

Titre: Géologie urbaine à Montréal : application aux travaux d'excavation,
Title: de construction et d'aménagement

Auteurs: Marc Durand
Authors:

Date: 1974

Type: Rapport / Report

Référence: Durand, M. (1974). Géologie urbaine à Montréal : application aux travaux
d'excavation, de construction et d'aménagement. (Rapport technique n° EP-R-74-
36). <https://publications.polymtl.ca/6177/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/6177/>
PolyPublie URL:

Version: Version officielle de l'éditeur / Published version

Conditions d'utilisation: Tous droits réservés / All rights reserved
Terms of Use:

Document publié chez l'éditeur officiel

Document issued by the official publisher

Institution: École Polytechnique de Montréal

Numéro de rapport: EP-R-74-36
Report number:

URL officiel:
Official URL:

Mention légale:
Legal notice:



GÉOLOGIE URBAINE À MONTRÉAL – APPLICATION AUX
TRAVAUX D'EXCAVATION, DE CONSTRUCTION ET D'AMÉNAGEMENT

par Marc Durand, ing.

Recherche post-doctorale effectuée à titre de
boursier du Conseil National de Recherches du
Canada, au Département de Génie Minéral,

Ecole Polytechnique de Montréal

CA2PQ
UP 4
74R36

Campus de l'Université
de Montréal
Case postale 6079
Succursale A
Montréal, Québec
H3C 3A7

Bibliothèque

Ecole

Polytechnique

COTE

CAZPQ

494

74836

MONTRÉAL

12236



EP 74 R 36

**GÉOLOGIE URBAINE À MONTRÉAL - APPLICATION AUX
TRAVAUX D'EXCAVATION, DE CONSTRUCTION ET D'AMÉNAGEMENT**

par Marc Durand, ing.

Recherche post-doctorale effectuée à titre de
boursier du Conseil National de Recherches du
Canada, au Département de Génie Minéral,

École Polytechnique
de
Montréal, Québec.

M-G 12236

Juillet 1974

16 OCT 1974

A CONSULTER
SUR PLACE

RÉSUMÉ

L'importance des dépenses des constructions et des aménagements divers prévus dans la région de Montréal, incite l'auteur à examiner en détail plusieurs aspects pratiques de la géologie urbaine. Différents organismes se trouvent impliqués dans des études géoscientifiques de cette région; leurs travaux, la législation actuelle, la pratique courante et l'importance relative des relevés géotechniques dans le secteur privé sont passés en revue.

La géologie des groupes stratigraphiques est présentée sous son aspect pratique en indiquant les utilisations et les problèmes techniques qui se rapportent à chaque formation géologique. La compilation d'études détaillées permet d'apporter des indications nouvelles sur la tectonique, la distribution des intrusifs mineurs et les orientations dominantes des diaclases; ces données sont présentées pour les secteurs étudiés (axes des excavations du Métro, des tunnels en projets du réseau d'égouts collecteurs de la C.U.M., ainsi que les excavations pour construction d'immeubles réalisés depuis deux ans), sur des cartes au 1/100 000 et 1/25 000.

L'auteur fait un examen critique des méthodes de reconnaissance employées et propose des modifications à la procédure actuelle, qui conduit à une surabondance de forages carottés, et qui ne permet pas malgré tout d'obtenir une image satisfaisante de la qualité du roc. On suggère les techniques de diagraphies pour améliorer la qualité des informations fournies par les forages d'exploration.

Les problèmes rencontrés par la suite au moment de l'exécution des excavations et des travaux de fondation sont commentés. Le territoire de l'Île de Montréal peut être divisé en quatre environnements distincts: -1- roc à faible profondeur (moins de 2 mètres);-2- dépôts meubles épais de 2 à 18

mètres; -3- dépôts meubles (2 à 18 m) avec présence d'argile marine; -4- rocher très profond (à plus de 18 mètres).

La cartographie des excavations pendant la période où elles sont visitables apporte une foule de renseignements que l'on ne saurait obtenir autrement. Les objectifs et les méthodes de cartographie des fouilles font l'objet d'une discussion pratique illustrée d'exemples tirés des relevés effectués dans les prolongements en construction de la ligne 1 du Métro.

La question des eaux souterraines comme réserve précieuse à exploiter et à préserver de la pollution, est abordée au chapitre 7. L'eau intervient également dans les travaux d'excavation et cause parfois des tassements dommageables aux immeubles avoisinants, par suite de l'abaissement de la nappe autour des fouilles.

La somme des données recueillies sur tout le territoire de l'Île de Montréal représente une masse énorme de renseignements qu'il importe de synthétiser et de présenter de façon facilement interprétable. Le chapitre 8 discute des différentes solutions existantes en ce qui concerne les fichiers et les cartes géotechniques régionales. Les informations géologiques collectées et rassemblées convenablement peuvent guider l'aménagement et le développement futur de Montréal, en identifiant tout d'abord avec précision les risques naturels (secousses séismiques, éboulis, inondations) ainsi que les risques associés aux travaux par l'homme. Ils doivent également aider les aménagistes à choisir pour leurs divers projets, des sites adaptés de façon naturelle par leurs caractéristiques géotechniques.

ABSTRACT

Because of the growing importance of development and building activities in the Montreal region, it is of interest to review the various aspects of the local urban geology as well as to comment on the laws, the state of the art, the relative importance of preliminary studies and the people and organizations doing geoscientific studies.

The description of the stratigraphic units is given with emphasis on the specific problems and the practical uses of each type of rock, or formation. Locally, examples of new data on the structural geology are presented, including compilation of the distribution of minor intrusives, faults and fracture orientations; the areas studied (extensions of the Metro, tunnels of the new sewer system of M.U.C., excavations sites for building foundation in the past two years) are compiled on 1/100 000 and 1/25 000 maps.

The author discusses the present methods of subsurface exploration and modifications that could be brought to cut down bore-hole cost and give a more quantitative image of rock quality. Geophysical bore-hole logging should be used systematically.

Some problems encountered during excavation works and foundation, are commented. Four distinct environments are delineated on the Island of Montreal: -1- shallow rock (less than 2 meters); -2- drift thickness between 2 and 18 meters; -3- drift (2-18 m) including marine clay; -4- drift thickness over 18 meters.

Detail mapping of excavation, while the rock is exposed, brings valuable information that could not be obtained otherwise. A practical discussion of the objectives and

methods of tunnel mapping is given, with examples from the Metro extensions.

Ground water from deep strata constitutes a precious natural ressource to extract rationnaly and preserve from pollution. Ground water can sometimes invade excavations, or produce consolidation of soft deposits if the water table is significantly lowered; damage to surrounding buildings may result.

The sum of data collected on the territory of the Island, constitutes an enormous amount of information that must be compiled and presented in an accessible manner. Existing methods concerning geotechnical maps and computer-based storage, are presented in chapter 8. Suitable use of these systems should give tools to manage a better planning of the future development in the Montreal area, by primarily defining natural risks (earthquakes, rockfalls, flooding) and risks originating from the human activity.. It whould also help developpers in choosing, economically, sites adapted by their geotechnical characteristics to each specific project.

Keywords: Urban geology, Montreal, subsurface exploration, core logging, tunnel mapping, geotechnical maps.

Mots repères: Géologie urbaine, Montréal, relevés préliminaires, description de carottes, cartographie géologique, cartes géotechniques.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur Marc G. Tanguay, ing. Ph.D., professeur agrégé du Département de Génie Minéral, qui a été l'instigateur et le directeur de ce travail de recherches. J'exprime également ma gratitude à l'École Polytechnique qui m'a fourni le cadre nécessaire à la poursuite de mes travaux.

Le directeur et le personnel du Laboratoire de Contrôle et de Recherche de la Ville de Montréal, plus particulièrement Monsieur Gérard Ballivy, m'ont apporté leur soutien par une franche et amicale collaboration; qu'ils trouvent ici l'expression de ma reconnaissance.

Je remercie également Monsieur Gérard Gascon, ing. Directeur du Bureau de Transport Métropolitain, pour m'avoir accordé la permission d'accès aux divers chantiers du Métro, ainsi que les nombreux autres organismes privés et publics qui m'ont également accueilli.

Je ne saurais oublier Mlle Céline Gauthier qui a dactylographié le texte de ce rapport, ainsi que Monsieur P. Albert qui a réalisé les tirages des photographies.

Ce travail a été rendu possible grâce à une bourse post-doctorale du Conseil National de Recherches du Canada.

T A B L E D E S M A T I È R E S

	page
I - INTRODUCTION	
× 1.1 Situation du problème	1
× 1.2 Objet du présent rapport	3
II - ÉTUDES GÉOLOGIQUES PASSÉES ET PRÉSENTES	
<u>2.1 Services Publics</u>	
× 2.1.1 Ministère des Richesses Naturelles	5
× 2.1.2 Autres Ministères du Gouvernement du Québec	6
× 2.1.3 Gouvernement fédéral	6
× 2.1.4 Services municipaux	7
<u>2.2 Constructions du secteur privé</u>	10
2.2.1 Règlementation	10
2.2.2 Importance relative des relevés préliminaires	11
× 2.2.3 Choix des solutions techniques vis-à-vis les conditions géologiques	12
<u>2.3 Recherches dans les universités</u>	13
III - GÉOLOGIE DE MONTRÉAL - PROBLÈMES PRATIQUES	
<u>3.1 Description des formations</u>	15
3.1.1 Le socle précambrien	15
3.1.2 Les grès de Potsdam	15
3.1.3 Le groupe de Beekmantown	16
3.1.4 Le groupe de Chazy	19
3.1.5 Le groupe de Black River	20
3.1.6 Les deux premières formations du groupe de Trenton .	22
3.1.7 La formation de Montréal	23
3.1.8 La formation de Tétreauville	24
3.1.9 L'Utica	25
3.1.10 Le groupe de Lorraine	29
<u>3.2 Roches intrusives</u>	29
<u>3.3 Tectonique</u>	36
3.3.1 Quartier Rivière-des-Prairies	38
3.3.2 Verdun-LaSalle	38
3.3.3 Secteur centre-ville	40

	page
<u>3.4 Dépôts meubles</u>	44
3.4.1 Le till glaciaire	45
3.4.2 Les dépôts intermédiaires et le till supérieur	45
3.4.3 Les dépôts de la mer Champlain	45
3.4.4 Les dépôts récents	45
<u>3.5 Problèmes de nomenclature et de classification des roches de Montréal</u>	47
IV - FORAGES ET RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE	
<u>4.1 Généralités sur les forages</u>	54
<u>4.2 Autres méthodes de reconnaissance</u>	57
4.2.1 Méthodes géophysiques	57
4.2.2 Méthodes pénétrométriques	59
<u>4.3 Description ou "logging" des carottes</u>	60
4.3.1 Description ou "log" d'un forage et évaluation quantitative	62
4.3.2 Cas des roches altérables	72
4.3.3 Conclusion sur l'indice de qualité	73
<u>4.4 Mesures dans les forages</u>	74
<u>4.5 Définition des faciès</u>	76
V - ÉTUDES GÉOTECHNIQUES DES FONDATIONS	
<u>5.1 Répartition géographique des conditions de fondation</u>	78
<u>5.2 Problèmes spéciaux</u>	85
VI - CARTOGRAPHIE DES EXCAVATIONS	
<u>6.1 Introduction</u>	87
<u>6.2 Rôle du géologue pendant la construction</u>	90
<u>6.3 Objectifs et utilité des relevés effectués au cours de la construction</u>	91
6.3.1 Les cartes et les coupes de l'ouvrage	91
6.3.2 Les renseignements complémentaires	93
6.3.3 Le rapport de synthèse	94
6.3.4 Dossier pour la construction d'un ouvrage additionnel .	94
6.3.5 Le fichier géotechnique régional	95
<u>6.4 Méthodes de cartographie</u>	
6.4.1 Méthode classique	96
6.4.2 Méthode photographique	98
6.4.3 Cartographie rapide	99

VII - HYDROGÉOLOGIE DANS LA RÉGION DE MONTRÉAL	
<u>7.1 Introduction</u>	103
<u>7.2 Utilisation industrielle de l'eau souterraine</u>	103
<u>7.3 Rabattements de nappe dans les travaux de génie civil</u>	103
<u>7.4 Pollution des nappes souterraines</u>	104
<u>7.5 Infiltrations dans les excavations</u>	106
<u>7.6 Karsts</u>	108
VIII - FICHIERS ET CARTES GÉOTECHNIQUES	
<u>8.1 Introduction</u>	111
<u>8.2 Types de cartes</u>	111
<u>8.3 Problèmes de présentation graphique</u>	115
<u>8.4 Fichiers</u>	121
IX - AMÉNAGEMENT ET PLANIFICATION	
<u>9.1 Introduction</u>	123
<u>9.2 Structures et infrastructures urbaines</u>	124
<u>9.3 Influence des conditions géologiques</u>	125
9.3.1 Risques naturels	125
9.3.2 Ressources naturelles	128
X - CONCLUSION	130
BIBLIOGRAPHIE	135
APPENDICE 1 : Nomenclature des joints	141
APPENDICE 2 : Avant-projet de systématisation dans l'acquisition des données de cartographie géotechnique	144

LISTE DES TABLEAUX

No	Titre	Page
1	Exemples de coût des relevés géotechniques pour des immeubles de moyenne importance	11
2	Stratigraphie et histoire géologique de Montréal	16
3	Classification des massifs rocheux pour la construction des tunnels	36
4	Principales techniques de diagraphe et leur utilité	75
5	Éléments à relever dans une excavation	92

LISTE DES FIGURES

No	Titre	Page
1	Rupture brusque par flambage de dalles de dolomies au plancher d'une carrière à Côteau-du-Lac	18
2	Carte géologique de Montréal - Excavations majeures dans le roc	21
3	Contact Utica-Trenton sous la rue Charlevoix	26
4	Élévation du contact Utica-Trenton dans un secteur de St-Henri	27
5	Orientation des dykes autour du Mont Royal	30
6	Pourcentage d'intrusifs en volume dans les roches paléozoïques	31
7	Épais filon-couche aux environs du Parc Maisonneuve	34
8	Épais filon-couche constituant les trois-quarts de la hauteur des murs du tunnel	35
9	Stratigraphie et structure géologique d'une portion de terrain au nord de l'île de Montréal	39
10	Carte géologique du centre-ville	41
11	Deux failles de chevauchement sur le flanc Est de l'anticlinal de Villeray, dans les calcaires de Tétreaувille	42
12	Stries bien nettes dans le plan de faille observé dans la tranchée à proximité de la station Beaugrand	43
13	Deux comportements contrastés de l'argile marine	46
14	Diagramme de composition des roches carbonatées	48
15	Classification de Mollazal	48
16	Classification de Leighton et Pendexter	51
17	Classification complète modifiant celle de Théodorovitch	51
18	Composition des roches ordoviciennes de Montréal	53
19	Diagrammes polaires de Schmidt montrant les densités relatives des pôles des plans de discontinuités mesurés	56
20	Orientations dominantes des diaclases mesurées <i>in situ</i>	58
21	Diagramme de la qualité du roc	64
22	Légende des symboles pétrographiques proposés pour les roches de Montréal	65
23	Essais d'eau au moyen d'une sonde hydraulique triple	76
24	Répartition géographique de 4 conditions de fondation	79
25	Pieux du mur de protection de la fouille déviés et tordus au cours de leur enfouissement en raison de la présence de gros blocs dans le till	81
26	Till gris très compact et comportant 10 à 20 % de blocs plus grands que 30 cm.	82

No	Titre	Page
27	Fouille du nouvel édifice de l'O.A.C.I. rue Sherbrooke	83
28	Exemple de cartographie géotechnique d'un tunnel	89
29	Feuille de terrain pour la cartographie géologique	97
30	Exemple de cartographie géotechnique d'une section de tunnel du Métro	101
31	Diagrammes des moyennes mensuelles des précipitations et des températures pour Montréal	107
32	Position relative du niveau statique par rapport à la profondeur du roc	109
33	Méthodes de présentation graphique pour les cartes géotechniques	116
34	Méthode du cercle pour la représentation de données de sondage	119
35	Représentation de plusieurs couches du sol par la méthode des cercles	120
36	Zones séismiques du Canada	126
37	Tremblements de terre dans l'est de 1928 à 1957	126
38	Schéma de coordination proposé pour les études géologiques dans la région de Montréal	132
39	Fiche de terrain	146
40	Recto d'une fiche de compilation	149
41	Verso d'une fiche de compilation	150

I - INTRODUCTION

1.1 SITUATION DU PROBLÈME

Dans l'esprit du citadin québécois, le mot géologie évoque les grands projets type Manicouagan-Outardes ou Baie James, l'exploration minière dans les régions éloignées et les forages pétroliers dans le golfe du St-Laurent. Il ignore très souvent que sa région, Montréal, se classe au premier rang par le volume annuel des travaux de construction , des matériaux exploités en carrière et des forages carottés. Contrairement aux projets lointains qui frappent les gens par leur aspect grandiose, les travaux urbains sont soit cachés à leur vue (comme l'important réseau des nouveaux collecteurs de la C.U.M.), soit perçus sous leur aspect de nuisance, qui est bien réelle il faut l'avouer.

Laissons de côté pour l'instant le commun des mortels, qui s'enthousiasme, s'irrite ou s'indiffère des travaux dans sa ville, selon la distance qui le sépare du plus proche chantier actif, pour jeter un coup d'oeil du côté des personnes et organismes directement intéressés. Ce qui retient l'attention en tout premier lieu, est le très petit nombre de géologues impliqués dans les travaux de développement de Montréal, comparativement aux autres régions, compte tenu de ce que nous avons dit précédemment de l'importance relative des investissements. Le manque de participation des géologues dans le développement des villes au Canada se remarque tant dans le secteur privé que chez les organismes publics et universitaires.

L'Étude Spéciale No 13 du Conseil des Sciences, sur la situation des sciences de la terre au pays (Blais et al., 1971) indique que sur un peu plus de 900 chercheurs oeuvrant à plein temps dans le domaine géoscientifique, cinquante s'occupent de recherche en géotechnique et un seul de ceux-ci en géologie urbaine; ces statistiques de 1968, sont tirées des tableaux II.7 et V.3 de l'Étude Spéciale No 13.

Si l'application courante et rentable d'une technologie procède de la recherche effectuée des années auparavant, nous pouvons dire que l'état actuel de l'application de la géologie dans le développement urbain résulte en partie du manque de recherche appliquée et de promotion de la part des chercheurs. Il y a encore un grand vide à combler entre les préoccupations et le langage des géologues et ceux des constructeurs et aménagistes. Ces derniers doivent être informés des implications des phénomènes géologiques pour leurs projets. De son côté le géologue doit repenser sa méthodologie et la présenter de façon adaptée aux problèmes urbains. Nous nous proposons dans cette optique, d'étudier plus spécifiquement le cas de l'agglomération de l'Île de Montréal.

1.2 OBJET DU PRÉSENT RAPPORT

Le présent rapport a pour but d'analyser différents aspects de la géologie appliquée au milieu urbain et plus spécifiquement d'étudier la pratique courante dans la région de Montréal en tenant compte de son contexte géologique et des types de travaux qui y sont exécutés. Nous formulerons également les recommandations que nous suggère cette analyse.

Nous avons jugé utile à l'occasion de rappeler certaines définitions; peut-être contribueront-elles à solutionner les problèmes de terminologie et de nomenclature qui subsistent dans la description courante des roches rencontrées dans les fouilles. Cette partie du rapport paraîtra très incomplète aux géologues professionnels: notre but est en réalité de donner une image claire et simple, destinée à tous ceux qui utilisent la géologie dans son application au génie civil et à l'urbanisme.

La géologie rencontre beaucoup de difficultés, voire des réticences, dans son implication pratique dans les travaux de construction à Montréal, parce qu'au niveau actuel des études, on connaît très peu de données sur les interrelations entre les paramètres géologiques et leurs effets en termes de coûts ou de paramètres techniques. Nous illustrerons d'exemples les corrélations qui devraient être compilées systématiquement.

Nous passerons en revue un peu tous les aspects des applications de la géologie à l'agglomération montréalaise; tous les chapitres n'ont pas reçu une attention égale cependant. Plus de temps a été consacré à la solution de problèmes immédiats comme la cartographie géologique d'excavations, l'évaluation qualitative des massifs rocheux au moyen des carottes de forage et l'utilisation d'une nomenclature précise et appropriée dans les descriptions des roches.

L'objet de cette étude est en fait si vaste qu'il ne pourra pas être traité de façon complète. Nous n'apporterons pas de réponse à toutes les questions posées, mais nous avons tenu à les poser toutes pour bien faire voir que l'étude géologique d'une ville forme un ensemble cohérent qui doit être étudié comme tel. L'avant-dernier chapitre traitera d'aménagement et des ressources naturelles du territoire de la communauté urbaine; cette approche globale de l'étude d'une région dans son ensemble, suppose l'achèvement des inventaires nécessaires et de leur compilation en documents interprétables, comme par exemple, les cartes géotechniques dont nous discuterons au chapitre 8.

II - ÉTUDES GÉOLOGIQUES PASSÉES ET PRÉSENTES

Nous avons laissé entrevoir dans l'introduction la multiplicité des domaines où la géologie est impliquée de près ou de loin; il en résulte que diverses personnes et organismes se retrouvent plus ou moins intéressés à l'étude des roches et des dépôts meubles dans le champ de leurs activités. Nous allons examiner sommairement le travail accompli par chacun, ce qui nous donnera en même temps les diverses sources d'information géologique à Montréal.

2.1 SERVICES PUBLICS

2.1.1 Ministère des Richesses Naturelles du Québec:

C'est à ce ministère qu'incombe la tâche de compléter la cartographie géologique du Québec, dans le but premier de faciliter et d'encourager l'exploitation des minéraux et des roches de valeur commerciale.

Publié une première fois en 1952, le rapport géologique de la région de Montréal décrit la stratigraphie et la tectonique d'un secteur d'environ 2150 km² couvert par la carte (à l'échelle 1:63 360) qui accompagne le rapport. L'auteur, T.H. Clark, commente également la géologie historique et la géologie économique.

À la demande du ministère, le docteur Clark a assuré récemment la révision du rapport par des travaux sur le terrain en 1969 et par la compilation des nouvelles données obtenues depuis 1952. Le nouveau rapport (Clark, 1972) présente une description revisée des formations géologiques, de leurs affleurements, ainsi qu'une édition corrigée de la

carte; la tectonique montre un bien plus grand nombre de failles, comme par exemple deux nouvelles failles associées à la faille du Rapide-du-Cheval-Blanc.

Le ministère publie également dans ses rapports annuels des données sur les carrières de la région métropolitaine. Une étude hydrogéologique est en projet; il est à souhaiter qu'elle puisse se concrétiser dès que possible en raison des besoins prévisibles des années qui viennent (voir au chap.7).

2.1.2 Autres Ministères du Gouvernement du Québec:

À l'occasion d'un projet ou d'une étude spéciale, différents autres services gouvernementaux se trouvent parfois impliqués dans une étude géologique ou géotechnique: c'est assez courant par exemple pour le service des sols et matériaux du ministère des Transports. Les études recueillent des informations relatives au sous-sol en fonction des besoins de l'ouvrage projeté; sauf exception, ces données sont ensuite archivées sans faire l'objet de publication.

Le ministre des Affaires municipales et de la protection de l'environnement se trouve de plus en plus fréquemment impliqué dans des problèmes d'évaluation quantitative et de zonage du territoire, dont nous parlerons aux chapitres 8 et 9, et de la pollution des réserves d'eau souterraines (paragraphe 7.2).

2.1.3 Gouvernement fédéral:

La Commission Géologique du Canada a publié les premières études de géologie appliquée dans la région de Montréal (Gauthier, 1920; Cumming, 1917; Goudge, 1935). Plus récemment en 1960, en collaboration avec le Laboratoire de Contrôle et de Recherches de la Ville de Montréal, elle a publié une première carte donnant l'épaisseur des dépôts meubles (Prest, 1961) dans la partie centrale de l'île de Montréal.

Un vaste programme de recherche en géologie urbaine concernant les principaux centres du pays a été initié en 1971 en vue de constituer des banques régionales de données géotechniques. Dans son étape initiale, le projet a consisté à recueillir auprès des ingénieurs-conseils le maximum de données de forage, à les codifier et transférer sur des fiches de compilation, cartes perforées puis rubans magnétiques. Cette phase initiale a été réalisée en bonne partie par le programme 1971-72 de travaux d'hiver. Presque simultanément, les relevés et la codification en fichier électronique des données de terrain du territoire du nouvel aéroport de Mirabel a permis à l'équipe du Docteur St-Onge d'acquérir une très bonne expérience en ce domaine (St-Onge, Kugler & Scott, 1973). Nul doute qu'à l'avenir cette technologie nouvelle constituera un outil de première importance pour le traitement de la grande quantité d'informations recueillies sur le territoire métropolitain. Les problèmes soulevés par l'élaboration d'un fichier seront discutés au paragraphe 8.4.

En plus des activités de la Commission géologique, divers ministères fédéraux commandent à l'occasion des études géotechniques ponctuelles (édifices fédéraux), linéaires (ex: voie maritime du St-Laurent), ou étendues (aéroports).

2.1.4 Services municipaux:

La Communauté Urbaine de Montréal possède un service de planification, mais ce service ne s'occupe pas encore de l'évaluation des terrains, zones ou axes, au point de vue des caractéristiques physiques et géotechniques. Il apparaît que dans l'esprit des planificateurs, les données sociologiques, économiques, etc... anhilent par leur importance tout effet que pourrait avoir les caractéristiques du sous-sol.

Ce phénomène n'est pas particulier à Montréal, car pour presque toutes les villes du monde, le site initialement choisi par les fondateurs en fonction des besoins de l'époque, s'est peu à peu transformé en centre-ville ou quartier d'affaires à très forte densité d'occupation; cela signifie que les édifices les plus élevés et les infrastructures les plus importantes dans une ville sont construits coûte que coûte dans des terrains parfois très peu favorables à ce type de construction.

La technologie peut résoudre à peu près tous les problèmes de fondations et répondre ainsi à la demande très forte de structures de plus en plus complexes; les prix élevés des terrains exigent une occupation à densité maximale même si cela entraîne des fondations coûteuses. Les services publics doivent fournir parallèlement des ouvrages souterrains: égouts, aqueduc, métro et autres voies de transport. La part des infrastructures dans le volume global de la construction croît chaque année et cette tendance ne peut que s'affirmer avec les nouvelles réglementations visant à limiter les hauteurs des immeubles pour préserver le paysage; les promoteurs créeront plus de niveaux en sous-sol pour compenser les limitations imposées au volume constructible au-dessus du sol.

Comme la grande partie des ouvrages souterrains relève de la responsabilité des municipalités, c'est à elles que revient la tâche d'organiser une gestion rationnelle de l'espace souterrain; les matières qui remplissent cet espace ne sont pas homogènes comme l'air au-dessus du sol: leur étude est l'objet propre de la géologie et de l'hydrogéologie.

Pour qu'une gestion soit possible, la première étape à réaliser consiste à tenir à jour le dossier des ouvrages, excavations et explorations réalisés afin de pouvoir en tirer une compilation des caractéristiques des matériaux rencontrés. La législation sur les permis de construire

assure un archivage complet de tout ce qui se construit; cela permet par exemple d'éviter les ruptures de conduites ou de cables enterrés. La mise en fichier systématique des résultats des sondages et autres mesures n'a pas encore d'assise légale comparable, puisqu'aucun service municipal n'a spécifiquement cette tâche.

Lors de chaque nouvelle étude on essaie au mieux, et grâce aux bonnes volontés individuelles, de récupérer les données recueillies par d'autres projets du même secteur. Bien que le sous-sol n'appartienne pas en propre à personne, on considère assez curieusement que les informations sur les dépôts meubles et les roches appartiennent à perpétuité à celui qui les a mesurées. C'est au niveau des autorités municipales que doit être diffusé le concept de propriété collective; la collection et la diffusion des données géologiques et géotechniques doit à notre avis être une affaire régie comme n'importe quel service public.

Les constructions exécutées par la municipalité elle-même nécessitent par leur nature (tunnels pour métros, collecteurs et aqueducs) des relevés géologiques très complets. Ces tunnels sont maintenant réalisés à des profondeurs beaucoup plus importantes que les fondations d'immeubles. Pour réaliser une reconnaissance du roc tout le long du tracé déjà choisi, on effectue des forages carottés jusqu'au niveau de l'ouvrage ou jusqu'à deux ou trois mètres dans le roc. L'espacement entre les trous varie de 30 mètres ou moins au voisinage d'une station de métro, à 100 mètres le long des tunnels et à 800 mètres pour les nouveaux collecteurs de la C.U.M. Les rapports préliminaires accompagnent les dossiers d'appel d'offres. Le Laboratoire de Contrôle et de Recherches a préparé jusqu'à maintenant la plupart des rapports préliminaires pour les grands ouvrages de ce type; en plus, il exécute certains essais et analyses. Il conserve plusieurs années dans sa carothèque les boîtes de forage des projets récents ainsi que quelques carottes de projets anciens.

Mentionnons en terminant que le service des Travaux Publics a publié en 1962 un rapport de 35 pages accompagné de deux cartes 1: 18 000 (dont celle montrant l'épaisseur des dépôts meubles mentionnée p. 6) sur la géologie du Pléistocène à Montréal; ce texte constitue un document de référence de première importance pour tous ceux qui doivent entreprendre des travaux de construction dans les limites du territoire décrit (Prest & Hode Keyser, 1962).

2.2 CONSTRUCTIONS DU SECTEUR PRIVÉ

2.2.1 Règlementation:

L'obtention d'un permis de construire est assujettie au règlement No 1900 à Montréal. L'article 7.3 définit les pressions admissibles sur le roc et les sols (25 bar pour le roc dur, 15 pour les shales, 5 bar pour le till, 2.5 bar pour l'argile dure et 0.5 pour l'argile molle). Le projeteur fournit généralement les plans de l'immeuble, le nom de la compagnie qui a effectué les sondages, ainsi que la référence du rapport préliminaire s'il y a lieu. Les plans doivent faire mention des pressions exercées par la fondation; elles peuvent parfois dépasser les valeurs indiquées dans le règlement municipal, si des essais de résistance exécutés à l'emplacement de l'immeuble démontrent de façon concluante que le terrain peut supporter des charges supérieures.

En recevant des demandes de permis pour certains emplacements où elle suspecte des problèmes particuliers, la division des permis de construction s'adresse au Laboratoire de Contrôle et de Recherches. Le directeur des Travaux Publics possède le pouvoir d'exiger du propriétaire l'exécution de puits ou sondages (article 7.1) et d'essais de chargement.

Le règlement No 1900 fait état de l'obligation d'assurer la stabilité et l'assèchement des fouilles, pendant la durée de la construction, mais il ne parle pas cependant des rabattements de nappe que cela peut entraîner. Toutes ces obligations sont exigées en pratique pour les édifices importants, mais il n'y a aucun seuil légal fixant la catégorie d'édifices ou de valeur immobilière à laquelle elles s'appliquent.

2.2.2 Importance relative des relevés préliminaires:

Les sondages préliminaires ne constituent qu'une faible dépense par rapport au coût total de l'immeuble; le tableau suivant tiré de données publiées par Eivemark (1971) donne trois exemples d'édifices d'importance moyenne, fondés dans trois contextes distincts:

Tableau 1 : EXEMPLES DE COUT DES RELEVÉS GÉOTECHNIQUES POUR DES IMMEUBLES DE MOYENNE IMPORTANCE.

ÉDIFICES	Étages/ sous-sol	Type de fondation	Forages - Nb	Coût pieds \$	F/ T
Hall Burnside	15/1	sol et roc	4	225	1575 0.05 %
Place du Cercle	15/3	pieux	2	159	1065 0.02 %
Mountain Place	18/3	roc	10	185	1295 0.05 %

* Rapport entre le coût du relevé préliminaire et la valeur totale de l'immeuble.

Pour les constructions plus importantes, il arrive que l'on effectue une seconde campagne de forage après le dégagement du niveau de fondation. Ces forages visent essentiellement à assurer le constructeur qu'il n'existe aucune couche ramollie ou altérée aux emplacements où seront coulées les fondations. Le coût total des relevés géotechniques représente alors environ 0.1 % de la valeur totale de l'édifice (ex. la Maison de Radio-Canada). A titre de comparaison, mentionnons que la

moyenne canadienne pour tout l'ensemble de la construction non domiciliaire se chiffrait à 0.4 % en 1968 (Blais et al., 1971). Cette valeur englobe évidemment des chantiers en dehors des villes où la complexité des travaux exige des relevés plus coûteux qui se situent alors entre 0.1% et 2 % des investissements totaux (Blais et al., 1971).

2.2.3 Choix des solutions techniques vis-à-vis les conditions géologiques:

Le choix du type de fondation dépend évidemment des conditions géologiques du site, mais pas uniquement de ce facteur; les délais de construction, la disponibilité de l'équipement et du personnel qualifié, les contraintes climatiques et les préférences de l'architecte influent autant, sinon plus.

Le soutènement des murs de fouilles doit tenir compte des conditions hydrogéologiques. L'utilisation de la paroi moulée s'est généralisée assez rapidement ces dernières années; cette méthode s'avère très efficace dans tous les matériaux à l'exception peut-être du till de Malone qui contient parfois trop de gros blocs. Les ingénieurs préfèrent souvent ce type de mur malgré son coût plus élevé que la paroi berlinoise (poutres H d'acier et boisage), parce qu'il assure une protection étanche là où il y a risque de venues d'eau.

Un certain conservatisme se manifeste parfois dans le choix des méthodes d'excavation. Ainsi pour la réalisation de tunnels, on a jamais encore utilisé les tunneliers ou machines foreuses à pleine section (communément appelées "taupes" en Europe), malgré le fait que la roche calcaire et argileuse des formations de l'Ordovicien permettrait une application très avantageuse de cette technologie nouvelle.

Nous avons constaté sur bien des chantiers que les entrepreneurs rencontrent des difficultés non prévues dans leur soumission et qui originent de leur méconnaissance des propriétés du roc.

Pour citer un exemple récent, mentionnons le cas d'une fouille dans les shales d'Utica à Ville LaSalle: dans les mois qui ont suivi l'achèvement de l'excavation à la cote demandée, la circulation des engins et camions sur le plancher de shale a produit un surcreusement atteignant un mètre par endroits. Ces trous, en plus de retenir désagréablement l'eau, ont nécessité leur comblement par 750m³ de béton maigre avant que l'on coule le radier.

Au chapitre suivant nous tâcherons d'indiquer pour chaque étage géologique les caractéristiques et les problèmes qui lui sont propres. Nous espérons démontrer comment des conditions géologiques différentes devraient commander des solutions techniques spécifiques aux problèmes de fondation, d'excavation et de soutènement.

2.3 RECHERCHES DANS LES UNIVERSITÉS

Les roches de Montréal ont reçu tout naturellement une attention particulière de la part des chercheurs des deux principales universités de la ville. Celles-ci sont implantées de part et d'autre du Mont Royal qui est composé de roches ignées appelées roches montérégienennes. Les roches du Mont Royal ainsi que les masses satellites ont été étudiées très en détail (plus de 25 thèses et de nombreuses publications).

En comparaison, les roches sédimentaires sont moins bien connues. Parmi les études pétrographiques récentes, Hofmann (1963) a décrit les calcaires du Chazy, Lewis (1971) les grès de Potsdam, Mason (1967) les shales du Lorraine et Young (1964) les calcaires du Trenton inférieur.

Les dépôts meubles sont traités dans de très nombreuses publications dont on trouvera une liste assez complète dans Gadd (1971). On peut trouver plusieurs textes décrivant les formations et la géochronologie de la période quaternaire dans les Basses Terres du St-Laurent, mais très peu concernent l'île de Montréal directement; ses environs immédiats ont été étudiés par Byers (1949), McPherson (1965) et Desjardins (1970).

Il est remarquable de constater que quelques étudiants sont maintenant orientés vers des sujets de géologie appliquée: Jobin (1969) a comparé les mérites respectifs des méthodes sismiques et électriques pour la détermination des épaisseurs des dépôts meubles dans l'île Perrot; Eivemark (1971) a suivi trois projets de construction mentionnés à la page 11. La remarquable étude de P. Crépeau (1963) du site de Carillon (environ 50 km à l'ouest de Montréal) est un très bon exemple de géologie appliquée. À Montréal même, Grice (1966 et 1969) s'est penché sur les relevés géologiques exécutés pour la construction du métro et la gestion par informatique des données de forage. Depuis deux ans, plusieurs projets de fin d'études à l'École Polytechnique ont porté sur des problèmes pratiques de géologie de l'ingénieur et ont été réalisés grâce à la collaboration avec la Ville de Montréal et la C.U.M. (Boisjoly, 1973, Harvey & Whalen, 1972, Letendre, 1973, Lévesque, 1974).

III - GÉOLOGIE DE MONTRÉAL - PROBLÈMES PRATIQUES

3.1 DESCRIPTION DES FORMATIONS

À l'échelle régionale, la géologie de Montréal est bien connue, de même que la succession des événements qui ont formé son sous-sol et modelé la morphologie du terrain; le tableau de la page suivante les résume.

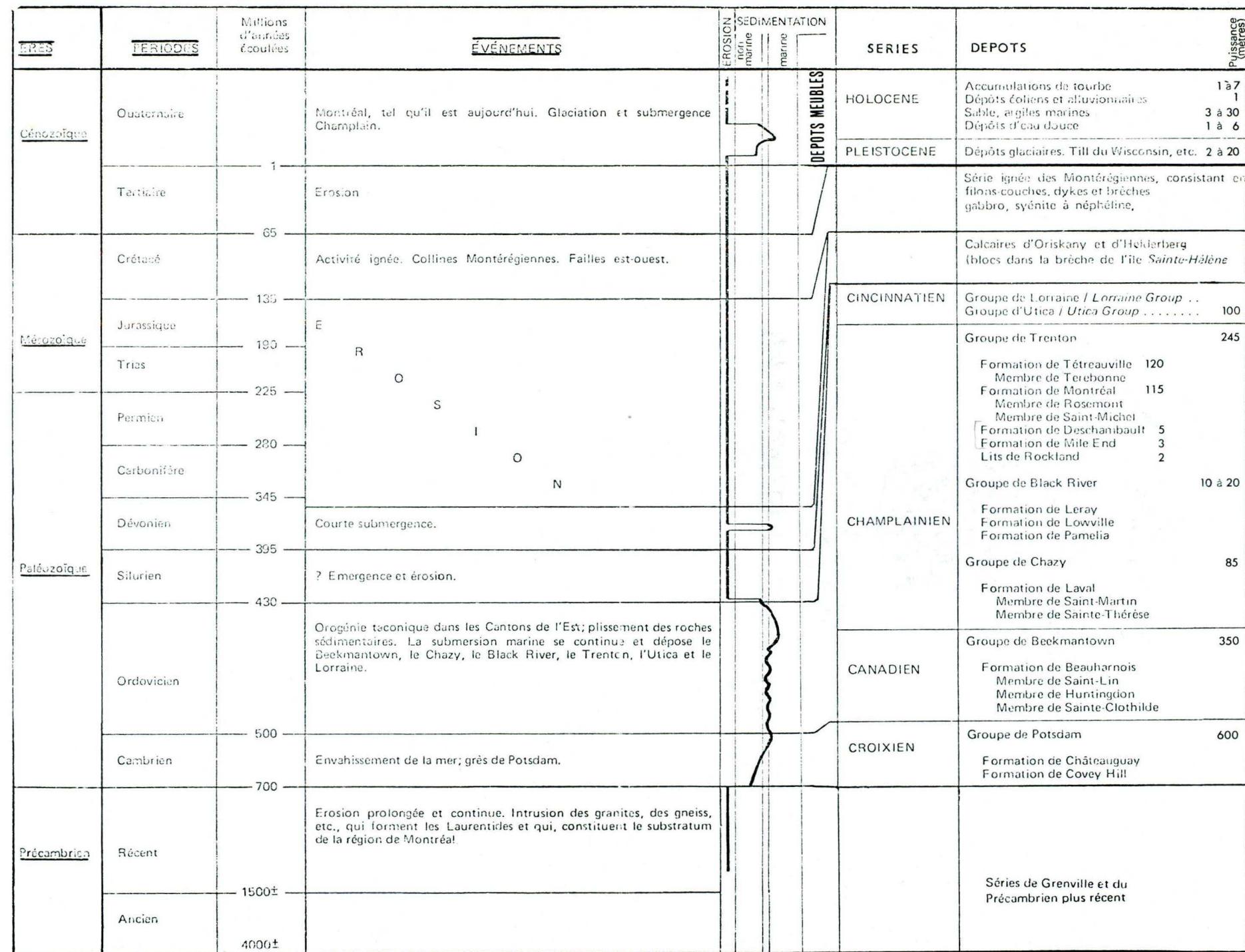
3.1.1 Le socle précambrien, qui affleure dans la région des collines d'Oka, se retrouve sous l'île de Montréal à plus de 1200 m de profondeur, de sorte qu'il n'est pas impliqué dans la géologie de l'ingénieur.

3.1.2 Les grès de Potsdam, d'une puissance atteignant 600 m, se situent aussi à des profondeurs trop grandes sous Montréal pour préoccuper l'ingénieur en construction, à l'exception toutefois d'une mince bande qui affleure à proximité de l'île Perrot. Les grès présentent un certain intérêt cependant pour la production de silice à partir de bancs très purs, qui affleurent à l'ouest de Montréal. On a ouvert une dizaine de carrières dans le passé dans l'île Perrot et autour de Melocheville pour fournir de la maçonnerie aux constructions locales; depuis la guerre, l'expansion de l'industrie de la pierre de taille a été compromise par l'utilisation de matériaux fabriqués.

L'utilisation du grès de Potsdam comme agrégat à béton dans certains ouvrages à Beauharnois a démontré que certains horizons sont réactifs aux alcalis et forment des gels expansifs (J. Bérard, communication personnelle, 1974).

L'intérêt au point de vue hydrogéologique de ce groupe est à explorer; les grès comblient les dépressions d'une surface d'érosion précambrienne qui possède des reliefs d'au moins 1000 mètres selon T.H. Clark (1972). Ils sont susceptibles de

Tableau 2: STRATIGRAPHIE ET HISTOIRE GÉOLOGIQUE DE MONTRÉAL



(modifié de Clark, 1972 et Hofmann 1972)

contenir une eau très pure et en grande quantité, malgré la porosité généralement très faible des couches.

3.1.3 [Le groupe de Beekmantown, qui recouvre le Potsdam, occupe le sous-sol de l'aéroport Mirabel, ainsi qu'une grande partie de la rive sud, mais seulement une portion très restreinte de l'île de Montréal.] Exploitée en carrière pour la production d'agrégats, la dolomie qui forme un peu plus des deux tiers du groupe, apparaît par endroit très altérable. Nous avons de plus observé en carrière deux phénomènes, qui à l'occasion pourraient se révéler importants dans les travaux de construction: la présence de nombreuses cavités de dissolution et de lentilles de gypse, ainsi que le flambage de dalles au plancher des excavations.

Le premier phénomène présente un risque d'irruption d'eau en écoulement concentré dans les excavations, ainsi qu'une agressivité de certaines de ces eaux pour les bétons. Les eaux contenant plus de 5000 ppm en sulfates réagissent avec le constituant C₃A (aluminate tricalcique) du ciment Portland normal pour donner un composé hydraté et expansif appelé sel de Candlot. Le gypse est abondant dans la partie de la formation de Beauharnois qui contient d'épais lits de dolomie (conditions évaporitiques). Nous recommandons donc d'effectuer des analyses d'eau souterraine avant de construire des ouvrages en béton dans ces roches; on utilisera un ciment résistant aux sulfates (ex. Portland type V) au besoin.

Le second phénomène observé au plancher de la carrière Meloche à Côteau-du-Lac, survenait par rupture brusque des lits du plancher de l'excavation après quelques semaines d'exposition (fig. 1). Legget (1973, p. 473) décrit un phénomène semblable au Missouri qu'il nomme "pressure ridge" et que l'on peut traduire par "crête de compression".

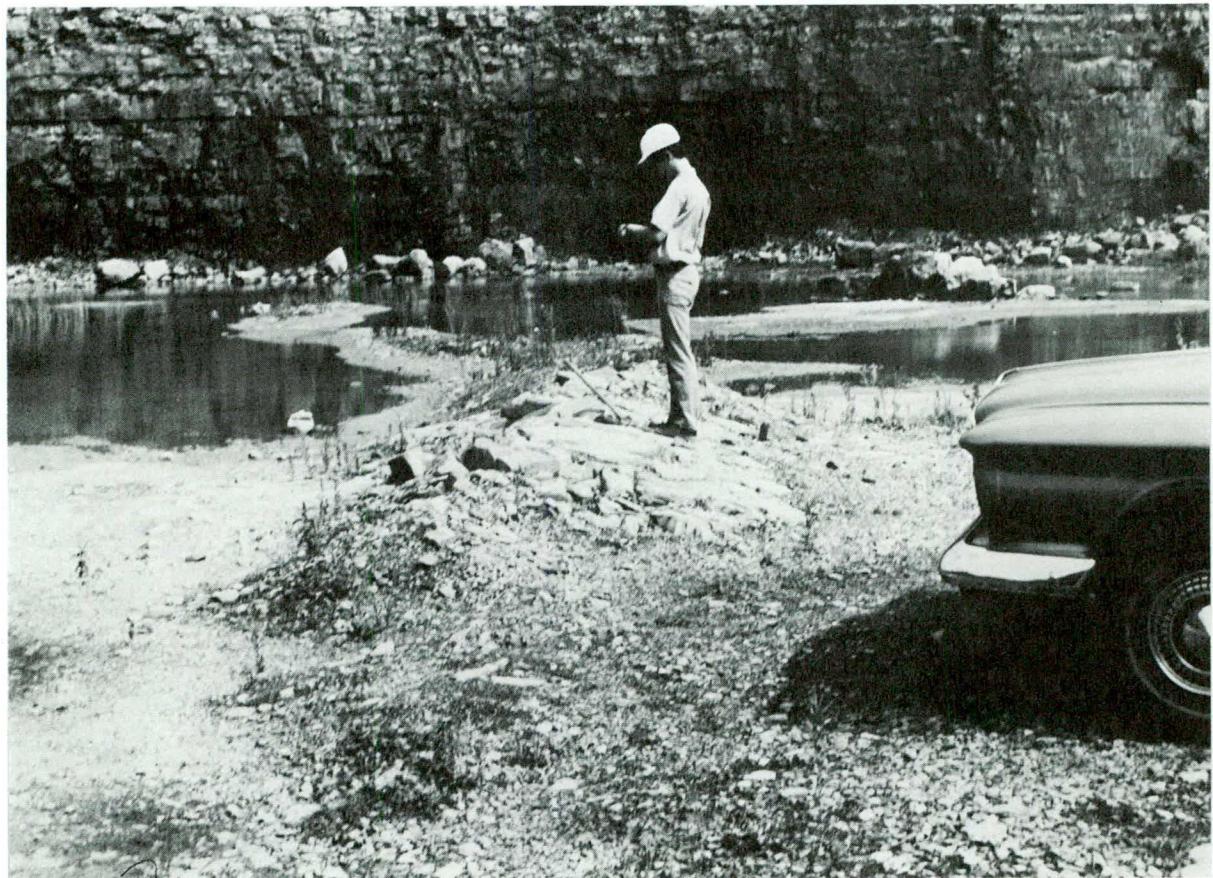


Fig. 1 - Rupture brusque par flambage de dalles de dolomies au plancher d'une carrière à Côteau-du-Lac. La crête formée, haute de 50 cm, se prolonge en zigzag jusqu'à 20 m du mur de l'excavation. Formation de Beauharnois, groupe de Beekmantown.

En Ontario, Coates (1964) étudie le cas d'une crête formée dans les calcaires du Black River au fond d'une excavation profonde de 15 m; White, Karrow et MacDonald (1973) décrivent six autres exemples dans la région Toronto-Hamilton. Dans les lits du Beekmantown ces ruptures brusques résultent à la fois de la valeur élevée de la contrainte horizontale au plancher d'une fouille nouvellement excavée, et de la décohésion des lits de dolomie par l'altération rapide des interlits argileux qui les séparent.

Une autre forme d'altération s'observe également sur des blocs utilisés en maçonnerie; ils se débitent très rapidement dès qu'ils sont exposés à des cycles de variation d'humidité. La formation est puissante (250 à 350 m) et formée de plusieurs types pétrographiques (dolomies, calcaires, shale et grès), de sorte qu'il reste beaucoup à faire pour son étude complète et pour pouvoir caractériser ces roches sous diverses sollicitations.

À l'exception du barrage de Carillon, peu d'ouvrages importants ont permis une étude géotechnique du Beekmantown; à cet emplacement Crépeau (1963) rapporte que l'on a trouvé une cavité à 50 m sous le parement amont; elle a nécessité un colmattage par 450 m³ de béton. Nous reviendrons au chapitre 7 sur la karstification et ses implications pratiques.

3.1.4 Le groupe de Chazy comporte une grande variété de roches en plus des calcaires très purs et cristallins qui affleurent au centre de l'île Jésus principalement. Ces roches initialement exploitées comme pierre de taille fournissent aujourd'hui de très bons agrégats. Les lits cristallins qui ne sont pas gréseux, contiennent plus de 95 % de CaCO₃.

A

La ligne 2 du métro a recoupé sur une distance de 2000 m les lits du Chazy qui forment le noyau de l'anticlinal Villeray. Le prolongement ouest de cette même ligne recoupera le Chazy sur plus de 3 km (figure 2). C'est là l'excavation la plus importante en dehors des nombreuses carrières ouvertes dans ce groupe. Les roches du Chazy présentent peu de problèmes géotechniques pour la réalisation d'ouvrages. Notons cependant que les calcaires de ce groupe contiennent des proportions variables de grains de sable de quartz, ce qui rend la roche légèrement plus abrasive que les calcaires plus jeunes qui les surmontent. Le Chazy ne contient pas que des lits calcaires dans toute son épaisseur (85 m); les couches à la base ont été décrites comme gréseuses ou argileuses et très peu carbonatées: elles forment le membre de Ste-Thérèse. Les unités de calcaire cristallin occupent vingt à trente mètres dans la formation, les strates du sommet de façon générale (membre de St-Martin), mais la position stratigraphique de ce faciès varie latéralement.

3.1.5 Le groupe de Black River qui suit dans l'échelle stratigraphique, est subdivisé en trois formations qui n'ont qu'une faible puissance dans la région (3 à 6 m). L'unité du bas est dolomitique et contient quelques lits de shale gris à noir. L'unité médiane est un calcaire à lits minces (4 à 20 cm) séparés par des passées de shale. La formation du sommet possède des lits épais (≥ 50 cm) calcaires, contenant des nodules de chert, ce qui peut être un constituant délétère dans les bétons.

Ces roches ont été exploitées au siècle dernier et au début du siècle comme pierre de maçonnerie (barrage de l'île Visitation, piliers du pont Victoria) et se sont révélées très durables. Bien qu'elles aient été recoupées, les trois formations n'ont pas été identifiées comme telles

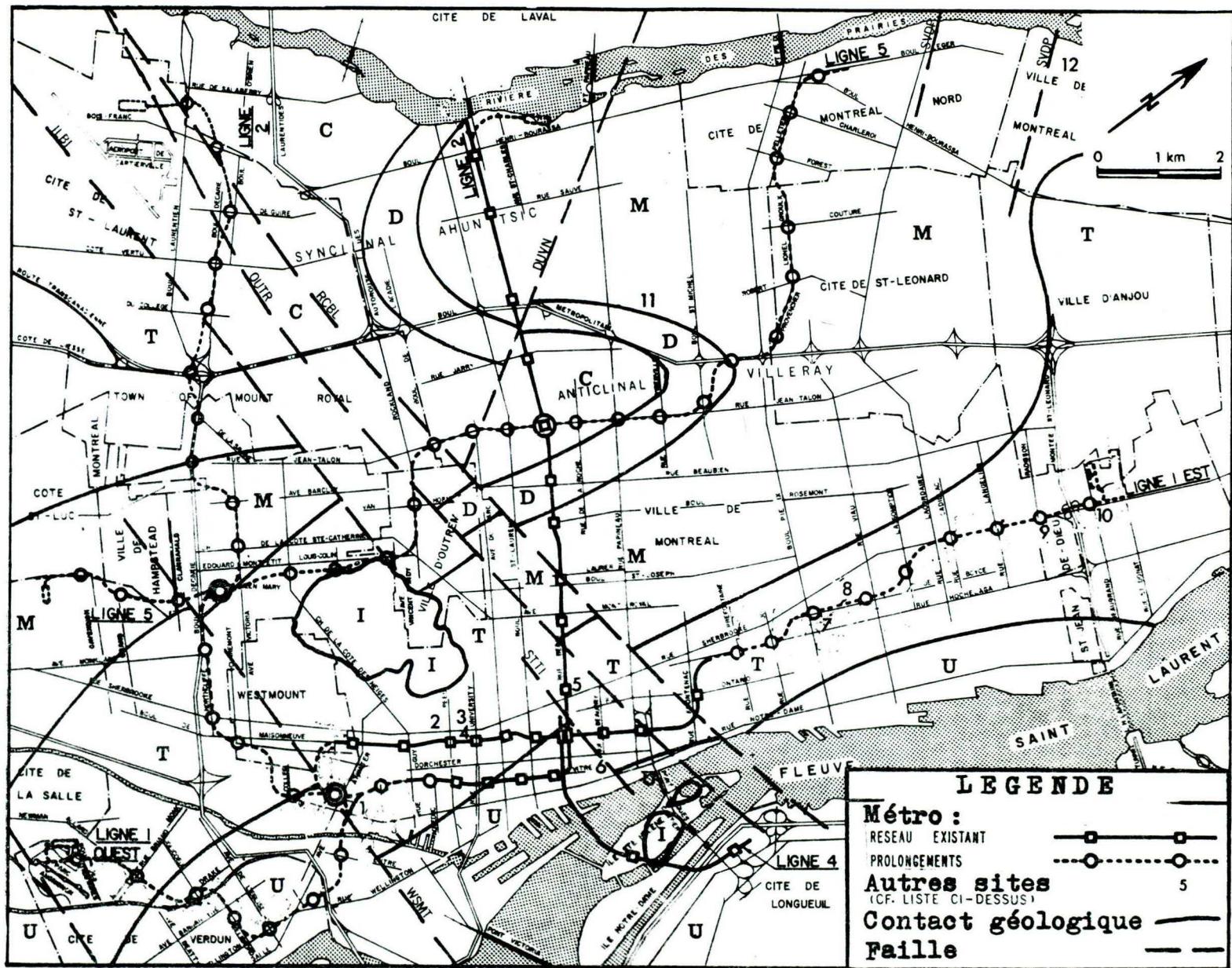


Fig. 2 - Carte géologique de Montréal - Excavations majeures dans le roc.

lors de la construction de la ligne 2 du métro. La faible puissance du groupe (20 mètres selon Hofmann, 1972) ne rend pas toujours facile son identification exacte dans les fouilles.

3.1.6 Les deux premières formations du groupe de Trenton
(Deschambault et Mile-End) présentent à Montréal des
successions de lits cristallins et de calcaires argileux,
un peu comme le Black River; il nous apparaît
plus commode en géotechnique de les regrouper ensemble.
On y retrouve des bancs de calcaires durs et massifs
en lits parfois épais (50 centimètres) qui ont été très
recherchés dans le passé par les tailleurs de pierre,
mais qui sont peu attrayants pour les exploitations
actuelles à l'échelle industrielle, parce que dilués
parmi des calcaires de composition fort variable, parfois
très argileuse.

Au point de vue fondation ou stabilité de tunnel, cette unité lithologique est apparue très satisfaisante dans son ensemble; l'hétérogénéité de composition amène des différences de comportement d'une formation à l'autre, donc à une échelle de 3 à 5 mètres. Par exemple, l'occurrence de lits épais aux épaulements d'un tunnel empêche souvent la formation d'une courbure comme demandée dans les devis; le sautage tend plutôt à former une marche d'escalier, ce qui forme une saillie ou des hors-profils importants. Sous une fondation, un lit épais peu fracturé répartit mieux les charges, donc diminue la déformation. Ce genre d'influence s'exerce à l'échelle du lit; on ne peut donc qu'en faire une étude de détail sur chaque site. Pour la zone d'affleurement de cet ensemble, rappelons simplement qu'on rencontrera des comportements hétérogènes et que l'on doit déterminer comment cela peut affecter tel ou tel ouvrage.

Les interlits de shales constituent des horizons très faibles, altérés ou altérables parfois. Lorsqu'ils sont ramollis ou très schisteux ils causent une augmentation du hors-profil en tunnel là où ils recoupent la voûte. Les interlits altérables sont très continus: on peut s'en servir comme horizon-repère et les cartographier sur de grandes distances.

Le plus important karst connu de la région, la caverne du ruisseau Quimbeau, Ste-Thérèse (Brassard, 1963), s'est creusé dans cet étage sur une longueur d'environ 300 mètres.

3.1.7 (La formation de Montréal du groupe de Trenton a été subdivisée en deux membres différents par leur population de fossiles: environ 40 mètres pour le membre de St-Michel, suivi par 80 mètres du membre de Rosemont. Lithologiquement cependant nous pouvons les considérer comme une seule unité formant le Trenton moyen.) Cette formation est très riche en fossiles; à certains niveaux, ceux-ci donnent un aspect tacheté aux interlits gris foncé. L'épaisseur des couches varie beaucoup, mais demeure toujours faible (2 cm à 15 cm). Les lits les plus minces apparaissent très irréguliers, parfois même discontinus et noduleux.) Par contre, l'épaisseur des divers faciès semble constante sur de grandes distances, de sorte qu'il est facile de définir la structure géologique d'un secteur reconnu par forages carottés en identifiant et en corrélant ces différents faciès; c'est ce que nous avons fait en examinant en détail les carottes prélevées dans le nord de l'île pour l'intercepteur Rivière-des-Prairies (fig. 9, p. 39).

(Les interlits argileux (shale noir ou gris foncé) comptent pour 40 pour cent du volume dans certaines unités. La base de la formation de Montréal comporte cependant des calcaires très purs exploités pour la fabrication d'agrégats dans deux très importantes carrières, celles de Miron et Francon.) En plus des deux mentionnées, il y en a eu de nombreuses autres

dans le passé, sur les deux côtés de l'anticlinal de Villeray.

Les sections du métro recouvrant le Trenton moyen n'ont malheureusement pas été cartographiées; d'autres projets à venir à la C.U.M. permettront d'étudier le comportement de ces calcaires en tunnel. (Mentionnons finalement que la petite caverne de St-Léonard s'est développée dans cette formation.)

3.1.8 La formation de Tétreauville est celle qui a revêtu jusqu'à maintenant la plus grande importance en ce qui concerne la construction. Exception faite du tunnel au sud du canal de l'aqueduc, la presque totalité de la ligne 1 du métro se situe dans cette alternance très régulière de calcaire gris argileux et de shale calcaieux plus foncé et en lits plus minces. En plus de la régularité de la stratification, qui confère une certaine homogénéité à l'ensemble, le Tétreauville a pour caractéristique un très faible contenu de fossiles. La pierre possède un grain très fin ou sublithographique. Les interlits de shale, parfois de schiste, passent graduellement à la composition des lits calcaires par transition sur un à deux centimètres; ils comptent pour 5 à 25 % du volume total. La faible épaisseur des lits calcaires ainsi que l'altérabilité des interlits, empêchent l'utilisation de cette pierre en maçonnerie, ou pour la fabrication d'agrégats de qualité. Par contre sa proportion d'argile la rend très apte à servir à la fabrication du ciment.

En ce qui concerne la géotechnique, l'homogénéité favorise l'exécution de tunnels et autres ouvrages, car le rocher possède des propriétés constantes sur de vastes étendues. Localement le Tétreauville a été affecté par l'arrachement d'écailles de quelques mètres à 10 mètres

d'épaisseur (Durand et Ballivy, 1974). Ce type particulier d'érosion par les glaciers continentaux du Pléistocène a laissé des dénivellations brusques dans la topographie du substratum rocheux, qu'il importe de cartographier avant la construction. Les travaux du métro aux stations Beaugrand, Radisson et Pie-IX en ont rencontré.

La formation de Tétreauville a une puissance assez constante évaluée à 120 mètres. Aux environs immédiats du Mont Royal, ces strates ont un aspect un peu différent et une attitude redressée consécutive à la mise en place du noyau intrusif de la montagne.

3.1.9 Le passage du Trenton à l'Utica marque un changement net de pétrographie; alors que les limites des groupes décrits précédemment sont difficilement identifiables pour un non-spécialiste en paléontologie, le contact Utica/Trenton apparaît clairement surtout sur les carottes de forage. Les alternances de couches claires et foncées du Tétreauville font brusquement place à une roche uniformément gris foncé à noir, sans aucun fossile. Partout où nous avons observé le contact, le sommet du dernier lit du Tétreauville montre des nodules calcaires perturbés et enrobés de pyrite (fig. 3a). Au sud du Mont Royal, le contact à faible pendage est souvent marqué par un filon-couche situé à peu de distance au-dessus du contact même. Là où il n'a que quelques centimètres d'épaisseur, le sill est altéré et ramolli en argile. Clark (1972, p. 110) insiste sur le manque de points d'observation de contact: nous croyons donc utile de représenter sur la figure 4 une carte montrant l'élévation de sa position que nous avons mesuré sur 21 forages ainsi que dans le tunnel actuellement en cours d'excavation sous la rue Charlevoix (fig. 3b).

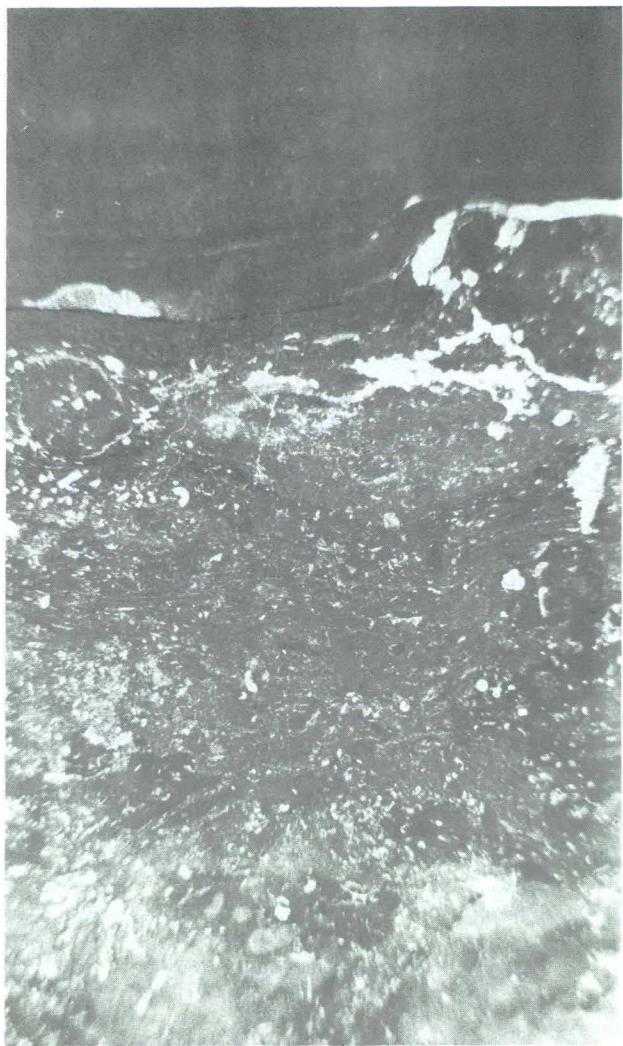


Fig. 3 Contact Utica-Trenton
Sous la rue Charlevoix (Cf. fig. 4)

- a) Détail de la structure au contact;
amas de pyrite en blanc (grossissement x 2).



b) Filon-couche épais de 25 cm entre les shales et le calcaire, au front de taille de la ligne 1 du métro.
(Janv. 1974).

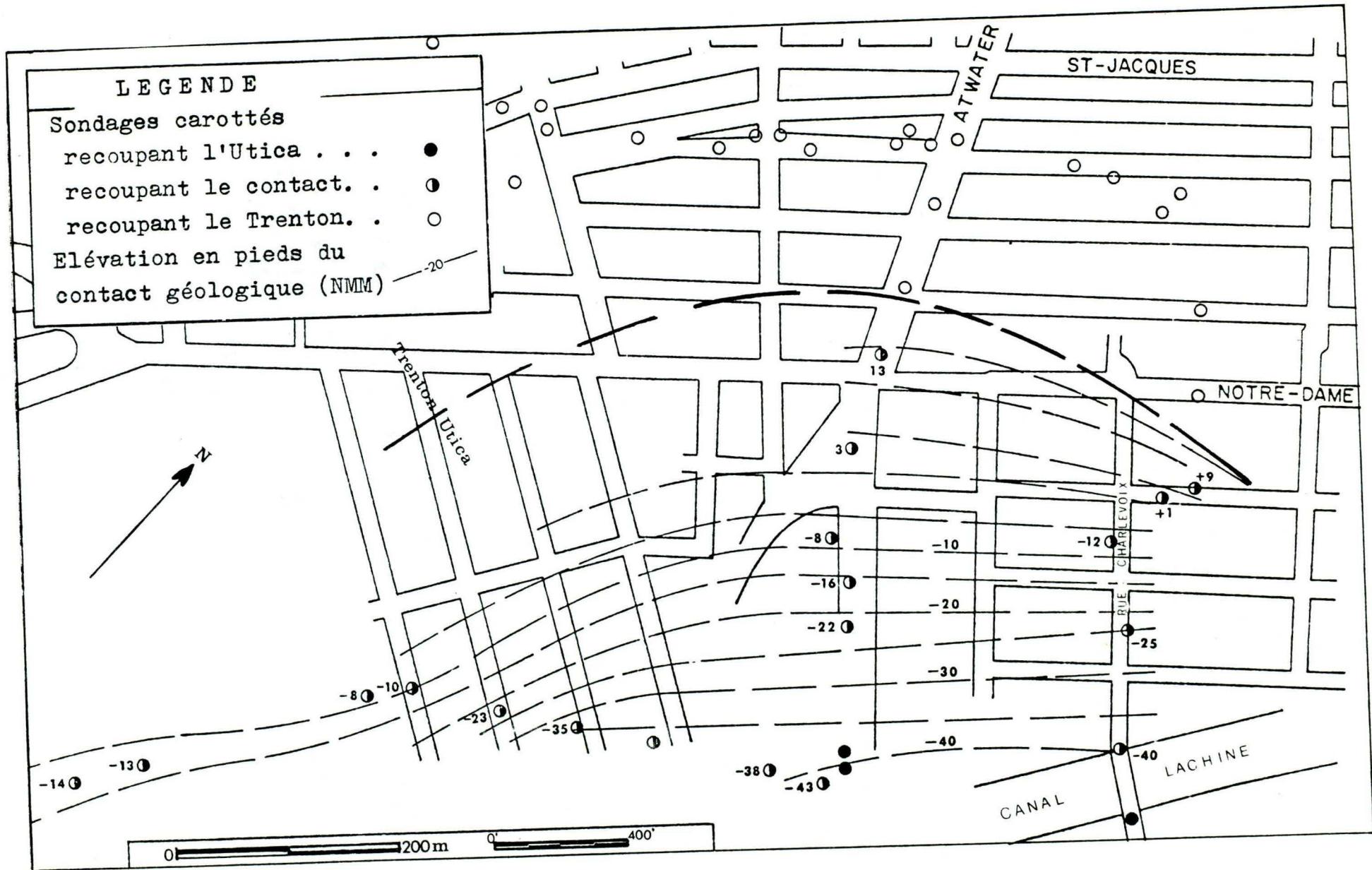


Fig. 4 - Élévation du contact Utica-Trenton dans un secteur de St-Henri.

[L'Utica, que l'on rencontre en bordure du fleuve, est constitué de shales et de mudstones un peu calcaieux, parfois fissiles et sensibles à l'intempérisme: des carottes de forage laissées à l'extérieur se débitent rapidement sous l'effet de l'intempérisme (variations d'humidité et de température). Dans une excavation ou un tunnel, les variations cycliques sont moins importantes et le comportement à court terme de la roche est meilleur que ce que l'on pourrait croire en examinant les carottes.]

Les fouilles les plus récentes dans ce groupe ont été ouvertes pour la construction de la maison de Radio-Canada, de la ligne 4 du métro et du prolongement à Verdun de la ligne 1. [La stratification n'est jamais bien visible autrement que par les joints de litage; la fracturation de la roche homogène est parfois conchoïdale. C'est le système de diaclases différent qui permet le mieux de distinguer l'Utica du Trenton: dans les shales les diaclases coupent parfois en travers des lits avec une surface incurvée.]

[La plus grande partie des diaclases sont virtuelles; elles ont tendance à s'ouvrir avec le temps entraînant ainsi des chutes de blocs successives. Le boulonnage, qui est très efficace pour retenir les dalles allongées des lits calcaires, ne peut pas prévenir les chutes de blocs et la décohésion des massifs d'Utica parce que les fractures peuvent se développer en réseau serré dans plusieurs directions.] Dans les chantiers actuellement en activité pour le percement du tunnel de la ligne 1 du métro, les entrepreneurs utilisent la technique du béton projeté en mince couche (2 à 5 cm) sur la voûte et les murs. Cette procédure assure un soutènement temporaire satisfaisant en retardant grandement l'altération et la décohésion du massif. Elle ne peut

cependant pas assurer la stabilité des voûtes dans les roches déjà fortement diaclasées, comme par exemple les shales recoupés densément par des intrusifs (voir le secteur Verdun sur la figure 6).

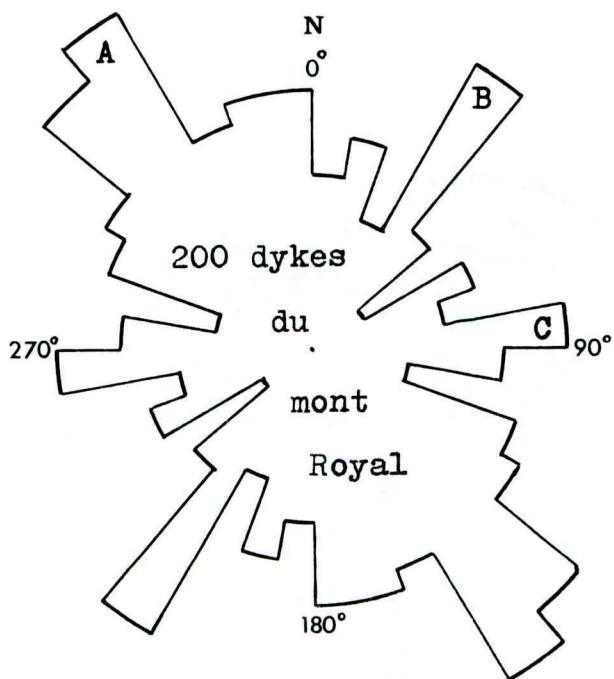
Sous les fondations d'immeubles, on doit principalement s'assurer qu'il n'existe pas de lit d'argile ou de schiste altéré qui pourraient entraîner un tassement. Si le fond de fouille doit supporter pendant plusieurs semaines la circulation d'engins et camions lourds, on doit s'attendre à un ramollissement jusqu'à l'état de boue des premiers pieds de la roche comme dans l'exemple signalé à la page 13. Les massifs rocheux de shale d'Utica sont pratiquement imperméables; la roche tend à gonfler et à bloquer toutes les fractures importantes.

3.1.10 Le groupe de Lorraine fait suite à l'Utica par un passage graduel, où les intercalations de microgrès (siltstone), schiste gris, calcaire, deviennent de plus en plus abondantes dans le shale noir. Dans l'île de Montréal, le Lorraine n'existe qu'à l'extrémité nord-est sous une couverture de dépôts meubles dont l'épaisseur est partout supérieure à 50 pieds (15 m). Utica et Lorraine sont exploités pour la fabrication de brique sur la rive sud.

3.2 ROCHES INTRUSIVES

Les roches intrusives comprennent deux grands types: les stocks et cheminées d'une part, les intrusions satellites (dykes et filons-couches ou sills) d'autre part. Nous n'étudierons ici que les secondes, les premières étant à la fois bien localisées et bien connues.

Les dykes et filons-couches sont naturellement très abondants aux environs des intrusions majeures qui se sont mise en place aux endroits les plus faibles de la roche de la région; les intrusifs satellites ont également suivi les faiblesses des roches traversées, comme en témoigne la figure 5 ci-dessous:



(tiré de Hodson, 1968 d'après une communication personnelle de A.R. Philpotts)

Fig. 5 - Orientation des dykes autour du Mont Royal.

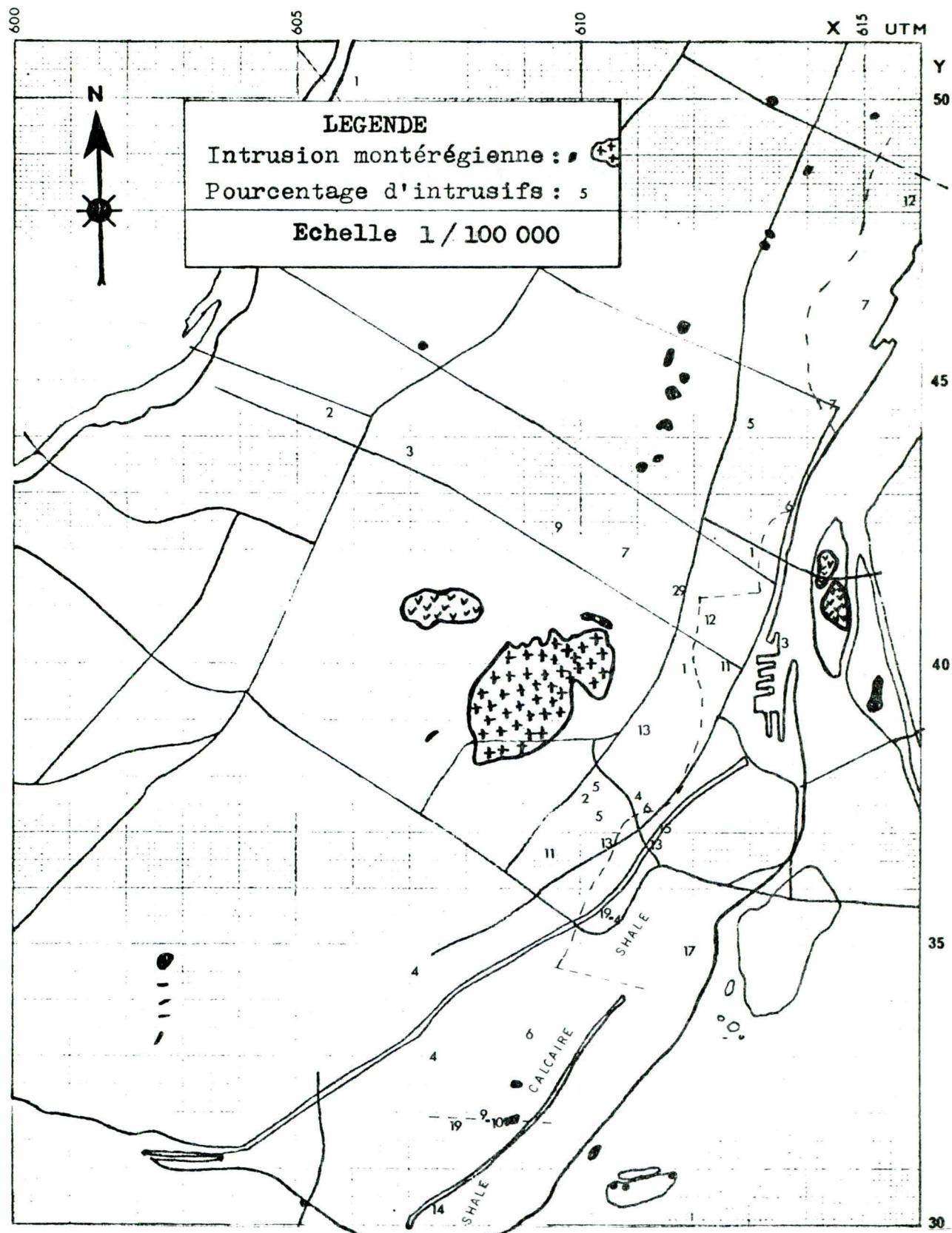


Fig. 6 – Pourcentage d'intrusifs en volume dans les roches paléozoïques.

Les orientations dominantes A , B et C correspondent aux directions tectoniques dans l'île de Montréal, respectivement les failles de St-Vincent-de-Paul, l'axe de plissement Villeray et la faille Rapide-du-Cheval-Blanc.

La figure 6 est une compilation tirée de quelques centaines de forages de la ville de Montréal et de la C.U.M. Chaque nombre reporté sur la figure représente une valeur moyenne pour 100 à 500 mètres de carotte. On remarque surtout que les abords du Mont Royal n'ont pas le monopole des concentrations élevées de dykes et sills. Cette carte, une fois complétée, devrait permettre de prédire la proportion de roche intrusive (dure de façon générale) dans les roches sédimentaires plus tendres; ce paramètre est très utile par exemple pour la planification des projets de forage de tunnels par les machines à pleine section.

Nous avons observé une grande variété de composition et de textures*; certaines sont plus sujettes à s'altérer; cette étude n'est pas encore assez avancée pour que nous puissions donner ici des conclusions définitives. Les intrusifs de composition acide, blancs ou beiges, sont très fréquemment kaolinisés, ce qui les rend un peu friables. Les intrusifs basiques peu épais rencontrés dans la limite des profondeurs explorées en génie civil (0 à 50 m) sont à l'occasion (2 à 5 % des cas) partiellement ou complètement altérés. La roche grise à grain fin lorsque saine, devient verdâtre avec parfois un peu de rouille dès que débute leur altération; la teinte verte est donnée par la chlorite et l'épidote qui se forment. Les bordures de trempe s'altèrent en premier; si le sill est peu épais (< 10 cm) c'est toute sa masse qui est ramollie en une pâte argilosilteuse de teinte vert pâle. Si les intru-

* La description détaillée des divers types sort du cadre de ce travail; on trouvera de bonnes descriptions des roches intrusives dans Clark, 1972 pp. 115 à 154 et dans Gold, 1972.

sifs durs peuvent présenter des problèmes pour les tunnelliers, les intrusifs altérés ont posé des problèmes aux fondations et à la stabilité de certaines excavations. (Ces couches molles) qui se présentent sous toutes les attitudes, parallèlement ou en travers des lits, n'ont qu'une très faible capacité portante, ne peuvent retenir les ancrages qu'on y place et causent des hors-profil s'ils recoupent la voûte d'un tunnel avec un angle inférieur à 20°. Dans les excavations du prolongement de la ligne 1 Est du métro, nous en avons rencontré un tous les 300 m en moyenne.

L'épaisseur courante des intrusifs va de un centimètre à un mètre; quelques filons-couches, dont l'épaisseur peut atteindre une dizaine de mètres, se rencontrent à l'occasion dans les travaux souterrains ou les forages, mais ce sont toujours les prolongements d'intrusifs qui affleurent dans le voisinage et qui sont indiqués sur la carte géologique. Les travaux autour du stade olympique ont par exemple, permis de retrouver le prolongement au sud de la rue Sherbrooke (figures 7 et 8) de l'épais filon-couche qui court depuis l'intersection des rues Papineau et St-Joseph jusqu'à l'ancienne carrière du Jardin Botanique (décrit par Clark, 1972, p. 138) dans le membre de Rosemont de la formation de Montréal. En allant vers l'est le filon-couche remonte dans la stratigraphie vers des formations plus jeunes; au stade olympique il se situe au bas du Tétreauville, à 30 mètres sous la surface.

A l'exception de quelques gros intrusifs, les dykes et sills courants ne sont pas indiqués sur les cartes géologiques; ils doivent être identifiés par des sondages et reportés sur les plans et coupes à l'échelle des plans de l'excavation projetée.

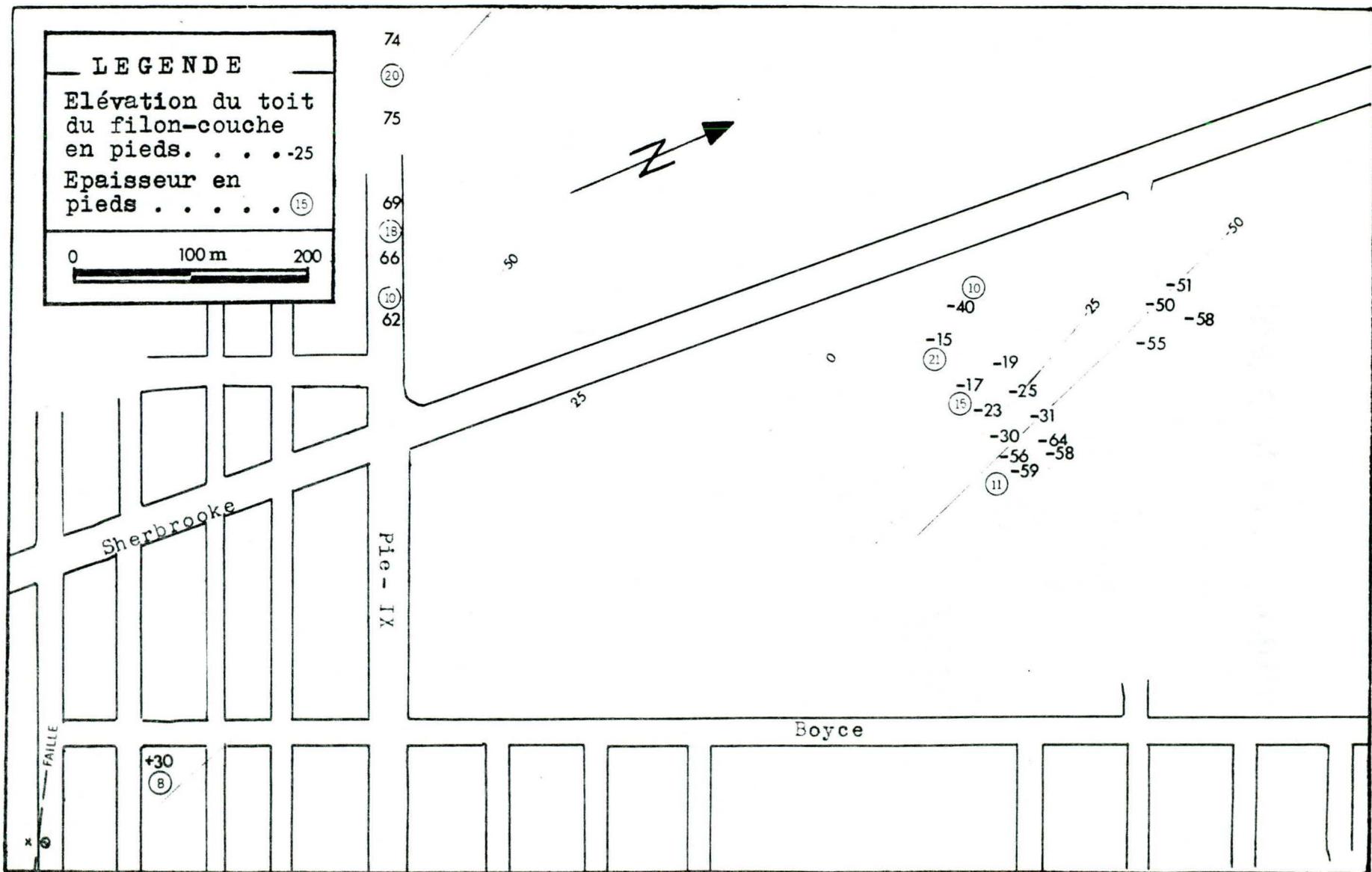


Fig. 7 - Épais filon-couche aux environs du Parc Maisonneuve.



Fig. 8 - Épais filon-couche (3m) constituant les trois quarts de la hauteur des murs du tunnel. Photo prise à 30 mètres à l'ouest de la faille indiquée à la gauche de la fig. 7.

3.3 TECTONIQUE

Les propriétés mécaniques des roches décrites précédemment ne diffèrent que pour trois grands types: les carbonates, les shales et les intrusifs. Le degré de fragmentation d'un massif influence plus son comportement que la distinction plus détaillée des types pétrographiques.

La densité des discontinuités diminue avec la profondeur. Dans les travaux de génie urbain à Montréal, les roches sont toujours modérément fracturées à très fracturées. Dans la classification de Terzaghi (tableau 3 ci-dessous) les massifs rencontrés se rangent presque toujours dans les classes II, III et IV, plus rarement dans la classe V.

Tableau 3 : CLASSIFICATION DES MASSIFS ROCHEUX POUR LA CONSTRUCTION DES TUNNELS. d'après Terzaghi.

Classe	Description	Effet sur l'ouvrage	Notes
I.	<u>Massif intact</u> (Intact Rock) ne contient ni joints ni fissures. S'il y a rupture, le plan de rupture passera par la roche saine. Lorsque ce massif est endommagé par sautage, il peut y avoir de la chute des pierres du toit durant quelques heures ou jours après le sautage. Ces massifs montrent souvent des phénomènes d'éclatements.	Soutènement léger, nécessaire seulement s'il y a de la chute de pierres et des éclatements.	
II.	<u>Massif stratifié</u> (Stratified Rock) consiste en strates individuelles aux contacts cesquelles il y a peu ou aucune résistance contre la séparation. Les strates peuvent être affaiblies par des joints transversaux. Dans ces massifs la chute des pierres est tout à fait habituelle.	Soutènement léger.	
III.	<u>Massif partiellement fissuré</u> (Moderately jointed rock) contient des joints et des fissures, mais les blocs de roche entre les joints sont localement unis ensemble ($0 < \frac{J_2}{J_1} < 1$) et étroitement enchevêtrés. Dans de tels massifs les parois verticales du tunnel n'exigent pas de soutènement, mais on y observe souvent la chute des pierres et les éclatements de la paroi.	Charge peut varier erratiquement de point en point.	
IV.	<u>Massif fragmenté</u> (Blocky and Seamy Rock) consiste en blocs de roche saine ou peu altérée qui sont complètement séparés les uns des autres ($J_2 = 1$) et incomplètement enchevêtrés. Dans de tels massifs les parois verticales peuvent exiger un soutènement.	Pas de pression latérale.	Peu ou aucune pression latérale.
V.	<u>Massif broyé</u> (Crushed Rock) et non altéré ressemble à un produit de concassage. ($e < 4"$). Si la plupart ou tous les fragments ne sont plus larges que les grains de sable ($e < 1/4"$) et s'il n'existe aucune cimentation, un massif broyé sous la nappe phréatique se comporte comme un sable aquifère.	Pression latérale considérable. L'effet de filtration vers le fond du tunnel demande soit un soutènement continu pour les bases des cintres, soit des cintres circulaires.	
VI.	<u>Massif plastique</u> (Squeezing Rock) est composé des roches qui contiennent un grand pourcentage de particules microscopiques et submicroscopiques des minéraux micacés ou argileux, ayant une faible capacité de gonflement. Ces types de roches avancent lentement dans le tunnel sans augmentation perceptible de volume.	Pression latérale très forte. Etrésillons renversés nécessaires. Cintres circulaires sont recommandés.	
VII.	<u>Massif gonflant</u> (Swelling Rock) est composé de roches contenant des minéraux argileux tels que montmorillonite avec une capacité de gonflement élevée. Ces roches avancent dans le tunnel principalement à cause de leur expansion volumétrique.	Cintres circulaires nécessaires. Dans des cas extrêmes, utiliser un soutènement coulissant.	

En plan, on reconnaît des étendues où il y a très peu de diaclases et des zones où au contraire la roche est très fracturée. Les zones faibles et broyées résultent de ruptures locales ou régionales produites dans l'histoire géologique par les forces agissant dans l'écorce terrestre. Les grands traits de la tectonique de Montréal sont commentés dans le rapport de Clark (1972).

Les failles et les plissements régionaux se répercutent à l'échelle d'un site particulier sous forme de discontinuités* de moindre extension (failles mineures, diaclases). Il est très rare de recouper une faille majeure par une excavation; par contre les discontinuités mineures affectent fréquemment les travaux de construction.

L'épaisseur de la zone affectée par une faille va de quelques centimètres à quelques dizaines de mètres. La majorité des failles de Montréal sont sub-verticales: il est donc exceptionnel de recouper un plan de faille par un forage vertical.

Les traits rouges sur la carte géologique de Montréal (Clark, 1972) servent à expliquer les discontinuités que l'on décèle dans la structure des formations cartographiées par un relevé des affleurements. On ne doit pas interpréter partout ces lignes comme des positions exactes de failles. On dispose en fait de très peu de points où une faille a réellement été observée. A un point précis de la carte où passe un trait rouge, on n'a pas obligatoirement une faille ou un rejet important. Les études détaillées pour les grands projets en cours confirment en général la géologie indiquée sur la carte; mais elles ne trouvent pas toujours les failles données et en rencontrent d'autres qui ne figurent pas. Nous allons illustrer ce point par quelques exemples de relevés récents dont nous avons examiné les forages.

* Voir à l'appendice A-1 pour les définitions des termes utilisés.

3.3.1 Quartier Rivière-des-Prairies: La faille du Bas-de-Ste-Rose a bel et bien été mise en évidence par les forages, mais à environ 300 mètres au nord de la position donnée par Clark. Le bloc nord abaissé de 100 à 200 mètres met en contact les shales du Lorraine avec les calcaires de Tétreaувille; dans le substratum rocheux la position de la faille correspond à une rupture de pente (bas de talus en pente douce) à l'élévation zéro (voir la fig. 35).

La faille St-Vincent-de-Paul I sous le boulevard Perras passe à au moins 200 mètres plus à l'est que l'emplacement prévu (fig. 9); la séparation verticale des faciès calcaires indique un abaissement de 30 mètres du bloc ouest. Ce même bloc est limité à l'ouest par une seconde faille, qui montre une séparation verticale de 21 mètres. Aucun autre déplacement de faciès n'a été relevé plus à l'ouest jusqu'au boulevard Pie-IX. Si on assimile la seconde faille à la faille St-Vincent-de-Paul II, il y a au moins 1000 mètres entre la position prévue et la position probable. L'excavation du tunnel permettra de la situer encore plus précisément.

3.3.2 Verdun - Lasalle: Nous avons examiné en détail une centaine de forages récents dans ce secteur; la faille de Dorval ne passe pas à l'emplacement indiqué dans le parc Angrignon, mais il y a une faille à 700 m plus au sud, qui correspond peut-être à la faille Lasalle. Un contact entre l'Utica et le Trenton, donnant sur 1 km une direction sensiblement parallèle à la faille de Dorval, est probablement une faille également; il se situe à près de 2000 mètres au nord de la position donnée par Clark à la faille de Dorval. Près de la rue Atwater nous avons déjà montré (fig. 4) que l'Utica repose sur le Trenton sans que l'on puisse déceler le décrochement de la faille de Westmount postulée par Clark.

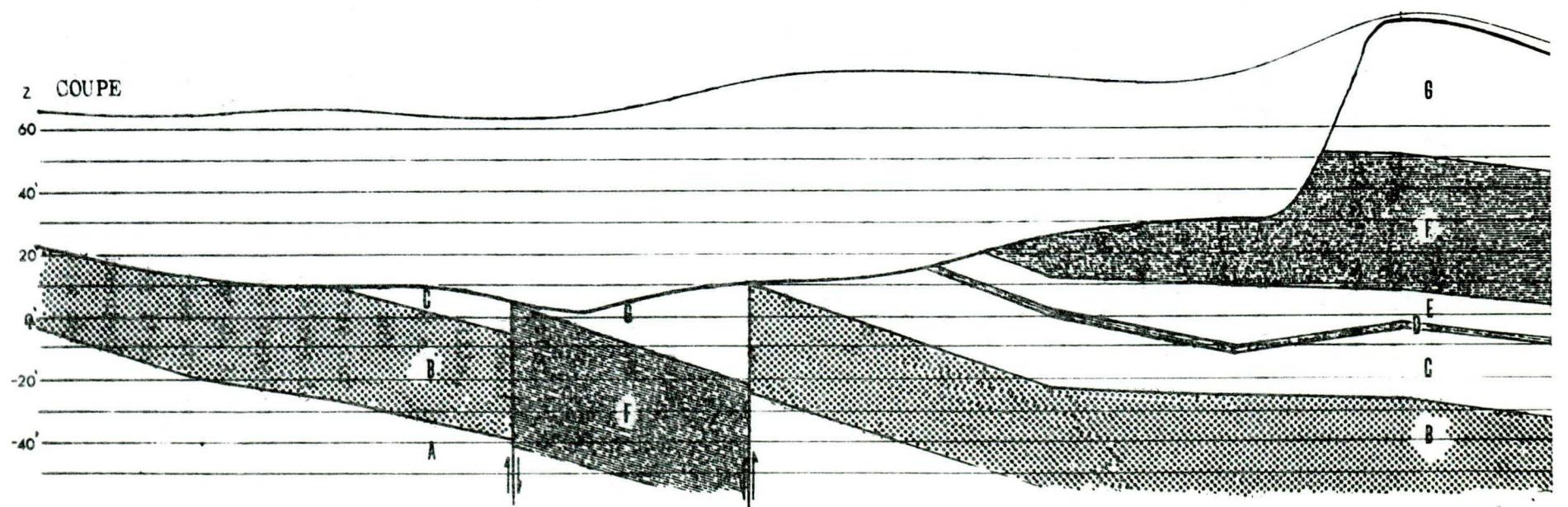
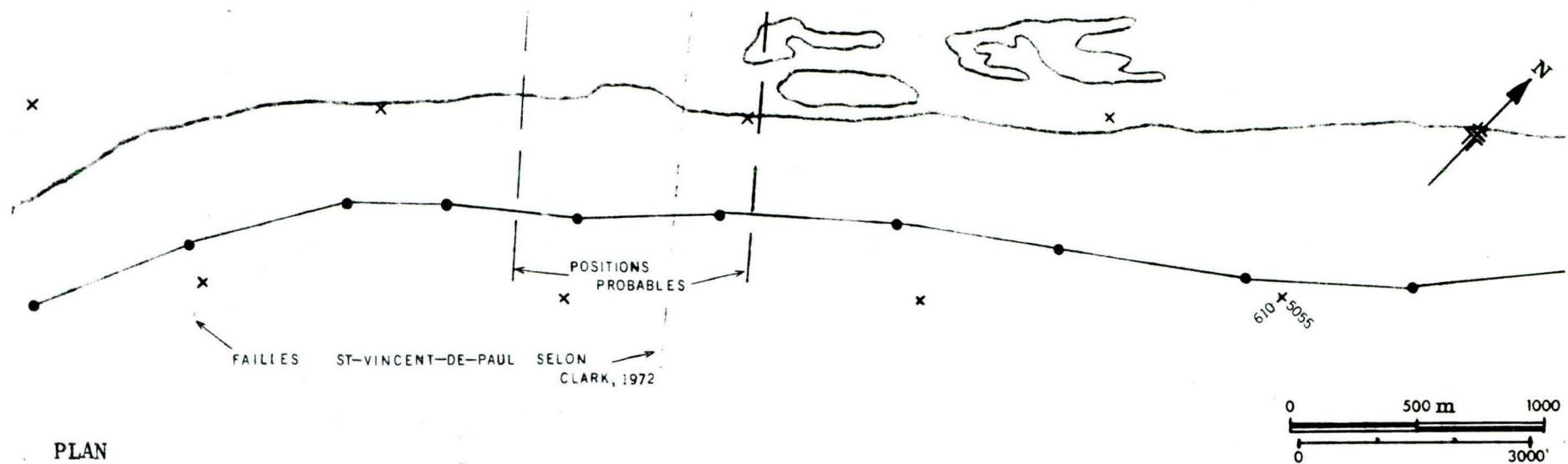


Fig. 9 - Stratigraphie et structure géologique d'une portion de terrain au nord de l'île de Montréal.

3.3.3. Secteur Centre-Ville: La figure 10 représente une portion de la carte géologique de Montréal, ainsi que les points où les contacts ont été effectivement observés. L'écart n'est jamais supérieur à 200 mètres.

Par le nombre encore limité de secteurs où nous avons pu comparer la carte et les relevés de détail, nous pouvons dire que les données cartographiées jusqu'à maintenant à l'échelle d'un mille au pouce sont utiles aux géologues dans l'interprétation des relevés de détail, mais elles sont nettement trop imprécises pour aider les planificateurs et les projeteurs dans le choix des sites. Nous croyons fermement qu'il est souhaitable et rentable d'établir une carte géologique à l'échelle 1: 25 000 par la compilation des données possédées actuellement ou en voie d'être recueillies par les grands travaux en cours. Le secteur centre-ville pourrait de plus être présenté à part à l'échelle 1: 10 000. Pour que la carte puisse présenter les accidents structuraux avec une précision de 25 mètres, il faut présenter la géologie sur un écorché (carte du substratum rocheux où figurent non pas les courbes de niveau du terrain, mais plutôt celles de l'élévation du roc).

En plus des failles majeures, qui se décomposent parfois en plusieurs plans ne révélant chacun qu'un faible mouvement relatif, nous avons observé en dehors des secteurs faillés, des failles de faible extension et décrochement; elles se rattachent plus aux axes de plissement qu'aux directions de faillage. L'exemple donné à la figure 11. se situe sur le flanc est de l'anticlinal Villeray, dans les calcaires de Tétreauville. Deux petites failles de chevauchement, opposées mais décalées l'une par rapport à l'autre, témoignent de la compression horizontale subie lors du plissement. Les stries (fig. 12) dans les plans de faille sont très nettes; l'homogénéité du Tétreauville ne permet pas cependant de mesurer les déplacements. Ils ne dépassent probablement pas dix mètres.

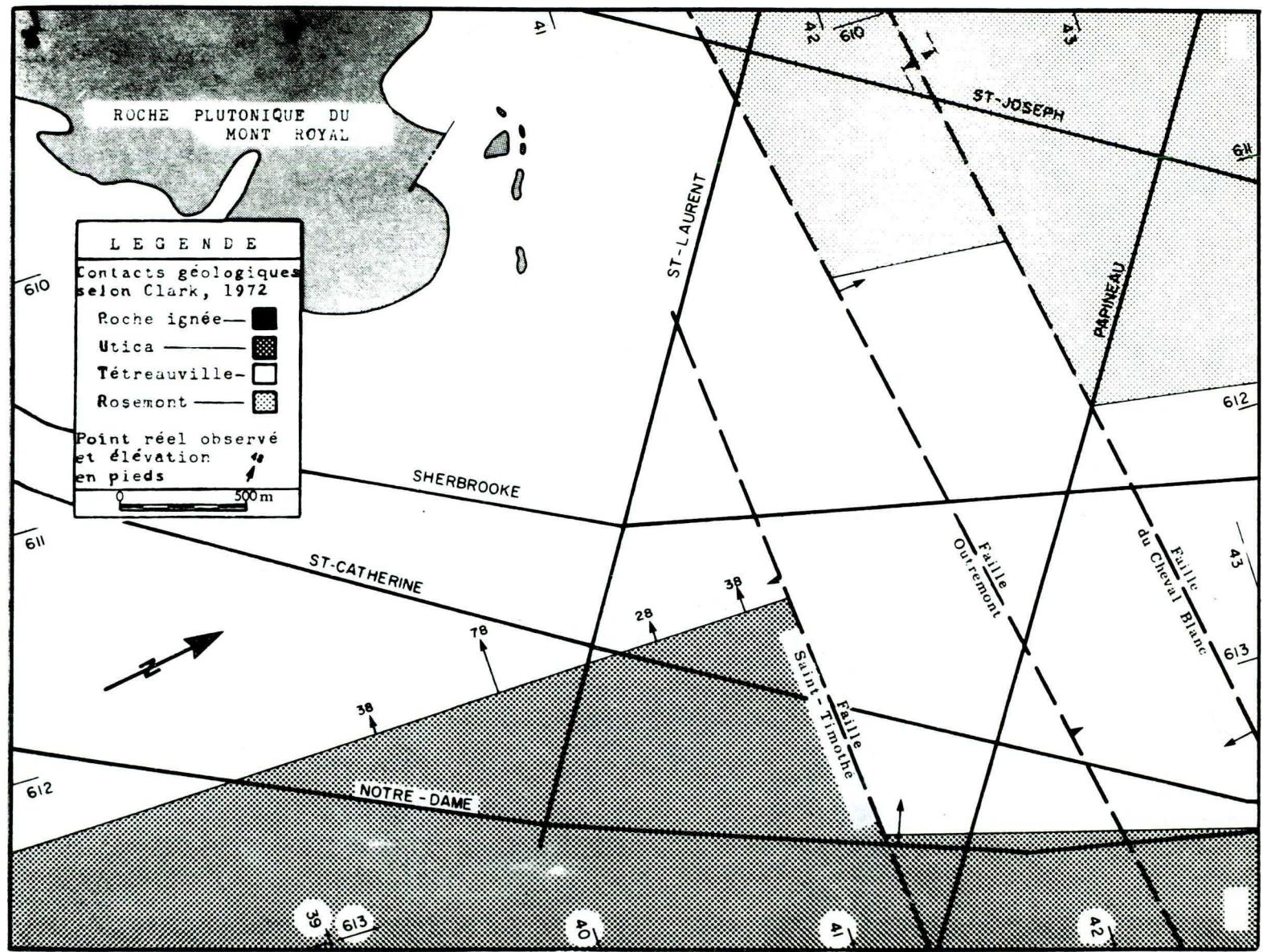


Fig. 10 - Carte géologique du centre-ville.

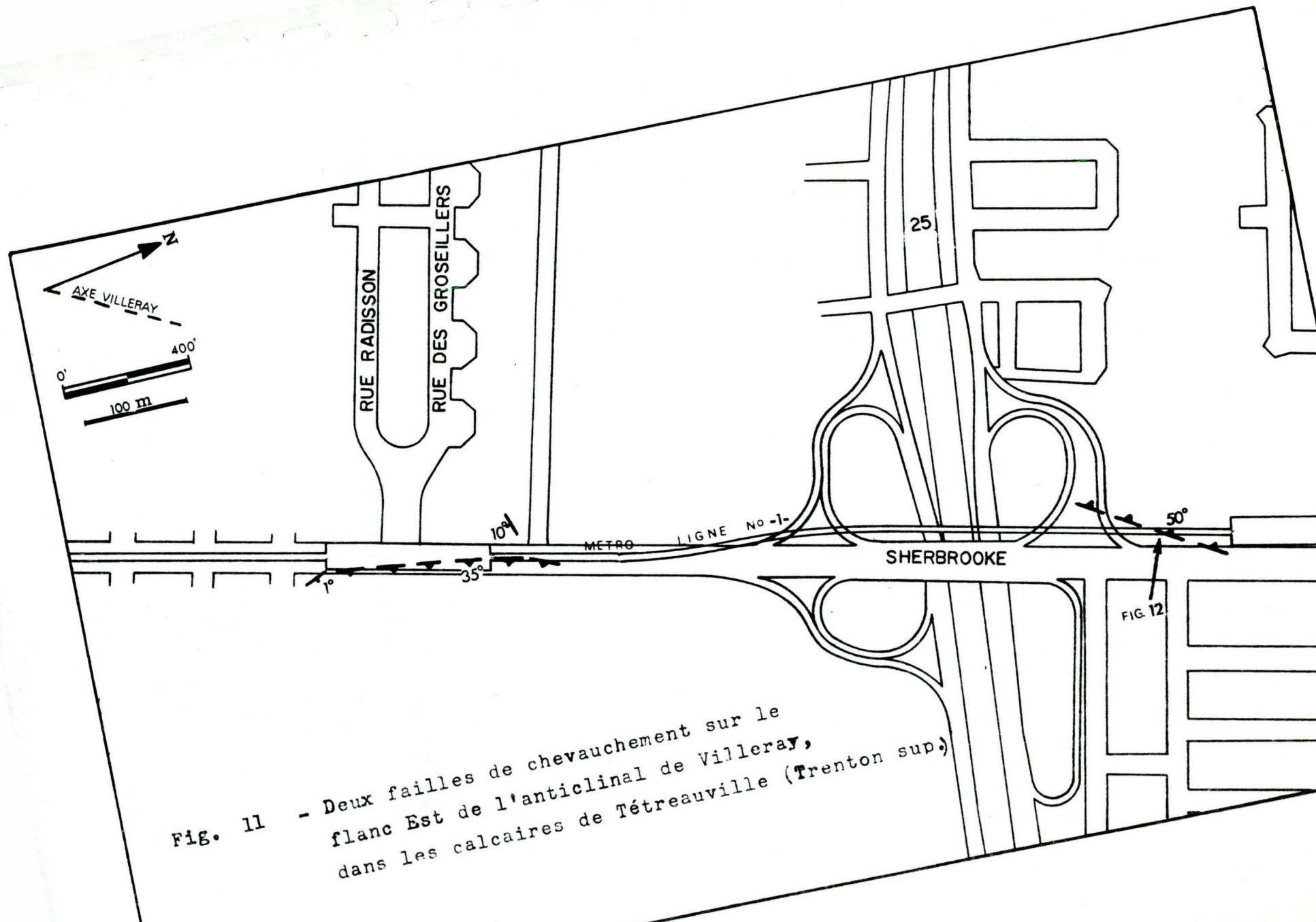




Fig. 12 - Stries bien nettes dans le plan de faille observé dans la tranchée à proximité de la station Beaugrand.

(vue en contre-plongée d'une section du plan de faille longue de 2 m)

3.4 DÉPOTS MEUBLES

La géologie des dépôts meubles a été admirablement présentée par Prest et Hode Keyser (1962). Le tableau de la page 16 résume la stratigraphie de ces formations qui datent toutes du Quaternaire, c'est-à-dire de la dernière période de l'histoire géologique, qui se poursuit actuellement.

En ce qui concerne le génie urbain, la construction et l'urbanisme, ces dépôts revêtent la plus grande importance pratique, car on les rencontre plus fréquemment et ils posent plus de problèmes que les roches sous-jacentes. Les variations de propriétés dans l'espace occupé par les dépôts non consolidés sont plus importantes et plus rapprochées que dans le roc. Les contacts entre deux dépôts sont souvent complexes; ils s'interdigitent, ou l'un se présente sous forme de lentille dans l'autre. La présentation sur une carte de ces diverses masses juxtaposées et superposées est éminemment compliquée et aucune solution connue n'est vraiment satisfaisante à tous les points de vue (voir chap. 8). L'interprétation d'une carte de dépôts meubles qui ne montre que les contours en surface des diverses formations, demande une bonne connaissance de chaque type de dépôt.

Il est plus difficile d'étudier la tranche non consolidée que la roche dure; le carottage d'échantillons intacts est à la fois délicat et coûteux. Le matériau se défait facilement et on ne peut examiner sa structure. Dans les excavations importantes les dépôts meubles sont très souvent masqués par les murs de soutènement. Là où ils sont laissés à l'air libre, l'altération et la dessication les modifie rapidement. La méthode qui nous semble la plus efficace consiste à être présent sur un chantier au cours de l'excavation et à observer les coupes fraîches qui se renouvellent au fur et à mesure que l'excavation progresse; c'est ce que nous avons fait par exemple sur le site des Jeux Olympiques au cours des importants travaux qui y ont été exécutés.

Nous ne ferons que quelques remarques sur les principaux matériaux, leur description complète ayant déjà été publiée (Prest et Hode Keyser, 1962).

3.4.1 Le till glaciaire repose sur le roc dont il incorpore toujours une proportion très variable de blocs de toutes tailles. Le till basal a été comprimé par le poids des glaciers; sa densité élevée (2.15 à 2.5) en fait un très bon matériau de fondation, presqu'aussi solide que le roc. Mais cette densité élevée ajoutée à la présence de gros blocs (voir fig. 26) complique parfois les travaux d'excavation.

3.4.2 Les dépôts intermédiaires et le till supérieur sont très silteux de façon générale, ce qui les rend gélifs. Leur stratigraphie et composition granulométrique est très variable.

3.4.3 Les dépôts de la mer Champlain comprennent des sédiments de rivage (sable et graviers fossilifères) et des argiles. Les dépôts de rivage n'ont été compactés d'aucune façon; on les retrouve sur des pentes et ils peuvent s'ébouler facilement dans les excavations non protégées, surtout lorsqu'ils sont gorgés d'eau. Les argiles occupent près du quart de la superficie de l'île et atteignent parfois des épaisseurs de 30 mètres. L'argile est très sensible, c'est-à-dire qu'elle peut aussi bien se tenir en falaise verticale d'une dizaine de mètres (fig. 13a) à l'état intact, que s'écouler sur une pente faible de 8° à l'état remanié (fig. 13b). Au chapitre 5, nous parlerons des problèmes qu'elle pose aux fondations.

3.4.4 Les dépôts récents ne couvrent qu'une faible superficie de l'île (5 %); ils posent néanmoins des problèmes s'ils ne sont pas identifiés convenablement. Ils se sont soit formés dans les chenaux d'anciens ruisseaux (alluvions diverses, sables, silts et graviers), soit accumulés dans les dépressions de la topographie (tourbe et terre noire).



Fig. 13 - Deux comportements contrastés de l'argile marine:

- a) En haut, front de taille haut de plus de 12 mètres se tenant vertical sans soutènement, dans l'argile intacte. (Notez la fracturation naturelle en colonnes).
- b) En bas, l'argile excavée d'une tranchée et déposée en tas glisse d'elle même sur une pente faible (8°) (coulée visible au centre de la photo).

Photos prises sur le même site en juin et septembre 1973.

Les terres organiques trop compressibles peuvent presque toujours être enlevées; certaines dans le centre-ville ont disparu sous du remblayage. Les anciens chenaux, même complètement enfouis, demeurent toujours des voies privilégiées pour l'écoulement de l'eau souterraine. Lorsqu'une excavation les recoupe, ils apparaissent comme une poche de matériau granulaire gorgé d'eau, et s'éboulent facilement.

3.5 PROBLEMES DE NOMENCLATURE ET DE CLASSIFICATION DES ROCHES DE MONTREAL

Les noms donnés aux objets comme aux roches ne sont signifiants et précis que dans la mesure où tous ceux qui les utilisent s'accordent sur des définitions communes et précises des termes utilisés. Ce problème n'est pas simple à résoudre, même si son énoncé semble simpliste.

Pour nommer les roches, il est préférable de se référer tout d'abord à ce que les pétrographes ont défini et utilisent; nous verrons ensuite quelle classification adopter pour les besoins propres de la géologie de l'ingénieur dans le contexte montréalais.

Les noms de roche visent parfois à identifier leur mode de formation; le plus souvent ils identifient la composition et la dimension des grains. Les roches sédimentaires de la région de Montréal peuvent être avantageusement classifiées sur un diagramme triangulaire (fig. 14) de composition. Les analyses de routine donnent les proportions des trois principaux constituants. Le sommet supérieur représente la fraction terrigène ou insoluble (sable, silt, argile) et la base du triangle porte à gauche le pôle du calcaire, à droite le pôle de la dolomie. Les roches contenant plus de 50 % d'insolubles devront être désignées par un nom de roche terrigène

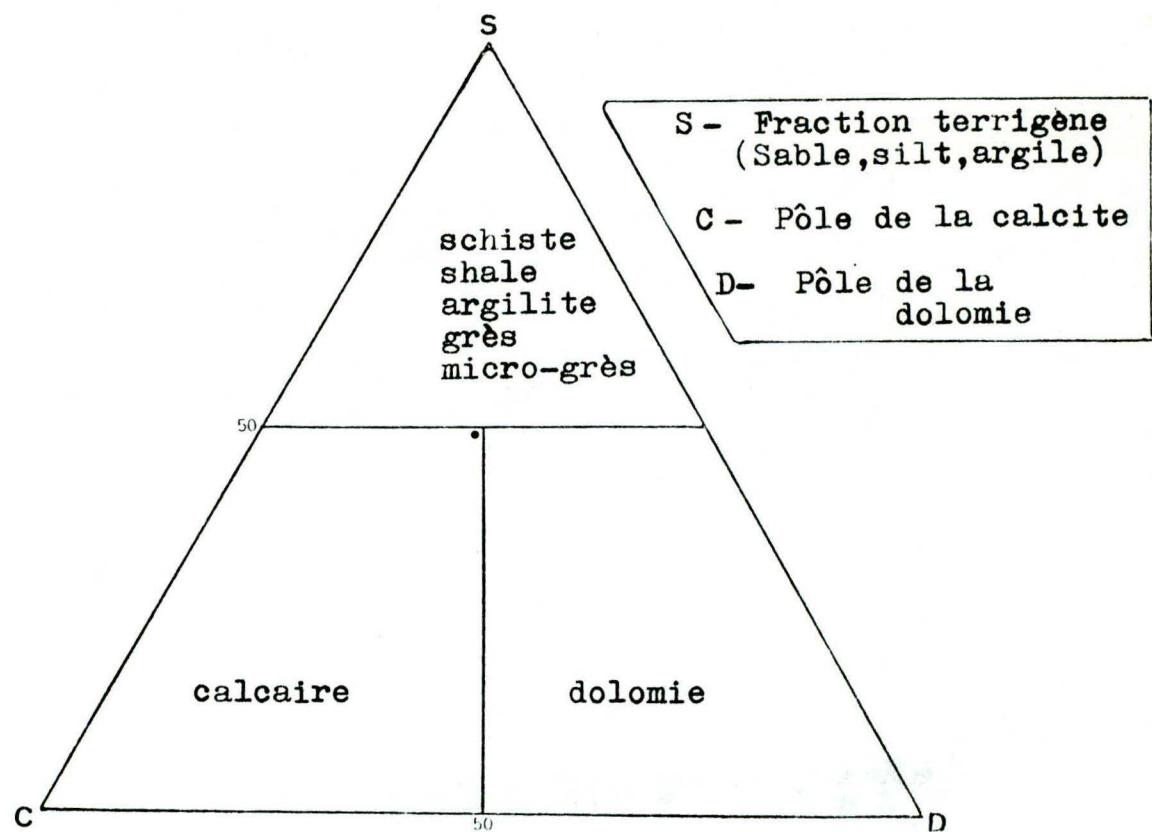


Fig. 14 - Diagramme de composition des roches carbonatées.

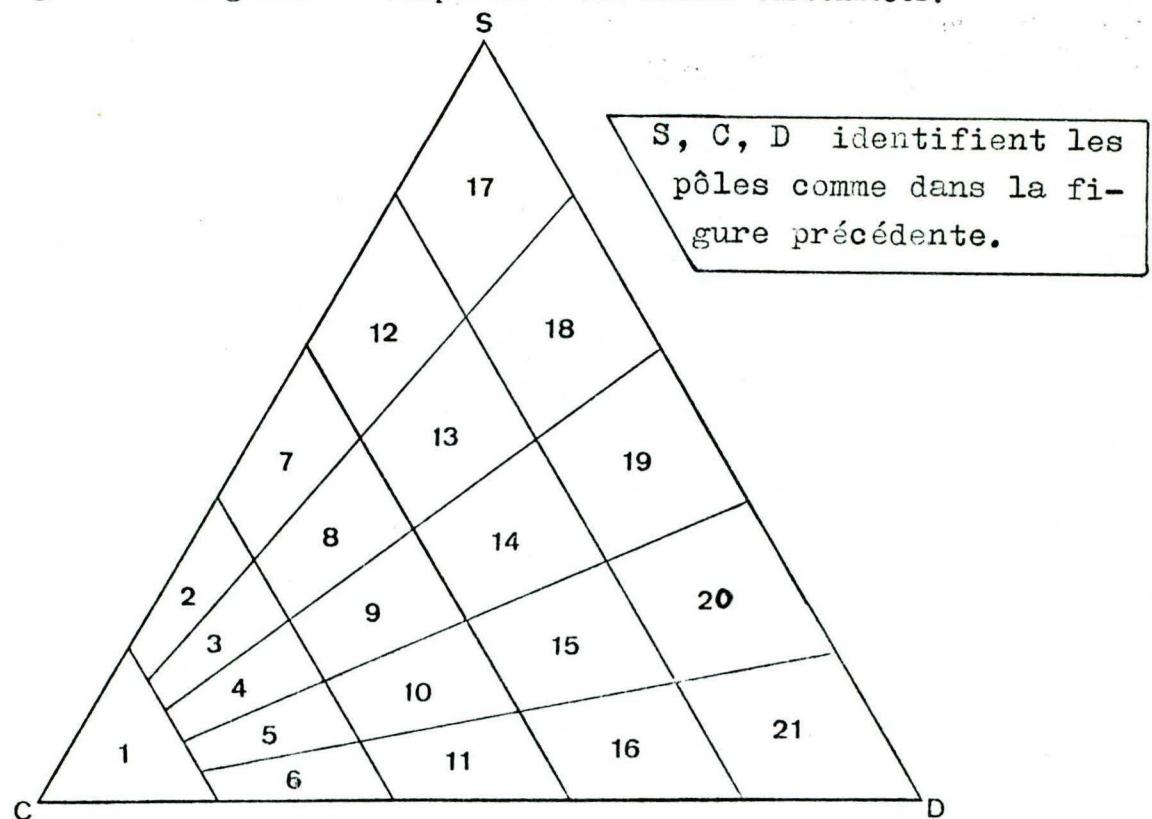


Fig. 15 Classification de Mellazal.

rattaché à la granulométrie des fragments qui la composent (conglomérat, grès, siltstone ou micro-grès, shale).

La fraction soluble carbonatée possède deux pôles importants pour distinguer dans les roches de Montréal, les roches dolomitiques et les roches calcaires. Les premières abondent dans les formations plus anciennes que le Black River, alors les calcaires se rencontrent un peu partout et qu'ils dominent dans le Trenton. La coupure entre les deux appellations se situe à 50 % de la fraction carbonate. Ainsi on appelle calcaire des roches contenant moins de 50 % de CaCO_3 ; sur la figure 14, on peut voir que cette proportion peut être aussi faible que 25 % à la limite: par exemple le point près du centre se situe à une composition 26 % CaCO_3 , 25 % $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ et 49 % d'insolubles. Cette roche possède des propriétés très différentes d'une autre à 100 % CaCO_3 , portant également le nom calcaire; la nécessité de préciser la nomenclature apparaît aussitôt.

On précise les noms de roche en ajoutant des qualificatifs au terme principal. Malheureusement c'est ici que le problème se complique, car une expression comme calcaire dolomitique argileux ne possède pas la même définition d'une classification à l'autre; examinons rapidement les principales.

En Europe, les géologues s'accordent sur les définitions suivantes (anonyme, 1961):

\parallel	ARGILE , roche meuble, non stratifiée, faisant pâte avec l'eau, formée de minéraux argileux (<u>Clay</u>)
	ARGILITE , argile indurée peu stratifiée (<u>Claystone</u>)
	ARGILE CALCAIRE , roche argileuse avec 5 à 35 % de calcaire, (terme impropre fréquent: argile marneuse), en anglais (<u>Limy clay</u>)
	CALCAIRE ARGILEUX , calcaire avec 5 à 35 % d'argile (<u>Argilaceous limestone</u>) (terme impropre: calcaire marneux)

MARNE, roche argilo-calcaire plus ou moins indurée, terreuse, à grain fin, contenant 35 à 65 % d'argile ou de calcaire (Marl)

La classification de Mollazal (fig. 15) utilise 21 classes identifiées par un nombre, ce qui simplifie au maximum la terminologie, mais a le désavantage d'être trop abstrait (Chilingar et al., 1967).

La figure 16 illustre les coupures proposées par Leighton et Pendexter pour les noms et adjectifs représentés respectivement par des lettres majuscules et des lettres minuscules:

C - calcaire (pur)	D - dolomie (pure)
Ci - calcaire impur	Di - dolomie impure
Cd - calcaire dolomitique	Dc - dolomie calcareuse
Cdi - calc. dolom. impur	Dci - dolomie calc. impure

On remplace le qualificatif "impur" par les mots "argileux, silteux, gréseux" selon que S, la fraction terrigène, est formée d'argile, de silt, ou de sable.

Finalement, nous proposons une classification un peu plus complète, qui modifie légèrement la proposition de Théodorovitch (1958). La signification des symboles, qui s'ajoutent à ceux mentionnés ci-dessus, est la suivante (fig. 17):

C(i) - Calcaire un peu argileux (silteux ou griséous)
Cd(i) - Calcaire dolomitique un peu argileux (etc.)
CD - Calcaire très dolomitique
CI - Calcaire très argileux (ou silteux...etc.)

Les classes correspondantes du côté de la dolomie sont décrites de la même façon. Les roches terrigènes carbonatées n'ont ici que trois subdivisions générales:

S - Shale, schiste, siltstone, grès... etc. selon la granulométrie des sédiments qui ont été consolidés
Sc - Shale (... etc.) calcaieux
Sd - Shale (... etc.) dolomitique

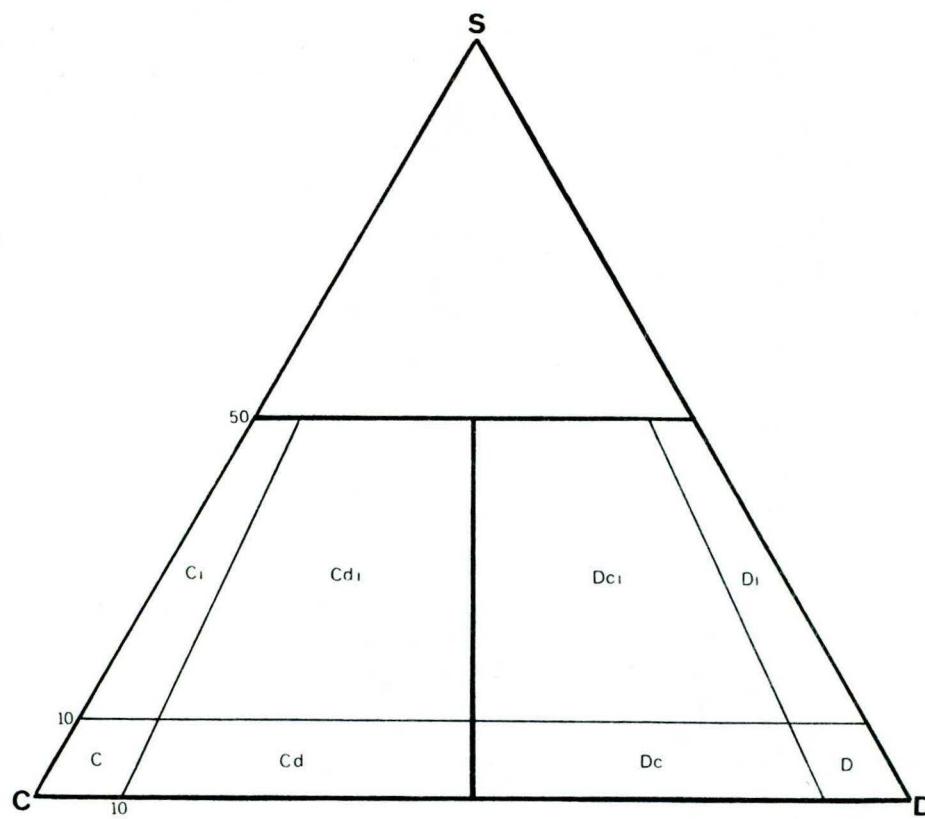


Fig. 16

Classification de Leighton et Pendexter

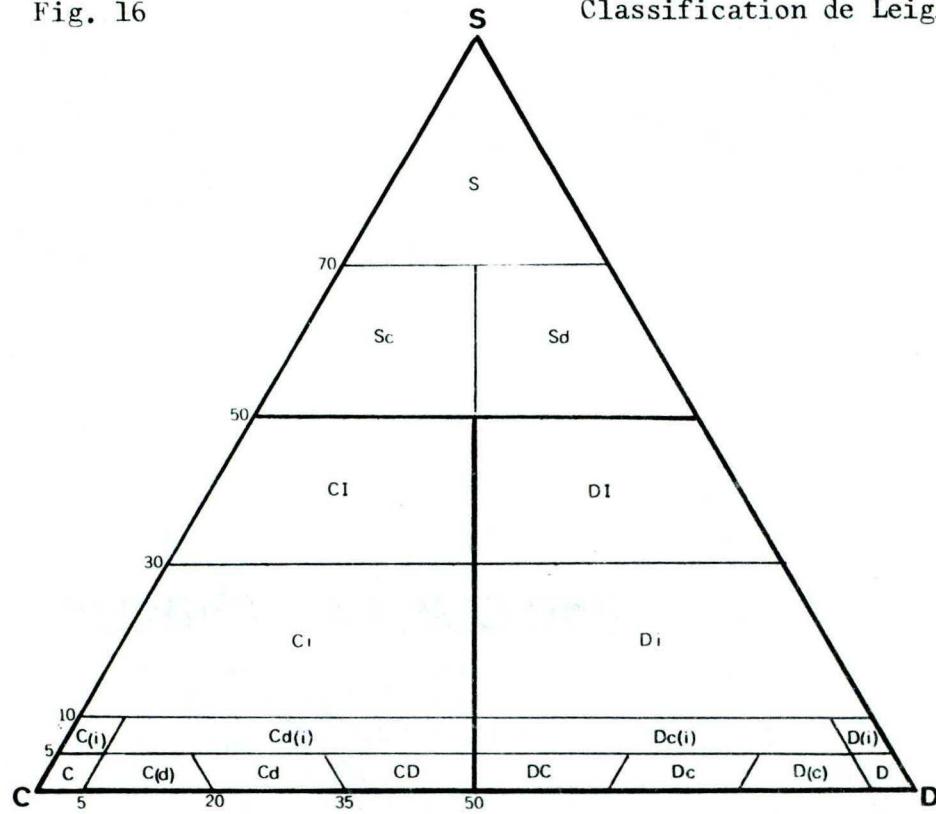


Fig. 17

Classification complète modifiant celle
de Théodorovitch (1958).

La terminologie des roches terrigènes est en réalité beaucoup plus complexe; mais comme ce sont les roches carbonatées qui dominent à Montréal, nous n'en discuterons pas plus en détail. Mentionnons simplement que le terme schiste (anglais: schist)* utilisé abusivement pour désigner toutes les roches argileuses (ex. schiste d'Utica, schiste du Lorraine, interlit de schiste dans les calcaires ... etc.), ne peut être appliqué en réalité qu'à celle qui sont véritablement schisteuses. La plupart du temps les roches sont massives et homogènes et devraient être désignées par les termes shale ou argilite.

Nous avons porté sur la figure 18 les points représentant les compositions des roches carbonatées de Montréal. Ces données ont été tirées de trois cents analyses de diverses sources dont Goudge (1935), Durand (1969), Boisjoly (1973). La dispersion des compositions est maximale dans le groupe de Chazy et très élevée également dans le Black River; c'est dans ces groupes que se rencontrent des calcaires véritablement purs. Très peu d'analyses représentent le groupe de Beekmantown, mais on peut constater que les compositions situent les roches dans les dolomies impures (silto-gréseuses). A l'opposé les roches du Trenton moyen et supérieur se situent toutes sauf une analyse, dans les calcaires et les shales calcaieux; elles ne comprennent pratiquement pas de calcaires purs, ni de calcaires dolomitiques (Cd) ou de calcaires très dolomitiques (CD).

* Schiste: roche sédimentaire ou métamorphique qui présente une structure feuilletée.

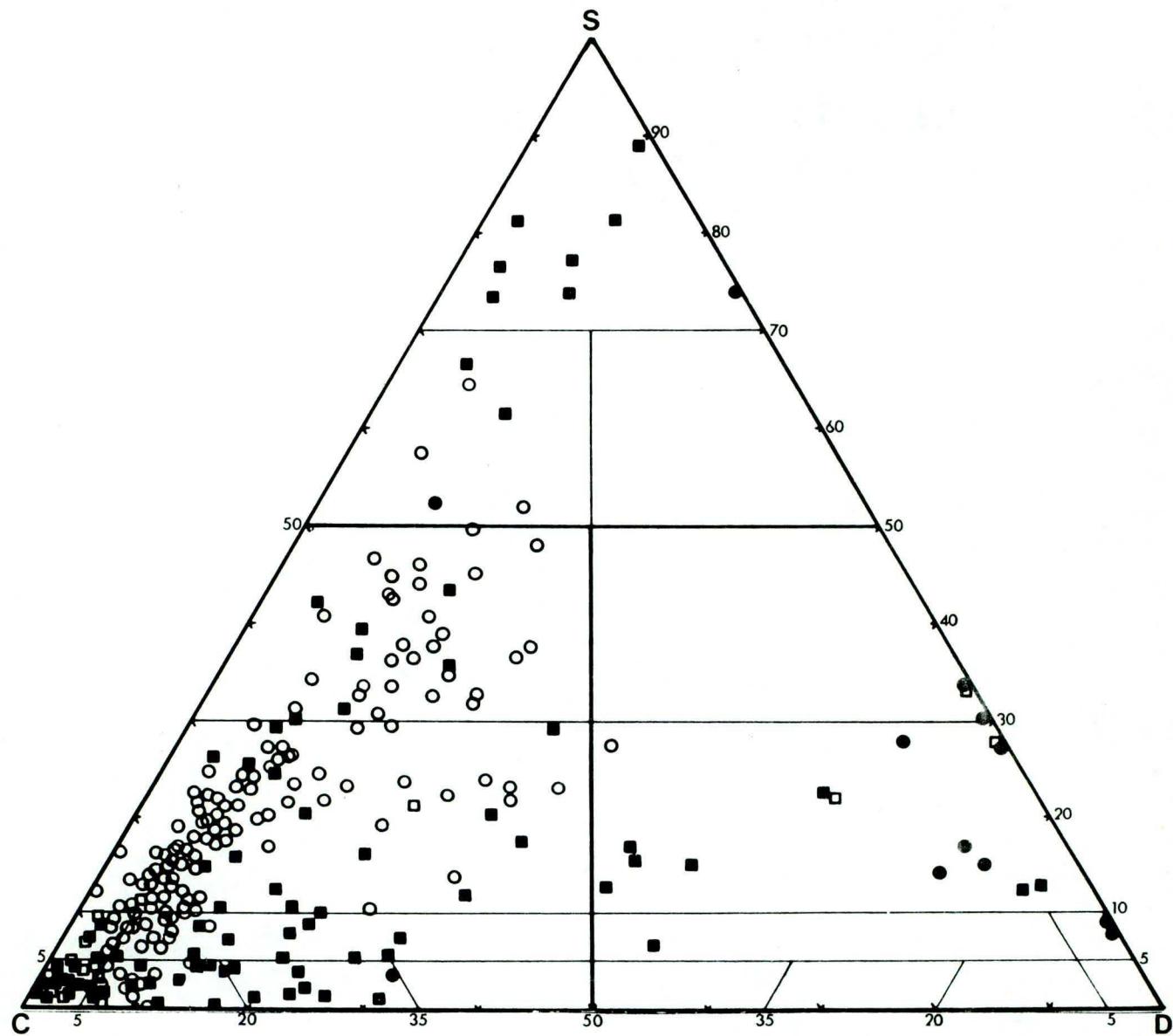


Fig. 18 - Composition des roches ordoviciennes de Montréal.

- - Trenton moyen et supérieur
- - Black River et Trenton supérieur
- - Chazy
- - Beekmantown

Analyses provenant de diverses sources dont:

Boisjoly (1973), Durand (1969) et Goudge (1935).

IV - FORAGES ET RECONNAISSANCE GÉOTECHNIQUE

4.1 GÉNÉRALITÉS SUR LES FORAGES

Dans la région de Montréal, les forages carottés représentent l'élément principal dans les dépenses des campagnes de reconnaissance préliminaire. Ces relevés visent essentiellement à:

- a) - identifier et situer les matériaux qui forment le sous-sol affecté par le projet,
 - b) - recueillir des échantillons de ces divers matériaux (sol et roc) pour fins d'analyses ou d'essais,
 - c) - mesurer les conditions hydrogéologiques locales,
 - d) - localiser les discontinuités du roc.
- a) - Le premier objectif n'est que partiellement rempli par les forages carottés, premièrement parce que les données recueillies sont ponctuelles et qu'on ne peut que supposer par interpolation les positions des contacts entre deux forages; deuxièmement, les matériaux les plus importants au point de vue géotechnique ne peuvent pas toujours être identifiés et mesurés, parce que difficilement carottables (ex: les remplissages de fracture, les minces couches d'argile dans le roc ... etc.).
- b) - Les forages répondent assez bien au second objectif, sauf là où la récupération est très mauvaise. La quantité de carottes recueillies dans un relevé est toujours surabondante par rapport au strict besoin des essais et analyses effectuées.
- c) - La carotte sert à l'occasion à une mesure de laboratoire du coefficient de perméabilité. Mais c'est surtout le trou foré qui permet d'étudier les conditions hydrogéologiques du massif (niveau piézométrique, perméabilité par les essais de pompage ... etc.). On peut donc faire des forages moins coûteux sans carottage et reporter la somme épargnée sur des mesures de diagraphies (paragraphe 4.4).

d) - Les discontinuités naturelles du rocher apparaissent dans les carottes; il est possible de les mesurer avec précision. Cependant, lorsque l'axe du trou est à peu près perpendiculaire au litage (ce qui est très courant pour les forages verticaux habituels à Montréal), on ne peut mesurer que le pendage des joints et non leur direction. Le nombre de diaclases recoupées par un forage dépend de l'angle α entre l'axe du trou et l'orientation de la famille de diaclases en question. On peut définir une densité apparente de discontinuités par le rapport N/L (N , nombre de diaclases pour une longueur L carottée). La densité réelle est l'inverse de l'espace-ment moyen (e) et se calcule par la relation suivante:

$$(N/L)_{90^\circ} = (N/L)_\alpha / \sin \alpha .$$

Deux forages orientés différemment dans un même massif peuvent laisser croire à des états de fracturation très différents si l'on ne tient pas compte de l'orientation réelle des discontinuités. Pour illustrer ce point sous un autre aspect, considérons les deux diagrammes de la figure 19 qui sont deux exemples de compilation de discontinuités sur des canevas de Schmidt. On suppose le même massif dans lequel les plans de fractures sont orientés selon un désordre parfait: en (a) on fait le relevé sur un affleurement horizontal, en (b) sur la carotte d'un forage vertical au milieu du même affleurement.

Sur l'affleurement apparaîtront les traces de nombreuses fractures verticales, un peu moins de fractures inclinées et pratiquement aucune trace des fractures horizontales, ce qu'illustre la densité relative des pôles portés en (a). Le relevé par forage vertical

fait apparaître au contraire une densité anormalement élevée de plans horizontaux (fig. 19 b).

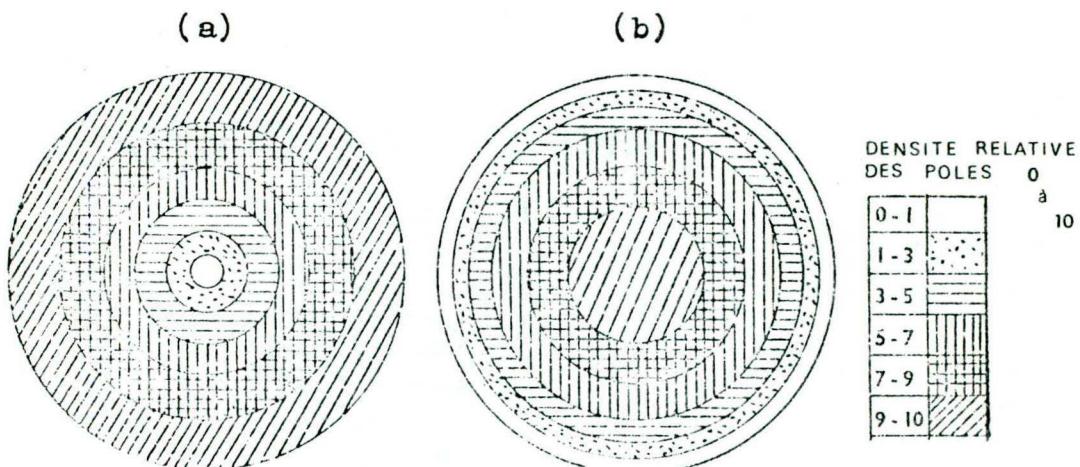


Fig. 19 - Diagrammes polaires de Schmidt (équi-surface) montrant les densités relatives des pôles des plans de discontinuités mesurés:
 - a) sur un affleurement horizontal,
 - b) dans un forage vertical.
 (tiré de R. Terzaghi, 1965)

En pratique dans les forages verticaux exécutés en très grand nombre à Montréal, il est à peu près impossible de caractériser d'autre famille de discontinuités que celle des joints de litage; les diaclases inclinées ou subverticales sont rencontrées en trop petit nombre pour que l'on puisse calculer un espacement moyen. Une méthode efficace de réaliser une exploration complète d'un volume de roche et de calculer les densités réelles des diaclases, consiste à réaliser trois forages inclinés à 50° et orientés à 120° les uns des autres. Pour la région de Montréal on a toujours deux familles bien distinctes de diaclases subverticales; nous suggérons donc

de choisir plutôt deux orientations perpendiculaires aux axes tectoniques dominants dans le secteur, ou aux directions prévisibles, que l'on peut tirer d'une carte de compilation des orientations mesurées sur plusieurs sites (fig. 20).

Quel patron d'implantation de forage est le plus rentable pour un projet? Prenons l'exemple d'un relevé pour la construction d'un tunnel. Pour ce projet, l'on dispose d'un montant déterminé affecté aux forages. La profondeur de l'ouvrage détermine la longueur des forages, donc leur coût unitaire; le budget permet donc d'en commander un nombre X que l'on est tenté de distribuer à des intervalles réguliers le long du tracé, disons à tous les 100 mètres. Si la carte géologique laisse supposer que l'ouvrage sera à peu près partout dans les mêmes roches, il vaudrait mieux planter deux ou trois forages orthogonaux et inclinés, à tous les 300 ou 500 mètres pour obtenir une évaluation précise des densités de fractures. Lorsque l'on pense rencontrer une faille entre deux chaînages, on aura de bonnes chances de recouper la zone broyée par des forages inclinés et à la suite les uns des autres.

Entre les forages, il peut être nécessaire de mesurer la puissance des dépôts meubles, ce qui peut être fait par un forage rapide sans carottage, ou un simple essai de battage, si aucun till à gros blocs n'est traversé. On pourrait également utiliser les méthodes dont nous allons maintenant discuter.

4.2 AUTRES MÉTHODES DE RECONNAISSANCE

4.2.1 Méthodes géophysiques

Les méthodes géophysiques sismiques et électriques ont prouvé leur efficacité en géologie de l'ingénieur, dans

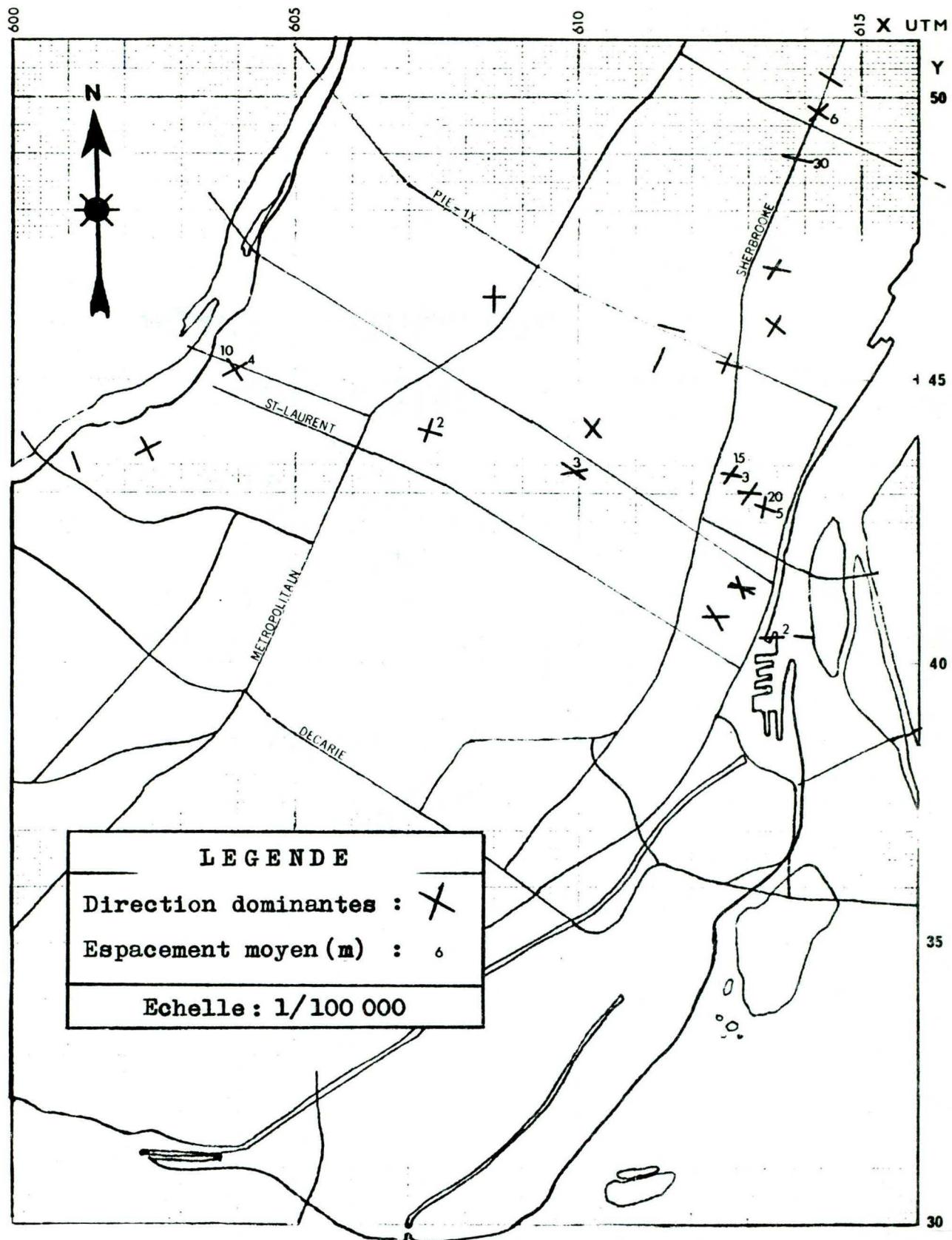


Fig. 20 - Orientations dominantes des diaclases mesurées in situ.

les travaux d'autoroutes et de barrages par exemple. Contrairement aux forages, ces méthodes fournissent des mesures qui affectent des volumes importants, à l'échelle des constructions. En milieu urbain cependant, ce grand volume d'essai devient un désavantage: il englobe trop souvent des artefacts (câbles, conduites, fondations ... etc.) qui faussent les valeurs mesurées. Le forage carotté demeure l'outil privilégié, car le faible volume qu'il explore peut être précisément choisi en dehors des artefacts. L'activité de la ville crée de plus un bruit de fond (vibrations dues à la circulation pour les méthodes sismiques, champs magnétiques et électriques artificiels pour la prospection électrique), ce qui constitue un deuxième obstacle qui n'existe pas dans les zones inhabitées.

Des études récentes (Mossman et al., 1972) permettent d'espérer qu'en modifiant les méthodes et les appareils pour les adapter spécifiquement à une utilisation urbaine, il sera possible d'éliminer complètement les obstacles. En prospection sismique par exemple, le dispositif de Moosman utilise un signal modulé et continu plutôt qu'une détonnation; les récepteurs nombreux et très étalement recueillent chacun un signal faible donc peu gênant, qui s'additionne et permet par filtrage de s'affranchir des effets locaux des artefacts.

4.2.2 Méthodes pénétrométriques

Pour les études de fondation dans l'argile, il y aurait avantage à utiliser le pénétromètre statique, qui fournit une valeur de la résistance mécanique en continu jusqu'au refus sur le till ou le roc. L'homotétrie pénétromètre-pieux permet également de calculer ces derniers par les seuls résultats de l'enfoncement statique. Cette méthode de design

est utilisée intensivement en Europe, parce qu'elle est l'alternative bien moins coûteuse que carottage - essais tri-axiaux en laboratoire, et qu'elle élimine les problèmes que présentent le prélèvement et le découpage d'éprouvettes de sols sensibles.

Les pénétromètres dynamiques peuvent traverser des terrains plus résistants. Il y a tant de facteurs qui affectent les mesures même dans les conditions dites "standardisées", que l'on doit se méfier des interprétations abusives des résultats obtenus par ces mesures. Une très intéressante revue critique des méthodes, de leurs limitations, ainsi qu'un commentaire des principales opinions exprimées sur la valeur de ce type d'essais, a été récemment publiée par Ireland et al., (1970). La mesure du nombre de coups nécessaire pour obtenir un enfoncement d'une valeur donnée, est une procédure courante à Montréal, comme partout en Amérique du Nord. C'est une technique peu coûteuse qui donne une première idée schématique sur la succession des couches de terrain; elle doit nécessairement être complétée par une technique plus sophistiquée.

4.3 DESCRIPTION OU "LOGGING" DES CAROTTES

Nous allons examiner un peu plus en détail la question du logging des carottes, étant donné que l'on dépense chaque année plusieurs centaines de milliers de dollars pour les obtenir.

Le carottage du roc demeure la technique la plus utilisée dans les travaux de reconnaissance préliminaires. Le foreur décrit sommairement les carottes dans son rapport; jusqu'à ces dernières années il était fréquent de ne trouver que le mot "roc" comme description sans autre détail. Heureusement,

cette situation est en voie de changer. Il semble important malgré tout de préciser les définitions des termes utilisés dans les logs géologiques. Les carottes de forages ne sont conservées qu'un temps, qui dépend de l'espace d'entreposage disponible; au bout d'un certain temps, n'existent plus que les rapports, qui sont archivés. Les logs doivent donc être suffisamment clairs et précis pour conserver l'information géologique de grande valeur (une carotte coûte environ \$10./pied). Il nous est arrivé de réexaminer des carottes anciennes, c'est-à-dire datant de dix ans ou plus; le vieillissement par l'intempérisme et les manipulations font disparaître au moins cinquante pour cent des informations, surtout en ce qui concerne l'évaluation de la qualité des roches sédimentaires.

Malgré son prix, la carotte n'a que très peu de valeur par elle-même. Sa conservation en bon état de nombreuses années peut s'avérer également coûteuse. Nous insistons donc sur l'importance qu'il y a de faire une fois pour toutes, un log détaillé, clair et complet.

Il est très avantageux également de faire des clichés de toute la longueur des forages, car le géologue qui fait la description des carottes peut alors porter directement sur les photographies, au moyen de symboles de différentes couleurs, les observations qu'il note. La méthode adoptée au Laboratoire de la Ville de Montréal est à la fois simple et efficace: les boîtes sont photographiées accolées quatre par quatre: on peut ainsi tenir à jour un fichier d'agrandissements 8 x 10 pouces représentant à l'échelle 1/4 environ, quarante pieds de carotte.

Un trou de forage peut être considérablement valorisé lorsqu'on se donne la peine d'effectuer quelques mesures additionnelles. La surveillance des fluctuations du niveau

piézométrique est importante dans tous les projets où l'ouvrage risque d'avoir un effet quelconque sur la nappe phréatique: nous en discutons au chapitre de l'hydrogéologie. Lorsque la récupération laisse à désirer et que l'on veut connaître la position exacte des fissures, il est possible d'ausculter directement la paroi du trou. Les appareils que l'on utilise vont du simple clou soudé transversalement au bout d'une tige de fer, aux dispositifs très élaborés de caméras vidéo et d'enregistrement continu de l'image. Malheureusement, il y a très peu d'appareils de géophysique disponibles pour les mesures dans les forages de petits diamètres. Dans ce domaine, la géologie de l'ingénieur accuse un net retard sur l'exploration pétrolière.

4.3.1 Description ou "Log" d'un forage et évaluation quantitative de la roche

Les logs géologiques classiques, donnant une description détaillée de la pétrographie de la roche, ne fournissent que peu de données directement utilisables par l'ingénieur de projet; une description plus détaillée n'améliorerait pas l'image fournie au constructeur, en raison de ses préoccupations toutes différentes.

Un peu partout on tente de donner un paramètre quantitatif pour remplacer ou compléter des descriptions uniquement qualitatives. Dans cet esprit nous préconisons d'en arriver à un indice de qualité symbolisé par la lettre Q, et qui représentera simplement un chiffre de zéro à dix. Ce chiffre serait en fait une classe de qualité de la roche en rapport avec la sollicitation qu'on lui destine. Nous ne croyons pas pratique de définir de façon unique cet indice; une classification doit se fonder sur les facteurs les plus impliqués dans le comportement du roc pour chaque type de sollicitation. Ce ne seront pas les mêmes pour classer les roches vis-à-vis leur capacité portante et vis-à-vis la tenue d'un tunnel qu'on projette d'y creuser, par exemple.

Le poids à donner à chaque paramètre doit pouvoir varier également; ce n'est qu'avec une bonne expérience acquise sur les chantiers pour chaque type de roche et pour chaque type d'ouvrage que l'on peut avec justesse pondérer chaque paramètre. Nous donnons à la page suivante un exemple de représentation graphique d'un indice de qualité (Q) obtenu en tenant compte des paramètres suivants:

- lithologie et résistance en compression simple,
- état de fragmentation naturelle du massif,
- qualité de la carotte récupérée par forage au diamant.

Les six premières colonnes constituent le log géologique et les cinq dernières représentent graphiquement la valeur de l'indice de qualité Q, ainsi que les paramètres en valeur pondérée servant à l'obtenir. L'en-tête du diagramme donne dans le coin gauche l'épaisseur totale (H) des couches meubles ou mort-terrain, la profondeur (N) de la nappe phréatique, l'épaisseur (E.A.) de roc altéré ainsi que la profondeur de pénétration dans les diaclases du roc de l'oxydation (E.O.); ces données sont inscrites lorsqu'elles sont mesurables et significatives. À droite, on porte les coordonnées U.T.M. ainsi que l'élévation du roc (voir p. 122).

Dans la première colonne on indique l'échelle des profondeurs; on utilise actuellement un pied par ligne, c'est-à-dire quatre pieds au pouce ou 1:48. La deuxième colonne donne les élévations correspondantes. À l'emplacement d'une diaclase inclinée, on indique dans la 3e colonne la valeur en degrés de l'angle qu'elle fait avec l'axe du trou; il n'est pas nécessaire de porter l'angle pour les joints de litage car nous en tiendrons compte dans la 7e colonne.

H- 3.6 (12')
N- 4
EA- —
EQ- —

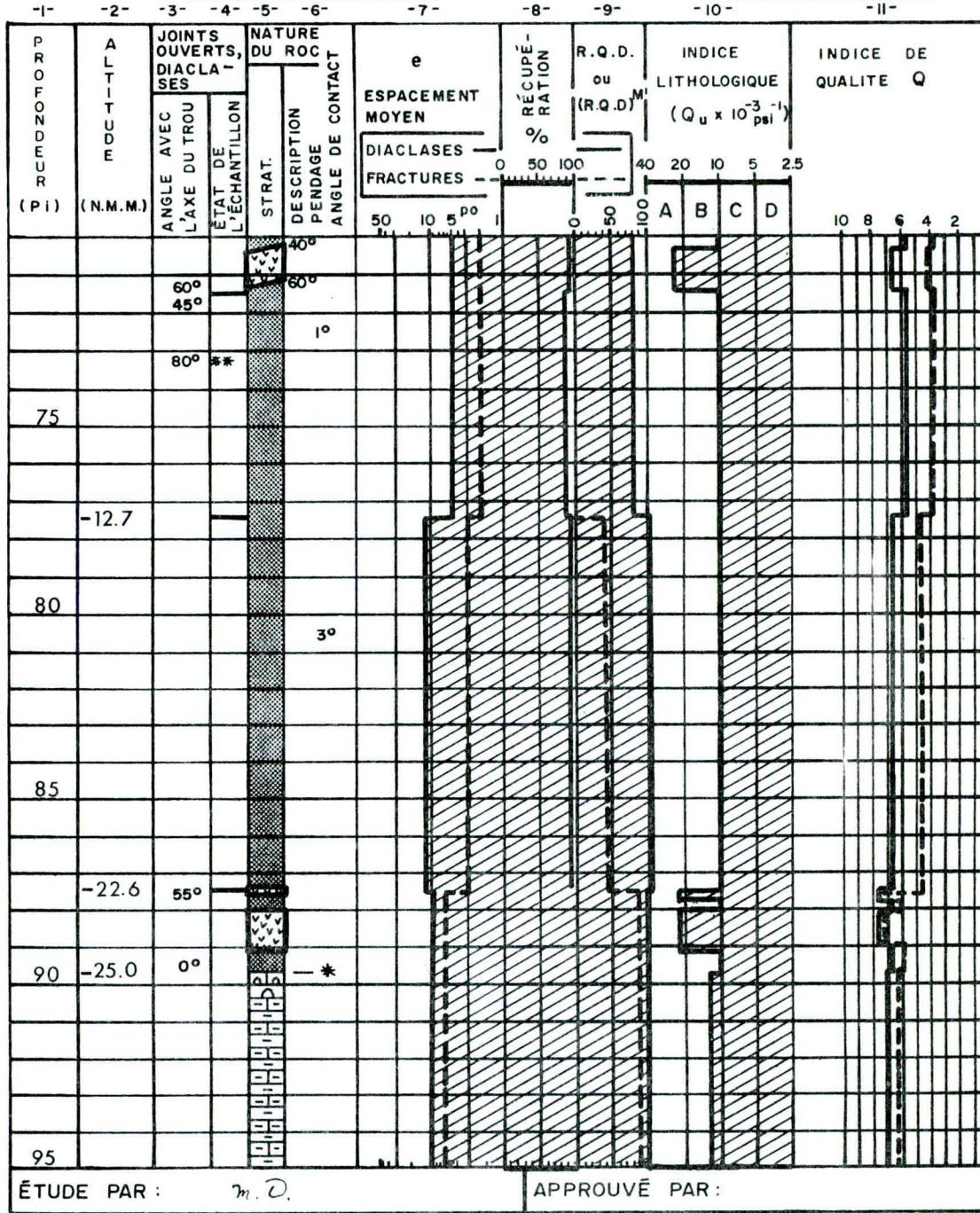
DIAGRAMME DE LA QUALITE DU ROC

UTM zone 18

NOM DU PROJET _____ **FORAGE NO.** _____

LIEU _____ **DATE DU FORAGE** _____

DIAM. DU TUBE _____ **DATE DU RAPPORT** _____



REMARQUES: * Contact Utica - Trenton avec amas (1cm) de pyrite

** Stries - miroir de faille - petit déplacement



Fig. 22 - Légende des symboles pétrographiques proposés pour les roches de Montréal.

Pour décrire l'état de la carotte, la 4e colonne contient deux symboles pour les zones très fracturées ($e < 1 \text{ cm}$). Un trait horizontal indique la fin de chaque course. On y indique également tous les commentaires utiles sur le côté technique du forage. Dans cette colonne comme dans les autres, on utilise les astérisques pour les renvois en bas de page et les remarques qui ne peuvent trouver place dans l'espace concerné.

Les colonnes 5 et 6 décrivent la nature de la roche par une colonne stratigraphique classique (les symboles suggérés sont donnés à la fig. 22) et par un espace adjacent où l'on indique toutes les valeurs mesurées (épaisseurs, angle de contact des intrusifs, pendage) ainsi que les précisions importantes ne pouvant figurer dans le symbole stratigraphique. Il est important pour la clarté du diagramme de ne pas trop surcharger de détails secondaires la description lithologique; nous préconisons de regrouper sous un même symbole tous les intrusifs sains et sous un autre bien distinct tous les intrusifs altérés et de faible dureté. On indiquera des points de détail que lorsqu'ils auront quelqu'importance pour le génie civil.

La section de droite du diagramme sert à visualiser graphiquement la qualité mécanique du massif carotté. La qualité mécanique que l'on veut classer dans une catégorie de zéro à dix, dépend principalement de la résistance de la roche en question d'une part, et de son état de fragmentation d'autre part.

a) Fracturation - Récupération :

Deere (1963) a proposé un indice simple pour quantifier l'état de fragmentation de la roche: R.Q.D. pour "rock quality designation":

$$\text{R.Q.D.} = \frac{\text{longueurs} > 4 \text{ po}}{\text{longueur totale forée}}$$

Cet indice se calcule donc comme le pourcentage de récupération, avec la distinction que l'on ne compte pour le R.Q.D. que la somme des longueurs de carottes supérieures à 10 cm (4 po.). L'indice R.Q.D. englobe en fait l'indice (% réc.):

$$\text{R.Q.D.} = \text{Réc.} - (\text{longueurs} < 4 \text{ po} / \text{longueur totale}).$$

Dans l'étude de l'état de la fissuration d'un massif par le moyen des carottes de forage, on doit comprendre les principes suivants:

- Tout d'abord, si l'on ne dispose que des mesures sur la carotte, on ne pourra connaître cet état que pour les profondeurs où l'on a pu récupérer le roc; il demeure toujours problématique de se prononcer pour les longueurs manquantes.
- Deuxièmement, le carottage impose au roc des contraintes, vibrations et chocs auxquels s'ajoutent tous ceux subis au cours du transport et des manipulations subséquentes; dans de mauvaises conditions d'équipement et d'opération, le forage peut même broyer et perdre dans le trou des longueurs de roc sain auparavant. On peut très souvent reconnaître les fractures causées par l'homme (on les désigne dans ce texte par l'expression fractures artificielles ou tout simplement "fractures"), et parfois aussi les longueurs broyées en fin de course.
- Troisième principe, les massifs rocheux sont découpés par des systèmes de fractures naturelles que nous désignerons dans ce texte par les termes "diaclases"* pour toutes les fractures verticales ou inclinées relativement au litage, et "joints de stratification sans cohésion" pour les plans parallèles au litage. La densité et l'orientation des diaclases peuvent conditionner le second principe "le forage crée des fractures": en terrain difficile le pourcentage de récupération diminue, mais de façon très diverse et dépendante de l'équipement utilisé, du diamètre du carottier...etc.

* Définitions à l'appendice A-1.

Ce que l'on cherche à caractériser par une classe ou un indice numérique, c'est la fracturation naturelle; l'indice devrait la représenter de façon indépendante des autres facteurs. Ce n'est pas le cas du % réc. ni de l'indice R.Q.D., qui l'englobe comme nous l'avons vu précédemment.

Le pourcentage de récupération est un paramètre important en lui-même; le log doit faire figurer toutes les sections manquantes de la carotte pour que l'on puisse en tout temps s'interroger sur ce que représentent ces longueurs qui n'ont pas été remontées du trou. Nous avons fait figurer en 8e colonne ce paramètre afin que les vides dus au carottage incomplet soient immédiatement apparents sur le diagramme. Le contexte géologique représenté sur le diagramme, ainsi que la qualité du carottage que l'on peut également estimer, devrait permettre, soit d'interpréter les passages manquants, soit de recommander des mesures dans le trou, ou encore un nouveau forage si un doute grave subsiste.

Dans la carotte récupérée de longueur L_c , on calculera l'espacement moyen (e) en comptant le nombre de diaclases et de joints de stratification sans ou à très faible cohésion, et en divisant L_c par ce nombre. En trait tireté sur l'exemple de la fig. 21, nous avons également fait apparaître la valeur de l'espacement moyen pour toutes les fractures, naturelles et artificielles. Le rapport entre les deux valeurs, qui peut être évalué très rapidement sur le diagramme par la distance entre les deux traits, donne un indice de la fragilité de la roche ainsi que de la qualité du carottage.

En 9e colonne, le pourcentage de carotte en bouts plus longs que dix centimètres (R.Q.D.) représente la proportion du massif qui est peu fragmenté. Il y a deux façons

de calculer cette valeur; prenons l'exemple très simple de quatre segments de vingt pouces (50 cm) récupérés sur une course de cent pouces (2.5 m), vingt pouces de carotte ayant été portés manquant par le foreur sans autre détails. La valeur R.Q.D. calculée par Deere est 80 % ce qui dans cet exemple est identique au pourcentage de récupération figurant déjà dans la colonne du centre. C'est la vision pessimiste pour laquelle tout ce qui a été perdu était de dimension inférieure à quatre pouces. On peut d'autre part obtenir un indice indépendant et complémentaire au pourcentage de récupération en utilisant la formule suivante pour le calcul d'un R.Q.D. modifié:

$$(R.Q.D.)^M = \text{longueurs } > 10 \text{ cm} / L_C$$

Cet indice ne s'applique qu'au roc prélevé pour caractériser son état de fragmentation; il complète l'indice (e). La valeur de $(R.Q.D.)^M$ ne diffère pas de R.Q.D. lorsque la récupération est 100 %. Comme dans la colonne 7 (espacement des fractures), nous pouvons indiquer en trait tireté les valeurs obtenues en prenant toutes les fractures, et en trait continu les valeurs pour les fractures naturelles. Le trait plein donne une image du roc en place non perturbé, alors que le trait tireté peut donner une idée du comportement du même roc ébranlé, par le creusage à l'explosif d'un tunnel par exemple. Il peut même parfois être intéressant de faire des comptages additionnels et successifs lorsque la roche se débite d'elle-même par altération (cas de certains shales et schistes).

b) Indice lithologique:

Le degré de fragmentation de la roche ne suffit pas pour établir une bonne classification; il faut en plus

tenir compte de la résistance mécanique, d'une façon ou d'une autre, du matériau lui-même dans son état intact. On peut par exemple utiliser la valeur de la résistance en compression simple obtenue sur des segments de carotte taillés en longueur double du diamètre. On pourrait également utiliser d'autres essais encore plus simples comme l'essai de compression entre pointes (Hiramatsu et Oka, 1966, Franklin, Broch et Walton, 1970). Cependant, comme il y a dans le monde des dizaines de classifications utilisant la résistance en compression simple, nous définissons l'indice lithologique (10^e colonne) comme le nombre sans dimension obtenu en prenant $\bar{Q}_u \times 10^{-3}$ psi⁻¹,

\bar{Q}_u étant la valeur moyenne de la résistance en compression simple pour la roche considérée.

Le code national du bâtiment subdivise les roches ainsi:

Roches tendres	$0.5 < Q_u < 2.5$ ksi,
Roches moy. dures	$2.5 < Q_u < 6.0$ ksi,
Roches dures	$Q_u > 6.0$ ksi.

Coates (1967) propose les subdivisions très faible, faible, résistante, très résistante pour des valeurs de Q_u respectivement inférieures à 5 ksi, comprises entre 5 et 10 ksi, comprises entre 10 et 25 ksi, et finalement supérieures à 25 ksi.

Deux séries de coupures sont proposées pour le nouveau code canadien, édition 1975:

Qu :	0.5	2.5	6.0	25 ksi
très faible	faible	moy. résistante	résistante	très rés.
Qu :	1.0	5.0	10.0	25 ksi

Il apparaît très difficile d'en arriver à une définition universelle de ce que l'on entend par roche faible, roche moyennement résistante ou roche très résistante. On remarque cependant que toutes les classifications s'accordent à peu près sur un principe: celui de la subdivision de l'échelle de

de résistance en tranches logarithmiques. Il en est de même dans la majorité des valeurs représentant des phénomènes naturels. Pour l'espacement des diaclases l'échelle logarithmique adoptée sur le diagramme est également beaucoup plus significative et pratique.

c) Indice de Qualité :

Les colonnes 7,8,9 et 10 donnent une image graphique de la qualité de la roche; la 11^e colonne résume l'ensemble de ces valeurs par un chiffre unique de 0 à 10. Chaque chiffre peut représenter une classe de qualité. L'indice Q se calcule comme suit:

- Chacun des paramètres considérés (espacement, récupération, R.Q.D. et indice lithologique) se voit attribuer un facteur de pondération représenté sur le diagramme par la largeur de la colonne. Nous avons attribué un facteur 4 à l'espacement (e) et à l'indice pétrographique que nous considérons primordiaux, et un facteur 2 à la récupération et au R.Q.D. Au besoin, on pourrait considérer d'autres paramètres et les pondérer différemment, mais toujours dans l'optique de bien représenter et de bien qualifier le comportement de la roche dans un problème donné. Par exemple, pour étudier la capacité portante du roc et les dangers de tassement, il serait nécessaire de tenir compte et d'accorder beaucoup de poids aux vides et aux remplissages de fissures.

- Le total des facteurs de pondération dans notre exemple de la fig. 21 est 12. La somme des points pour une couche considérée sera comprise entre 0 et 12. On peut l'obtenir rapidement en additionnant les largeurs hachurées dans les colonnes 7 à 10 incl. Afin d'uniformiser sur une échelle de 0 à 10 les indices obtenus, nous divisons la somme des points par 12/10. L'indice Q est porté dans la dernière colonne.

La synthèse de plusieurs paramètres en un seul indice permet d'indiquer sur une coupe géologique les différentes zones correspondant aux différentes classes de qualité.

La possibilité de remplacement de facteurs par d'autres et la possibilité de les pondérer de diverses façons ne confère pas à l'indice de qualité une définition stricte et rigoureuse. La définition générale ne retient que le principe de pondération de facteurs et d'addition de points avec la somme obtenue ramenée sur une échelle de zéro à dix. Les recherches à venir et la compilation de données de terrain permettront de définir les meilleurs choix de paramètres et leur facteur de pondération pour tel et tel usage de classification de la qualité des roches. Nous aurons ainsi des définitions particulières comme celle présentée sur le diagramme de la figure 21.

4.3.2 Cas des roches altérables:

Les roches qui peuvent s'altérer (au sens large) soit chimiquement, soit mécaniquement comme les shales et les schistes des groupes d'Utica et de Lorraine, posent un problème quant à l'établissement d'un indice de qualité, puisque leur "qualité" à un temps donné pourra changer assez facilement. Les carottes des roches argileuses traduisent déjà cette fragilité; de nombreuses cassures s'ajoutent à chaque manipulation en plus de celles ouvertes par les opérations de forage et de prélèvement. L'espacement des fractures naturelles est toujours très supérieur à l'espacement des fractures totales. Le délitage de certaines carottes de ces formations devient complet en quelques semaines, si les boîtes ne sont pas conservées à l'abri de l'intempérisme. L'espacement des fractures totales et le R.Q.D. correspondant dépend donc entièrement

de facteurs autres que naturels, comme la qualité de la couronne de forage, le soin pris à retirer la carotte, à la transporter et à l'entreposer. Ces facteurs ne sont ni constants d'un forage à l'autre, ni représentatifs de la qualité naturelle du rocher.

Dans l'exemple donné sur la figure 21, nous avons fait un double comptage: en trait plein les indices calculés par les fractures naturelles et en trait tireté les indices obtenus par le nombre total de fractures. La séparation ou le rapprochement des deux lignes donne un indice de la fragilité de la roche: notez le contraste entre l'Utica et le Trenton. En connaissant la méthode de forage qui sera utilisée pour l'excavation d'un tunnel, on choisira l'indice le plus approprié. L'indice Q obtenu par les seules diaclases naturelles peut représenter la qualité du roc excavé par une méthode qui l'ébranlera peu, comme les tunneliers. Si l'excavation est laissée long-temps sans revêtement, on devra tenir compte de son altérabilité; si l'excavation est faite par sautage, on prendra l'indice Q calculé par les fractures totales.

4.3.3 Conclusion sur l'indice de qualité :

La méthode que nous venons de proposer vise à présenter de façon simple un spectre complet des caractéristiques du roc carotté en quantifiant les valeurs des divers paramètres. Il y a un danger rattaché à cette procédure: celui de laisser supposer que les nombres attribués ont une exactitude mathématique qui peut se prêter à des calculs. Même lorsqu'un paramètre est mesuré de façon rigoureuse, la signification du résultat ne possède jamais cette rigueur. Le jugement et la pondération judicieuse de plusieurs paramètres importent beaucoup plus que leur valeur individuelle. L'indice de qualité sera d'autant plus valable que l'on aura tenu compte de tous les paramètres importants pouvant représenter les facteurs en cause.

4.4 MESURES DANS LES FORAGES

Dans bien des cas de piète récupération, on ne peut se contenter de savoir que le rocher est mauvais à une profondeur donnée; il faut pouvoir examiner avec précision ce qui n'a pas été récupéré: fissures ouvertes, karst, remplissage argileux ... etc. Les moyens sophistiqués de diagraphies comme la géocaméra, les échantillonneurs latéraux, n'ont pratiquement jamais été utilisés jusqu'à maintenant en milieu urbain pour deux raisons: le faible diamètre des trous et l'absence d'équipement et de spécialistes rapidement disponibles.

À l'exception des cas où l'on a dû faire face à des problèmes complexes, les données objectives qu'apporteraient ces diverses méthodes n'ont jamais été envisagées à leur juste valeur. Introduites en 1927 par les frères Schlumberger avec leur première sonde de résistivité, les techniques de diagraphies sont actuellement au nombre d'environ cinquante. Le tableau 4 donne l'utilité des sondes les plus utilisées actuellement, principalement dans l'exploration pétrolière et minérale. Le perfectionnement et la miniaturisation des appareils permet actuellement de monter des sondes composites; nul doute que les années qui viennent verront leur diffusion dans les relevés de reconnaissance géotechnique. A titre d'exemple, l'identification et la corrélation des unités stratigraphiques pourraient être facilitées par les diagraphies PS, résistivité et gamma. L'évaluation de la fragmentation naturelle et le contrôle de travaux d'injection de consolidation peuvent faire appel aux sondes acoustiques et électriques (ex. microlatérolog).

TABLEAU 4 – PRINCIPALES TECHNIQUES DE DIAGRAPHIE ET LEUR UTILITÉ

	Mécanique des roches	Géologie - Hydrogéologie
SONDES ÉLECTRIQUES		
Potentiel spontané (PS)		
Pendage: 3PS à 1200	x x x	x x x
Résistivité - normale	x	x x x
Latérale	x	x x x
Latérolog	x	x x x
Induction	x	x x x
Microlog	x	x x x
Microlatérolog	x	x x x
Pendage - résistivité	x	x x x
SONDES ACOUSTIQUES		
Vitesse	x	x x x
Amplitude		x x x
Tri-dimensionnelle	x x x x	x x x
Oscillographe	x	x x x
Seisviewer	x	x x x
SONDES NUCLÉAIRES		
Rayons gamma		x x x
Neutron	x	x x x
Densité	x	x x x
Spectrale	x	x x x
TEMPÉRATURE		
GRAVITE		
SONDES VIDEO		
Caméra	x	x x x x
T.V.		x
AUTRES		
Diamètreur	x	x x
Inclinomètre		

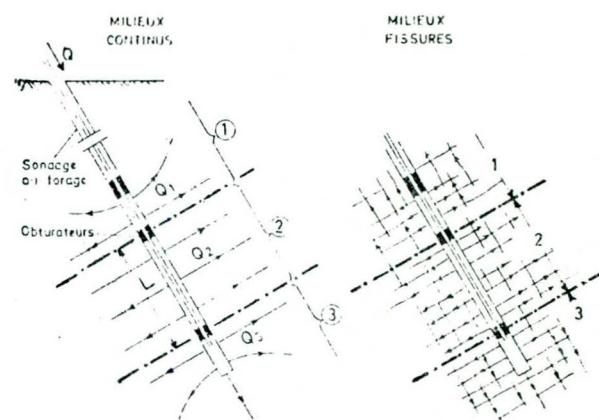
La généralisation en pratique courante des essais d'eau les plus simples donnerait pour chaque trou une mesure très utile de la densité des fractures ouvertes et communiquantes. Des résultats valables peuvent être obtenus par des sondes hydrauliques comportant en plus de la longueur d'essai deux zones d'équilibre de part et d'autre (fig. 23).

Fig. 23 - Essais d'eau au moyen d'une sonde hydraulique triple:

(1) et (3) écoulement tridimensionnel;

(2) écoulement radial plan.

(tiré de C. Louis 1970)



4.5 DÉFINITION DES FACIÈS

Pour fins de génie civil, on se contente le plus souvent d'une description géologique sommaire (ex. calcaire, shale, intrusif) pour ne pas surcharger les logs de détails moins utiles, que n'utiliseraient pas de toutes façons les soumissionnaires ou les projeteurs.

Au point de vue des synthèses des résultats d'essais et de la compréhension de la géologie de la région cette pratique se révèle nettement insuffisante; c'est la raison pour laquelle il est à peu près impossible de compiler correctement les résultats d'analyses et d'essais anciens.

Une description un peu plus précise permet de définir des faciès ou de reconnaître des horizons repères qui se retrouvent d'un forage à l'autre. De cette façon on arrive à définir la structure géologique, ses zones continues et

ses accidents tectoniques. Presque toute la stratigraphie cambro-ordovicienne possède des faciès ou sous-faciès suffisamment distincts pour permettre des corrélations de forage en forage. Les unités ont quelques mètres à quelques dizaines de mètres d'épaisseur. La compilation des résultats de mesures aurait avantage à se faire en référant à ces unités.

L'examen des carottes et leur description n'est pas aussi laborieuse que l'on pourrait le croire; elle nécessite simplement un personnel compétent en géologie. La figure 9 est un exemple de coupe établie en quelques heures: le travail s'est fait à partir des photographies de carottes avec quelques vérifications au besoin dans les boîtes de forage. Les caractéristiques pétrographiques qui ont servi à distinguer les faciès A, B, C, D, E, F et G sont assez subtiles et ne présentent aucun intérêt pour le constructeur; nous les avons omises sur les logs de façon voulue, pour simplifier la présentation.

Certaines formations, comme le Tétreauville ou l'Utica, apparaissent mégascopiquement uniformes et pauvres en fossiles; la mesure de leur radio-activité naturelle et de leur résistivité en diagraphies montrerait certainement plusieurs sous-faciès identifiables par leur "signature spectrale".

V - ÉTUDES GÉOTECHNIQUES DES FONDATIONS

La fondation d'immeubles ou de structures importantes ne pose pas de problèmes techniques difficiles à Montréal; il y a presque partout, à moins d'une dizaine de mètres de profondeur, une couche portante (till ou roc) capable de supporter les édifices les plus élevés. Les fondations sont descendues à cette couche soit par excavation, soit par transfert de charge au moyen de pieux. Les petits édifices n'ont que des fondations superficielles ou de faible profondeur (un sous-sol pour éviter l'action du gel). Nous allons commenter sommairement les trois types de fondation:

- A) Semelles ou radiers sur les dépôts meubles.
- B) Structures portées par des pieux ou piliers.
- C) Structures fondées directement sur le roc.

5.1 RÉPARTITION GÉOGRAPHIQUE DES CONDITIONS DE FONDATION

Nous avons délimité sur la figure 24 quatre types de substratum identifiés par des chiffres de 1 à 4.

— Les secteurs où le roc se situe à moins de trois mètres (10') sous les morts-terrains sont identifiés par le chiffre -1-. À partir du Mont Royal une vaste superficie de cette nature s'étend vers le nord où elle occupe toute la partie médiane de l'île. À l'exception de la montagne même, toute la roche de fond est formée des calcaires Chazy, Black River et Trenton. Dans sa partie sud, cette zone de roc peu profond correspond à un plateau peu élevé (70 m, max.) qui suit l'anticlinal de Villeray. Au nord, la zone s'étend jusqu'à la faille du Bas-de-Ste-Rose, où

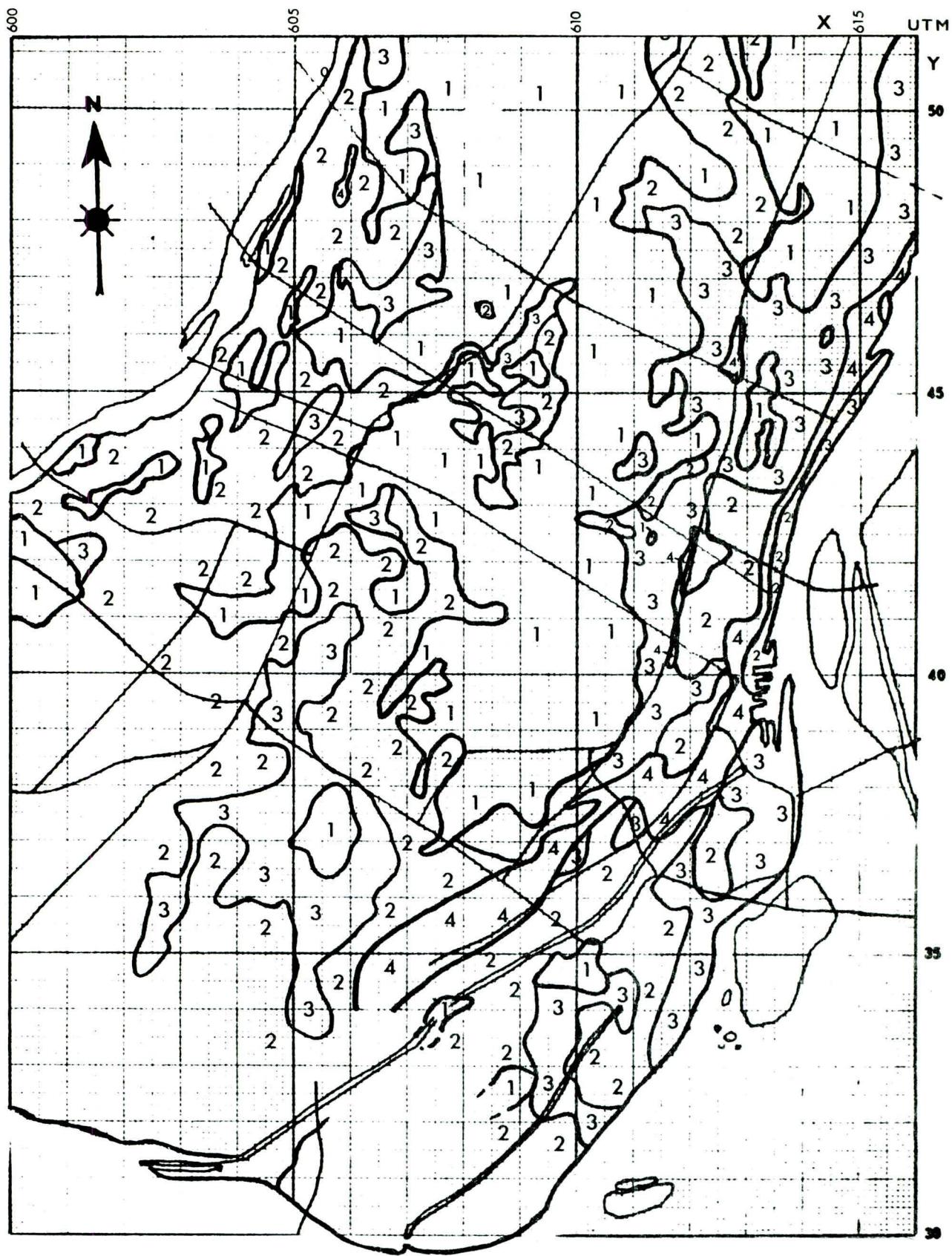


Fig. 24 – Répartition géographique de 4 conditions de fondation.

le changement lithologique (passage brusque calcaires à shales) se traduit par un approfondissement important du substratum rocheux. La fondation d'immeubles petits ou moyens ne pose aucun problème. Par contre, l'excavation des sous-sols à niveaux multiples exige des opérations de dynamitage qui exigent des précautions spéciales visant à ne pas causer de préjudice aux immeubles avoisinants ou à leurs occupants. Quelques immeubles actuellement en construction au nord-ouest de la rue Sherbrooke dans le centre-ville rencontrent ces conditions. Dans la zone -1-, les fondations sont du type C, quelle que soit la taille de la structure.

— Les étendues où les dépôts meubles ont des épaisseurs comprises entre 3 et 18 mètres (10 à 60 mieds) et ne renferment pas d'argile de la mer Champlain, se retrouvent de part et d'autre ainsi qu'au sud de la zone précédemment décrite. Dans ces secteurs (chiffres -2-) les petits immeubles peuvent être fondés sur semelles filantes (type A). Les grands immeubles sont fondés soit sur pieux (B), soit par excavation jusqu'au roc pour permettre la construction de plusieurs niveaux en sous-sol. Dans ce dernier cas, il est nécessaire d'étudier l'hydrogéologie du site pour prévoir les débits d'eau pouvant envahir la fouille, ainsi que les effets secondaires sur la stabilité, les rabattements de nappe et leurs conséquences ... etc. Les murs de protection de l'excavation du type paroi berlinoise (pieux H d'acier avec boisage placé à la main entre les pieux) apparaissent très satisfaisants dans toutes les excavations visitées. Deux problèmes mineurs surviennent à l'occasion:

- 1) la présence de blocs de 50 cm ou plus dans le till peut gauchir les pieux au cours de leur battage (fig. 25); en plus, ils compliqueront l'excavation du till (fig. 26);
- 2) l'entraînement de sable fin par l'écoulement des eaux d'infiltration (fig. 27).

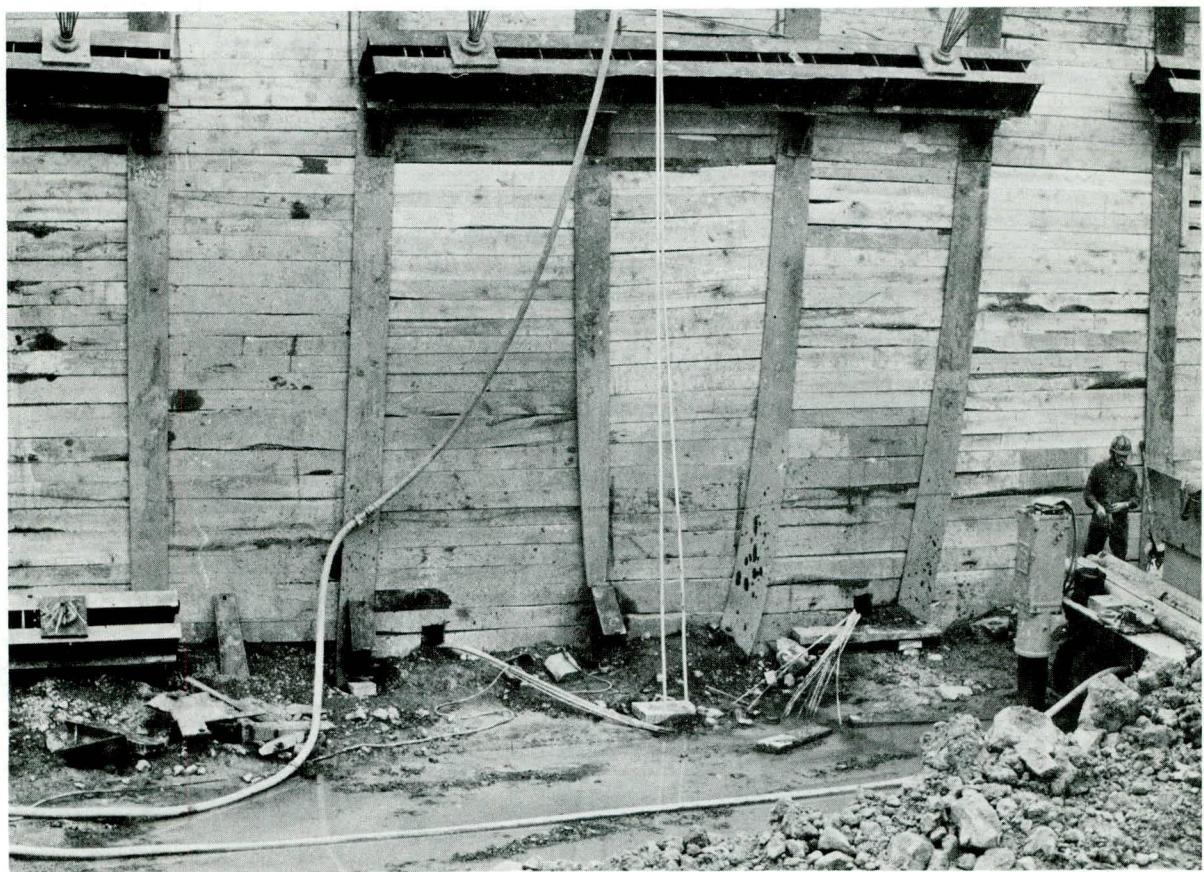


Fig. 25 - Pieux du mur (paroi berlinoise) de protection de la fouille déviés et tordus au cours de leur enfoncement en raison de la présence de gros blocs dans le till.



Fig. 26 - Till gris très compact et comportant 10 à 20 % de blocs plus grands que 30 cm.

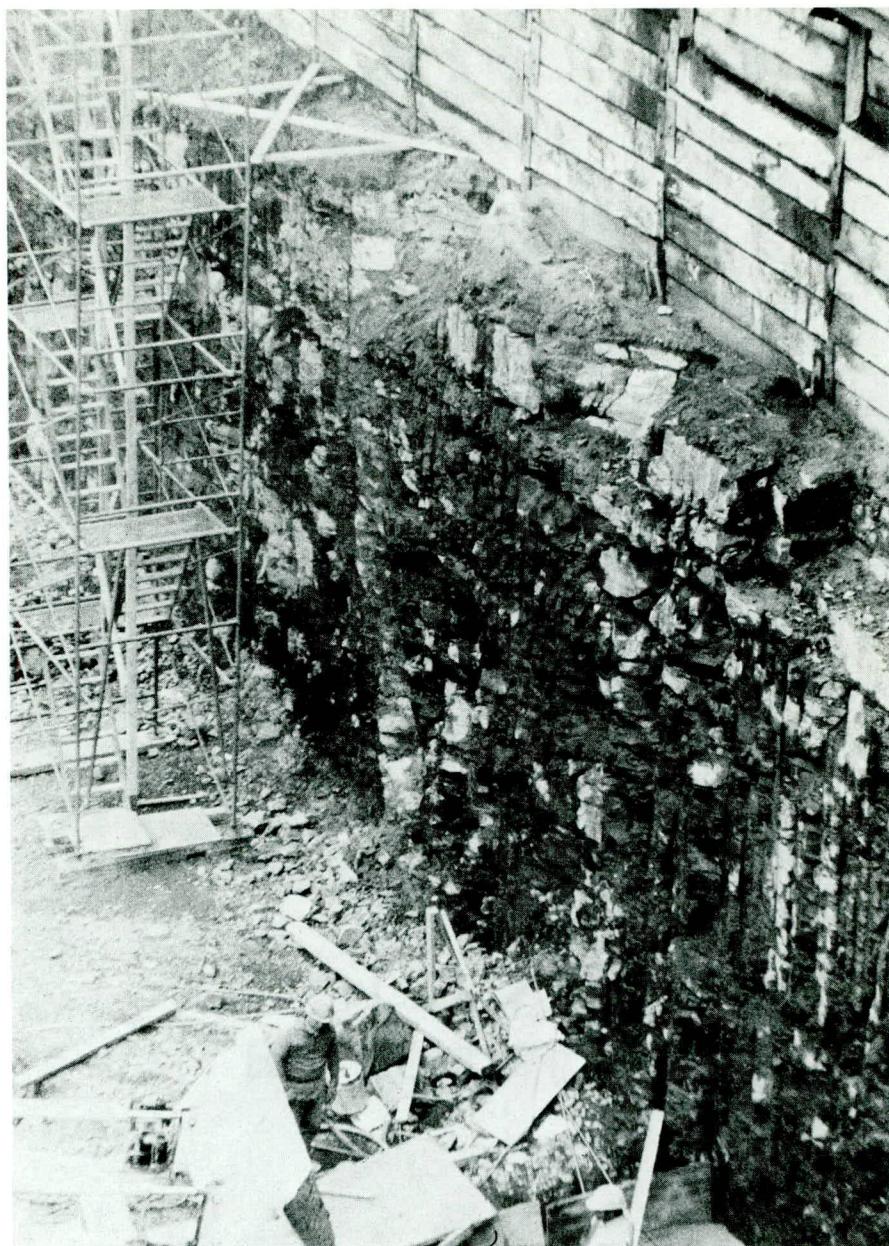


Fig. 27 - Fouille du nouvel édifice de l'O.A.C.I. rue Sherbrooke. Amas de sable silteux jaune au bas de la paroi berlinoise; les eaux s'écoulent principalement au-dessus du substratum rocheux.

Calcaire régulier du Tétreaувille; un dyke épais de 30 cm apparaît un peu à gauche du centre de la photo.

Les murs étanches, type paroi moulée, permettent d'éviter le second problème; par contre, il n'est pas possible de s'affranchir du premier.

— Les chiffres -3- correspondent aux étendues où les dépôts non consolidés épais de 3 à 18 mètres renferment une couche importante d'argile. Les fondations d'immeubles, même légers, sont soumises aux aléas de ce matériau. Plusieurs maisons reposant sur l'épaisse couche d'argile marine sous la rue Sherbrooke ont subi des dommages importants résultants des tassements différentiels. La valeur de la contrainte transmise par la fondation au sol n'est pas souvent la cause principale; les tassements résultent plutôt des rabattements de nappe. À ce point de vue les arbres constituent le principal danger lorsqu'ils sont plantés trop près des maisons. Dans les zones 3, on doit veiller particulièrement à étudier l'effet combiné des trois paramètres suivants énumérés et commentés par Burn (1973) pour des exemples de maisons à Ottawa:

- a) Effet des variations de teneur en eau sur l'argile.
- b) Type d'arbre (certains peuvent transpirer entre 50 et 100 gallons d'eau par jour.)
- c) Périodes de déficit pluviométrique.

Chaque arbre agit comme un puit drainant qui peut rabattre fortement la nappe pendant les périodes de sécheresse.

La protection des fouilles creusées dans l'argile nécessite des précautions un peu spéciales; l'angle d'équilibre naturel de l'argile est si faible qu'on ne songe jamais à réaliser des talus permanents sans moyen de soutènement. Si la fouille est maintenue sèche pendant une longue période, elle draine petit à petit les environs immédiats et peut causer des tassements. L'ancre des murs de soutènement ne peut se faire dans l'argile même. Les tirants

doivent par conséquent être plus longs et scellés dans le till ou le roc sous-jacent. Eivemark (1971) décrit l'ouverture de fissures apparaissant dans le terrain parallèlement aux murs d'une excavation dès que celle-ci eut atteint une profondeur de 6 mètres. En zone -3-, les calculs des poussées des terres doivent tenir compte de la nature particulière de l'argile; toutes les structures importantes doivent être fondées sur pieux ou descendues jusqu'au roc.

— Pour environ 3 % de la superficie représentée sur la figure 24, la roche consolidée se situe à plus de dix-huit mètres (ou 60 pieds) de la surface topographique. Peu de fouilles ont dépassé jusqu'ici cette profondeur, de sorte que l'on peut considérer qu'en zone -4- les fondations sont du type A ou B. Ces grandes épaisseurs de morts-terrains correspondent à des terrasses laissées en bordure nord du St-Laurent à la fin de la période marine, ainsi qu'à une portion surcreusée de l'ancien lit du fleuve le long de l'extrémité est du canal Lachine*.

Le long de la rue Sherbrooke la terrasse est taillée dans l'argile, alors que le long de la rue St-Jacques elle est formée surtout de matériaux glaciaires en partie remaniés par les eaux post-glaciaires. La pente de la nappe phréatique est beaucoup plus élevée là qu'ailleurs; il en résulte que les dépôts silteux que l'on y rencontre peuvent se trouver dans des conditions de boulance. Il est recommandable d'assurer une étanchéité aux parois des fouilles profondes. Si le mur étanche ne descend pas jusqu'au rocher imperméable, le risque de boulance persiste au plancher de l'excavation.

5.2 PROBLÈMES SPÉCIAUX

Les indications très générales que l'on peut donner à partir d'une carte comme la figure 24 ne comprennent pas les cas de fondations où une composante horizontale

* La partie surcreusée correspond au changement lithologique calcaire-shale; (voir fig. 6, p. 31)

agit sur le substratum. Cette composante peut provenir soit de l'attitude des lits ou de la topographie du site, soit de la forme de l'ouvrage (voûte exerçant une force très inclinée sur ses points d'appui), soit de la prise en considération du risque séismique (voir au paragraphe 9.3.1). Dans de tels cas, l'étude géologique préliminaire doit déterminer les orientations, espacements, ouverture et remplissage des diaclases verticales et inclinées. Les forages verticaux sont alors insuffisants; l'étude doit se faire par des sondages recoupant les diaclases dans la direction des forces d'appui. Les diagraphies peuvent mesurer précisément les zones dangereuses. Lorsque sera achevée l'excavation, on effectuera un relevé minutieux du fond de la fouille.

Le relevé géologique permet de choisir des blocs représentatifs pour effectuer des essais de cisaillement en place. Dans un contexte de fractures ouvertes et d'interlits argileux ou de schiste altéré, la résistance qu'offre le massif à une poussée parallèle à son litage ne représente que 5 à 20 pour cent de sa résistance perpendiculaire. Les massifs stratifiés constituent plus de 95 % du substratum de Montréal. La notion de capacité portante doit tenir compte de l'anisotropie de résistance de ces massifs. Leur structure doit être définie par un relevé géologique; dans la majorité des cas elle est très simple, c'est-à-dire subhorizontale.

Le tassement vertical d'une fondation reposant sur un roc sain est toujours négligeable; mais si cette fondation exerce une poussée horizontale importante, le risque de tassement horizontal existe, car les forces se répartissent dans les premières dizaines de mètres de rocher qui peuvent contenir des fractures ouvertes ou remplies d'un matériau compressible.

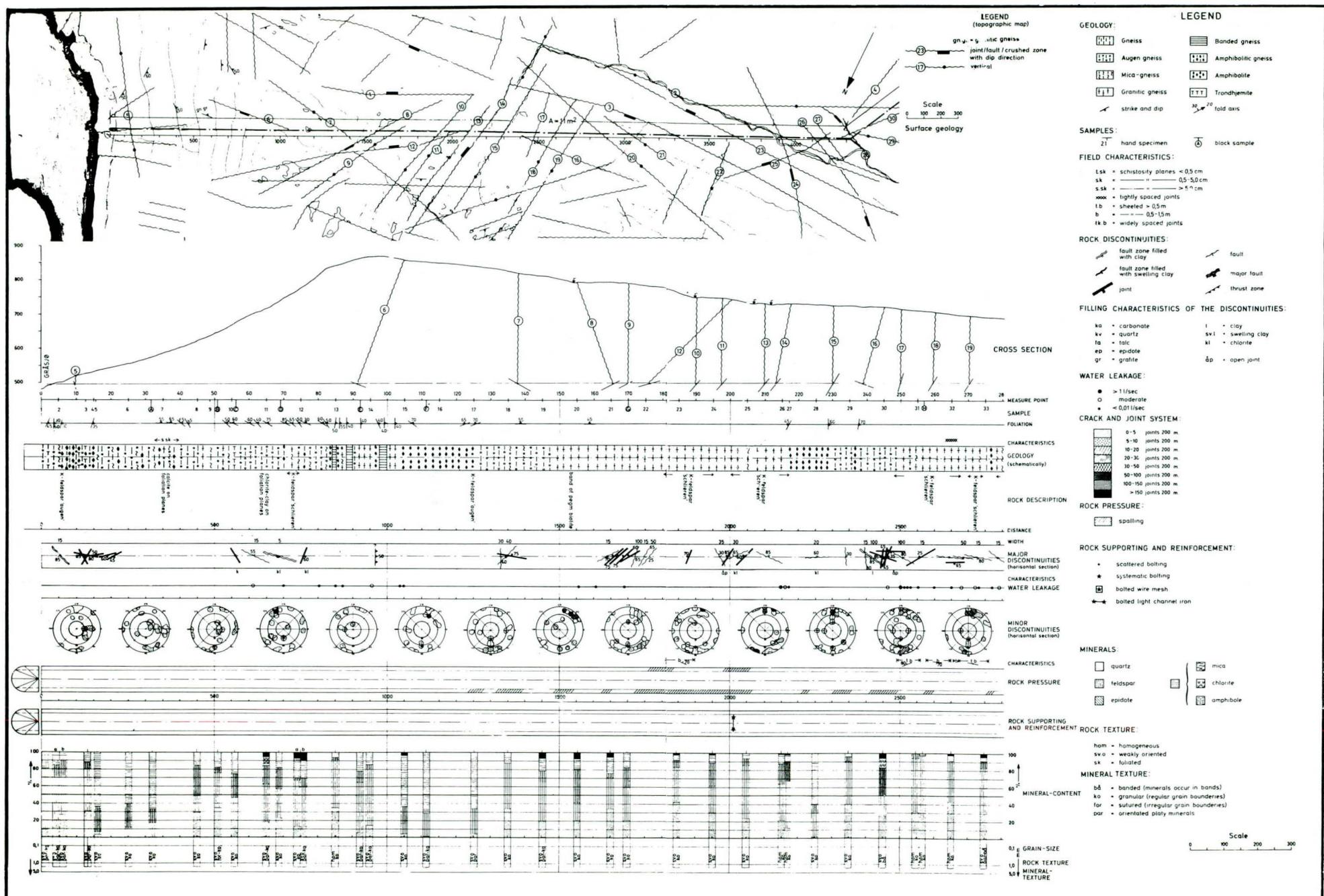
VI - CARTOGRAPHIE DES EXCAVATIONS

6.1 INTRODUCTION

Au chapitre IV, nous avons commenté les travaux de reconnaissance faits avant l'excavation de l'ouvrage. Nous allons maintenant discuter de ce qu'il convient de faire pendant les travaux. Les données géotechniques comme les données géologiques sont spatialisées; leur présentation la plus adaptée est une carte: c'est pourquoi les relevés et mesures peuvent entrer dans un processus de cartographie au sens large.

Les méthodes de cartographie des phénomènes géologiques sont commentées abondamment dans la littérature: Compton (1962) et Proctor (1971) résument très bien les idées importantes. La juxtaposition sur une même coupe ou carte de toutes les données géologiques, hydrogéologiques, les mesures physiques ainsi que les données techniques relatives à l'exécution de l'excavation permet de saisir les interactions et aide à la réalisation de l'ouvrage en facilitant les synthèses.

En pratique à Montréal, ces données ne sont jamais complètes ni obtenues avec autant de rigueur que dans les cas de construction d'aménagement hydro-électriques, ou dans les grands tunnels routiers d'Europe. Barkey et Palmstrom (1970) ont donné un exemple très complet de ce que peut être un relevé géotechnique d'un tunnel (fig. 28). Ce type de compilation paraît complexe et n'est en fait interprétable que par les spécialistes familiers avec ce genre de représentation. Un rapport complet est de plus assez long à réaliser; il arrive toujours trop tard pour



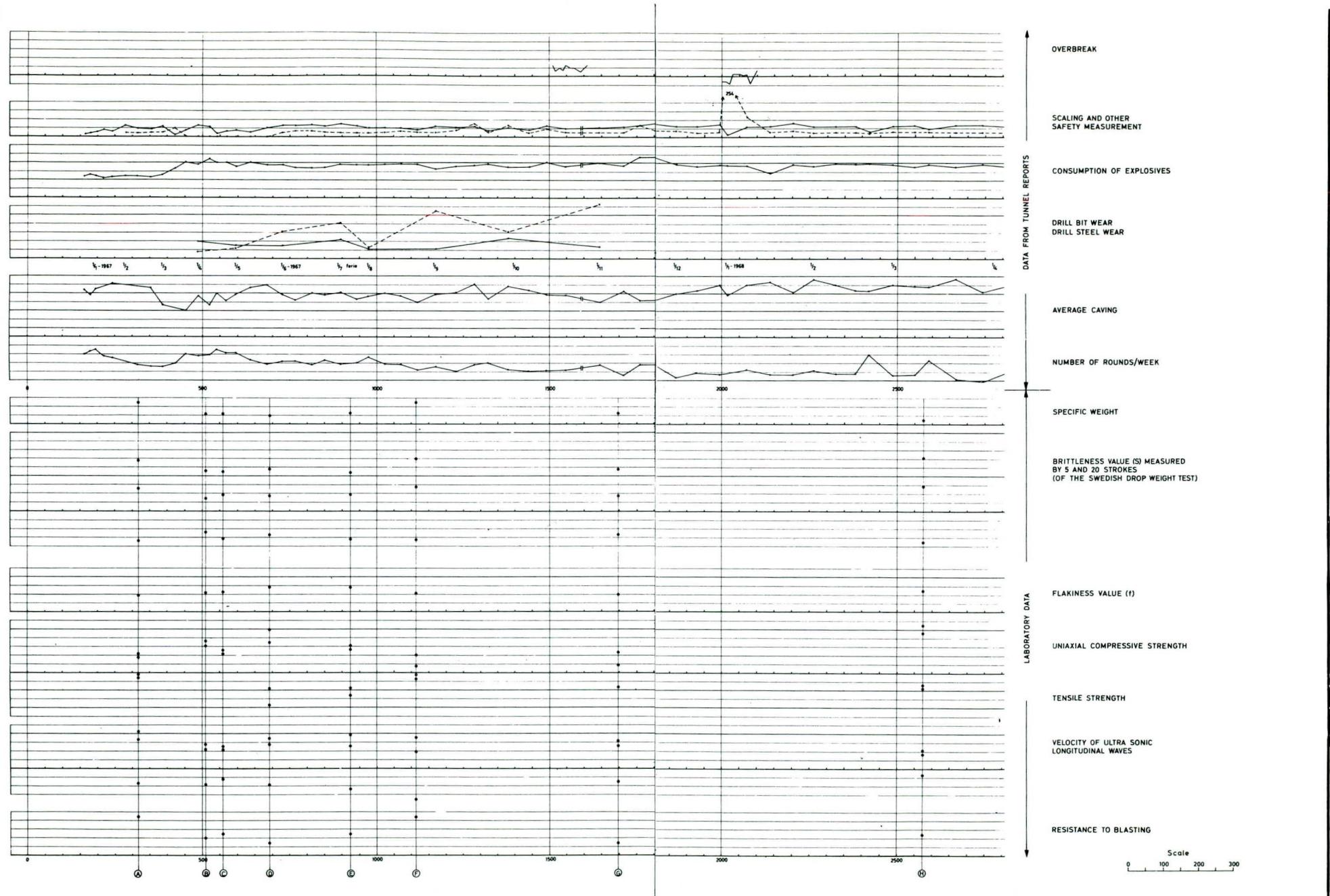


Fig. 28 - Exemple de cartographie géotechnique d'un tunnel - Aménagement de Trollheim, Norvège.
(Tiré de Barkey et Palmstrom, 1970)

modifier quoi que ce soit dans la réalisation de l'ouvrage. En revanche on peut en tirer des corrélations entre des paramètres géologiques et des données techniques, qui, elles, seront utilisables par les maîtres d'oeuvre et les constructeurs d'ouvrages semblables ou connexes.

Les relevés et la cartographie géotechnique permettent de classer les sections de l'ouvrage dans une échelle de qualité relative de rocher. Ils expliquent les facilités ou difficultés rencontrées dans sa réalisation. La comparaison entre ces données et les résultats du relevé préliminaire permet aussi de trouver des moyens de prédition plus justes à partir des données des sondages.

6.2 ROLE DU GÉOLOGUE PENDANT LA CONSTRUCTION

Il importe que les relevés soient effectués par un ingénieur possédant à la fois une compétence professionnelle en géologie et une expérience des chantiers et des méthodes de construction. Nous prendrons pour acquis que le géologue travaille pour le propriétaire de l'ouvrage et non pas pour l'entrepreneur. Il est souhaitable qu'il ait suivi ou dirigé les relevés préliminaires et qu'il connaisse parfaitement les sondages exécutés.

Une fois les contrats accordés, les soumissionnaires choisis s'engagent à réaliser les travaux en conformité avec le cahier des charges. S'il existe toujours une marge d'imprévus, c'est encore plus vrai lorsqu'on travaille dans des matériaux naturels comme les sols et les roches. La géologie peut et doit intervenir rapidement pour solutionner des problèmes non prévus dans le cahier des charges. Il semble raisonnable qu'un minimum de collaboration s'établisse entre l'exécutant, le maître d'oeuvre et le géologue. Dans certains cas, rares heureusement, des phénomènes naturels mettent des vies en danger, sans compter

les pertes matérielles. Le géologue peut en dehors de ces éventualités, faire des observations de grande valeur sur l'efficacité des techniques d'excavation, les moyens de soutènement, etc. Lorsqu'un projet de grande envergure, comme un métro, s'étale sur plusieurs chantiers successifs, la compilation des observations et des relevés apporte une aide précieuse dans l'optimisation des méthodes et des coûts d'exécution. Ces recommandations permettent des cahiers des charges plus justes et des marges d'incertitude moins larges sur les coûts.

6.3 OBJECTIFS ET UTILITÉ DES RELEVÉS EFFECTUÉS AU COURS DE LA CONSTRUCTION

Le tableau de la page suivante présente une liste générale des données à recueillir ou à mesurer pendant la cartographie d'une excavation et leur utilité relative pour divers niveaux de compilation:

- 1- Cartes et coupes de l'ouvrage présentées et commentées dans un rapport de géologie de l'ingénieur.
- 2- Renseignements complémentaires sur l'ouvrage et le site.
- 3- Rapport de synthèse sur plusieurs sites
- 4- Dossier géotechnique rassemblé pour la construction d'ouvrages additionnels connexes.
- 5- Fichier géotechnique régional.

6.3.1 Les cartes et coupes de l'ouvrage signifient ici la présentation graphique des faces excavées à une très grande échelle (celle des plans de l'ouvrage par exemple). Elles doivent permettre de comparer d'un seul coup d'oeil les principales données géologiques (structure, failles, orientation dominante des diaclases), géotechniques (infiltration d'eau, qualité du massif) et techniques (soutènement, hors-profils). Il est préférable de noter dans un même relevé tous ces paramètres, afin de saisir déjà au moment de la cartographie les interdépendances et de les commenter dans le carnet de notes. L'établissement au jour le jour

TABLEAU 5 ELEMENTS A RELEVER DANS UNE EXCAVATION

(tunnel ou à ciel ouvert)

		CARTES ET COUPES DE L'OUVRAGE	RENSEIGNEMENTS COMPLEMENTAIRES	RAPPORT DE SYNTHESE	OUVRAGES ADDITIONNELS CONNEXES	FICHIER GEOTECHNIQUE REGIONAL
	<ul style="list-style-type: none"> • - occasionnellement utile • - utile ● - important ● - indispensable 					
A - LOCALISATION (X,Y,Z).	Chaînage de l'excavation	●	●	●	●	●
B - IDENTIFICATION	(Date, No de Contrat, Entreprene.)	●	●	●	●	●
C - DONNEES D'EXECUTION	- Taux d'avancement		●	●		
	- Facteur poudre		●	●	●	●
	- Soutènement	●	●	●	●	●
	- Hors-profils	●	●	●	●	●
	- Ecaillage	●	●	●	●	●
D - GEOLOGIE	- Nom pétrographique	●	●	●	●	●
Description de la roche	- Texture et granulométrie		●	●		
	- Couleur		●	●	●	●
	- Altération	●	●	●	●	●
	- Minéralogie		●	●	●	●
Structure géologique	- Stratigraphie	●	●	●	●	●
	- Attitude des lits	●	●	●	●	●
	- Failles, zones broyées	●	●	●	●	●
	- Diaclases individuelles	●	●			
	- Familles et espacement m.	●	●	●	●	●
E - GEOTECHNIQUE	- Venues d'eau, débit	●	●	●	●	●
	- Dureté, qualité du massif	●	●	●	●	●
	- Comportement (BL, éboulis)	●	●	●	●	●
	- Instrumentation, mesures	●	●	●	●	●
F - MORTS-TERRAINS	- Nature, ép. chaque couche	●	●	●	●	●
	- Couleur	●	●	●	●	●
	- Granulométrie		●	●	●	●
	- Limites d'Atterberg	●	●	●	●	●
	- Résistance mécanique		●	●	●	●
G - AUTRES	- Epaisseur de roc altéré - EA	●	●	●	●	●
	- Ep. de roc avec diaclases oxydées-EO	●	●	●	●	●

de ce rapport géologique du chantier considéré permettra à l'occasion au géologue de faire des recommandations immédiates sur le déroulement des travaux, comme nous l'avons mentionné au paragraphe 6.2; cela peut inclure l'installation d'instruments de mesures à des endroits jugés critiques ou représentatifs, selon le cas. Une fois l'excavation terminée, le géologue transpose ses schémas et notes de terrain sur les plans et coupes montrant toutes les faces cartographiables; le plancher ne peut que rarement figurer pour les chantiers actifs, étant donné qu'il est masqué par les débris et la boue. Un rapport bref et clair commente les cartes et coupes et résume l'essentiel de la géologie du site. Les points où il y a interrelation importante entre la géologie et l'ouvrage, soit à cause d'un accident géologique (ex. une faille), soit à cause d'une particularité de l'ouvrage (ex. appui de voûtes ou pilier créant des contraintes plus élevées), devraient être analysés un peu plus en détail et illustrés de photographies au besoin. Un exemple d'un tel rapport est l'étude 72F-149 de la station Beaugrand réalisée par G. Georges du Laboratoire de Contrôle et de Recherches de la Ville de Montréal. Nous avons cartographié les autres ouvrages importants sans cependant écrire un rapport individuel pour chaque site (voir au paragraphe 6.4.3).

6.3.2 Les renseignements complémentaires comprennent tous les renseignements relatifs à l'étude, y compris ceux que l'on n'a pas jugé utile de reporter dans le rapport. Ce sont tous les originaux, carnets de notes, photos, etc. qui constituent des documents d'archive du projet. Comme on ne peut prévoir quelle donnée pourrait être utile un jour, si faible soit cette probabilité, il semble sage de conserver précieusement tous ces documents uniques au moins pendant les premières années de vie de l'ouvrage. On fera appel à ce dossier pour des éventualités comme:

- a) Comportement anormal de la structure (fissuration du revêtement de béton, suintements, tassements); un phénomène géologique mal évalué initialement peut apporter l'explication si on le réexamine avec soin.
- b) Orientation des mesures d'entretien de l'ouvrage.
- c) Construction d'ouvrages additionnels ou adjacents; le dossier fournira une foule de renseignements bien plus complets que tout ce que pourra apporter une nouvelle campagne de relevés.

6.3.3 Le rapport de synthèse est un document qui rassemble les données obtenues sur plusieurs chantiers ouverts dans un même type de roche, en vue d'en tirer des corrélations statistiques qui ne sont pas significatives à partir des informations d'un seul site. Ce rapport plus complet au point de vue de la géologie, pourra discuter de la justesse des prévisions faites à l'aide des relevés préliminaires. Il compare l'efficacité des différentes méthodes de relevés et recommande le cas échéant, des modifications à la procédure. Le rapport de synthèse peut présenter à l'échelle habituelle des cartes géotechniques et géologiques (1:50 000 ou 1:25 000), la somme des données recueillies et la comparer aux cartes officielles englobant le même secteur. Le présent rapport constitue en fait ce que nous venons de décrire, avec en plus des considérations sur la méthodologie que nous proposons. Aucun rapport de synthèse ne sera jamais définitif tant que Montréal se développera; nous espérons qu'il y aura toujours quelqu'un qui observera et commentera les données nouvelles que fournissent les travaux d'excavation.

6.3.4 Un dossier rassemblé pour la construction d'un ouvrage additionnel connexe sera rapidement complété si l'on a élaboré et conservé avec soin un rapport géotechnique avec cartographie géologique détaillée de l'excavation adjacente. Les commentaires du géologue qui a suivi les premiers travaux seront très précieux. Le rapport géologique et les renseignements complémentaires conservés au

dossier permettront de dire dans quelle mesure les données connues du premier site peuvent être extrapolées au nouveau chantier; elles indiqueront également quel type de relevés sera nécessaire pour compléter le dossier, comment les effectuer (nombre, localisation, type de sondages, etc.) et comment les interpréter. À titre d'exemple, la cartographie détaillée de la fouille du vélodrome olympique permet actuellement d'orienter et de compléter les relevés exécutés pour la réalisation du stade adjacent. Les relevés pour le vélodrome ont eux-même été facilités par la cartographie géologique effectuée sur deux autres chantiers adjacents: le tunnel d'un égout collecteur sous la rue Boyce et la tranchée de l'interstation Viau-Pie IX de la ligne 1 du Métro.

6.3.5 Le fichier géotechnique régional a pour but de stocker les informations sous forme codée, pour en tirer par des programmes de traitement, des synthèses automatiques. Son efficacité suppose une compilation à un échelon encore plus élevé qu'un rapport de synthèse. Pour l'ensemble de la région de Montréal, la somme d'informations à traiter est énorme et ne peut se faire autrement que par l'informatique. Mais toutes les données ne possèdent pas la même importance dans le but d'arriver à une synthèse régionale. De plus, elles doivent être codées et stockées dans une mémoire magnétique, ce qui n'est pas rentable si un trop grand volume de détails peu importants englue le système. Sur le chantier au moment du relevé, on s'orientera autant que possible vers un consensus régional des termes, abréviations et symboles utilisés dans les descriptions pour faciliter leur intégration dans un fichier.

Nous verrons au chapitre 8 comment un fichier régional et des rapports de synthèse couvrant la grande région de Montréal devraient faciliter la planification et l'aménagement de l'espace urbain. La qualité de l'intégration finale de toutes les données dépend donc à la base de la

qualité des données cartographiées sur chaque site.

6.4 MÉTHODES DE CARTOGRAPHIE

6.4.1 Méthode classique: la façon habituelle d'obtenir un plan ou une coupe d'une face excavée, est de dessiner sur place un brouillon de plan ou schéma à l'échelle approximative de 1: 100 ou 1: 500. On procède par sections que l'on délimite sur le terrain et sur le schéma; lorsque les chaînages ne sont pas déjà indiqués sur les murs, cette partie du travail est alors assez laborieuse.

La figure 29 montre un exemple de feuille de terrain que nous avons mis au point pour les relevés en tunnel ou en tranchée. Son utilisation est commentée en détail dans l'appendice A-2. Dans l'exemple présenté, l'espace central désigne la voûte, l'espace du haut le mur gauche et l'espace du bas le mur droit; c'est une section de tunnel du métro, ligne 1 est. En dessinant directement sur le chantier le brouillon du plan final, on élimine la majorité des erreurs qui surviendraient en transposant des données numériques prises dans un carnet de notes, comme par exemple l'attitude relative de deux systèmes de diaclases et leur intersection.

Dans les secteurs de l'île peu perturbés tectoniquement, un géologue peut cartographier avec un minimum d'entraînement 300 à 500 mètres de tunnel en une journée. Les codifications employées figurent sur la feuille de terrain. Lorsque les fractures sont importantes ou renferment un remplissage quelconque, il est important de noter la valeur de l'angle minimal entre les faces de l'excavation et les diaclases: cet angle est désigné

Fig. 29 - Feuille de terrain pour la cartographie géologique.

DATE: 25-07-73	GÉOLOGUE: M. DURAND									
EXCAVATION: JPR TRANCHEE TUNNEL (Rayez la mention inutile)										
LIEN: Rue Hochelaga	CONTRAT:									
SECTION DE: 231 + 70 + 235 + 20	EXÉCUTÉE DU 12-72 au 12-72									
BM: X = Y = Z =	X = Y = Z =									
BM: X = Y = Z =	X = Y = Z =									
► DESCRIPTION GÉNÉRALE Pendage faible vers l'est										
DE LA STRUCTURE :										
► DESCRIPTION DE LA STRATIGRAPHIE : Calcaire argileux aphénitique avec inter-lits de schiste, parfois shale										
► ACCIDENTS STRUCTURAUX										
//// Zone humide	Faillle (dépl. en pieds) Dykes									
↑ Suintement	ZBB Zone broyée (ép. en pieds) Remplissage									
↑ Venue d'eau (gal/min)	Diaclase vert (/ 60° / 40° / 20° / 0°)									
CHARGE										
MUR - NW-	232	233	234	235						
VROUTE										
MUR - SE-										
SOUTIENEMENT	C4C = cintres (espacement en pieds)	B5B = (BOULONS espacement en pieds)	G= Gumite	Revêtu ////						
	B5B B4B B4B	B5B B4B B4B		B4B B4B						
RUSOCITE DES PROFILS (amplitude en pieds) et % de contrôle des faces	1 0% 0.7%	1.5 80% 1.5	0% 0% 1.5 0%	0.7% 0.7% 10% 0% 20% 0%						
DIVISASSES	105 V	90 15 V 25	90 V	130 V	100 95 100 V V V	120 V	10 105 V 60	95 125 V V	80 V	100 CALC 30
REMARQUES:	Angle variable de 0° à ~5° car le tunnel remonte. Bon aspect des murs et de la route, secs									
35-	(A) Filon-couche basique, ép. 8 ft, N, grain fin, à 15' (A') " " à 14'									
231+70 233+60										

LITS	NOM	TEXTURE GRANULO	COULEUR	EPAISSEUR EN PO. (MAX-MIN) MOY	% EN VOLUME
○ -	20 CALC	21 A M	22 G	(2-8) 6	
○ -	24	25	26		
INTERLITS	28 SCH	29 L A N	30	(0-1) 0.5	10
DIRECTION	32 N-S	PENDAGE 34 3 E	RECOUPANT PLATOND (OU PLANCHER) A		
► JOINTS DE STRATIFICATION (L)	36 ✓ RÉGULIERS	37 IRRÉGULIERS	38 PERSISTANTS	39 PEU CONTINUS	ONDULANTS $\lambda = \square$ pi $\bar{A} = \square$ po
	43 SANS COHÉSION TOUS LES 2 PIENS	44	45 DIRECTION	PENDAGE	
► SCHISTOSITÉ					
► MORT-TERRAIN	ép. \square pi	NATURE:			
NOMS COMMUNS DES LITS ET REMPLISSAGES DE FRACTURES		TEXTURE	GRAINE	COULEUR	
Calc - CALCAIRE	IA - INTRUSIF ACTIVE	A - AMOLLE	I - INGRÉDIENT	V - VERT	J - ROUILLE
Sch - SCHISTE	IB - INTRUSIF BASIQUE	SE - SABLE	F - FOSSEABLE	J - JAUNE (1 - jaune)	J - JAUNE (2 - jaune)
Sh - SHALE	Crbs - CRBS	ST - STILT	K - KLASTIF	H - ROUGE	H - ROUGE (1 - rouge)
bol - BOULONNE		C - CAYVIER	C - CRYSTALLISE	G - GRIS	G - GRIS (1 - gris)
		T - TILL	E - FIN	P - BLANC	P - BLANC (1 - blanc)
			F - REINFORCE	B - BEIGE	B - BEIGE
N.B. Calc.a = Calcaire argileux Att = argile siliceuse		(un chiffre pour diamètre moyen mm.)			

SECTION
ELARGIE
(STATION) 235

par α et figure à la quatrième ligne de l'espace "DIACLASES" au bas de la figure 29. Les feuilles de terrain peuvent par la suite être complétées par une feuille portant les données techniques sur des diagrammes tracés à la même échelle que le relevé géologique (comme sur la figure 28).

6.4.2 Méthode photographique. Cette méthode consiste à obtenir une couverture photographique complète du roc exposé par les travaux d'excavation. La qualité du relevé est meilleure si les faces sont propres, ou si le roc est fraîchement excavé. En tunnel on doit très souvent faire un lavage préalable; de plus, il n'est pas facile d'obtenir un éclairage convenable. Nous avons expérimenté la méthode dans les deux contextes.

a) Fouille à ciel ouvert: à titre expérimental, nous avons réalisé une couverture complète de la station Radisson (83 clichés). Le recouvrement stéréoscopique permet de conserver une vision à trois dimensions de tous les accidents des faces. L'étude se fait en trois étapes: 1e) une journée consacrée à la prise des clichés; 2e) assemblage d'une série pour constituer des mosaïques pour chaque face; 3e) une deuxième visite sur le chantier pour mesurer et reporter sur les photos les valeurs exactes des épaisseurs des couches, les directions et pendages des accidents structuraux.

b) Tunnels: L'application de la procédure expliquée ci-dessus se révèle en pratique beaucoup plus complexe pour plusieurs raisons: la faible largeur d'un tunnel ne permet pas de recul et même un objectif grand angulaire ne permet pas de couvrir une grande superficie; la saturation de l'air en vapeur d'eau et la présence de poussières et de fumées reflète jusqu'à 80 % de l'éclair d'un flash. Les

jours qui suivent des pluies abondantes voient les tunnels peu profonds du métro en construction se remplir de bruine qui limite la visibilité à 10 mètres.

En conclusion, il nous semble très avantageux d'utiliser, dans les excavations à ciel ouvert, la photographie pour enregistrer un maximum de données en très peu de temps. En prenant soin de toujours inclure dans les photos un objet, ou mieux un jalon, qui en donne l'échelle, il devient même relativement aisément de mesurer sur les clichés les directions et pendages des couches, l'épaisseur des lits, etc.; cela est très précieux dans les cas où ces mesures ne peuvent être obtenues autrement (chantiers très actifs et dangereux, murs très hauts). En tunnel, les conditions ne permettent pas toujours la prise de photos; il faut de préférence attendre les périodes sèches et les jours où le chantier est peu actif. Pour diminuer beaucoup l'effet brouillard, nous recommandons de laisser l'appareil photo sur pied avec le diaphragme ouvert et d'aller près du mur à photographier avec le flash que l'on déclenche plusieurs fois pour couvrir toute la surface visée.

6.4.3 Cartographie rapide: Dans l'étude du tunnel du métro, nous avons mis au point et utilisé une méthode simplifiée, étant donné que nous ne disposions d'aucun budget. Elle retient les principaux éléments de la méthode exposée en 6.4.1.

Par cartographie rapide nous entendons un relevé schématique des faits saillants visibles dans le roc des fouilles et leur mise en plan à une échelle de 80 pieds au pouce ($\sim 1: 1000$) dans le carnet de note. Les données sont ensuite présentées à une échelle plus réduite (100 ou 200 pieds au pouce) afin de pouvoir visualiser des longueurs importantes

de tunnel. La figure 30 présente un exemple de cette cartographie géotechnique. Dans les faits saillants, nous avons retenu de façon générale:

A - La géologie simplifiée : i.e. description mégas-copique du roc, des intrusifs (dyke et filon-couche qui sont systématiquement échantillonnés pour étude ultérieure).

B - Les diaclases majeures: leur direction et pendage n'est pas mesuré cependant: seule leur trace sur les murs et la voûte est reportée de façon schématique sur le plan.

C - Les venues d'eau et les zones humides : cette indication est valable pour le jour du relevé et peut varier selon la saison.

D - Le pourcentage de contrôle des faces par les diaclases : cet estimé à 10 % près donne le rapport de la surface formée par le système des diaclases naturelles préexistantes, sur la surface totale de la face considérée (mur gauche, voûte, mur droit).

E - La rugosité du profil : donne l'amplitude du relief formé par le sautage sur la face considérée; la rugosité du profil dépend surtout de la qualité de la méthode d'abattage ainsi que de l'orientation et de la densité des diaclases.

F - Le type de soutènement : est décrit rapidement par un symbole - Ex: B5B signifie "boulons espacés à tous les cinq pieds".

Ce type de relevé rapide constitue le minimum souhaitable à réaliser comme cartographie. Il a été effectué par une personne seule sur plusieurs segments importants de la ligne 1 Est du métro en cours de construction. Le relevé effectué avec comme instruments le carnet de note et le marteau de géologue est complété par des photographies en couleurs et en noir et blanc à des endroits stratégiques reportés sur les plans (partie du haut sur la fig. 30).

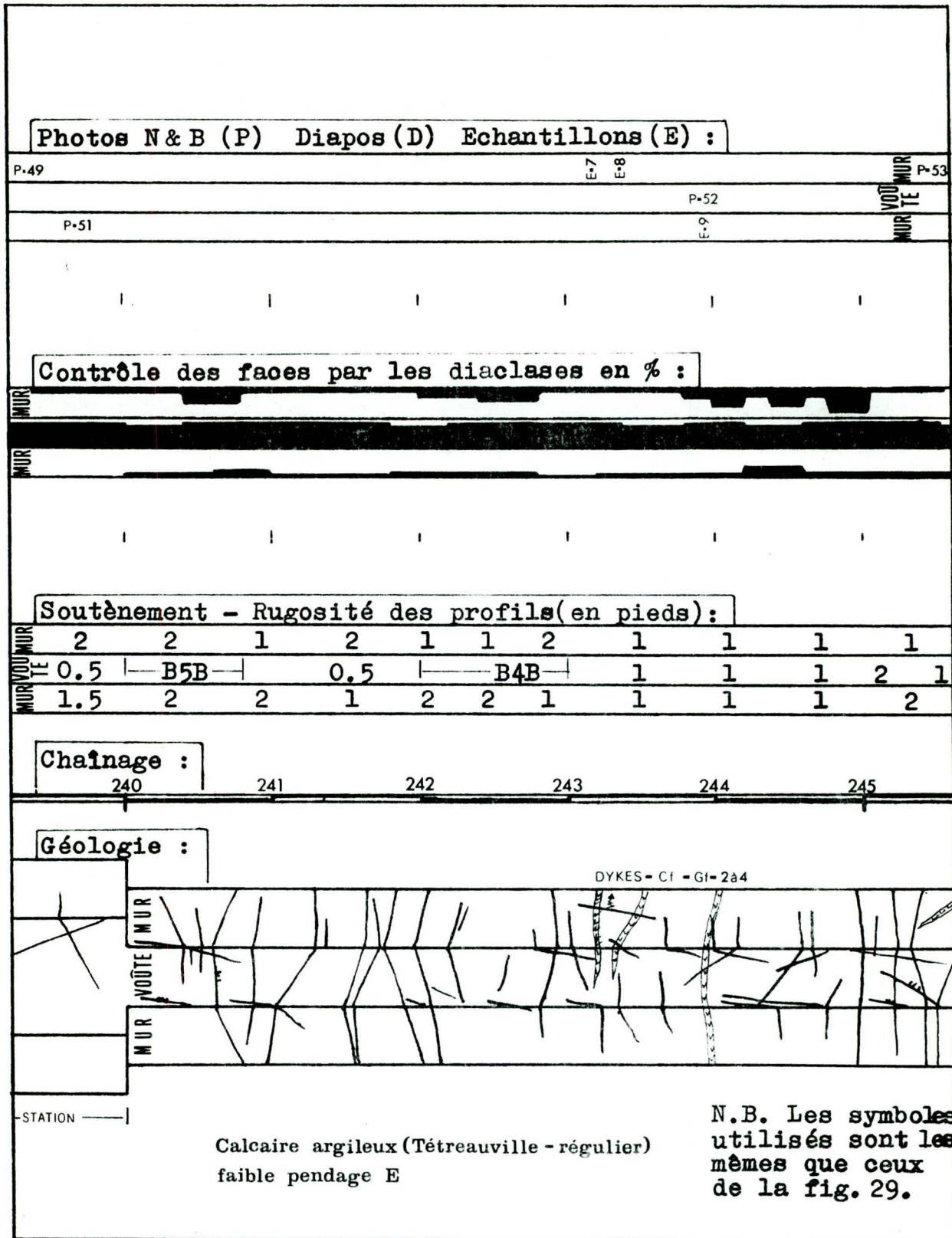


Fig. 30 - Exemple de cartographie géotechnique d'une section de tunnel du Métro (Ligne 1 Est).

La cartographie géologique rapide ou minimale ne peut être considérée suffisante cependant pour les secteurs où la géologie se révèle plus complexe (zone de faille ou de contact), ou encore là où les ouvrages imposent au rocher des conditions particulières de contraintes, comme par exemple dans les blocs de rocher compris entre les stations et les ouvrages adjoints. Il serait très souhaitable d'effectuer un relevé détaillé à plus grande échelle, en mesurant de façon exacte les accidents structuraux (position, direction et pendage des diaclases, des lits argileux mous, des intrusifs altérés). La cartographie détaillée nécessite une étroite collaboration entre le maître d'œuvre et l'équipe qui effectue le relevé: cette équipe peut être constituée d'un géologue et d'un assistant. Le temps requis pour un relevé détaillé est de quatre à dix fois le temps consacré au relevé rapide, mais c'est un investissement modeste par rapport au coût des retards ou des accidents de travaux qu'il peut prévenir.

VII - HYDROGÉOLOGIE DANS LA RÉGION DE MONTRÉAL

7.1 INTRODUCTION

La nature, les fluctuations, positions et écoulement des nappes d'eau souterraine de Montréal ont fait l'objet de très peu d'études jusqu'à maintenant. La plus complète à notre avis remonte au début du siècle (Cumming, 1917). Clark (1952) la commente en une page dans son rapport sur la géologie de la région de Montréal; le même texte est repris dans l'édition de 1972.

Une étude hydrogéologique complète serait pourtant utile à plusieurs points de vue: utilisation industrielle, travaux de génie, contrôle de la pollution, des dépotoirs, de l'aménagement.

7.2 UTILISATION INDUSTRIELLE DE L'EAU SOUTERRAINE

Pour des besoins précis et en raison de leur alcalinité, température et composition, certaines industries puisent l'eau en grande profondeur plutôt que d'avoir à traiter l'eau fournie par l'aqueduc municipal. En 1915, il y avait déjà 179 puits d'un débit total de 7 millions de gallons par jour, alimentant principalement les brasseries, les industries alimentaires ainsi que certains besoins de réfrigération (Cumming, 1917). Il serait intéressant que les chiffres se rapportant à l'exploitation de cette ressource naturelle soient publiés au même titre que les autres matières premières tirées du sous-sol. L'eau des nappes profondes n'est ni inépuisable ni à l'abri des contaminations. Seule une étude exhaustive permettrait de voir si l'on en fait un usage rationnel.

7.3 RABATTEMENTS DE NAPPE DANS LES TRAVAUX DE GÉNIE CIVIL

La nappe peu profonde ou superficielle, celle qui se situe dans les dépôts meubles et les premiers pieds du roc fissuré, est rabattue de façon permanente ou temporaire par les travaux d'excavation. Ces rabattements peuvent entraîner une consolidation des dépôts par l'augmentation de la contrainte effective.

On trouvera une bonne discussion théorique et pratique du phénomène dans les textes de Ballivy (1973), Josseaume (1968) et Grube (1972).

À Montréal, certains tassements importants ont endommagé des immeubles avoisinants et ont donné lieu à des réclamations. Bien que les articles 7-6 à 7-8 du règlement municipal (Ville de Montréal, 1948) fassent état de la nécessité de la protection de la propriété, ils l'expliquent en termes de risques de glissements, d'étayage des fouilles et ne disent rien sur les rabattements de nappe.

Une étude hydrogéologique d'un site de construction où la nature des dépôts fait craindre un risque de consolidation, devrait comprendre l'installation de piézomètres et la mesure des niveaux statiques avant et pendant les travaux d'excavation. Ballivy (1973) recommande en plus au projeteur qui veut se pré-munir contre les réclamations, de:

- 1e) définir la zone d'influence possible où les rabattements risquent d'être significatifs,
- 2e) étudier toutes les conditions de fondation des édifices existants dans cette zone et voir si son design ne devrait pas être modifié au cas où il risquerait de leur faire subir des dommages (tassements, pourrissement des pieux de bois si la nappe est abaissée ...etc.),
- 3e) effectuer, avant les travaux, un relevé photographique des édifices et structures dans la zone d'influence, spécialement si les immeubles montrent des signes extérieurs de dommage ou de fissuration, et prouver ainsi qu'ils ne résultent pas des travaux qui suivront,
- 4e) procéder à des relevés topographiques précis en installant au besoin des repères de tassement.

7.4 POLLUTION DES NAPPES SOUTERRAINES

Il est important d'avoir une connaissance précise sur les écoulements, leurs variations et sur la qualité des eaux pour l'ensemble du territoire de l'agglomération montréalaise. Sans

ces données de base, les mesures isolées n'ont que peu de valeur parce qu'elles sont difficilement interprétables.

Une réglementation efficace doit pouvoir s'appuyer sur une étude hydrogéologique régionale et des mesures de contrôle bien établies.

L'enfouissement sanitaire des déchets, que l'on semble préconiser actuellement comme remède aux dépotoirs traditionnels des petites municipalités, ne devrait pas se faire sans une étude hydrogéologique du site choisi. Aucune partie du terrain ne doit pouvoir communiquer avec des formations perméables. Les étendues d'argile marine ou de till dense peuvent convenir dans bien des cas. Les conditions hydrogéologiques d'exutoires se prêtent évidemment mieux à un contrôle, que les zones de recharge.

La technologie de l'élimination des déchets est actuellement en voie de perfectionnement. Les normes qui la régissent tendent à devenir de plus en plus précises; l'installation d'une décharge contrôlée nécessitera à l'avenir des études du site encore plus poussées. Il ne suffira pas d'utiliser un quelconque terrain imperméable et de respecter la norme actuelle de 550 mètres de distance minimale avec le puits d'eau potable le plus rapproché (Tremblay, 1972). Le site doit permettre une décomposition efficace et sécuritaire du type de déchets enfouis. La réutilisation subséquente du terrain dépendra beaucoup de l'opération de la décharge, surtout de la vitesse de la décomposition et de degré de compactage de chaque couche.

Dans l'étude d'un site, on étudiera la perméabilité des matériaux qui serviront à recouvrir le dépotoir en fin de journée, ce qui donnera un estimé de la quantité d'eau des précipitations qui pourra s'infiltrer. Cette eau de lessivage doit avoir un exutoire contrôlé après filtration dans le sol sur une courte distance.

L'établissement d'une décharge dans des roches carbonatées fissurées ou karstiques ne peut jamais être une solution acceptable. Les déchets solides ou liquides accumulés dans d'anciennes carrières peuvent créer une pollution qui s'étend sur plusieurs centaines de mètres; lorsque la nappe polluée s'infiltra dans un

réseau karstique, le phénomène devient pratiquement incontrôlable.

7.5 INFILTRATIONS DANS LES EXCAVATIONS

L'examen des mesures d'un relevé hydrogéologique en relation avec le diagramme des précipitations annuelles (fig. 31) devrait permettre de prédire les débits d'eau qui risquent de s'infiltrer dans une fouille pendant la période de construction. Dans quelques fouilles d'une dizaine de mètres dans le centre-ville, on a constaté que ce problème n'avait que peu d'importance, étant donné que les débits pompés dépassaient à peine la quantité d'eau reçue sous forme de précipitations. Les excavations plus profondes comme l'échangeur de la rue Université, et les tunnels qui descendent sous le niveau du fleuve ou de la rivière Des Prairies (ex. la ligne 4 du métro), enregistrent des débits plus importants. Ces constatations nous amènent à dire que la nappe souterraine des dépôts meubles et des premiers pieds de roc fissuré est relativement peu importante, parce que très mal alimentée. L'urbanisation d'un territoire produit une imperméabilisation à 80 % du sol en raison des constructions, pavages et drains superficiels, selon Arnould (1969). Les quatre cinquièmes des eaux de pluie sont collectées et canalisées dans le réseau d'égouts et ne retournent donc pas à la nappe phréatique, sauf par des fuites accidentelles dans un égout collecteur.

Dans les relevés préliminaires du métro, il est de pratique courante de mesurer le niveau d'eau vingt-quatre heures après l'achèvement d'un forage. Il n'est pas possible de dire à coup sûr si cette procédure permet de mesurer un niveau d'eau à l'équilibre. Jusqu'à maintenant, on possède peu de relevés plus élaborés permettant de suivre les variations de niveau de mois en mois; cette dépense n'apparaît pas encore rentable en génie civil urbain. Pour ne pas négliger malgré tout la somme importante de mesures de niveau statique dans les différents projets que nous avons étudiés, nous donnons à la figure 32 une carte montrant la position relative de la nappe par rapport au roc, sur l'étendue des excavations étudiées.

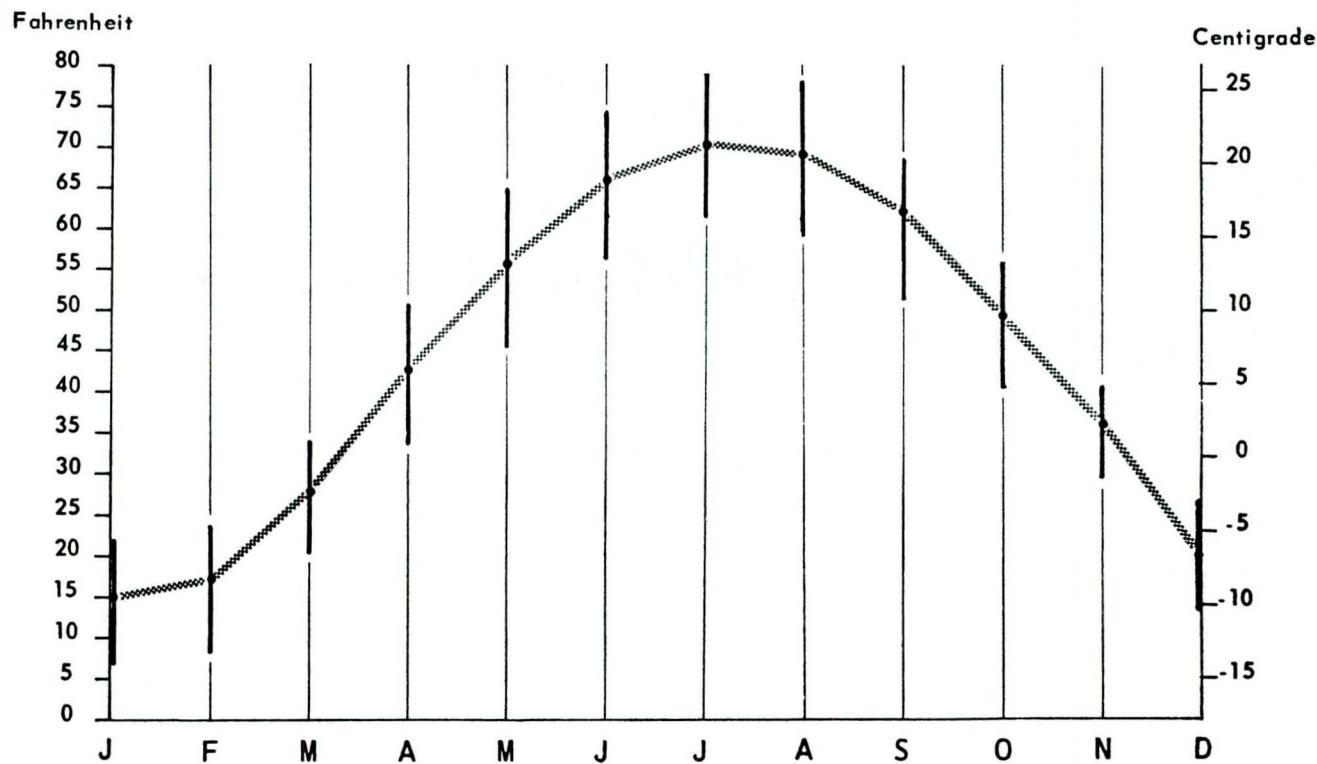
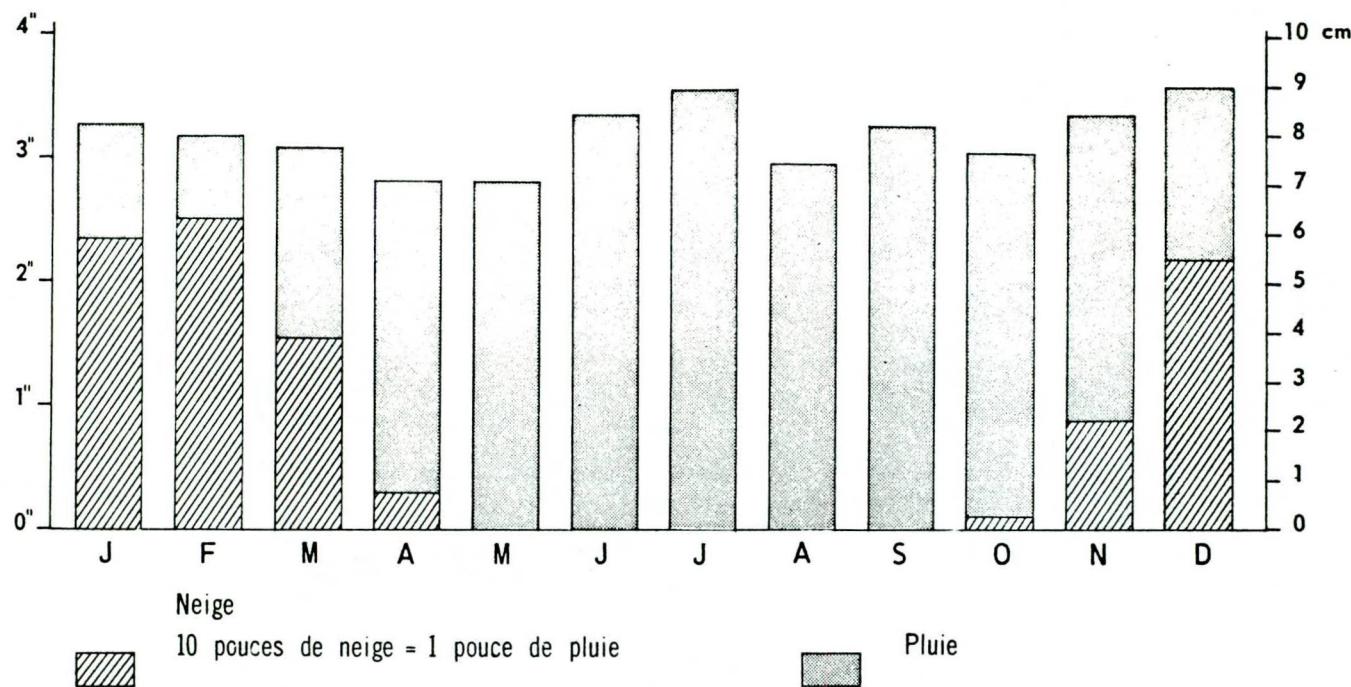


Fig. 31 - Diagrammes des moyennes mensuelles des précipitations (en haut) et des températures (en bas) pour Montréal. - Tiré de Ritchot, 1972.

Pour une grande partie de l'île où le roc se situe à une élévation supérieure à 20 mètres, le niveau statique s'établit, à un ou deux mètres près, à la position du contact rocher-dépôts meubles. La nappe souterraine circule sur et dans la tranche du substratum rocheux qui est fissurée. Les débits que peuvent fournir cette nappe seront toujours faibles, sauf dans les secteurs où la fracturation du roc est anormalement élevée, comme par exemple dans les zones de failles et les écailles glaciaires. Ce dernier type de roc fracturé se retrouve au parc Maisonneuve (Durand et Ballivy, 1974); au cours de l'excavation des fondations du vélodrome, on a pu observer des fractures ouvertes de quelques pouces à quelques pieds. La perméabilité d'un tel rocher est évidemment énorme.

7.6 KARSTS

Une forte concentration des écoulements souterrains se retrouve également dans les boyaux karstiques. La détection des cavités souterraines est importante en génie civil à cause des infiltrations en grands débits qui peuvent survenir lorsqu'on les recoupe par des travaux d'excavation. Leur présence non détectée sous une fondation peut aussi causer des ennuis. Nous n'en connaissons qu'un seul exemple dans l'île, à Ville St-Léonard: en creusant les fondations d'une maison dans un développement domiciliaire, le constructeur a rencontré une petite caverne (1x3x10 m) à 600 mètres du "trou de fée" déjà bien connu dans cette localité (voir au haut de la fig. 32). Les deux cavernes constituent en fait une portion d'un ruisseau souterrain qui s'écoule vers le nord en suivant les lits du synclinal d'Ahuntsic. Le Trenton de l'île ne semble pas contenir d'autre karst significatif.

Il est très difficile de détecter des petites cavités. La probabilité d'en rencontrer accidentellement est heureusement très faible: environ une caverne pour 1000 km² dans

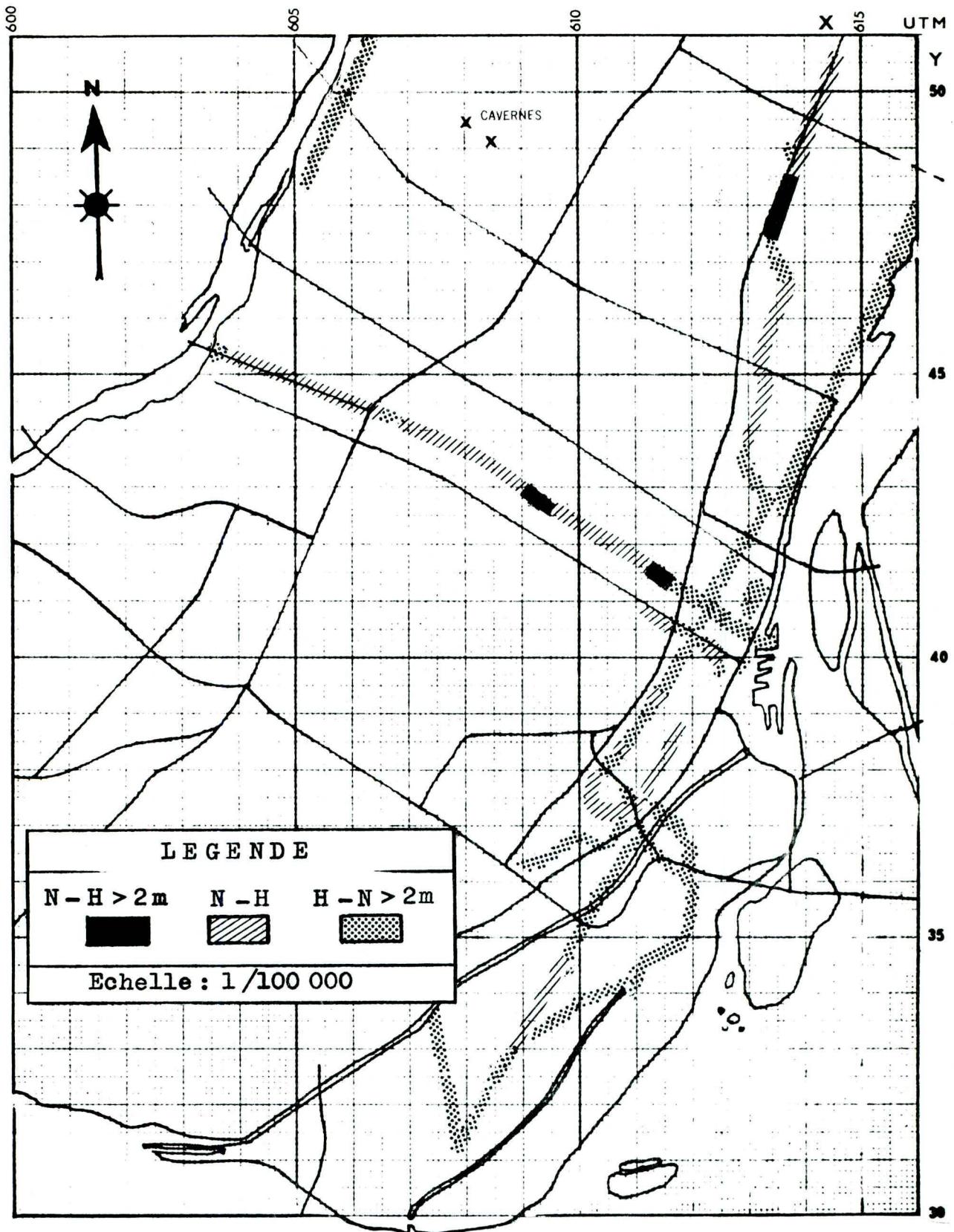


Fig. 32 – Position relative du niveau statique (N) par rapport à la profondeur du roc (H).

la région de Montréal. Cela ne signifie nullement que le climat soit défavorable à la formation de karst; bien au contraire le taux de dissolution du calcaire dans la plaine du St-Laurent se compare aux taux mesurés dans les régions les plus karstifiées du monde. Aux environs de Montréal, ce taux est de $120 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}^*$; par comparaison dans les montagnes du Karst en Yougoslavie (pays qui a donné le nom au phénomène), le taux moyen n'est que de $60 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{an}$. La température de l'eau souterraine contrôle de façon dominante la valeur du taux. Les eaux froides et abondantes comme celles de la fonte des neiges au printemps peuvent se charger au maximum en CO_2 et sont en fait responsables de la valeur élevée de l'indice.

Le petit nombre de cavernes connues et leur faible dimension dépend de l'absence de reliefs importants dans les plateaux calcaires et de la grande jeunesse des cavernes existantes; une étude de J. Corbeil (1958) montre que les grottes actuelles ont eu une vitesse de formation très rapide (3000 ans par exemple pour l'âge de la caverne de Rosemère mentionnée au paragraphe 3.1.6). Les grottes plus anciennes que le Pléistocène ont été oblitérées par les glaciations, et les longues périodes où le permafrost a régné en ont empêché la formation.

* Pour visualiser ce taux, disons qu'il pourrait produire une érosion uniforme, sur toute l'étendue considérée, de 12 centimètres par millénaire.

VIII - FICHIERS ET CARTES GÉOTECHNIQUES

8.1 INTRODUCTION

Les derniers congrès géologiques internationaux ont été l'occasion de discuter et de comparer les travaux effectués un peu partout dans le monde, pour le stockage et le traitement de l'information géologique sur ordinateur. Les données géotechniques ne font pas exception à la règle. Nous allons discuter en termes généraux des conditions requises pour que l'on puisse dépasser le stade expérimental actuel.

Il n'est pas nécessaire d'utiliser un ordinateur pour établir une carte géotechnique, mais nous verrons comment ces deux questions sont complémentaires; c'est pourquoi nous discuterons des fichiers et des cartes géotechniques dans un même chapitre. Les cartes géotechniques sont nées du besoin pressant de combler le fossé entre les études des spécialistes (géologues, géotechniciens, hydrogéologues) et les besoins des aménagistes, urbanistes, constructeurs, administrateurs municipaux ... etc. Les cartes apparaissent comme le mode de présentation le mieux adapté des données relatives au terrain. Il est plus difficile cependant d'y représenter la valeur d'un paramètre à différentes profondeurs. La densité et la complexité de l'information est inversement proportionnelle à la clarté du document.

8.2 TYPES DE CARTES

Au cours des dernières années, le mot géotechnique a été accolé à divers types de cartes portant des indications autres que celles habituellement données sur les cartes géologiques. Lorsqu'une carte est orientée vers un but ou un objet donné, mieux vaudrait la désigner comme telle: ex. carte de dépôts meubles, carte des épaisseurs des morts-terrains, carte d'aptitude à l'aménagement urbain ... etc. Nous pouvons regrouper les documents en trois grands types:

A - Les cartes de base ou documents primaires comprennent des cartes de paramètres: ex. épaisseur des dépôts meubles, profondeur de la nappe. Les variations complètes des valeurs peuvent être présentées par des courbes d'isovaleurs; ou encore des tranches critiques de la variable peuvent être distinguées par des figurés différents. Les cartes d'objets sont également des cartes primaires; elles donnent la position des objets, des formes ou des formations par le tracé de leur contour en surface: ex. cartes géologiques (Clark, 1959 et 1972), cartes géomorphologiques, cartes des dépôts non consolidés (Prest et Hode Keyser, 1962).

Lorsqu'on rassemble dans un même dossier les principales cartes primaires, on réalise un document très utile qui permet de comparer les caractéristiques physiques du territoire. Le Service d'Urbanisme de la ville de Montréal les a compilées sur sept cartes (géologie du roc, des dépôts meubles, géomorphologie, topographie, pentes, drainage et couvert forestier) pour la grande région métropolitaine. L'échelle des cartes, 1: 300 000, ne permet pas cependant de les utiliser concrètement; leur but est avant tout de vulgariser et de susciter l'émulation nécessaire à la poursuite d'études plus poussées chez les urbanistes et les aménagistes (Ville de Montréal, 1966).

Un document du même type, quoique plus élaboré et détaillé, présente une vingtaine de cartes et coupes géologiques des environs de Saskatoon (Christiansen, 1970). Les échelles des cartes, qui sont malheureusement un peu trop disparates (1/500 000, 1/330 000, 1/250 000, 1/63 360) ne visent pas non plus une utilisation précise par les projeteurs. Ce document admirablement bien présenté sert à vulgariser des données techniques des terrains d'une vaste région et pourra contribuer à guider les grandes lignes de son développement.

B - Les cartes composites ou documents secondaires utilisent les superpositions de symboles, figurés, hachures ou couleurs pour présenter sur une même feuille ou sur une série superposable, plusieurs données choisies comme importantes pour la

géotechnique, l'aménagement, les risques naturels ... etc. C'est ce type de document que l'on peut appeler carte géotechnique. Son but est toujours de présenter ensemble les principales données de base et/ou de paramètres calculés à partir de données de base, afin de faciliter leur intégration et synthèse par l'utilisateur de la carte et d'orienter ses décisions. On voit tout de suite que cette fonction suppose plusieurs choses:

- Toutes les données pertinentes à l'orientation de la décision doivent être exprimées sur la carte, ou la série de cartes.
- L'échelle du document doit être adaptée au problème à résoudre (trop grande elle nuit aux synthèses, trop petite elle est imprécise).
- Les coupures dans la valeur d'un paramètre pour passer d'un figuré à l'autre doivent être adaptées aux problèmes géotechniques courants; par exemple dans l'étude des fondations, on décide de représenter quatre classes de profondeur du roc; les coupures à 2, 6 et 18 mètres seront plus utiles que le choix de 8, 16 et 24 mètres par exemple.

L'élaboration de cartes géotechniques demandent un travail coordonné de plusieurs spécialistes des sciences de la terre; elles sont destinées à d'autres spécialistes qui n'ont pas toujours une formation adéquate en géologie. L'expérience des cartes réalisées en Europe (Arnould et Vantroys, 1970; Cratchley et Denness, 1972; Ghiste, 1970; Karacsonyi et Remenyi, 1970; Wilson, 1972), en Australie (Branagan, 1972) et en Amérique (Legget, 1972; Moser, 1972; Rockaway, 1972), pour n'en citer que quelques exemples, montre que ces documents demeurent toujours complexes malgré leur but initial de clarifier le problème. Il y a un certain risque à les diffuser trop largement auprès de personnes qui n'ont pas toujours la formation requise pour éviter d'en faire des utilisations erronées.

C - Les cartes d'aménagement ou documents tertiaires

répondent directement aux questions de l'utilisateur.

Lorsqu'on arrive à affecter chaque paramètre de base d'un coefficient d'influence, on peut réaliser une intégration des principaux facteurs et présenter le résultat sous forme de carte. Par exemple pour caractériser l'aptitude des terrains à supporter un développement urbain ou industriel, on intègre selon certains critères les facteurs topographiques, morphologiques, hydrogéologiques et géotechniques. Le résultat de cette sommation de paramètres physiques est une carte comportant trois à dix figurés ou couleurs qui donnent selon l'échelle relative détaillée dans la légende, un coefficient d'aménagement (Humbert, 1970). On peut tirer ainsi des données du dossier géotechnique, plusieurs cartes spécialisées délimitant selon une échelle relative, les zones considérées, au point de vue de leurs caractéristiques physiques, comme très favorables, favorables, peu adaptées, à proscrire ... etc. pour tel et tel type d'aménagement (ex. carrières, maisons unifamiliales, enfouissement sanitaire, agriculture, constructions lourdes ... etc.).

C'est ce type de cartes que réclament les aménagistes et les législateurs, sans doute parce qu'elles leur permettent d'appuyer leurs décisions sur un document écrit. Les cartes d'aménagement sont la meilleure ou la pire des choses: la meilleure si elles synthétisent sous une forme claire et accessible des données fiables et intégrées de façon prudente; la pire des choses cependant si elles se fondent sur des informations trop incomplètes et extrapolées de façon abusive.

Une fois qu'on a représenté sur une carte les capacités relatives des terrains au point de vue de leurs propriétés géotechniques ou physiques, l'urbaniste peut poursuivre son étude en tenant compte des facteurs économiques, politiques et sociologiques qui orientent les décisions finales. La carte d'aménagement ne doit jamais dire où construire tel ou tel aménagement, mais simplement délimiter les secteurs pouvant le recevoir.

8.3 PROBLÈMES DE PRÉSENTATION GRAPHIQUE

Même si nous avons dit que les cartes apparaissent comme l'outil privilégié pour la présentation des données de terrain, il existe un sérieux problème pour donner une image claire de 5, 6 ou 8 couches superposées. Une des solutions préconisées, en Europe surtout, (voir l'article de A. Peter, 1966, pour un historique et une description complète des méthodes) utilise un mode de représentation par bandes de couleur (fig. 33) superposées. Les bandes verticales décrivent la première couche du terrain, les deux bandes horizontales les deux couches suivantes. La nature des formations leur épaisseur, leur granulométrie, leur compressibilité peuvent être présentées par la couleur, la largeur, la trame des couleurs, des symboles en surcharge... etc. Des courbes de niveau de teinte bleue identifient la position de la nappe d'eau.

La représentation par bandes est limitée à trois ou quatre couches; lorsque le terrain en possède plus, on doit utiliser deux cartes superposables. On préfère en général, présenter sur deux cartes distinctes les dépôts meubles et la roche consolidée. Comme la carte imprimée couvre tout le territoire étudié, mais pas nécessairement avec une densité uniforme de points de mesures, il s'avère nécessaire de fournir également une carte de documentation où sont reportés tous les forages, échantillonnages, essais, mesures ayant servi à la compilation.

L'élaboration d'une série de cartes superposables, traitant tous les aspects de la géotechnique requiert passablement de temps à une équipe pluridisciplinaire. Ces documents se sont révélés particulièrement utiles pour l'aménagement de villes nouvelles, par exemple Cergy-Pontoise et Evry en France (Simard, 1973; Arnould et Vantroys, 1970) ou des projets spéciaux comme le nouvel aéroport de Mirabel (St-Onge et al., 1973); ils ne dispensent pas cependant les projeteurs de vérifier les conditions détaillées du sol à chaque site en vue d'y construire.

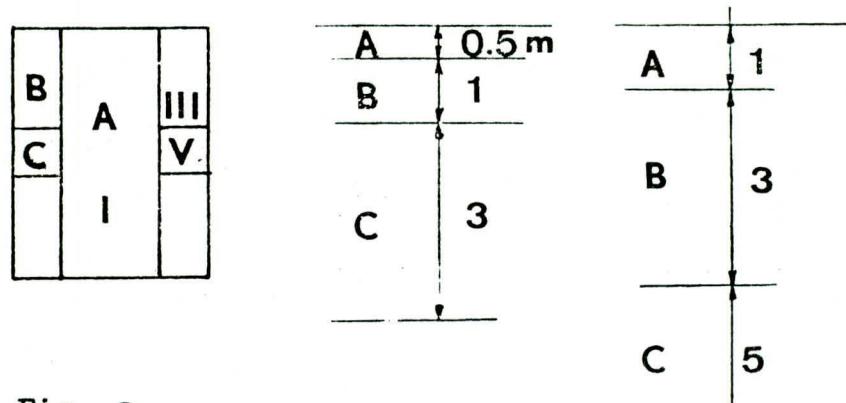


Fig. a

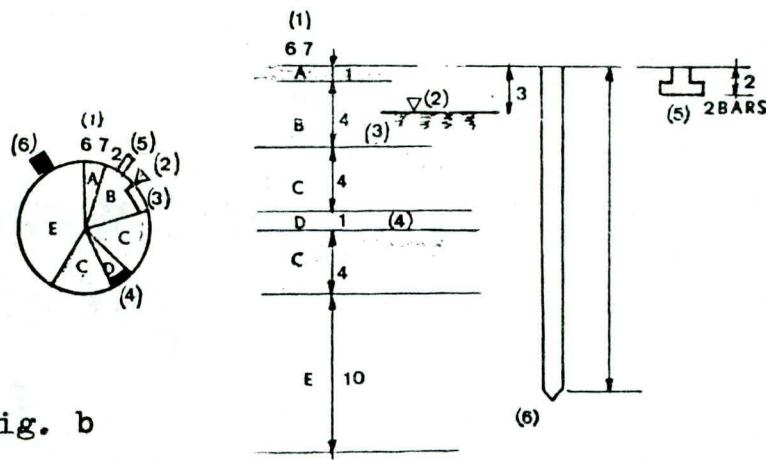


Fig. 33 - Méthodes de présentation graphique pour les cartes géotechniques.

- Représentation par la méthode des bandes d'un terrain à trois couches; les chiffres romains identifient les classes d'épaisseur (I pour 0.5 à 1 m, II pour 1 à 3 m, V pour 3 à 5 m...etc.)
- Représentation par la méthode du cadran où chaque division horaire vaut 2 m; de plus on porte les indications suivantes:
 - (1) élévation du terrain
 - (2) niveau d'eau dans le forage
 - (3) couche boulante
 - (4) couche compressible
 - (5) niveau conseillé pour les semelles (avec en bar, la capacité portante)
 - (6) niveau conseillé pour les pieux.

(Tiré de Ghiste, 1972)

Les pays de l'Est où le critère rentabilité immédiate n'a pas la même résonnance qu'ici, ont présenté bon nombre de ces documents à toutes les échelles (Churinov et al., 1970; Malinowski, 1970). La principale pierre d'achoppement, selon nous, demeure la mise à jour. Les cartes peuvent devenir périmées quelques années après leur parution, faute de ne pas représenter les données les plus récentes, qui sont souvent les plus intéressantes. Dans les cas de projets d'aménagement nouveau, où l'on consacre de fortes sommes pour l'évaluation systématique d'un territoire, l'acquisition des données est suffisamment homogène et complète pour que l'on puisse réaliser un document complet et "définitif" servant de référence à la planification subséquente.

Pour les villes déjà établies, la collecte des informations géotechniques se fait de façon continue; en aucun moment on ne peut dire que l'on possède toutes les données définitives. La mise à jour doit pouvoir s'effectuer facilement. Une solution élégante proposée par Ghiste (1972) résout ce problème, ainsi que celui de la présentation d'un grand nombre de couches. Plutôt que de présenter une carte classique où les figurés ou les couleurs couvrent la totalité de la feuille, Ghiste ne reporte les données qu'aux endroits où elles ont été mesurées; sa carte géotechnique remplace en même temps la carte de documentation. L'épaisseur et la nature des couches en un point est représentée par les secteurs d'un cercle où chaque division horaire correspond à deux mètres (fig. 33 b). Un cercle complet permet donc de faire figurer toutes les couches comprises entre 0 et 24 mètres (79'). Pour adapter cette technique aux besoins d'ici, nous proposons de prendre 3 m (10') par division horaire, ce qui revient à une échelle $10^0=1\text{ m}$ (fig. 34). La profondeur maximale pouvant être représentée sur une circonférence sera 36 m (118'); 95 % des sondages de génie civil entrent dans cette catégorie. S'il s'avérait nécessaire à l'occasion de représenter les matériaux au delà de cette valeur, nous proposons de tracer tout simplement

une deuxième circonference à l'intérieur de la première (ex. jusqu'à 47 m sur la fig. 34a). Des symboles supplémentaires indiquent l'élévation du départ du forage, le niveau statique de la nappe, les pertes d'eau au forage et toute autre information jugée utile.

La figure 34 b représente les informations que l'on peut reporter sur une carte "documentation": no de forage, dates d'exécution, échantillons prélevés (trait gras sur la circonference), essais réalisés (dont les résultats sont représentés sur la fig. 34 d), diamètre de la carotte, un second trait un peu à l'intérieur de cercle pour indiquer si elle a été photographiée ... etc. Il est parfois important de présenter graphiquement un indice de la qualité du roc, comme le R.Q.D. ou l'indice proposé au paragraphe 4.3.1, de même que les résultats des essais de pénétration dans les horizons meubles (fig. 34 c) et les mesures effectuées en laboratoire (fig. 34 d).

A vrai dire tous les résultats que l'on porte habituellement sur des coupes ou diagrammes, peuvent être transposés sur des tirages de la carte. L'interprétation visuelle des données peut paraître complexe à première vue, mais elle est en fait plus simple que toutes les autres méthodes visant le même but. L'exemple donné (fig. 35) d'un secteur dans le nord de l'île de Montréal recoupé par la faille du Bas-De-Ste-Rose (BDSR) montre qu'en chaque point exploré on peut voir la succession des couches et leur épaisseur. On peut également suivre assez facilement leur variation dans l'espace sans qu'aucune coupe ne soit nécessaire. Lorsque les niveaux de départ, en général la cote du terrain, sont très différents, on peut tourner les cercles de façon à ce que les mêmes élévations se retrouvent partout dans la même orientation par rapport au bord de la carte. Il n'est plus nécessaire alors d'indiquer l'élévation du terrain, contrairement à notre exemple (fig. 35). Un dernier raffinement très utile parfois, consiste à utiliser deux ou

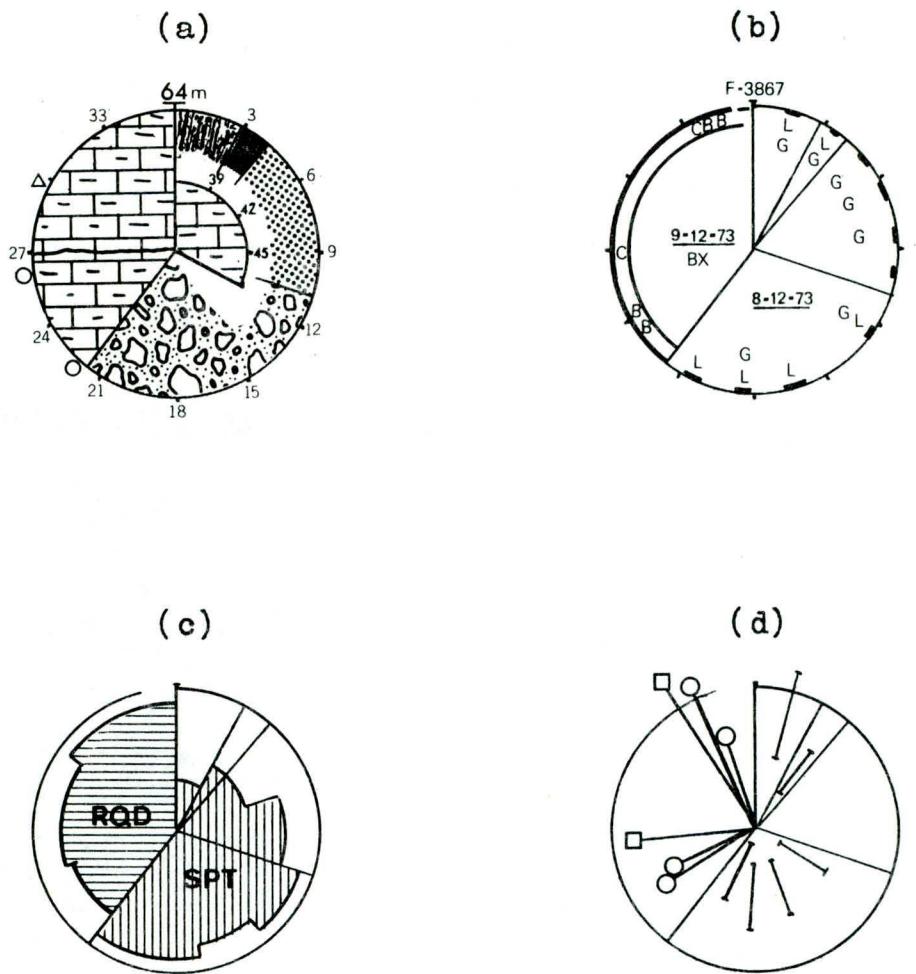


Fig. 34 Méthode du cercle pour la représentation de données de sondage ; échelle $10^{\circ} = 1 \text{ m}$

- a) Coupe géologique
- b) Données pour la carte DOCUMENTATION
- c) Résultats de battage - Mesures de R.Q.D.
- d) Mesures de laboratoire

N.B.	Niveau statique	(▽)
	Perte d'eau au forage	(○)
	Limites d'Atterberg	— L —
	Mesure de granulométrie	G
	Essai brésilien	— O —
	Compression simple	— □ —

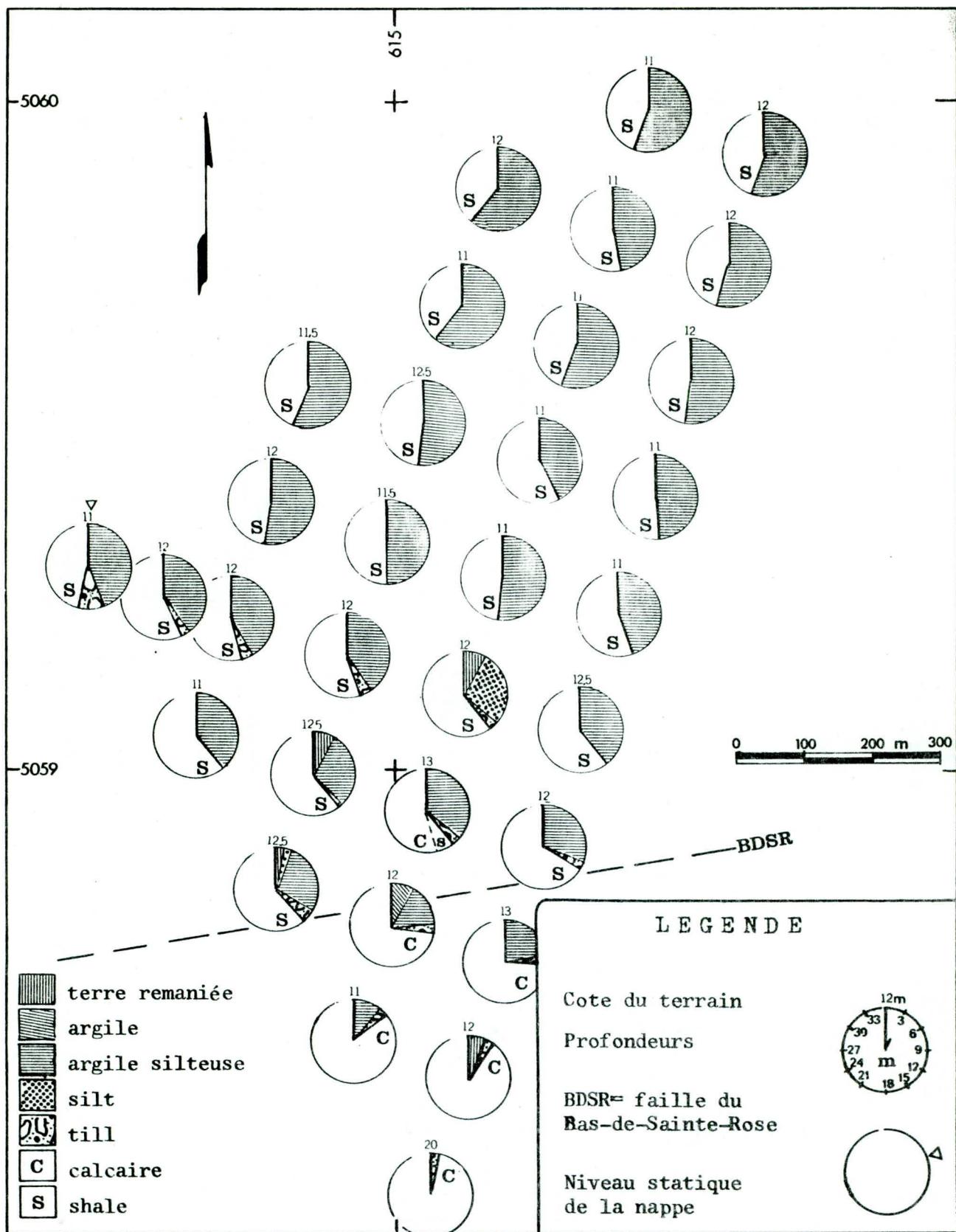


Fig. 35 – Représentation de plusieurs couches du sol par la méthode des cercles.

trois tailles de cercles pour représenter de façon différente des données compilées sur un ou plusieurs forages, des données très certaines et d'autres plus douteuses.

8.4 FICHIERS

Comme mentionné précédemment, la compilation et la synthèse de la géotechnique à Montréal nécessite un système souple pouvant constamment inclure des données nouvelles. Les quartiers sont depuis longtemps établis, de même que les axes de communications; l'intérêt premier n'est pas d'établir des cartes pour la planification et l'aménagement, mais plutôt de rendre disponible la grande masse des données déjà obtenues.

Actuellement beaucoup de résultats de sondages sont dissimilés chez une foule d'organismes privés et publics. Chaque nouveau projet recommence une partie d'un travail déjà fait. La mise en commun des informations et leur gestion par un service municipal devrait réduire le gaspillage d'énergie et surtout permettre des études beaucoup plus poussées du sous-sol. L'objection de la confidentialité des informations, vis-à-vis les réclamations possibles et les conflits d'intérêts, pourrait être contournée par une réglementation adéquate assurant la non diffusion d'une partie des données pour un délai légal de 5 ans. Rien ne devrait cependant empêcher le traitement de l'information dans l'exécution de synthèses par certains programmes d'exploitation*.

Une fois que tous ses utilisateurs et participants potentiels seront convaincus de l'utilité d'un fichier, le problème n'aura franchi qu'un premier obstacle. Le second est l'établissement d'un consensus minimal dans l'acquisition, la description et la codification de l'information, pour que le système

*La confidentialité bien plus importante des dossiers médicaux des individus, n'empêche pas les synthèses et les compilations statistiques des maladies par groupe d'age, de profession ...etc, qui font progresser les recherches médicales.

soit efficace et rentable. Le système retenu devra également être compatible, autant que possible, avec d'autres fichiers géologiques en usage au pays. L'adoption prochaine du système métrique devrait dès maintenant inciter les géotechniciens à codifier les données dans ce système, quitte à utiliser des programmes de conversion d'ici à ce que son usage exclusif se généralise.

La localisation des données doit également se faire dans le système métrique selon trois axes: X et Y étant déjà indiqués dans le système topographique national selon les coordonnées kilométriques U.T.M. (Montréal est dans la zone géodésique No 18), et Z étant l'élévation topographique au-dessus du niveau moyen des mers (N.M.M.).

Le projet pilote élaboré par Grice (1973) à partir de la mise en fichier de 400 forages du métro, permet déjà d'évaluer la rentabilité théorique d'un tel système par rapport aux méthodes classiques de compilation. Mais tant que l'élaboration de ces systèmes demeure le fait de projets de recherches, le coût réel est sous-évalué et les utilisations pratiques très restreintes. Les projeteurs ne s'adresseront à un fichier que si celui-ci est suffisamment complet pour leur fournir les renseignements qu'ils demandent habituellement, c'est-à-dire des données précises pour des secteurs très limités.

L'autre grande utilité du fichier concerne évidemment les synthèses de paramètres, les compilations statistiques, l'édition automatique de cartes de paramètres. Ce dernier travail est plutôt du ressort des organismes municipaux, gouvernementaux et universitaires intéressés à la géologie appliquée. Il sera normal d'envisager cette partie de la gestion du fichier non pas uniquement en terme de rentabilité immédiate, mais également comme un projet de recherche à long terme entre l'université et les administrations municipales.

IX - AMÉNAGEMENT ET PLANIFICATION

9.1 INTRODUCTION

L'agglomération montréalaise croît et continuera de croître dans les décennies qui viennent, pour atteindre une population estimée à cinq ou six millions d'habitants en l'an 2000, sur un territoire s'étendant à 35 milles à la ronde du centre-ville (Beauregard, 1972). La valeur totale des constructions nouvelles nécessaires à cette expansion doubleront, et plus probablement, tripleront la valeur des immobilisations actuelles. C'est la raison pour laquelle on insiste tant sur la planification et l'aménagement d'un territoire, qui apparaît de plus en plus précieux au fur et à mesure que les espaces et les ressources vierges diminuent.

Au chapitre précédent nous avons dit que les extrapolations abusives à partir des cartes géotechniques pouvaient devenir la pire des choses, si l'on en fait un usage simpliste sans tenir compte des facteurs socio-économiques. L'inverse est également vrai: si les projets de loi en élaboration, qui régiront à l'avenir l'urbanisation, la protection de l'environnement, sont servis par des règlements et des responsables qui ignorent tout des caractéristiques physiques et géologiques des terrains, la communauté entière devra supporter des coûts plus élevés pour les infrastructures, sans parler des risques d'accident.

L'élaboration de cartes d'aménagement à partir des seules données géographiques et géomorphologiques constitue une procédure dangereuse, car elle peut mener à des interprétations complètement erronées des caractéristiques du sous-sol. Même dans le cas d'un développement de structures légères, il est nécessaire de faire une étude géologique-géotechnique de la première tranche de terrain d'environ 30 mètres d'épaisseur. Dans le cas du triste exemple du quartier résidentiel de

St-Jean-Vianney, la couche ultra-sensible du fond du glissement se situait à 25 mètres de profondeur.

9.2 STRUCTURES ET INFRASTRUCTURES URBAINES

Pour vivre et croître, une ville comme Montréal doit pouvoir subvenir à un certain nombre de besoins vitaux, ou fonctions, comme:

a) la fonction logement des individus, à leur domicile et au lieu de travail, les établissements commerciaux et publics, en un mot tous les immeubles du gratte-ciel à la maison privée, nécessitent des espaces (terrains) et des matériaux.

b) la fonction transport: pour vivre on doit circuler dans la ville (rues, viaducs, métros) et pouvoir y accéder (autoroutes, chemin de fer, ports et aéroports); la fonction communications (téléphone, télex...etc.) y est intimement associée.

c) la fonction alimentation et les fonctions corollaires: réseau d'aqueduc et évacuation des eaux usées, distribution de l'énergie électrique et combustible (gaz naturel).

Chacune de ces activités doit être installée au moindre coût, fonctionner longtemps en parfaite sécurité et ne pas affecter défavorablement les autres activités. On voit donc que la planification doit être envisagée dans un ensemble et doit chercher à prévoir des besoins et des situations qui se situent 15 ou 25 ans dans l'avenir. Prenons un exemple dans la fonction logement: un terrain qui peut sembler idéal par son prix et sa situation pour un développement domiciliaire actuel, peut se révéler par la suite très défavorable, donc coûteux, pour l'installation et la réparation des utilités publiques; ou bien encore l'on s'apercevra dix ou vingt ans plus tard que les habitations "gèlent" un important dépôt de matériaux granulaires devenus très rares à ce moment-là.

La planification de l'utilisation de l'espace urbain suppose deux conditions préliminaires: la connaissance du terrain et de ses caractéristiques, et l'ordre de priorité présent et futur des divers besoins de la ville. Nous n'allons examiner que le premier point.

9.3 INFLUENCE DES CONDITIONS GÉOLOGIQUES

Les cartes géotechniques et les cartes des possibilités des terrains à divers aménagements peuvent répondre à la première question. Accompagnées d'un rapport, elles doivent en tout premier lieu définir et situer les risques naturels qui peuvent parfois proscrire toute possibilité pour certains types d'aménagement; ensuite seulement, on peut aborder les questions d'économie et de facilité de construction pour tel ou tel secteur.

9.3.1 Risques naturels:

A - Tremblements de terre: on sait depuis la publication des données séismologiques rassemblées par les observatoires fédéraux, que la région de Montréal se situe dans une zone de séismicité moyenne (fig. 36), c'est-à-dire qu'elle possède une probabilité annuelle de 1/100 de subir un séisme dont l'accélération horizontale serait égale à 1/20 de la valeur de "g". Les tremblements de terres des dernières décennies montrent en fait deux zones où se concentrent les épicentres, la région de Cornwall et celle de Baie-St-Paul, situées en dehors de la région métropolitaine (fig. 37), mais dont les secousses sont malgré tout ressenties. Pour une discussion des causes et des effets des secousses telluriques dans la vallée du St-Laurent, on peut consulter les textes de Leblanc et al. (1973) et David (1966).

L'effet d'une vibration séismique varie grandement à l'intérieur d'une même région; la distribution des intensités ressenties dépend en plus de la distance de l'épicentre, de l'épaisseur et de la nature des dépôts meubles ainsi que de la morphologie du substratum rocheux. L'addition de normes aséismiques dans les codes de la construction impose évidem-

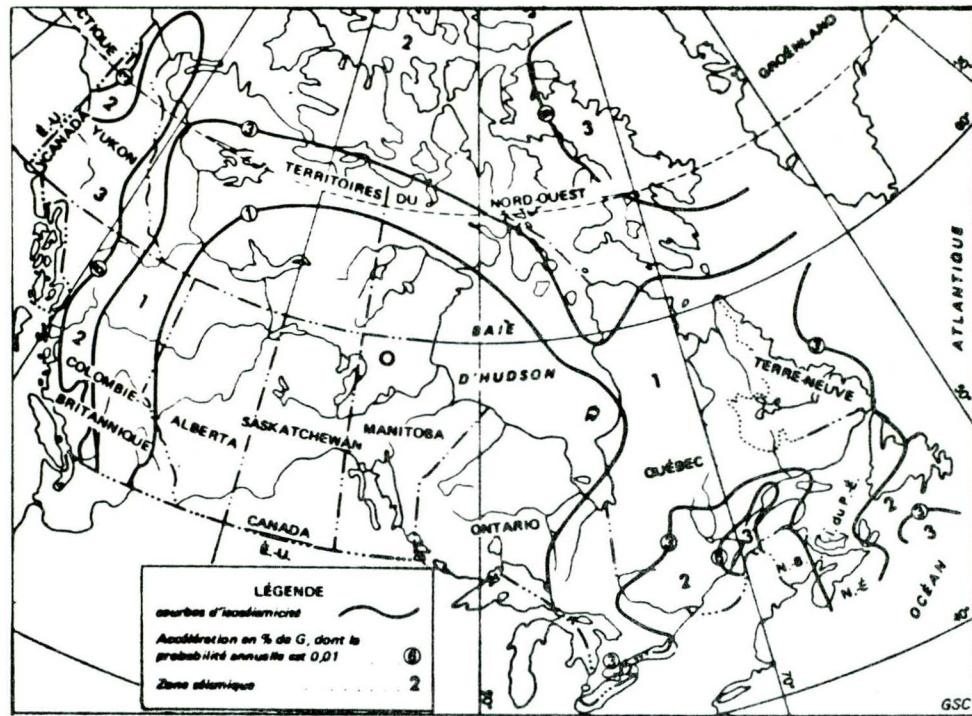


Fig. 36 - Zones séismiques du Canada.

(Tiré de Blais et al., 1971)

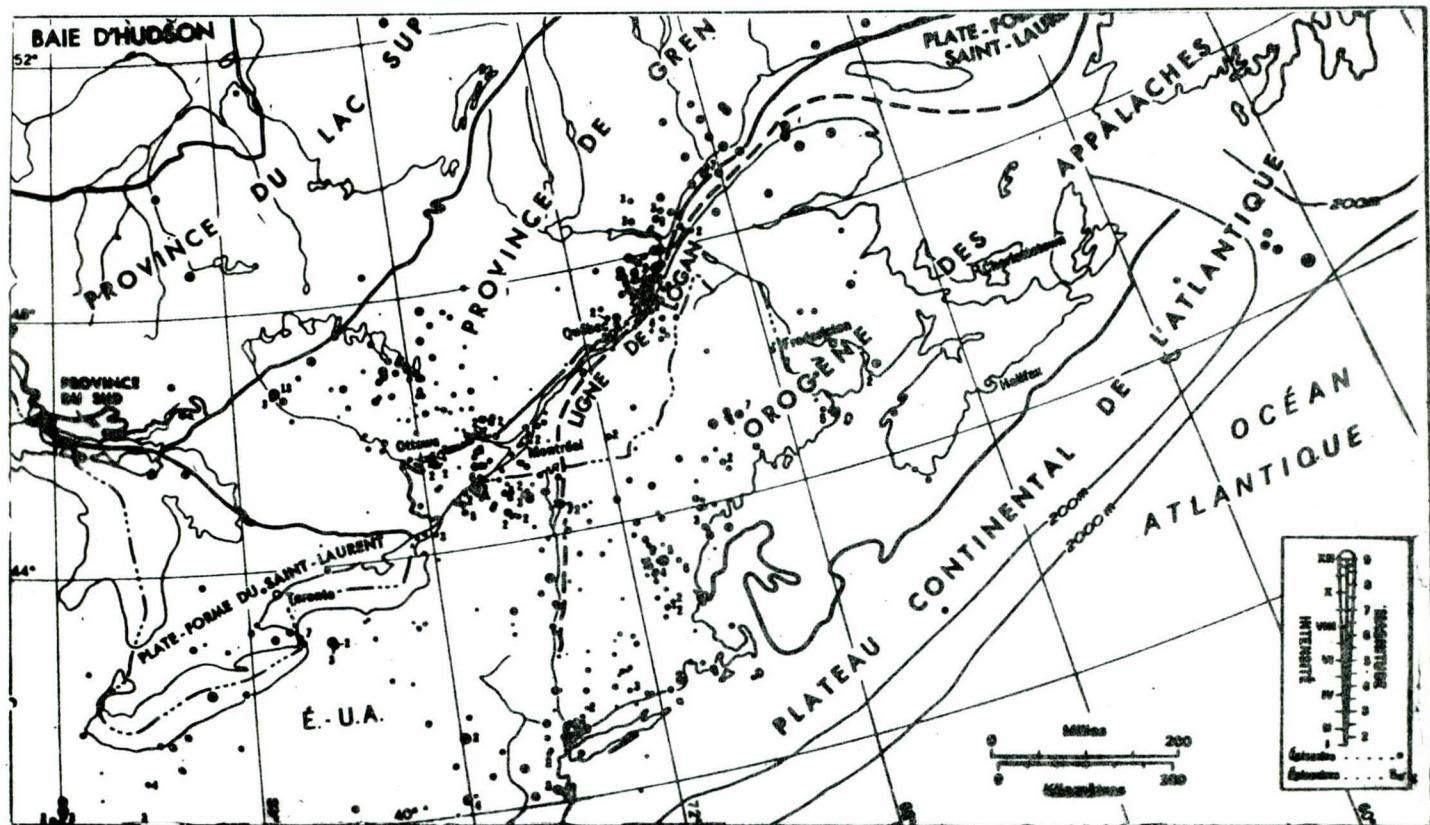


Fig. 37 - Tremblements de terre dans l'est de 1928 à 1957

(Tiré de Poole et al., 1970).

ment des dépenses accrues, spécialement aux fondations. Il serait souhaitable que l'on puisse à l'aide de cartes géotechniques adéquates, moduler les règlements pour les différents contextes de sol; on éviterait ainsi de trop pénaliser l'ensemble de la région par un règlement sévère, ou encore de mal protéger certains secteurs, si la règle uniforme est moins sévère.

B - Zones innondables: on peut raisonnablement prédire les risques de ce type à partir des données géomorphologiques, hydrologiques et hydrogéologiques. Ces données doivent cependant être complétées par des commentaires d'accidents particuliers, comme certaines berges érodables ou en cours d'érosion, l'épaisseur des sédiments au fond des cours d'eau et leur nature, les chenaux enterrés, les nappes d'argile formant des cuvettes étanches ... etc. A partir d'une carte montrant les valeurs relatives de ce risque, on peut choisir un type d'aménagement qui peut s'accommoder d'un risque moyen, ou encore un aménagement qui l'élimine par des travaux de protection.

C - Glissements de terrain et éboulis: l'inclinaison des pentes et la nature des matériaux contrôlent ces phénomènes. Les calculs de stabilité sont trop complexes pour être faits de points en points sur une carte; on peut par contre délimiter des zones très stables, occasionnellement instables, très instables, et recommander pour chaque zone des essais et études qui seront plus complètes pour les secteurs moins sûrs. A Montréal, ces risques sont minimes: quelques petits éboulis le long des voies taillées en rocher (ex. chemin Camilien Houde), glissements dans l'argile surtout au moment de surcharges ou d'excavation.

Il existe d'autres risques plus nombreux, mais que l'on ne peut qualifier de naturels parce qu'ils sont liés en partie à l'activité humaine; on peut citer comme exemple les chutes de blocs et effondrements en tunnels, l'apparition

de conditions de boulance et l'innondation de fouilles, les tassements et ruptures de fondations. Ces risques doivent être étudiés sur chaque site particulier; il n'y a que les risques naturels qui se prêtent à une étude régionale.

9.3.2 Ressources naturelles: Les ressources en eau souterraine, en minéraux industriels, en pierre calcaire pour la fabrication du ciment, en agrégats naturels ou concassés, en argile à brique, de la grande région montréalaise devraient être évalués et comparés aux besoins prévisibles. Les gîtes de grande valeur pourraient ainsi être délimités et protégés. Montréal et sa banlieue ont la chance d'être bien pourvus actuellement; pour conserver cet avantage aux prochaines générations, il faut dès maintenant réaliser un inventaire et réservé des secteurs pour l'exploitation de matériaux. Robbi (1972) en Ecosse, Guyard et Vézina (1973) dans la région de Québec, donnent de bons exemples de ce genre d'inventaire.

Les exploitations à venir doivent éviter un enlaidissement permanent de l'environnement. Il est possible de contrôler les exploitations des carrières et gravières pour permettre une reconversion économique des terrains après cessation des opérations (Guyard et Vézina, 1973, Oehmichen, 1973).

9.3.3 Économie de l'aménagement: une fois qu'on a délimité sur la carte de la région, les zones où il serait dangereux, coûteux, peu coûteux, ...etc. de construire, ainsi que les sites à préserver pour la conservation de ressources naturelles, on doit discuter avec d'autres spécialistes pour inclure leurs points de vue (biologistes, écologistes, géographes) et ajouter d'autres secteurs à protéger pour des raisons écologiques ou esthétiques. Il est utopique actuellement de croire que l'on peut arriver à une évaluation objective de chaque point de vue; en étudiant les seules caractéristiques physiques du sol, on peut être porté à croire que chaque bout de territoire peut recevoir un "coefficient" et qu'une économie de gestion de l'aménagement n'aurait ensuite qu'à pondérer chaque point de

vue.

La planification cherche avant tout à éviter les plus grosses erreurs et pour cela elle ne doit pas devenir trop abstraite. Nous n'avons insisté ici que sur quelques aspects concrets du problème en référence aux sciences de la terre, qui constituent à notre avis les données de base. Nous avons tenté de démontrer comment ces données doivent être collectées, compilées et synthétisées afin d'éviter en tout premier lieu les accidents, les à-peu-près, les dédoublements de dépenses et les majorations de coût, qui ont existé jusqu'ici faute d'études adéquates.

CONCLUSION

Cet examen, bien que forcément limité et imparfait, de l'état des connaissances géoscientifiques se rapportant à la région de Montréal, des moyens d'acquisition de ces connaissances et de leur application dans les travaux de construction et d'aménagement, permet de formuler un certain nombre de conclusions:

- 1) Malgré son importance pour les activités de construction, d'excavation, d'exploitation de matières minérales et d'eau souterraine, la région de Montréal est l'objet de peu d'études de géologie appliquée. Cela se réflète tant dans la faible proportion de chercheurs oeuvrant en géologie urbaine, que dans le faible pourcentage que représentent le coût des études géologiques dans le volume global annuel des dépenses de ces secteurs.
- 2) Un grand nombre de problèmes n'ont peu ou pas encore été étudiés. La revue formation par formation de la stratigraphie de Montréal permet de se rendre compte du manque d'information sur les propriétés physiques et techniques des diverses roches.
- 3) Plusieurs organismes s'occupent de façon sporadique d'investigations géotechniques sur le territoire concerné. La coordination et la synthèse des diverses études doit être poursuivie et améliorée. Par leur fonction d'approuver les plans de construction de tous les immeubles privés et par leur tâche de réaliser tous les travaux publics, les autorités municipales sont actuellement les principales intéressées par les relevés géologiques. Un effort supplémentaire de coordination, et surtout d'interprétation et de synthèse, constituerait une activité très rentable à moyen et long terme. Si les relevés antérieurs étaient rassemblés, compilés et synthétisés de

façon complète par un géologue ou une équipe constituée à cette fin, la communauté pourraient épargner bien plus que son coût de fonctionnement, en travaux de forage et de campagne de reconnaissance.

4) Les services de travaux publics et les ingénieurs municipaux ne sont pas les seuls, comme nous l'avons montré au chapitre 9, à devoir tirer profit de la synthèse des données géotechniques. La Communauté Urbaine par exemple, s'oriente vers une participation de plus en plus active dans la planification du développement, la protection de l'environnement et la lutte à la pollution, pour lesquelles d'importants budgets seront consacrés dans les années qui viennent. Une des toutes premières démarches de ces politiques consiste à établir sur une base régionale des dossiers des caractéristiques physiques des terrains. Ne serait-il pas logique et urgent de regrouper les services et personnes qui s'occupent de relevés géologiques et géotechniques des diverses municipalités de la C.U.M. qui se situent toutes dans le même contexte géologique?

La figure 38 schématise le fonctionnement de ce que nous décririons pour l'instant comme le "service des données de terrain" ou "service géologique de la C.U.M.", peu importe le nom. Sa tâche première serait de regrouper ou coordonner les services municipaux existants et de compléter leur activité en réalisant la synthèse des données, comme nous l'avons exposé tout au long de ce rapport. En plus de compiler les relevés pour les divers services municipaux, on voit sur la figure 38 qu'il rassemblera également tous les autres résultats d'exploration, de sondage et de cartographie détaillée exécutés sur son territoire par les services fédéraux, provinciaux ainsi que ceux du secteur privé. Afin de parfaire certaines cartes et synthèses, nous considérons qu'il devrait pouvoir effectuer des études sur le terrain, directement et sans qu'elles soient requises pour des projets précis à court terme.

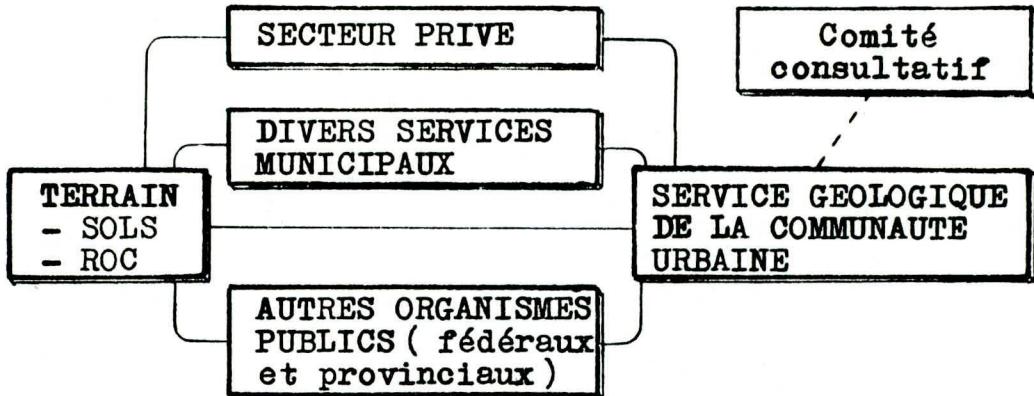


Fig. 38 - Schéma de coordination proposé pour les études géologiques dans la région de Montréal.

Legget (1973) suggère aux agglomérations urbaines la mise sur pied d'un comité consultatif en sciences de la terre réunissant les spécialistes intéressés à la géologie locale. A Montréal un tel comité pourrait regrouper un certain nombre d'universitaires et de praticiens intéressés aux différents aspects de la géologie de la région. Il se réunirait une ou deux fois par année pour examiner les problèmes spéciaux soulevés par les travaux en cours. Nous avons vu au chapitre 2 que les chercheurs peuvent apporter des contributions originales qui tendent de plus en plus à se rapprocher des problèmes pratiques des collectivités. Encore faut-il que leur intérêt soit maintenu en éveil et que cela soit facilité par une entente réciproque d'échange, que nous avons symbolisé par un trait tireté sur la figure 38.

Les recommandations pratiques que nous avons expliquées au long des différents chapitres sont rappelées ci-dessous. Elles constituent une bonne partie de la tâche prioritaire du groupe dont nous venons de suggérer la formation.

a) Réalisation d'une carte géologique à l'échelle de 1/25 000 pour tout le territoire de l'Île et la zone avoisinante, avec une portion plus détaillée (1/10 000) pour le secteur plus densément développé du centre-ville. Cette carte géologique doit montrer les contours exacts des unités géologiques distinguées au

point de vue de la géologie de l'ingénieur. Le fond de la carte devrait être un écorché, c'est-à-dire une carte donnant l'élévation du roc en tout point.

b) La carte géologique ou des feuillets superposables devraient donner les paramètres géotechniques importants, comme les zones broyées, les directions dominantes des diaclases, l'épaisseur de l'altération, la position de la nappe phréatique ...etc.

c) Les données sur les dépôts meubles existent actuellement dans un fichier informatique. Nous souhaitons qu'il devienne prochainement possible d'obtenir l'édition de cartes automatiques donnant dans l'espace, la position et les propriétés des divers types de dépôts meubles.

d) Réalisation d'un inventaire des eaux profondes, de leur utilisation et de leur protection.

e) Réalisation d'un inventaire sur les ressources minérales non renouvelables (sable et gravier, argile à brique, sites de carrières).

f) Poursuite des relevés des fouilles et cartographie des excavations importantes. Cette collection d'informations géologiques aurait une efficacité nettement plus grande si elle était assurée de façon systématique et continue, plutôt que d'être l'objet de travaux de recherches isolés.

g) Introduction d'un indice de qualité pour compléter les logs de forage. Comparaison de ce paramètre avec le roc cartographié, par la suite, en tunnel, ou avec le comportement des ouvrages.

h) Introduction progressive dans les relevés géotechniques des méthodes de diagraphies. Distinction et corrélation des sous-unités dans les groupes considérés jusqu'ici comme homogènes.

i) Compilation pour chaque unité stratigraphique et chaque type pétrographique des résultats des essais et

mesures. Cela implique l'identification des faciès et sous-faciès comme sur l'exemple donné à la page 39.

j) Établissement d'un consensus dans les descriptions des roches, les classifications et les termes utilisés, ainsi que dans les méthodes de collection des données et de cartographie. Nous espérons que les propositions que nous avons formulées pourront servir de modèles, ou tout au moins de base de discussion.

BIBLIOGRAPHIE

- ANONYME, 1961. Essai de nomenclature des roches sédimentaires. Technip, Paris.
- ARNOULD, M. 1969. Aspects géologiques des problèmes d'urbanisme. Annales des P. et C., sept.-oct. 1969, pp. 261-268.
- ARNOULD, M. & VANTROYS, M. 1970. Essai de cartographie géotechnique automatique sur la ville nouvelle d'Evry. C.R. 1er Congrès Int. de l'A.I.G.I., pp. 1069-1080.
- BALLIVY, G. 1973. Problèmes légaux liés à l'aménagement du sol en milieu urbain. C.R. Conf. Nat. sur les problèmes de génie urbain rel. aux terrains, pp. 35-40.
- BARKEY, H. & PALMSTROM, A. 1970. Some Results of an engineering geological investigation in the Breiskar discharge tunnel, Norway. C.R. 1er Congrès Int. de l'A.I.G.I., Paris, pp. 1159-1171.
- BEAUREGARD, L. 1972. Montréal An 2000. Guide d'excursions, 22e Congrès Int. Géographie, Montréal, Presses de l'U. de M., pp. 193-197.
- BLAIS, R.A. et al. 1971. Les sciences de la Terre au Service du Pays. Étude Spéciale No 13, Conseil des Sciences du Canada, Ottawa, 395 p.
- BOISJOLY, C. 1973. Corrélations géologiques des forages et des problèmes rencontrés lors du creusement du tunnel collecteur Maisonneuve. Projet de fin d'études, École Polytechnique, Montréal, 72 p.
- BRANAGAN, D.F. 1972. Geological Data for the City Engineer - A comparison of Five Australian Cities. C.R. 24e Congrès Int. Geol. Vol. 13, pp. 3-12.
- BRASSARD, L. 1963. Où chercher des grottes dans le Québec? Le Jeune Scientifique, avril 1963, pp. 136-142.
- BURN, K.N. 1973. Houses settlement and trees. C.R. Conf. Nat. sur les problèmes de génie urbain rel. aux terrains, pp. 41-65.
- BYERS, A.R. 1949. The nature and origin of the glacial and post-glacial deposits lying between the City of Montreal and the Canadian Shield. Thèse M.Sc., Univ. McGill.
- CHILINGAR, G.V., BISSELL, H.J. & FAIRBRIDGE, R.W. 1967. Carbonate Rocks. Origin, occurrence Classification. Elsevier, 471 p.
- CHRISTIANSEN, E.A. 1970. Physical Environment of Saskatoon, Canada. Saskatchewan Res. Council & NRC, Ottawa, 68 p.
- CHURINOV, M.V., TSYPINA, I.M. & LAZAREVA, V.P. 1970. The principles of compiling the engineering-geological map of the USSR territory on the scale of 1/250 000. C.R. du 1er Congrès Int. de l'A.I.G.I., tome 2, pp. 850-860.

- CLARK, T.H. 1952. La Région de Montréal - Feuilles de Laval et de Lachine. Rapport géol. no 46, Min. des Mines, 150 p.
- CLARK, T.H. 1972. Région de Montréal: Rapport Géol. No 152, Min. des Rich. Nat., 244 p.
- COATES, D.F. 1964. Some cases of Residual Stress Effects in Engineering Work. pp. 679-688; dans "State of Stress in the Earth's Crust". American Elsevier.
- COATES, D.F. 1967. Rock Mechanics Principles. Mines Branch Monograph 874, Gouv. Canada, 363 p.
- COMPTON, R.R. 1962. Manual of field geology. John Wiley & Sons New-York, 378 p.
- CORBEIL, J. 1958. Les Karsts de l'Est Canadien. Cahiers de Géographie de Québec, Vol. 2, No 4, pp. 193-216.
- CRATCHLEY, C.R. & DENNESS, B. 1972. Engineering Geology in Urban Planning with an example from the New City of Milton Keynes. C.R. 24e Congrès Géol. Int., Vol. 13, pp. 13-22.
- CRÉPEAU, P.M. 1963. Géologie de l'emplacement du barrage de Carillon. Thèse M.Sc.A. École Polytechnique, sept. 63.
- CUMMING, C.L. 1917. Les Puits Artésiens de Montréal. Co . Géol. Can., Mém. 72, 159 p.
- DAVID, R.E. 1966. Tremblements de terre et Constructions aséismiques. Can. Inst. Steel. Construction, Montréal, 91 p.
- DEERE, D.U. 1963. Technical description of rock cores for engineering purposes. Rock Mech. Eng. Geol. Vol. 1, pp. 18-22.
- DESJARDINS, J.P. 1970. Cartographie des sols par photo-interprétation pour fins de génie. Thèse M.Sc.A., École Polytechnique, Montréal, nov. 70, 173 p.
- DURAND, M. 1969. Étude de propriétés physiques et chimiques de calcaires de la région de Montréal. Thèse M.Sc.A. École Polytechnique, Montréal, août 1969, 135 p.
- DURAND, M. & BALLIVY, G. 1974. Particularités rencontrées dans la région de Montréal résultant de l'arrachement d'écaillles de roc par la glaciation. Rev. Can. de Géotech. Vol. 11, No 2, pp. 302-306.
- EIVEMARK, M.M. 1971. The practice of Engineering Geology during preconstruction investigation in the Montreal Area. Thèse M.Sc. Univ. McGill, 216 p.
- FRANKLIN, J.A., BROCH, E. & WALTON, G. 1970. Logging the Mechanical Character of Rock. Imp. Coll. London, Res. Rep. D 14, 15 p. juillet 70.

- GADD, N.R. 1971. Pleistocene Geology of the Central St. Lawrence Lowland. Com. Géol. Can., Mém. 359, 153 p.
- GAUTHIER, M. 1920. Matériaux de voirie dans la ville et le district de Montréal. Com. Géol. Can., Mém. 114, 56 p.
- GHISTE, S. 1970. La Carte d'Interprétation Géotechnique de la Région de Mons (Belgique). Problèmes et solutions. C.R. 1er Congrès Int. de l'A.I.G.I., Paris, pp. 904-915.
- GHISTE, S. 1972. Problèmes de Cartographie Géotechnique en Belgique. C.R. 24e Congrès Géol. Int. Vol. 13, pp. 23-29.
- GOLD, D.P. 1972. Diatremes, Kimberlites, Lamprophyres et Brèches intrusives à l'Ouest de Montréal. Livret-guide B-10, 24e Congrès Géol. Int., 35 p.
- GOUDGE, M.F. 1935. Limestones of Canada: their occurrence and characteristics - Part III Québec. Dept. Mines, Publ. No 755, 274 p.
- XX GRICE, R.H. 1966. The Engineering Geology of the Montreal Subway. A.E.G. bull., Vol. 3, No 2, pp. 59-64.
- GRICE, R.H. 1969. Geological Data Handling in Urban Areas. Congrès GAC-MAC-69.
- GRICE, R.H. 1973. A small pilot system for the management of Urban Geological Data by Digital Computer. C.R. Conf. Nat. Prob. Génie Urbain, pp. 231-249.
- GRUBE, F. 1972. Urban and Environmental Geology of Hamburg. C.R. 24e Congrès Géol. Int., Vol. 13, pp. 30-36.
- GUYARD, J. & VEZINA, J. 1973. Influence des exploitations des granulats sur l'aménagement territorial de la Communauté Urbaine de Québec. C.R. Conf. Nat. Prob. Génie Urbain rel. Terrains Montréal, 7 et 8 mai 1973, pp. 250-254.
- HARVEY, J.M. & WHALEN, A. 1972. Corrélation géologique des forages et des excavations au point de vue degré de fragmentation. Projet Fin d'Étude, École Polytechnique, Montréal, 38 p.
- HIRAMATSU, Y. & OKA, Y. 1966. Determination of the Tensile Strength of Rock by a Compression Test of an Irregular Test Piece. Int. J. Rock. Mech. Min. Sci., Vol. 3, pp. 89-99.
- HODGSON, C.J. 1968. Monteregian Dyke Rocks. Thèse Ph.D. Univ. McGill, 168 p.
- HOFMANN, H.J. 1963. Ordovician Chazy Group in Southern Quebec. Am. Ass. Pet. Géol. Bull., Vol. 47, No2, pp. 270-301.

- HOFMANN, H.J. 1972. Stratigraphie de la région de Montréal.
Livret-Guide de l'excursion B-03, 24e Congrès Géol. Int., 34 p.
- HUMBERT, M. 1970. Aptitude des terrains au développement urbain et industriel. C.R. 1er Congrès Int. de l'A.I.G.I., pp. 950-959.
- IRELAND, H.O., MORETTO, O. & VARGAS, M. 1970. The Dynamic Penetration Test: A standard that is not standardized. Geotech., Vol. 20, No 2, pp. 185-192.
- JOBIN, C. 1969. Méthodes séismiques et électriques appliquées à l'étude des dépôts meubles de la Vallée du St-Laurent et la détermination de l'épaisseur des glaciers contemporains. Thèse M.Sc., U. de M., 84 p.
- JOSSEAUME, H. 1968. Tassements dus aux rabattements de nappes. Bull. Laboratoires routiers, No spécial du Compte Rendu des Journées d'Hydraulique des Sols, Paris 27 au 29 nov. 1968, pp. 141-152.
- KARACSONYI, S. & REMENYI, P. 1970. The significance of the explorations connected with the Town development in the Engineering Geological Mapping. C.R. 1er Congrès Int. de l'A.I.G.I. pp. 861-870.
- LEBLANC, G., STEVENS, A.E., WETMILLER, R.S. & DU BERGER, R. 1973. A Microearthquake Survey of the St. Lawrence Valley near La Malbaie, Quebec, Can. J. of Earth Sci., Vol. 10, No 1, pp. 42-53.
- LEGGET, R.F. 1972. Engineering Geological Maps for Urban Development. GSA. 1972 Annual Meeting, Minneapolis.
- LEGGET, R.F. 1973. Cities and Geology. McGraw Hill 624 p.
- LETENDRE, R. 1973. Cartographie en milieu urbain; métros et Parc Olympique. Projet Fin d'Étude, École Polytechnique, Montréal, 36 p.
- LÉVESQUE, A. 1974. Caractéristiques de retrait des argiles rouges et grises de la mer Champlain-Parc Maisonneuve de Montréal. Projet Fin d'Étude, École Polytechnique, Montréal, 85 p.
- LEWIS, D.W. 1971. Qualitative Petrographic Interpretation of Potsdam Sandstone (Cambrian), Southwestern Quebec. Can. J. Earth Sci., Vol. ?, pp. 853-882.
- LOUIS, C. 1970. Écoulement à trois dimensions dans les roches fissurées. Rev. Ind. Min., No Spéc. 15 juil. 1970, pp. 73-93.
- MACPHERSON, J.C. 1965. The Post-Champlain evolution of the drainage of the Montreal Lowland. These Ph.D., Univ. McGill.
- MALINOWSKI, J. 1970. Engineering-geological cartography in Poland, C.R. du 1er Congrès Int. de l'A.I.G.I., tome 2, pp. 1018-1035.

- MASON, G.D. 1967. Depositionnal Environments of the Lorraine and Richmond Groups in the St. Lawrence Lowlands. Thèse M.Sc. Univ. McGill, 103 p.
- MOSER, P.H. 1972. Environmental Geology studies in Alabama. C.R. 24e Congrès Int., Vol. 13, pp. 37-43.
- MOSSMAN, R.W., HEIM, G.E. & DALTON, F.E. 1972. Seismic exploration in the urban environment. C.R. 24e Congrès Géol. Int., Vol. 13, pp. 183-190.
- OEHMICHEN, S. 1973. Planning of Quarry-Operation for recovery use. C.R. Conf. Nat. Probl. Génie Urbain rel. Terrains, Montréal, 7 et 8 mai 1973, pp. 96-102.
- PETER, A. 1966. Essai de carte géotechnique. Sols Soils, No 16, pp. 13-30.
- POOLE, W.H., STANFORD, B.V., WILLIAMS, H. & KELLEY, D.G. 1970. Geology of Southeastern Canada: dans Geology and Economic Minerals of Canada. Edité par DOUGLAS, R.J.W., G.S.C. Econ. Geol. Rept. 1, 5e ed., pp. 228-304.
- PREST, V.K. 1961. Géologie des dépôts meubles - Région de Montréal, Québec Carte 29-1961, Commission géologique du Canada.
- PREST, V.K. & HODE KEYSER, J. 1962. Géologie des dépôts meubles et sols de la Région de Montréal, Québec. Serv. Trav. Publics de la Ville de Montréal, 43 p.
- ~~X~~ PROCTOR, R.J. 1971. Mapping Geological Conditions in tunnels. Bull. A.E.G. Vol. 8, No 1, pp. 1-93.
- RITCHOT, G. 1972. Le Mont Royal. Guide d'excursions, 22e Congrès de géographie, Montréal, pp. 49-53.
- ROBBIE, J.A. 1972. The Institute of Geological Sciences and the Scottish Environment. C.R. 24e Congrès Géol. Int., Vol. 13, pp. 55-63.
- ROCKAWAY, J.D. 1972. Evaluation of Geologic Factors for Urban Planning. C.R. 24e Congrès Géol. Int., Vol. 13, pp. 64-69.
- ST-ONGE, D.A., KUGLER, M. & SCOTT, J.S. 1973. Géoscience et environnement urbain. C.R. Conf. Nat. sur les probl. de génie urbain rel. aux terrains, Montréal 7-8 mai, pp. 20-34.
- SIMARD, R. 1973. Essai de cartographie géotechnique - Ville nouvelle de Cergy-Pontoise. Thèse Dr. Ing., Univ. Paris VI, 197 p.
- TERZAGHI, R. 1965. Source of Errors in Joint Surveys. Geotech. Vol. 25, pp. 287-304.
- THEODOROVICH, G.I. 1958. Study of sedimentary rocks. Gostoptekhizdat, Leningrad, 572 p.
- TREMBLAY, P. 1972. La décharge contrôlée. Travail de fin d'études, École Polytechnique, Montréal.

VILLE DE MONTRÉAL, 1948. Règlement No 1900 concernant la construction des batiments dans la Cité de Montréal.

VILLE DE MONTRÉAL, 1966. Caractéristiques physiques de la région.
Bull. tech. No 4, Serv. d'Urbanisme, 51 p.

WHITE, O.L., KARROW, P.F. & McDONALD, J.R. 1973. Residual stress relief phenomena in Southern Ontario. C.R. 9e Symp. Méc. Roches, École Polytechnique, Montréal.

WILSON, H.E. 1972. The Geological map and the Civil Engineer.
C.R. 24e Congrès Géol. Int., Vol. 13, pp. 83-86.

YOUNG, F.G. 1964. Petrology of the Deschambault Formation, Trenton Group. St. Lawrence Lowland of Quebec. Thèse M.Sc.
McGill, 157 p.

APPENDICE A-1

NOMENCLATURE DES JOINTS

- 1 - Clivage : Aptitude d'un cristal à se séparer facilement suivant certaines directions de plan du réseau cristallin. Désigne aussi l'opération de séparation en deux parties ou en feuillets minces d'un cristal, et par extension la séparation d'un matériau schisteux, notamment des schistes ardoisiers.
- 2 - Diaclase : Fracture sans rejet, transversale à la stratification ou à la schistosité ; par extension diaclase virtuelle : surface de moindre résistance transversale à la stratification ou à la schistosité.
- 3 - Faillle : Surface de discontinuité avec déplacement relatif tangentiel des deux lèvres, appelé rejet, souvent souligné par des stries ; avec ou sans interposition d'une zone broyée (une fracture, un joint de stratification, un ensemble de fissures peuvent jouer le rôle d'une faille).
- 4 - Fissure : Surface de non adhérence d'étendue limitée ne traversant pas le volume considéré ; exemple : paille d'un métal fondu, fissure de retrait à la surface du béton ou de l'argile.
- 5 - Fracture : Surface de non adhérence de grande étendue, partageant le volume considéré en parties distinctes ; exemples : diaclase, joint de stratification ouvert au voisinage du sol.

6 - Joint : Surface de contact entre deux matériaux différents, en général sans vide ni annulation de la résistance à la traction perpendiculaire. Par extension, ensemble de deux surfaces de contact et d'un matériau intermédiaire différent du matériau encaissant, à l'image du joint de mortier dans une maçonnerie.



Exemples : joint de grain, joint de stratification ou de litage, joint de schistosité.

7 - Schistosité : Disposition de nombreuses roches métamorphiques en feuillets parallèles de même nature, qui favorise leur séparation suivant les joints de schistosité très rapprochés. (Lorsque les joints s'ouvrent, ils échappent à la définition no 6).

8 - Stratification : Disposition d'une roche sédimentaire en bancs parallèles, de composition identique ou différente, séparés par des joints de stratification. (Lorsque ces joints s'ouvrent au voisinage de la surface du massif, ils échappent à la définition no 6).

9 - Surface de discontinuité : Surface ou zone mince à l'intérieur d'un milieu continu ou entre deux milieux continus différents, en général assimilable à un plan sur une certaine étendue.

10 - Surface de non-adhérence : Surface de discontinuité perpendiculaire à laquelle la résistance à la traction est nulle ; exemples : fissure, fracture, diaclase non virtuelle.

11 - Surface de moindre résistance : Surface de discontinuité perpendiculaire à laquelle la résistance à la traction n'est pas nulle ; exemples : clivage, diaclase virtuelle, la plupart des joints.

- 12 - Espacement : Distance perpendiculaire entre deux surfaces d'une même famille.
- 13 - Famille de surfaces de discontinuité : Ensemble des surfaces sensiblement parallèles dans le domaine étudié.
- 14 - Ouverture : Distance perpendiculaire entre les parois d'une surface de discontinuité ouverte ; distance perpendiculaire entre les deux surfaces de contact d'un joint à matériau intermédiaire.
- 15 - Remplissage : Matériau remplissant les parties ouvertes des surfaces de discontinuité, et dont les propriétés mécaniques sont généralement inférieures à celles de la matrice. Exemples : produits de broyage dans une faille, matériaux d'apport dans une fissure. Il y a toutes les transitions entre une fissure remplie et un joint.

(Ref. Revue de l'Industrie Minérale, no spéc. du 15 juillet 1970 pp. 3 - 4).

APPENDICE A-2

**AVANT-PROJET DE
SYSTÉMATISATION DANS L'ACQUISITION
DES DONNÉES DE CARTOGRAPHIE GÉOTECHNIQUE**

- Buts Immédiats :**
- 1- Rendre conformes les relevés effectués par diverses personnes sur le territoire limité de la C.U.M.
 - 2- Faciliter les synthèses entre plusieurs sites, ce qui est indispensable pour le progrès de la connaissance géotechnique de la région.
 - 3- Constituer un réservoir de données bien codifiées et facile d'accès.
 - 4- Rendre les relevés plus rapide par l'emploi de symboles et d'abréviations mnémotechniques (codifiées sur les feuilles de terrain).

Buts Plus Lointains:

- 1- Mise en fichier électronique sous une forme définitive élaborée à partir de l'expérimentation de l'avant-projet et en tenant compte des utilisations prévisibles du fichier.
- 2- Système compatible au mieux avec les autres fichiers géologiques en élaboration ou en usage au Canada.

FICHES DE TERRAIN

Les fiches ou feuilles de terrain, élaborées et utilisées par le géologue, servent premièrement à la rédaction des rapports des projets individuels ainsi qu'à la compilation sur des cartes géologiques et géotechniques. Les feuilles de terrain contiennent de plus toutes les informations destinées aux cartes perforées, les renseignements graphiques dessinés à grande échelle et les remarques additionnelles non prévues dans la codification.

L'exemple de fiche (fig. 39) décrit ci-dessous est un prototype susceptible de subir des modifications. La partie supérieure de la fiche contient toutes les informations nécessaires à l'identification et à la localisation (casiers 1 à 17 inclusivement), ainsi qu'une description simplifiée de la géologie de la section en cause (casiers 18 à 49 incl.). Les symboles codés figurent au centre de la feuille. La partie centrale comporte des grilles pour recevoir le schéma de la géologie ainsi que les données sur le soutènement, la rugosité du profil, le pourcentage du contrôle des faces par les diaclases, et la description des diaclases. Dans l'utilisation actuelle que nous en faisons, chaque trait vertical limite une distance horizontale de 20 pieds. Les trois bandes horizontales peuvent représenter soit une grande surface continue (mur d'une fouille à ciel ouvert), soit les murs et la voûte d'un tunnel selon le mode conventionnel.

Instructions particulières pour l'utilisation de la fiche (fig. 39)

1- RENVOI À UNE REMARQUE. Chaque casier porte un numéro; lorsque l'information en question ne peut complètement être donnée par les abréviations proposées, barrez le numéro pour indiquer qu'il y a renvoi aux remarques en bas de la feuille: par exemple sur la figure 29 on n'a pas inscrit (a) l'angle avec lequel les strates recoupent la voûte.

RECOUPANT PLAFOND à
(OU PLANCHER) A

Dans un casier REMARQUE, indiquez tout d'abord le numéro du casier à laquelle s'applique le commentaire (35 dans notre exemple), puis la remarque elle-même sur autant de lignes que nécessaire; on utilisera le verso de la feuille au besoin.

2- Une remarque s'appliquant à une longueur de la section sera identifiée en indiquant les chainages en question: ex.

REMARQUES	
231+70 à	Bon aspect des murs et de la
233+60	voûte, secs à l'exception d'une diaclase à 231+20

3- SCHEMA. Sur le schéma géologique, utilisez les symboles et figures donnés dans la légende (au centre de la fig. 39) et identifiez au besoin par une lettre encerclée (ex. A) toutes les failles et autres accidents structuraux à commenter plus en détails.

Fig. 39 - Fiche de terrain.

DATE: [] - [] - []	GÉOLOGUE: []
EXCAVATION: [] TRANCHÉE TUNNEL (Rayez la mention inutile)	
LIEU: []	CONTRAT: []
SECTION DE: [] + [] X [] + [] EXÉCUTÉE DU [] - [] au [] - []	
B.M. []: X = [] Y = [] Z = []	
B.M. []: X = [] Y = [] Z = []	
► DESCRIPTION GÉNÉRALE	
DE LA STRUCTURE :	[]
► DESCRIPTION DE LA STRATIGRAPHIE	
ACCIDENTS STRUCTURAUX	
//// Zone humide	
Sintement	
Venue d'eau (gal/min)	
Faillle (dépl. en pieds)	Dykes
ZB Zone broyée (ép. en pieds)	Remplissage
Diaclase vert (/ 60° / 40° / 20° / 0°)	
► CHARGEMENT	
SOUTIENEMENT C4C = cintres (espacement en pi.)	BSB = (BOULONS espacement en pieds) G= Goumite Revêtu ////
► RUGOSITÉ DES PROFILS (amplitude en pieds) et % de contrôle des faces	
► DIACLASES	
DIRECT	
PLONGÉE	
REMPLE	
REMARQUES:	
LITS INTERLITS DIRECTION [] PENDAGE [] RECOUVRANT PLAFOND [] (OU PLANCHER) A []	
NOM [] TEXTURE GRANULO [] COULEUR [] ÉPAISSEUR EN PO. (MAX-MIN) MOY [] % EN VOLUME []	
JOINTS DE STRATIFICATION (L) RÉGULIERS [] IRRÉGULIERS [] PERSISTANTS [] PEU CONTINUS []	
SANS COHÉSION TOUS LES FIELDS [] SCHISTOSITÉ [] DIRECTION [] PENDAGE [] MORT-TERRAIN [] ép. [] pi NATURE: []	
NOUS AVONS DES LITS ET REMPLISSAGES DE FRACTURES Calc - CALCAIRE IA - INTRUSIF ACTIF A - ARGILE Sch - SCHISTE IB - INTRUSIF BASIQUE SE - SABLE Shm - SHALE Grès - GRÈS ST - STILF Dol - DOLOMIE G - GRAVIER T - TILL R.B. Calc.a = Calcaire argileux Aut. = argile siliceuse	
TEXTURE ALT - ALTERE L - LAGUNÉE L - APPARTITIONNE F - FOSSILIÉE g - granulier H - HASSIF e - moyen C - CRISTALLIN f - fin R - RIZZINIE p - très fin (un chiffre pour diamètre moyen en mm)	
COULEUR V - VERT R - ROUILLE J - JAUNE (j - jaunâtre) g - grisâtre H - HÔTÉ (h - noirâtre) e - moyen G - GRIS f - foncé P - BLANC p - très fin B - BEIGE	

- 4- FAILLES ET DYKES. Notez à part les directions et pendages des intrusifs et des failles et les décrire sur une liste spéciale.
- 5- N'indiquez une caractéristique dans une case que si elle est vraiment significative et représentative pour toute la section. Si elle ne s'applique que localement, ou pour un lit donné, le préciser par une remarque (voir -l-).
- 6- Un casier laissé en blanc indique que l'information n'a pas été recueillie pour diverses raisons. Si après avoir bien cherché à déterminer une caractéristique, on en arrive à la conclusion qu'il est impossible de l'obtenir, même en revenant sur le chantier (ex. pendage de lits tordus, ou nature pétrographique d'une section déjà revêtue), on l'indique par un trait dans le casier:

► SCHISTOSITÉ DIRECTION PENDAGE

- 7- JUXTAPOSITION DE SYMBOLES. On l'utilise pour préciser les descriptions dans les casiers: ex.

Gp - signifie gris pâle
 A/F- signifie lits aphanitiques alternant avec des lits fossilifères
 A,F- signifie lits aphanitiques dominants avec des lits fossilifères par endroits
 F,A- signifie lits fossilifères dominants avec des lits aphanitiques par endroits
 . . . etc.

Lorsqu'on a deux types pétrographiques bien distincts (ex. grès et calcaire) on utilise les deux séries de cases 20 à 23 et 24 à 27. Les cases 28 à 31 sont réservées aux interlits minces et argileux en général; il est important de donner la proportion qu'ils représentent dans la masse totale (casier No 32).

Les feuilles de terrain peuvent être classées directement par projet et par ordre de chaînage dans une filière de format standard.

FICHES DE COMPIRATION

Les fiches de compilation résument pour chaque projet les points importants. Nous avons adopté des fiches cartonnées 5" x 8", avec des perforations (fig. 40 et 41). Chaque site est identifié par trois lettres tirées du nom du projet; ce code est indiqué sur une carte

index de la région (1/25 000). Les trois lettres sont d'une certaine couleur pour identifier le genre de projet ou de dossier:

carrières	:	vert
métro	:	bleu pâle
aqueduc	:	bleu foncé
forage	:	orangé
collecteurs	:	brun
autoroute	:	rouge
immeubles	:	violet

En consultant la carte index, on peut déjà connaître combien et quels types de projets ont été réalisés dans tel ou tel secteur. On se réfère alors aux fiches de compilation pour connaître les traits essentiels de la géologie (recto des fiches, fig. 40) et de la géotechnique (verso des fiches, fig. 41). Les perforations ont pour but de permettre l'extraction immédiate des dossiers renfermant un type de données: ex. pour retracer les descriptions de failles dans le Trenton on introduit deux broches dans les trous 5 et 8 de la pile de fiches, pour la soulever; les dossiers cherchés sont automatiquement identifiés parce qu'ils sortent du paquet. Le fichier compte actuellement une centaine de cartes qui sont complétées au fur et à mesure des recherches bibliographiques et des relevés sur le terrain.

Mot code

souligné s'il existe un dossier plus complet

Fig. 40 - Recto d'une fiche de compilation.

Carrière	
Tunnels	
Tranchées	
Forage	
Immeubles	
GEOTECHNIQUE : Problèmes spéciaux rencontrés Type de soutènement ou mur Comportement des roches, Rugosité, hors-profil, % de contrôle	
Indice de Qualité	
Venues d'eau, brève description des conditions hydrogéologiques	
REMARQUES	Schéma
	

Fig. 41 - Verso d'une fiche de compilation.

SYMBOLES UTILISÉS ET PROPOSÉS

<u>Signification</u>	<u>expliqué dans le texte page</u>
C , c - Calcaire, calcaieux	50
D , d - Dolomie, dolomitique	50
e - Espacement des discontinuités d'une même réseau	55,66
E.A. - Epaisseur de roc altéré	63
E.O. - Profondeur de pénétration de l'oxydation dans les fiaclases	63
H - Epaisseur des morts-terrains	63
L - Longueur, longueur forée	55
Lc - Longueur de la carotte ou longueur récupérée	68
N - Nombre de discontinuités dans une longueur L	55
N - Profondeur de la nappe (niveau statique)	63
Q - Indice de qualité du roc (valeur de 0 à 10)	63,71
Qu - Résistance en compression simple exprimée en livres/pouces carrés $\times 10^3$ (ksi)	70
Rec - Pourcentage de récupération (Lc/L)	67
R.Q.D.- "Rock Quality Designation"	66,69
S - Fraction terrigène	50
X et Y- Coordonnées U.T.M.	
Z- Élévation N.M.M. d'un point	
Zt- Élévation N.M.M. de la surface du terrain	
Zr- Élévation N.M.M. de la surface du substratum rocheux	
Zn- Élévation N.M.M. du niveau d'eau statique	
α- Angle entre une discontinuité et un trou de forage ou une face d'excavation	55 98

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL



3 9334 00288735 2