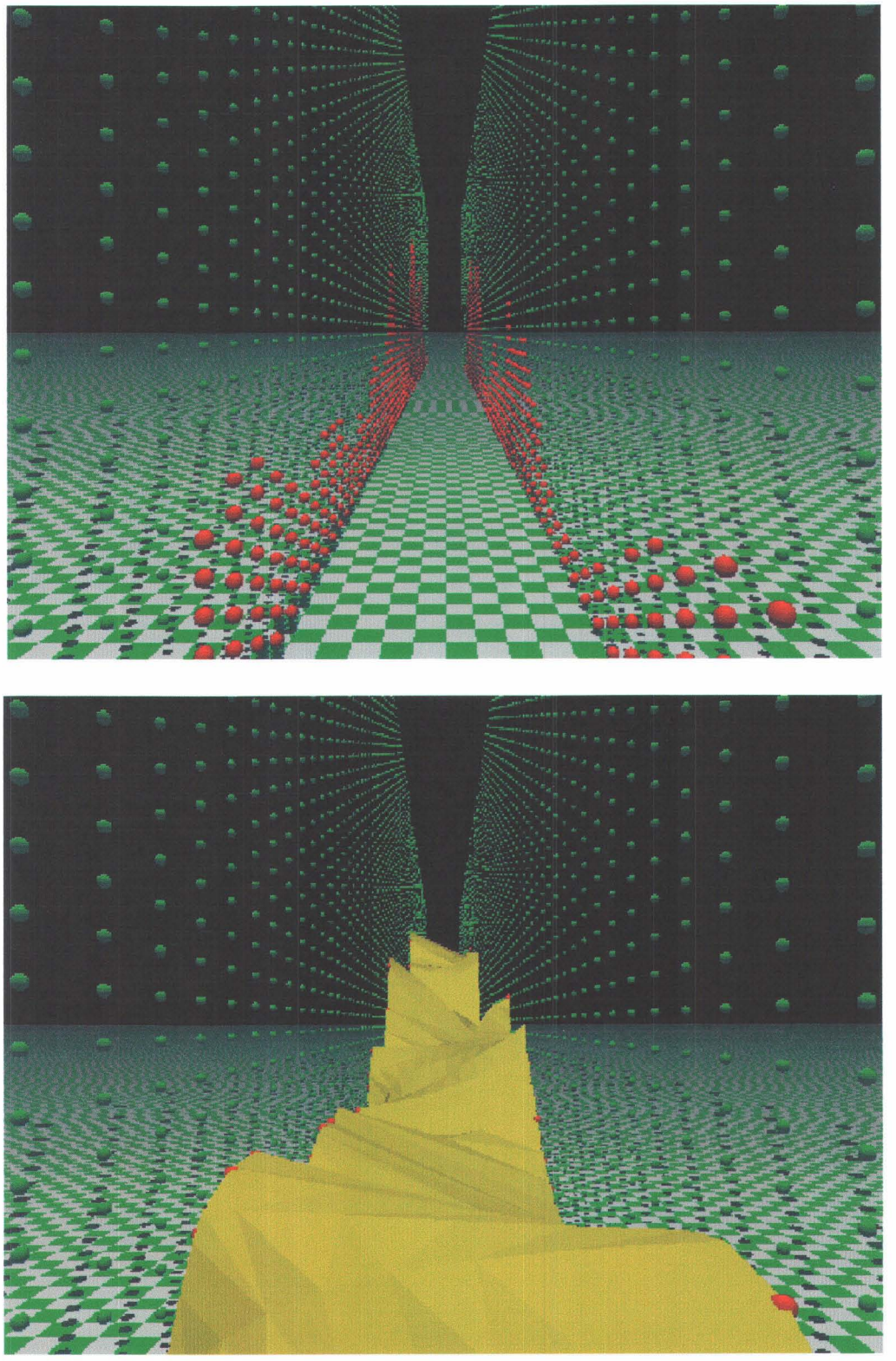


ANNEXE F

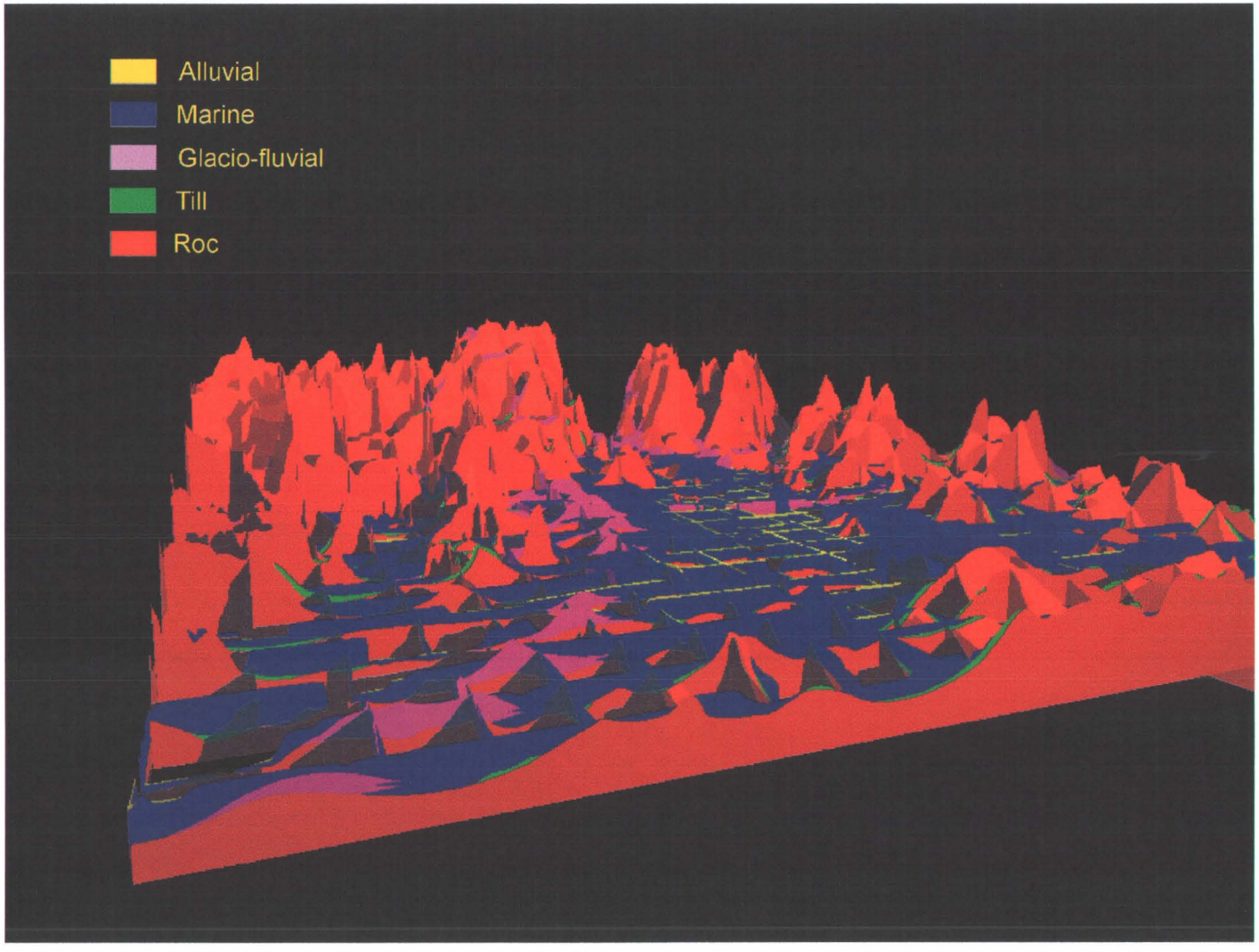
IMAGES DU BLOC TRIDIMENSIONNEL



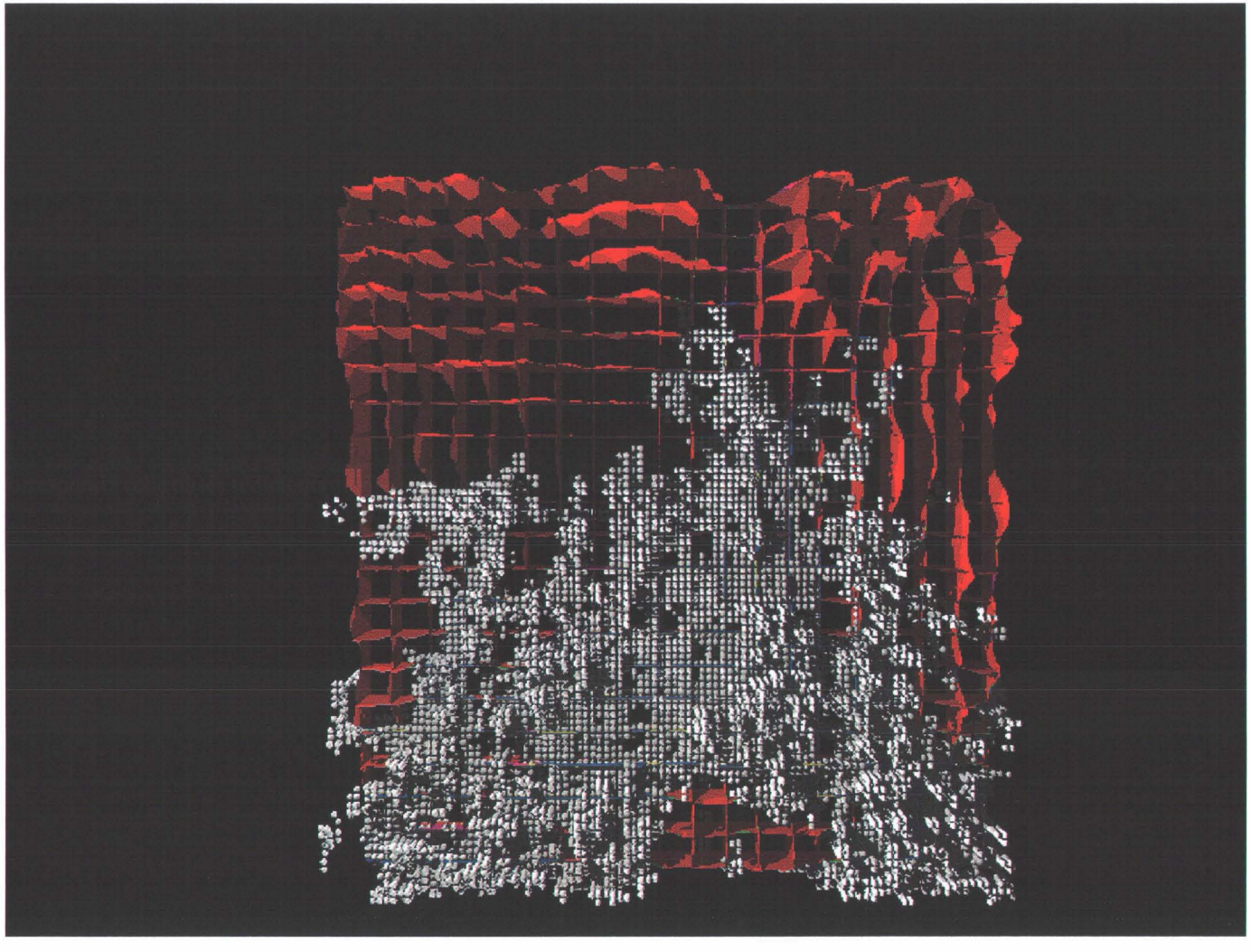
Interface du logiciel GEOSOLID II développé dans le cadre du projet afin d'effectué l'interpolation entre les coupes stratigraphiques. Ce logiciel génère des fichiers compatibles POV RAY v.3.1 (http://www.povray.org)



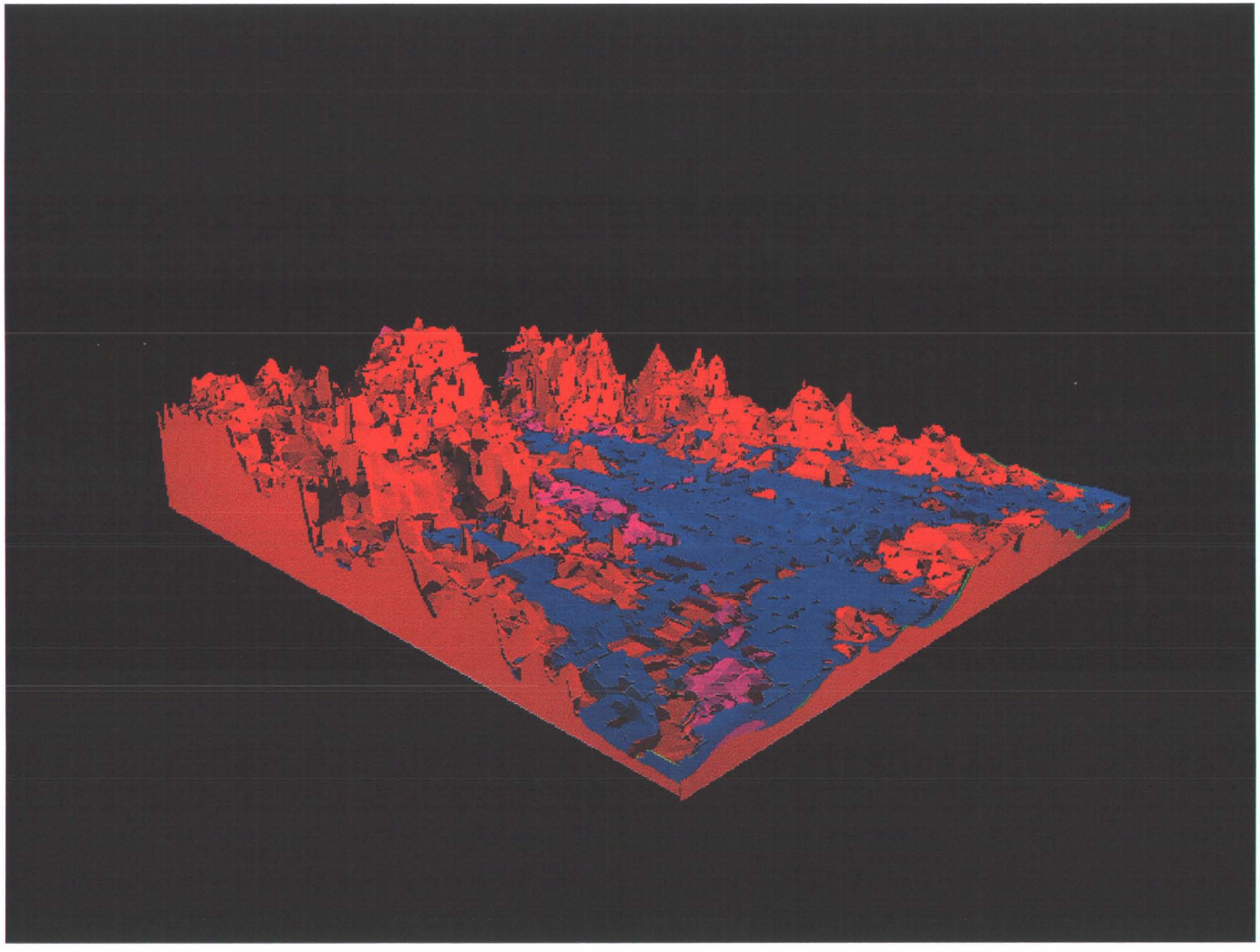
Surface interpolée entre les points de contrôle de deux coupes stratigraphiques adjacentes



Juxtaposition des 41 coupes stratigraphiques avant l'interpolation. Il est à noter qu'un regroupement des unités marines (Ma, Mdp, Md et Mb) a été effectuée afin de facilité la visualisation et l'interpolation.



Vue des points de contrôle calculés lors de l'interpolation des unités de sédiments marins. La région à faible relief (au centre) correspond à celle ou les sédiments marins sont surmontés par des sédiments fluviatiles.



Modèle 3D montrant l'interpolation des unités du substratum rocheux (R) (rouge), des unités marines (Md, Mb, Mdp et Ma) (bleu) et des unités de la Moraine de Saint-Narcisse (GxT) (rose). Les unités de till (T) (vert) ont été illustrées sur les coupes situées en bordure du modèle 3D seulement.