

**UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
FACULTÉ DE GÉNIE
Département de génie civil**

**CONTRIBUTION À L'INSTRUMENTATION DES OUVRAGES EN BÉTON:
APPLICATION DES FIBRES OPTIQUES POUR LA MESURE DES
DÉFORMATIONS INTERNES**

**Thèse de doctorat ès sciences appliquées (Ph.D)
Spécialité: génie civil**

Marco QUIRION

Sherbrooke, Québec, Canada

Novembre 1999

IV - 1206



**National Library
of Canada**

**Acquisitions and
Bibliographic Services**

**395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

**Bibliothèque nationale
du Canada**

**Acquisitions et
services bibliographiques**

**395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada**

Your file Votre référence

Our file Notre référence

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

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

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-67590-4

Canada

RÉSUMÉ

La nécessité de surveiller les ouvrages de génie civil, plus spécialement les grands barrages, ne fait maintenant plus de doute, autant parmi les concepteurs que les gestionnaires. Le vocable « sécurité des barrages » fait maintenant partie du vocabulaire des techniciens, ingénieurs et administrateurs et il intègre plusieurs aspects spécifiques: la sécurité du public, l'environnement et l'économie. Aussi, les conséquences de la rupture ou de l'endommagement d'un barrage de grande envergure sont des pertes, plus ou moins considérables, à tous les paliers énumérés auparavant. Dans le cas des barrages, la modification de l'état de la structure, souvent liée au vieillissement du béton, doit être suivie afin de garantir la sécurité de l'ouvrage

La technologie des capteurs à fibre optique est actuellement en plein essor. Cette technologie est particulièrement intéressante puisqu'elle permet d'installer des capteurs extrêmement efficaces à des endroits jusqu'à maintenant inaccessibles. La sensibilité des capteurs et la rapidité de lecture permettent d'envisager, entre autres, la mesure des faibles déformations et des comportements cycliques. En ce qui a trait à l'instrumentation géotechnique et structurale, cette technologie laisse entrevoir de nombreuses possibilités.

Parmi les innombrables perspectives de recherche, on propose le développement d'un appareil simple de détection des déformations internes spécialement adapté à l'instrumentation des barrages en béton. Ce thème est d'ailleurs en continuité avec les recherches menées sur le Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS). Par ailleurs, l'utilisation des fibres optiques pour l'instrumentation des barrages ainsi que le suivi en temps réel des déformations peuvent être retenus à titre d'originalité du présent ouvrage. On travaille donc à la conception de cellules de mesures miniaturisées, l'une à fibre optique et l'autre à corde vibrante. Une fois installé dans un barrage, ce type d'appareil permettrait de suivre, en temps réel, le comportement global ou local de ces structures et cela, éventuellement, à distance. Aussi, la mise au point de l'appareil de mesure des déformations passe, dans un premier temps, par la validation en laboratoire et sur sites de jauges appartenant à cette nouvelle technologie des capteurs à fibre optique pour l'instrumentation du béton.

Les résultats montrent que les jauges à fibre optique Fabry-Pérot permettent un suivi avec plus d'exactitude des déformations internes du béton puisque la perturbation créée par leur présence dans le milieu est négligeable. Aussi, les effets de la température sur la jauge enfouie dans le béton sont limités et l'application d'un facteur de correction pour la mesure des déformations n'est pas nécessaire. Enfin, le développement de cellules de mesure des déformations internes des barrages en béton est possible avec ce type de capteurs.

ABSTRACT

Surveillance of large engineering structures, especially large dams, is of great concern among designers as well as for managers. The expression « dam security », now common for dam technicians, engineers and managers, includes many specific aspects: public security, environment protection and economy. Also, the consequences of large dam failure or damaging are losses in all aspects already mentioned. Keeping track of the changing state of dams, often related to the aging of structure concrete, is quite important regarding security aspects.

Fiber optic sensors technology is expanding very rapidly. The particular interest of this technology is the possibility to install efficient sensors at locations difficult to reach. The sensitivity of these sensors and their fast response allow, among other things, to measure small strains and cyclic behavior. Regarding geotechnical and structural instrumentation, this technology gives rise to many perspectives.

Among many research avenues, development of a simple internal strain detection probe for specific application in concrete dam monitoring is proposed. This research theme is a continuation of the Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS) development. Application of fiber optics and real time monitoring system to dam instrumentation could be hold as the originality of the present work. Actually, working on the design of small fiber optic and vibrating wire strain measuring probe is the main task. Installed in dams, this type of probe would allow an accurate real-time monitoring of the global or local behaviour of the structure and also, eventually, remote monitoring. Design of the proposed device first begins with a validation, in laboratory and on site, of the new fiber optic sensor technology for concrete instrumentation.

Results show that the embedded Fabry-Pérot sensors allows to monitors internal strains in concrete because the modification of the properties of the surrounding concrete is negligible. Temperature is of less effect on the embedded sensor and correction factors are unnecessary. Finally, development of an internal strain measurement probe is possible with this new type of strain gauge.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier monsieur Gérard Ballivy, directeur de ces travaux, pour la confiance qu'il m'a accordée, non seulement tout au long de mes études supérieures, mais aussi, lors des diverses activités de recherche du Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée auxquelles j'ai eu la chance de participer.

La participation financière du Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et de la compagnie Roctest Ltée, par le biais du programme de bourses de doctorat à incidence industrielle, fut essentielle au déroulement de ce projet. Par ailleurs, je tiens à remercier sincèrement messieurs Pierre Choquet et François Juneau de la compagnie Roctest Ltée et monsieur Claude Belleville de FISO Technologies inc. pour le support technique et leur intérêt soutenu tout au long de ces travaux. Aussi, la participation financière d'Hydro-Québec et les commentaires pertinents de monsieur Don Nguyen concernant l'instrumentation des barrages avec le CIUS ne peuvent être passés sous silence.

Au cours de cette recherche, de nombreux professeurs et étudiants furent sollicités pour discuter et commenter divers aspects de ces travaux. Je tiens à remercier les chercheurs du groupe béton, notamment Mohamed Lachemi et Éric Dallaire, les chercheurs du réseau ISIS, particulièrement messieurs Pierre Labossière, Kenneth Neale, Pierre Rochette et Kaan Inal ainsi que monsieur Antoine Lahoud pour les discussions concernant les éléments finis. Enfin, les nombreux entretiens avec Patrice Masson et Alain Berry du Groupe d'acoustique de l'Université de Sherbrooke furent des plus fructueux. Impossible de ne pas souligner l'implication de Martin Lizotte, Georges Lalonde et Danick Charbonneau, techniciens du Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée ainsi que le dévouement de Nicole Laverdière, que je nommerais agente de liaison professeur-problèmes-étudiants.

À monsieur Jean-Marie Caussignac, j'exprime ici toute ma gratitude pour l'encadrement qu'il m'a accordé lors d'un stage, particulièrement formateur, que j'ai effectué à la section optoélectronique du Laboratoire central des ponts et chaussées de Paris. Je n'oublie pas l'accueil que lui et les chercheurs de la section opto m'ont réservé.

Finalement, je réserve un merci tout spécial à ma compagne de vie, Danielle, pour sa compréhension, son appui et surtout pour sa présence à chaque jour.

LISTE DES SYMBOLES

A_e	Amplitude d'une onde lumineuse à l'entrée d'une fibre optique
A_s	Amplitude d'une onde lumineuse à la sortie d'une fibre optique
CDT	Coefficient de dilatation thermique
d	Ouverture de la cavité Fabry-Pérot
E'_c	Module d'élasticité du béton
E_c	Module d'élasticité du béton dans le modèle numérique
E_{cyl}	Module d'élasticité du cylindre de béton contenant une jauge EFO
E_i	Module d'élasticité d'une inclusion
F	Finesse de l'interféromètre
f_c	Résistance en compression du béton
I	Intensité d'un faisceau lumineux
L	Longueur entre les microsoudures du capteur Fabry-Pérot
l	Longueur du chemin parcouru par la lumière
n	Indice de réfraction
P	Puissance d'un faisceau lumineux
P_0	Puissance initiale d'un faisceau lumineux
R	Coefficient de réflexion
t	Temps
α	Coefficient d'atténuation linéique (en dB/km)
Δd	Variation de déplacement
$\Delta\phi$	Variation de phase d'une onde
ε_y	Déformation axiale
ε	Déformation
λ	Longueur d'onde
Λ	Périodicité d'un réseau de Bragg
ν	Coefficient de Poisson du béton
ν_{cyl}	Coefficient de Poisson du cylindre de béton contenant une jauge EFO
θ	Angle d'incidence (réflexion et réfraction) de la lumière
BHP	Béton à haute performance
BPR	Béton de poudres réactives
CDT	Coefficient de dilatation thermique
LVDT	Linear variable differential transducer
CIUS	Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke
CV	Jauge à corde vibrante
EFO	Jauge à fibre optique enfouie

TABLE DES MATIÈRES

CHAPITRE 1 Introduction	1
1.1 Problématique	1
1.2 Objectifs.....	3
1.3 Structure de la thèse et documentation	5
CHAPITRE 2 Sécurité et instrumentation des barrages en béton	7
2.1 Types de barrages	8
2.1.1 Barrage-poids.....	9
2.1.2 Barrage à contreforts	10
2.1.3 Barrage-voûte	11
2.1.4 Barrage à voûtes multiples.....	12
2.1.5 Mécanique des barrages.....	13
2.2 Surveillance des barrages	14
2.3 Instrumentation des barrages en béton	17
2.3.1 Instruments et paramètres mesurés	18
2.4 Mesure des déformations: jauges extensométriques.....	20
2.4.1 Jauge à corde vibrante.....	20
2.4.2 Jauge électrique.....	23
2.4.3 Jauge à fibre optique.....	24
2.5 Mesure des déformations et des contraintes: cellules de mesure.....	25
2.5.1 Inclusion rigide instrumentée	27
2.5.2 Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke	28
2.5.3 Capteur de mesure de contraintes relatives de Polytechnique (CCRP)	31
2.6 Développement d'un appareil de mesure des déformations internes	32

CHAPITRE 3 Fibres optiques et capteurs	33
3.1 Définition.....	33
3.2 Propagation de la lumière dans une fibre optique	34
3.2.1 Réflexion et réfraction.....	36
3.2.2 Absorption	37
3.2.3 Diffusion.....	38
3.2.4 Diffraction	40
3.2.5 Polarisation.....	41
3.3 Types de fibre optique.....	42
3.3.1 Fibre optique multimode à saut d'indice	42
3.3.2 Fibre optique multimode à gradient d'indice.....	43
3.3.3 Fibre optique monomode.....	44
3.3.4 Autres types de fibres optiques	45
3.4 Caractéristiques des fibres optiques	46
3.4.1 Atténuation	46
3.4.2 Résistance.....	47
3.5 Connexion, interconnexion et multiplex.....	49
3.6 Capteurs à fibre optique.....	52
3.7 Classification des capteurs à fibre optique.....	53
3.7.1 Distribution des capteurs	53
3.7.2 Modes d'interrogation des capteurs	54
3.8 Description des phénomènes de modulation de la lumière	56
3.8.1 Interférométrie	56
3.8.2 Polarimétrie	59
3.8.3 Intensimétrie	60
3.9 Capteur de type Fabry-Pérot	61
3.10 Applications des capteurs à fibre optique en génie civil.....	62
CHAPITRE 4 Validation expérimentale et numérique de la jauge Fabry-Pérot EFO	65
4.1 Description de la jauge Fabry-Pérot EFO	65
4.2 Étude du comportement de la jauge	70
4.2.1 Comportement en compression	70
4.2.2 Dilatation thermique	70
4.3 Étude du comportement de la jauge EFO noyée dans le béton	71
4.3.1 Conception du cylindre d'essais	72
4.3.2 Propriétés mécaniques du béton et du cylindre d'essais	73

4.3.3 Déformation interne du béton mesurée avec la jauge EFO	74
4.4 Modélisation numérique du comportement de la jauge EFO dans le béton	79
4.4.1 Modèle physique et maillage	79
4.4.2 Conditions aux limites et vérification du maillage	81
4.4.3 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux	82
4.4.4 Analyse paramétrique	84
4.5 Comparaison avec divers extensomètres	85
4.5.1 Chargement en compression simple des divers cylindres	86
4.5.2 Comportement thermique des extensomètres	91
CHAPITRE 5 Applications sur site de la jauge Fabry-Pérot EFO	95
5.1 Jauges de déformation considérées	97
5.2 Stationnement à étages Webster	97
5.2.1 Structure et matériaux de réhabilitation	98
5.2.2 Instrumentation	100
5.2.3 Résultats	100
5.3 Passerelle piétonnière de Sherbrooke	108
5.3.1 Béton de poudre réactive (BPR)	108
5.3.2 Description de la structure	109
5.3.3 Instrumentation	110
5.3.4 Résultats	113
5.3.5 Systèmes d'acquisition de données et autres instruments à fibre optique	117
5.4 Synthèse	119
CHAPITRE 6 Cellules de mesure 2D des déformations internes du béton	121
6.1 Prototypes de cellules de déformation	121
6.1.1 Mélange et propriétés mécaniques du béton	124
6.1.2 Jauges extensométriques	124
6.2 Étude de la jauge à corde vibrante de faible dimension	126
6.2.1 Cylindre de béton à jauges parallèles	126
6.2.2 Jauges extensométriques	128
6.2.3 Propriétés mécaniques du cylindre	128
6.2.4 Comportement de la jauge à corde vibrante	130
6.3 Expérimentations sur les cellules de mesure des déformation	132
6.3.1 Compression uniaxiale	133
6.3.2 Compression triaxiale	136
6.4 Analyse du comportement des prototypes	143

6.5 Acquisition de données et réseau de cellules	145
CONCLUSION	147
BIBLIOGRAPHIE	151
ANNEXE A Rétrospective des applications du CIUS	161
A1 Application dans les barrages	162
A1.1 Barrage Daniel-Johnson (Manic-5)	163
A1.2 Barrage Beauharnois	164
A1.3 Barrage Idduki	168
A1.4 Barrage Saunders	169
A1.5 Barrage Témiscouata	172
A1.6 Barrage La Tuque	173
A2 Application dans les milieux rocheux	174
A2.1 Mine Niobec	174
A2.2 Énergie atomique du Canada limitée (ÉACL)	177
A3 Application dans d'autres structures	179
A3.1 Fondation du biodôme de Montréal	179
A3.2 Pont de Portneuf	181
A4 Étude de cas: Instrumentation du barrage Daniel-Johnson avec les CIUS	184
A4.1 Rappel des objectifs de l'instrumentation	184
A4.2 Résultats de l'instrumentation avec les CIUS	184
A4.3 Analyse des températures	199
A4.4 Analyse des déformations et des contraintes principales	199
A4.4.1 Contraintes et déformations dans le plot Z	199
A4.4.2 Contraintes et déformations dans le plot S	200
A4.5 Conclusion sur le suivi avec les CIUS et recommandations	201
A5 Synthèse des applications	201
A6 Bibliographie sur le CIUS	202
ANNEXE B Développement d'un système d'alarme	209
B1 Contexte du développement du système d'alarme	210
B2 Méthodologie	211

B3	Système d'alarme	212
	B3.1 Description des composantes	212
B4	Résultats	213
	B4.1 Programme CAIUS-Alarme	214
	B4.2 Dossier sécurité	215
	B4.3 Validation en laboratoire	216
B5	Synthèse	220
B6	Références	221

LISTE DES FIGURES ET TABLEAUX

Liste des figures

Figure 2.1 Organigramme des divers types de barrages	9
Figure 2.2 Illustration d'un barrage poids	9
Figure 2.3 Illustration d'un barrage à contreforts.....	10
Figure 2.4 Illustration d'un barrage-voûte	11
Figure 2.5 Illustration d'un barrage à voûtes multiples.....	12
Figure 2.6 Forces agissant sur les barrages en béton.....	13
Figure 2.7 Organigramme des éléments de gestion de risque	15
Figure 2.8 Nombre d'incidents par année en relation avec la période de la vie d'un barrage	16
Figure 2.9 Extensomètre à corde vibrante.....	22
Figure 2.10 Jauge extensométrique électrique pouvant être noyée dans le béton.....	23
Figure 2.11 Jauge extensométrique à fibre optique de type EFO	24
Figure 2.12 Inclusion rigide biaxiale.....	28
Figure 2.13 Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS).....	29
Figure 2.14 Vue en coupe du CCRP	31
Figure 3.1 Représentation schématique d'une fibre optique	34
Figure 3.2 Différentes trajectoires de rayons lumineux dans le coeur d'une fibre optique.....	35
Figure 3.3 Trajectoire d'un rayon lumineux dans une fibre optique à saut d'indice.....	36
Figure 3.4 Représentation schématique des phénomènes de réflexion totale et de réflexion partielle	37
Figure 3.5 Représentation schématique de l'effet Rayleigh.....	39
Figure 3.6 Polarisation de la lumière. a) représentation du rayonnement de la lumière naturelle et b) polarisation linéaire de la lumière	41
Figure 3.7 Profil des indices de réfraction dans une fibre optique multimode à saut d'indice	43
Figure 3.8 Représentation schématique de la propagation de la lumière dans une fibre multimode à saut d'indice	43
Figure 3.9 Profil des indices de réfraction dans la fibre multimode à gradient d'indice.....	44
Figure 3.10 Représentation schématique de la propagation de la lumière dans une fibre multimode à gradient d'indice.....	44
Figure 3.11 Représentation schématique de la propagation de la lumière dans une fibre monomode.....	45
Figure 3.12 Défauts des fibres optiques	46

Figure 3.13 Câble à fibre optique. a) représentation schématique des diverses protections de la fibre optique et b) schéma et photographie d'une section de câble à fibre optique.	48
Figure 3.14 Connecteur et traversée de cloison de type ST	51
Figure 3.15 Exemple schématique de commutateurs à fibre optique	51
Figure 3.16 Différents réseaux de mesures avec les fibres optiques	54
Figure 3.17 Représentation schématique de la réflectométrie optique	55
Figure 3.18 Représentation du déphasage d'une onde lumineuse dans une fibre optique	56
Figure 3.19 Schéma simplifié de l'interféromètre Mach-Zehnder	57
Figure 3.20 Représentation schématique du fonctionnement du réseau de Bragg	59
Figure 3.21 Illustration du principe des capteurs polarimétriques.....	60
Figure 3.22 Illustration du principe des capteurs intensimétriques à microcourbures	61
Figure 3.23 Schéma de l'interféromètre Fabry-Pérot.....	62
Figure 4.1 Schéma du capteur Fabry-Perot	66
Figure 4.2 Schéma du fonctionnement de l'intercorrélateur optique	68
Figure 4.3 Extensomètre Fabry-Perot de type EFO	69
Figure 4.4 Unité portable d'acquisition à quatre canaux	69
Figure 4.5 Dilatation thermique des jauges EFO	71
Figure 4.6 Cylindre de béton intégrant une jauge Fabry-Pérot EFO	72
Figure 4.7 Dispositif externe avec LVDT pour la mesure des déformations de cylindre de béton de 100 mm de diamètre	74
Figure 4.8 Déformation du béton mesurée à 7 jours avec la jauge EFO et les LVDT externes; a) courbe contrainte déformation b) agrandissement de la partie de montée en charge	75
Figure 4.9 Déformation du béton mesurée à 35 jours avec la jauge EFO et les LVDT externes; a) courbe contrainte déformation b) agrandissement de la partie de montée en charge	76
Figure 4.10 Déformation du béton mesurée à plus d'un an avec la jauge EFO et les LVDT externes à un niveau de charge de 0,2f _c ; a) courbe contrainte déformation b) agrandissement de la partie de montée en charge	76
Figure 4.11 Déformation du béton mesurée à plus d'un an avec la jauge EFO et les LVDT externes à un niveau de charge de 0,4f _c ; a) courbe contrainte déformation b) agrandissement de la partie de montée en charge	77
Figure 4.12 a) Déformations du cylindre d'essais sous une charge dynamique de 5 Hz b) Portion de 2,5 à 5 secondes de la figure 4.12a	78
Figure 4.13 Maillage du quart du modèle étudié, avec agrandissement de la portion centrale	80
Figure 4.14 Vérification du maillage construit avec des éléments triangulaire à 6 nœuds	81
Figure 4.15 Champ de déformation axiale du cylindre contenant la jauge EFO	82
Figure 4.16 Essai sur le cylindre EFO à 0,2 f _c ; comparaison entre les résultats expérimentaux, numériques et la loi d'élasticité linéaire	83
Figure 4.17 Essai sur le cylindre EFO à 0,4 f _c ; comparaison entre les résultats expérimentaux, numériques et la loi d'élasticité linéaire	83
Figure 4.18 Profils de déformation axiale calculés par éléments finis	85
Figure 4.19 Cylindres de béton flanqués des divers extensomètres servant à leur instrumentation	86
Figure 4.20 Déformation du béton mesurée à plus d'un an avec la jauge électrique, à corde vibrante et les LVDT externes à un niveau de charge de 0,2 f _c ; a) courbe contrainte déformation b) agrandissement de la partie de montée en charge incluant la jauge EFO	87

Figure 4.21 Déformation du béton mesurée à plus d'un an avec la jauge électrique, à corde vibrante et les LVDT externes à un niveau de charge de 0,4 fc; a) courbe contrainte déformation b) agrandissement de la partie de montée en charge incluant la jauge EFO	88
Figure 4.22 Dispositif externe avec LVDT pour la mesure des déformations axiales de cylindre de béton de 150 mm de diamètre	88
Figure 4.23 Déformation du cylindre de béton contenant la corde vibrante mesurée avec des LVDT externes et avec la corde vibrante; a) courbe contrainte déformation b) montée en charge	89
Figure 4.24 Déformation du cylindre de béton contenant la jauge électrique mesurée avec des LVDT externes et avec la jauge électrique; a) courbe contrainte déformation b) montée en charge ..	89
Figure 4.25 Réponse en déformation de la jauge EFO et de la corde vibrante dans les cylindres soumis à une charge constante	90
Figure 4.26 Dispositif de mesure du coefficient de dilatation thermique des divers cylindres	92
Figure 4.27 Coefficient de dilatation thermique des cylindres de béton mesuré avec les divers extensomètres	93
Figure 5.1 Stationnement à étages Webster	96
Figure 5.2 Passerelle piétonnière de Sherbrooke	96
Figure 5.3 Profil typique des deux premiers niveaux du stationnement Webster	98
Figure 5.4 Fissures relevées dans la poutre 24 avant la réhabilitation	99
Figure 5.5 Schéma montrant la position des instruments dans les poutres réhabilitées	101
Figure 5.6 Poutre 20: Variations de déformation a) thermique théorique et mesures de la jauge EFO 1 et b) mesures de la jauge EFO 1 et de la CV 2	103
Figure 5.7 Poutre 22: a) Variations de déformation thermique théorique et mesures de la jauge EFO 3 b) mesures de la jauge EFO 3 et de la CV 4 et c) Variations de déplacement mesurées avec le FISS 2	104
Figure 5.8 Poutre 22: variations de déformation a) thermique théorique et mesures de la jauge EFO 2 et b) mesures de la jauge EFO 2 et de la CV 3	105
Figure 5.9 Poutre 24: variations de déformation a) thermique théorique et mesures de la jauge EFO 4 et b) mesures de la jauge EFO 4 et de la CV 5	106
Figure 5.10 Poutre 25: variations de déformation a) thermique théorique et mesures de la jauge EFO 5 b) mesures de la jauge EFO 5 et de la CV 6	107
Figure 5.11. Schéma des voussoirs en BPR constituant la passerelle piétonnière et position des zones instrumentées	110
Figure 5.12 Tubes métalliques servant de membrures installés dans le bâti permettant de comprimer le BPR lors du mûrissement	111
Figure 5.13 Schéma de fixation des cordes vibrantes et des jauges à fibre optique Fabry-Pérot EFO dans les membrures	111
Figure 5.14 Position des instruments enfouis dans les membrures en tension T1	112
Figure 5.15 Position des instruments dans les membrure en compression C2	112
Figure 5.16 Position des instruments dans les poutres inférieure et supérieure	113
Figure 5.17 Variations de déformation thermique et mesures de la jauge EFO 12 installée dans la membrure T1-Est	114
Figure 5.18 Variations de déformation a) thermique et mesures de la jauge EFO 15 et b) mesures des jauges EFO 15 et CV 165 installées dans la membrure C2-Est	115
Figure 5.19 Variations de déformation a) thermique et mesures de la jauge EFO 16 et b) mesures des jauges EFO 16 et CV 170 installées dans la poutre inférieure	116

Figure 5.20 Prototypé du système d'acquisition à 32 canaux	117
Figure 5.21 Capteur de déplacement à fibre optique (FOD) installé sous un joint de dilatation des approches en BHP de la passerelle piétonnière	118
Figure 5.22 Variations de déplacements et de déformations enregistrées avec le prototype du système d'acquisition à 32 canaux	118
Figure 6.1 Cellules de mesure des déformations à fibre optique (à gauche) et à corde vibrante (à droite)	122
Figure 6.2 Schéma de la cellule de mesure des déformations à corde vibrante de conception identique à celle à fibres optiques	123
Figure 6.3 Fabrication de la cellule de déformation à fibre optique	123
Figure 6.4 Jauge à fibre optique utilisée dans la conception de la cellule de déformation à fibre optique ...	125
Figure 6.5 Jauge à corde vibrante de petite dimension et montage pour étalonnage	125
Figure 6.6 Représentation schématique du cylindre de béton à jauges parallèles	127
Figure 6.7 Cylindre béton à jauges parallèles monté sur la presse pour les essais de validation	127
Figure 6.8 Diverses jauges extensométriques utilisées; à gauche la corde vibrante, au centre la jauge électrique et à droite la jauge EFO	128
Figure 6.9 Montage des extensomètres MTS sur le cylindre d'essais pour la détermination du module d'élasticité de la zone centrale	130
Figure 6.10 Courbes contrainte-déformation du cylindre à jauges parallèles obtenues avec les diverses jauges	131
Figure 6.11 Montage pour les essais de compression uniaxiale sur la cellule à fibre optique	133
Figure 6.12 Courbes contrainte-déformation obtenues avec les cellules à fibres optiques et à cordes vibrantes	134
Figure 6.13 Mesure des déformations effectuées avec les jauges EFO internes et les LVDT externes	135
Figure 6.14 Mesure des déformations effectuées avec les jauges à corde vibrante internes et les LVDT externes	135
Figure 6.15 Cellule triaxiale installée sur la presse MTS du Laboratoire	137
Figure 6.16 Schéma du montage expérimental pour les essais triaxiaux	138
Figure 6.17 Schéma de l'assemblage de la cellule triaxiale intégrant une cellule de déformation en béton	139
Figure 6.18 Cellule de déformation à corde vibrante disposée sur la base de la cellule triaxiale	140
Figure 6.19 Déformations mesurées avec les jauges axiales dans la partie supérieure des prototypes	141
Figure 6.20 Déformations mesurées avec les jauges diamétrales au centre des prototypes	141
Figure 6.21 Déformations mesurées avec les jauges diamétrales dans la partie inférieure des prototypes ...	142
Figure 6.22 Contrainte déviatorique ($\sigma_1 - \sigma_3$) en fonction de la déformation pour les deux prototypes de cellules de déformation et résultats des simulations numériques	143
Figure A1 Plan de la voûte 5-6 du barrage Daniel-Johnson et position des CIUS	165
Figure A2 Vues en coupe de la voûte 5-6 du barrage Daniel-Johnson avec la position des CIUS	166
Figure A3 Vue en plan du barrage Beauharnois avec la position des CIUS	168
Figure A4 Position des CIUS au barrage Idukki	170
Figure A5 Vue en coupe de l'unité S-4 du barrage Saunders avec la position des CIUS (phase I)	171
Figure A6 Vue en coupe de l'unité S-4 du barrage Saunders avec la position des CIUS (phase II)	172

Figure A7 Vue en coupe des colonnes d'essais avec la position des CIUS	173
Figure A8 Position des CIUS au barrage La Tuque	174
Figure A8b Position des CIUS au niveau 600 de la mine Niobec	176
Figure A9 Variation des déformations au niveau 700 du pilier de la mine	176
Figure A10 Position des CIUS autour de la galerie RM415	177
Figure A11 Variations de contraintes détectées par le CIUS SM-13 lors du creusage de la galerie RM415..	179
Figure A12 Résultats d'une modélisation de la redistribution des contraintes dans le massif rocheux perturbé par l'excavation de la galerie RM415.....	180
Figure A13 Vue en coupe de la butée W avec la position des CIUS	181
Figure A14 Vue en coupe d'une béquille du pont de Portneuf avec la position du CIUS	183
Figure A15 Température réelle du CIUS A-5-0Z-8-11-0 installé dans le plot Z	186
Figure A16 Déformation du CIUS A-5-0Z-8-11-0 installé dans le plot Z	187
Figure A17 Variations de déformation mesurées dans le plot Z par le CIUS A-5-0Z-8-11-0	188
Figure A18 Variations de contrainte mesurées dans le plot Z par le CIUS A-5-0Z-8-11-0	189
Figure A19 Température réelle du CIUS A-6-0S-4-10-0 installé dans le plot S.....	190
Figure A20 Déformation du CIUS A-6-0S-4-10-0 installé dans le plot S	191
Figure A21 Variations de déformation mesurées dans le plot S par le CIUS A-6-0S-4-10-0.....	192
Figure A22 Variations de contrainte mesurées dans le plot S par le CIUS A-6-0S-4-10-0	193
Figure A23 Température réelle du CIUS A-6-0S-7-07-0 installé dans le plot S.....	194
Figure A24 Déformation du CIUS A-6-0S-7-07-0 installé dans le plot S	195
Figure A25 Variations de déformation mesurées dans le plot S par le CIUS A-6-0S-7-07-0.....	196
Figure A26 Variations de contrainte mesurées dans le plot S par le CIUS A-6-0S-7-07-0	197
Figure A27 Schéma du CIUS et de la voûte 5-6 avec les repères 0XYZ.....	198
Figure B1 Méthodologie de développement du système d'alarme	211
Figure B2 Schéma de tous les composants du système d'alarme	213
Figure B3 Carte d'acquisition intelligente de l'Université de Sherbrooke	214
Figure B4 Table des matières d'un dossier de sécurité	216
Figure B5 Essai de compression uniaxiale sur le CIUS	217
Figure B6 a) Résultats des essais de chargement uniaxial du CIUS b) Résultats de l'essai de chargement biaxial	218
Figure B7 Le CIUS en cellule biaxiale et CAIUS dans son boîtier hermétique	219
Figure B8 Montage d'essai pour la validation en laboratoire	219
Figure B9 Exemple de l'évolution des déformations détectées avec CAIUS-Alarme	220

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Surveillance et phases critiques de la vie d'un barrage.....	16
Tableau 2.2 Principaux instruments utilisés pour l'instrumentation des barrages en béton.....	19
Tableau 2.3 Termes reliés à la performance des instruments de mesures.....	21
Tableau 3.1 Caractéristiques d'un câble à fibre optique Type Thrifty-Bit™ Simplex 50/125	49
Tableau 3.2 Principes physiques des capteurs à fibre optique	53
Tableau 4.1 Résultats du chargement en compression de diverses jauges EFO	70
Tableau 4.2 Mélange de béton du cylindre d'essais (E/C = 0,4)	73

Tableau 4.3	Propriétés mécaniques du béton et du cylindre instrumenté avec la jauge EFO	73
Tableau 4.4	CDT du béton et des divers extensomètres	93
Tableau 5.1	Matériaux de réhabilitation utilisés dans les poutres du stationnement Webster.....	100
Tableau 6.1	Paramètres mécaniques du béton à 28 j des cellules de déformation	124
Tableau 6.2	Facteur de jauge expérimental pour les cordes vibrantes	126
Tableau 6.3	Paramètres mécaniques du béton du cylindre à jauges parallèles	129
Tableau 6.4	Écart maximum des déformations mesurées entre la montée et la descente en charge du cylindre	131
Tableau A1	Sites instrumentés avec le CIUS	162
Tableau A2	Instrumentation du barrage Beauharnois avec les CIUS	167
Tableau A3	Date d'installation des CIUS dans la voûte 5-6 du barrage Daniel-Johnson	184
Tableau A4	Liste des graphiques montrant les résultats de l'instrumentation de la voûte 5-6 du barrage Daniel-Johnson avec les CIUS	185

CHAPITRE 1

Introduction

La nécessité de surveiller les ouvrages de génie civil, plus spécialement les grands barrages, ne fait maintenant plus de doute, autant parmi les concepteurs que les gestionnaires. Conséquemment, l'expression « sécurité des barrages » fait à présent partie du vocabulaire des techniciens, ingénieurs et administrateurs et elle intègre plusieurs aspects spécifiques: la sécurité du public, l'environnement et l'économie. Aussi, les contrecoups de la rupture ou de l'endommagement d'un barrage de grande envergure sont des pertes, plus ou moins considérables, à tous les paliers énumérés auparavant. La surveillance des barrages, corollaire au processus de sécurité, met en conjonction l'inspection visuelle, l'auscultation non destructive (méthodes géophysiques) et l'instrumentation, c'est-à-dire l'installation d'instruments de mesure à l'extérieur et à l'intérieur de la structure. C'est, par ailleurs, sur ce dernier point qu'est centré l'essentiel du travail qui suit.

1.1 Problématique

La surveillance des barrages est basée, entre autres, sur l'instrumentation dont l'efficacité est liée aux deux facteurs suivants [POUPART, 1994]: la détection précoce des anomalies et la rapidité de transmission des mesures. À court terme, l'auscultation doit avertir les exploitants du barrage de toute anomalie et, à plus long terme, elle permet aux ingénieurs d'effectuer l'analyse du comportement de la structure. Toujours selon cet auteur, c'est le diagnostic à court terme qui a la plus grande importance pour contrôler la sécurité de l'ouvrage. Ceci implique de veiller à deux

aspects fondamentaux: la qualité de la détection des anomalies et la rapidité de traitement des mesures.

Les mesures de déformations et de contraintes figurent parmi les indicateurs utilisés par les ingénieurs lors de l'évaluation du comportement d'un barrage. Ces mesures sont, entre autres, réalisées à l'aide de dispositifs multiaxiaux, dérivant des techniques de la mécanique des roches, dont la vocation première est l'évaluation des contraintes et déformations dans les massifs rocheux où leur intensité est beaucoup plus grande que dans les structures [GILL & coll., 1987; 1993]. Ces appareils sont parfois moins bien adaptés à cette application qu'est le suivi de structures comme les grands barrages.

La conception de ces appareils, que l'on appelle inclusions, intègre soit les jauges extensométriques à corde vibrante ou les jauges électriques. Ces diverses jauges extensométriques ont fait leur marque en instrumentation, autant géotechnique que structurale. Cependant, certaines questions demeurent quant à l'exactitude des mesures et à la perturbation qu'elles provoquent dans le milieu où elles sont noyées. En effet, la dimension et la rigidité des jauges « noyées » dans le béton constituent des aspects qui ne sont pas négligeables, pouvant modifier la répartition des déformations du milieu, et affectant sans doute les mesures. Quant aux jauges électriques, deux types sont disponibles, l'une conçue pour être noyée dans le béton et l'autre pour être collée à la surface d'un élément. Tandis que le premier conduit lui aussi à l'effet tout juste mentionné, on attribue au deuxième un comportement instable à long terme. En plus des limitations liées aux capteurs de déformations qui entrent dans la fabrication des dispositifs de mesures, la conception même de l'inclusion est tributaire de ses performances. En effet, selon la rigidité du matériau qui sert de support aux capteurs, on qualifie alors les inclusions de rigides, semi-rigides ou souples. Ces dernières appellations servent aussi de classification et chaque groupe présente des caractéristiques particulières parmi lesquelles se dégagent leurs avantages et leurs inconvénients.

Divers types d'inclusions ont été appliqués au suivi des variations de déformations et de contraintes, certains ayant même servi à la détermination des contraintes absolues, dans diverses structures [RAHMAN, 1992; RYALL, 1996; BOIS, 1995; GILL & coll., 1993; LEITE & coll. 1998]. Cependant on remarque, à la lecture des différentes études, que la détermination des

contraintes dans les barrages est parfois entachée d'incertitude. En effet, le calcul des contraintes passe dans un premier temps par l'établissement des constantes élastiques du milieu; il s'agit là d'une activité préalable relativement délicate. En général, des essais mécaniques sont réalisés en laboratoire sur des éprouvettes de béton. Maintenant, il n'est pas dit que les paramètres élastiques déterminés de cette manière s'accordent bien avec ceux que l'on pourrait mesurer à l'échelle de la structure ou du moins pour une section de celle-ci. Aussi, le calcul du tenseur des déformations et des contraintes passe par divers artifices mathématiques souvent peu attrayants pour un utilisateur moins familier avec ce type de calcul; la technique est alors parfois oubliée étant donné son inhérente complexité.

Tout récemment, une nouvelle génération de jauges extensométriques a fait son apparition dans le domaine de l'instrumentation; il s'agit des jauges à fibre optique. Il existe une version de la jauge à fibre optique Fabry-Pérot qui peut être noyée dans le béton pour en mesurer les déformations internes. Ces nouvelles jauges sont de taille réduite, insensibles aux champs électromagnétiques et la rapidité de lecture est accrue comparativement aux jauges plus classiques mentionnées ci-dessus. Cependant, l'application de ces jauges dans les structures, ou encore dans des activités de développement de dispositifs de mesure, ne peut être envisagée sans, dans un premier temps, en comprendre le principe et deuxièmement, sans en effectuer la validation en laboratoire et sur site.

1.2 Objectifs

L'objectif premier des travaux réalisés dans le cadre de cette thèse est le développement d'un dispositif de détection des déformations internes spécialement dédié au suivi à long terme des barrages. Ce détecteur doit être un instrument simple à fabriquer et à utiliser afin de garantir son avenir en pratique. On rappelle ici certaines spécifications de base identifiées par la CIGB [1988; 1989] concernant un instrument de mesure donné:

- il doit être robuste, juste et stable;
- son principe doit rester simple et comporter un minimum de pièces mobiles
- les appareils doivent être distribués de manière à ausculter l'ensemble de l'ouvrage;
- les lectures doivent être faciles et exiger un minimum d'effort;
- la cueillette des données doit pouvoir se faire durant plusieurs années;
- il doit être utilisé conjointement avec les inspections visuelles.

Aussi, retient-on les affirmations de POUPART [1994], citées auparavant, quant à l'importance de la détection précoce des anomalies. À cette fin, une partie du travail est axée sur le suivi des données en temps réel combiné à un «programme de détection des niveaux de déformation» puisque l'on préfère pour le moment cette appellation à celle plus courante de système d'alarme. Mentionnons que cette recherche s'inscrit à la suite des recherches sur le Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS) entreprises au Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée. Les plus récents travaux sont ceux de BOIS [1995], lequel s'est particulièrement intéressé au transfert des contraintes et déformations du milieu encaissant à cette cellule de mesure en béton. Aussi, l'auteur propose la miniaturisation du CIUS si éventuellement des extensomètres de petite taille étaient disponibles. La miniaturisation du CIUS se matérialise donc par le développement de prototypes de détecteurs de déformations internes. On envisage bien sûr d'utiliser les jauges à fibre optique mais on n'abandonne nullement celles à corde vibrante. Nécessairement, l'analyse de la performance de ces jauges pour la détection des déformations interne du béton doit être effectuée. La validation en laboratoire et en chantier de ces nouvelles jauges s'ajoute aux objectifs de cette recherche.

Parmi les contributions de ce travail, l'utilisation des fibres optiques pour l'instrumentation des barrages et le développement d'une cellule de mesure des déformations à fibre optique pourraient être retenus à titre d'originalité. En ce qui concerne la pertinence de la recherche, disons qu'actuellement, il n'est pas rare de concevoir des barrages en prévoyant une période d'exploitation de soixante ans et on peut même répertorier des cas de barrages en service âgés de cent ans. Cela dit, tous les problèmes de vieillissement doivent être pris en compte et un niveau constant de sécurité doit être maintenu [FANELLI, 1994]. Cette assertion justifie, à elle seule, toute la pertinence de la recherche entreprise. Au Québec, plus de la moitié des barrages en béton ont plus de cinquante ans et il est impossible de les remplacer tous [VERZENI & ROBICHAUD, 1998]; il faut donc effectuer la surveillance à l'aide d'instruments à la fine pointe de la technologie.

1.3 Structure de la thèse et documentation

Le présent chapitre a exposé la problématique, les objectifs et la pertinence de la présente étude dans le domaine de l'instrumentation des barrages. Le développement de prototypes de détecteurs de déformations nécessite une documentation provenant de domaines d'activités variés: ingénierie des barrages, optoélectronique, mécanique des roches et matériaux. Quant au chapitre 2, il précise le rôle et l'importance de l'instrumentation des barrages dans un schéma global de gestion du risque. On effectue une revue des instruments de mesure utilisés pour le suivi des barrages et spécialement ceux dédiés aux mesures de déformations et de contraintes, c'est-à-dire les jauges extensométriques et les cellules de mesure; on en profite aussi pour introduire le détecteur de déformations. Les jauges extensométriques à fibre optique constituent une toute nouvelle technologie. Le chapitre 3 est consacré à une revue de la technologie des capteurs à fibre optique. Les premières sections de ce chapitre exposent certaines notions fondamentales reliées aux fibres optiques. Par la suite, la technologie des capteurs à fibre optique est abordée en plus de la description de divers modèles de capteurs. Finalement, diverses applications de ces nouveaux capteurs dans le domaine du génie civil sont mises en relief.

Le chapitre 4 présente la validation de la jauge à fibre optique Fabry-Pérot de type EFO (*Embedment Fiber Optic*). On y expose les résultats d'une série d'essais mécaniques en laboratoire sur ce type de jauges enfouies dans des cylindres de béton. Du reste, le phénomène d'inclusion jauge-béton est un aspect auquel on s'intéresse particulièrement. La modélisation par éléments finis de l'interaction jauge EFO-béton est effectuée à l'aide du logiciel COSMOS/M. Les applications en chantier n'ont pas été négligées. En effet, le chapitre 5 présente les résultats de l'instrumentation d'une passerelle piétonnière fabriquée en béton de poudres réactives (BPR) et de certains éléments structuraux d'un stationnement à étages multiples.

Le chapitre 6 s'arrête au développement des cellules de mesure des déformations. Les expérimentations et simulations réalisées sur des prototypes de cellules de mesure à fibre optique et à corde vibrante sont détaillées. Aussi, quelques éléments liés à l'acquisition des données en temps réel ainsi qu'aux programmes informatiques utiles à la détection des déformations pouvant éventuellement être combinés aux cellules de déformations internes, sont présentés.

CHAPITRE 2

Sécurité et instrumentation des barrages en béton

En 1933, à Stockholm, sous l'égide de la Commission internationale des grands barrages, (CIGB), avait lieu le premier Congrès des grands barrages. La mission de cet organisme international est de favoriser l'échange des connaissances et de l'expérience dans le domaine de l'ingénierie des barrages. Les congrès des grands barrages se tiennent tous les trois ans et une revue des comptes rendus de ces événements permet de constater la grande variété des thèmes abordés : sécurité, coût, auscultation, réfection, etc. Cependant, on peut dire que le thème de la sécurité des barrages, lorsqu'il n'est pas carrément le sujet de premier ordre, reste néanmoins en filigrane dans les questions examinées. Voici une liste chronologique où, parmi les sujets discutés, figure le vocable sécurité des barrages:

- 1955 Bilan économique et sécurité des différents types de barrages en béton;
- 1967 Sécurité des barrages du point de vue de la fondation et stabilité des versants de la retenue;
- 1982 Sécurité des barrages en service;
- 1985 Mesures pour renforcer la sécurité des barrages en service;
- 1994 Évaluation et renforcement de la sécurité des barrages en service.

Au Québec, parmi les 565 barrages exploités par Hydro-Québec, on en compte 146 en béton dont plus de la moitié sont en service depuis plus de 50 ans. En tant que propriétaire d'un très grand nombre de barrages, Hydro-Québec s'est doté d'un processus « Sécurité des barrages » avec des

principes directeurs bien précis [VERZENI & ROBICHAUD, 1998]. Parmi ces principes de sécurité, on en retient trois où figurent les notions de surveillance et d'instrumentation :

- mettre en œuvre des mesures spécifiques à chaque aménagement, permettant d'intervenir en temps opportun dans le but de prévenir ou maîtriser toute situation d'urgence;
- adapter notre suivi et notre instrumentation aux paramètres de performance de l'ouvrage;
- se doter d'un processus capable de détecter toute anomalie qui pourrait survenir durant la vie d'un ouvrage.

L'instrumentation est intimement liée à la sécurité des barrages, puisqu'elle fait généralement partie des processus de surveillance [CDSA, 1995]. Dans ce chapitre, on s'applique, en plus de définir les divers types de barrages en béton, à situer le processus de surveillance dans une approche de gestion du risque et aussi de décrire les divers instruments utilisés pour le suivi du comportement des barrages. Parmi les instruments étudiés, on remarquera le Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS), pour lequel on présente une revue détaillée de ses applications (annexe A). Le fait que le détecteur de déformations, dont on prévoit entamer le développement, soit un proche parent du CIUS, autant dans son principe que dans sa construction, n'est pas étranger à cette étude plus approfondie du CIUS.

2.1 Types de barrages

L'organigramme de la figure 2.1 présente la plupart des types de barrages rencontrés dans le monde. Puisque l'un des objectifs de cette thèse est le développement d'un appareil dédié à l'instrumentation des barrages en béton, on s'attachera essentiellement à la description de cette catégorie de barrage. De plus, bien que le choix et la construction d'un type de barrage fassent intervenir, du point de vue technique, de nombreux aspects : topographie, géologie, sismicité, on se restreint tout de même à une description de la structure générale des divers modèles. Des ouvrages de base tels *Advanced Dam Engineering* de JANSEN [1988], *Handbook of Dam Engineering* de GOLZÉ [1977] et *Cours de calcul de barrages* de BOURGIN [1955] constituent des manuels techniques très complets sur la conception des barrages. Des textes à caractère grand public sont aussi disponibles, citons entre autre celui de BELLIER [1982] ainsi que celui de

SCHNITTER [1994] sur l'histoire des barrages. De tous ces ouvrages sont extraits certains des enseignements contenus dans les paragraphes qui suivent.

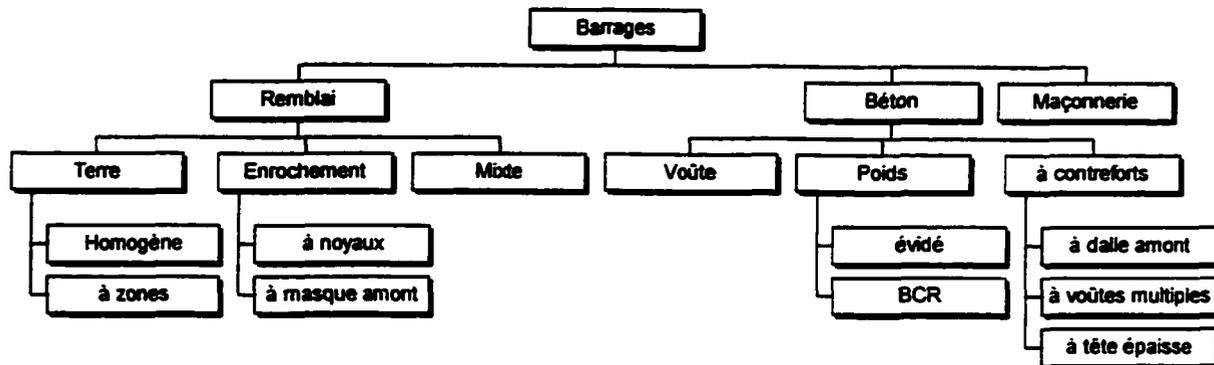


Figure 2.1 Organigramme des divers types de barrages

2.1.1 Barrage-poids

Le barrage-poids en est un dont le principe est relativement simple. Comme son nom l'indique, son seul poids, créé par l'énorme masse de béton dont il est construit, est garant de sa stabilité vis-à-vis du glissement et du basculement. La figure 2.2 montre un schéma d'un barrage-poids typique.

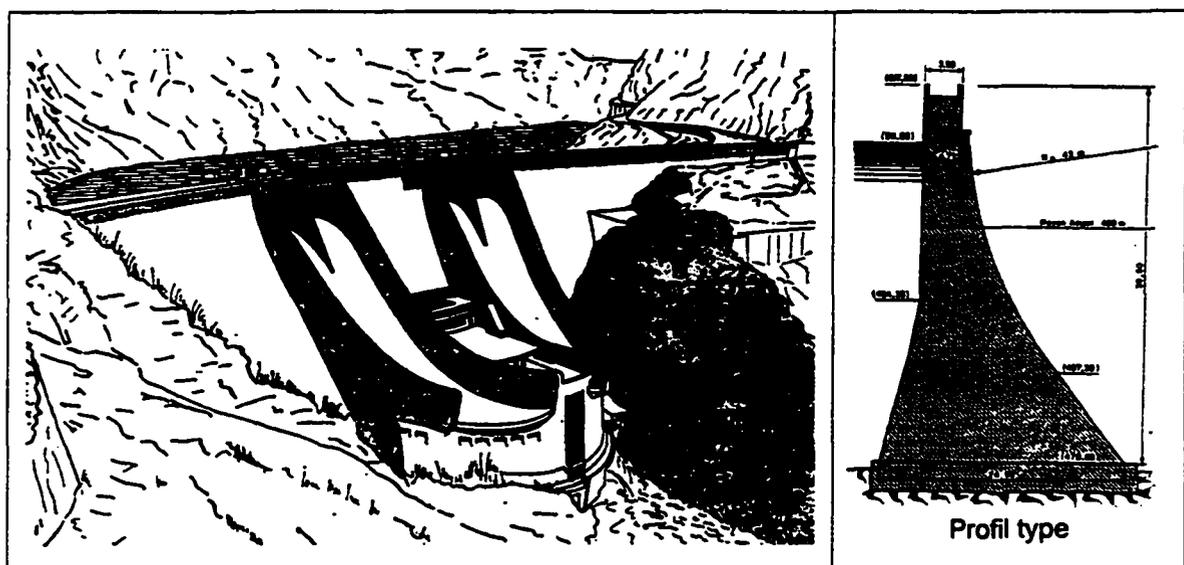


Figure 2.2 Illustration d'un barrage poids [tirée de Bellier, 1982]

Ce type de barrage présente généralement un profil triangulaire ou, du reste, qui s'en approche. En ce qui a trait à la méthode de construction, le coulage et la vibration du béton par niveaux successifs d'unités juxtaposées sont d'usage courant; toutefois, le béton compacté au rouleau (BCR) fait l'objet de diverses recherches pour la construction de ce type de barrage. Aussi, différentes structures connexes, comme les évacuateurs de crues, complètent l'ouvrage pour former l'ensemble de la structure hydraulique.

2.1.2 Barrage à contreforts

Le barrage à contreforts est de conception analogue au barrage-poids, en fait, la pression hydrostatique agit sur des dalles de béton adjacentes et les efforts sont transmis à des « contreforts » de forme triangulaire régulièrement espacés (Fig. 2.3).

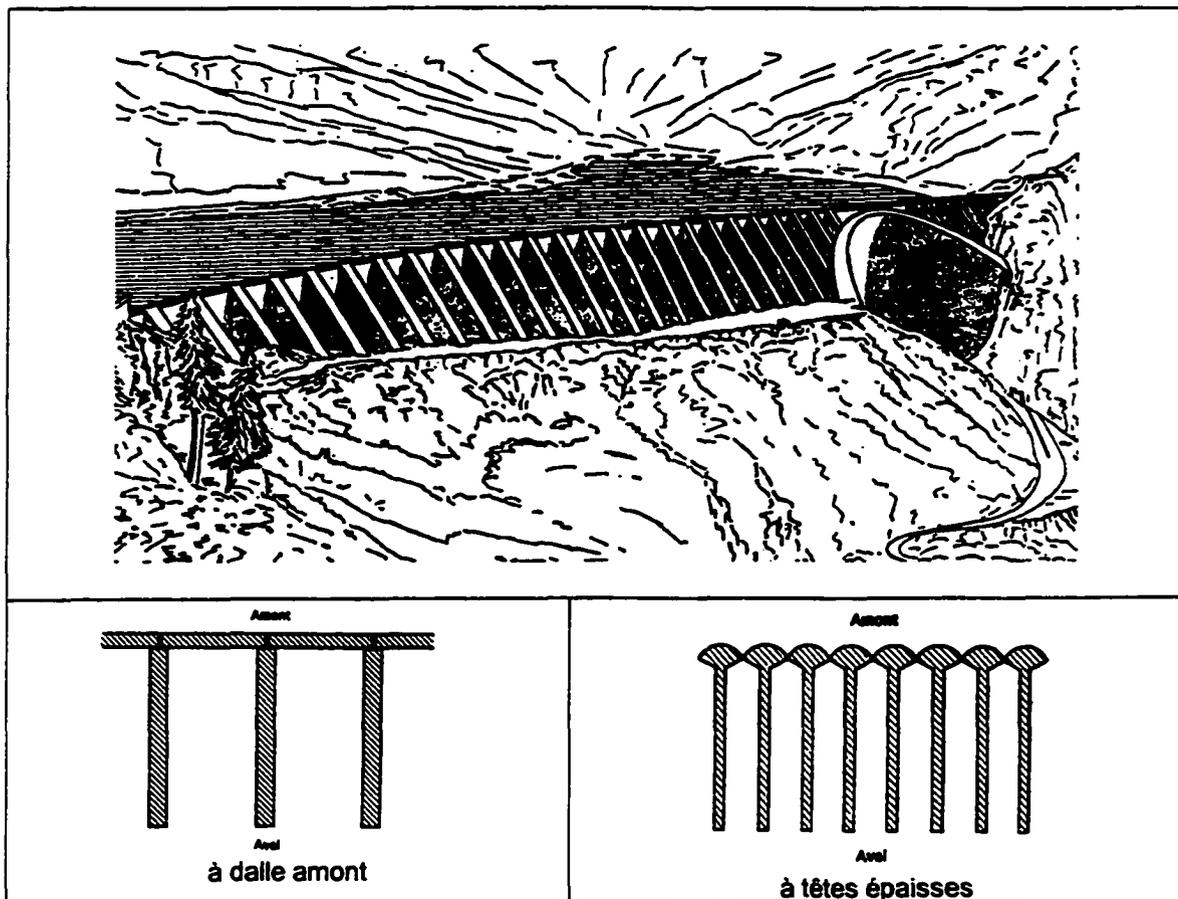


Figure 2.3 Illustration d'un barrage à contreforts [tirée de Bellier, 1982]

À moins de resserrer grandement l'espace entre les contreforts, réduisant ainsi la portée des dalles, on ne peut guère atteindre des hauteurs élevées avec ce type de construction. Aussi, afin d'obtenir un gain en hauteur, on préférera des dalles amont plutôt que des « têtes épaisses ». Ces têtes de forme ronde ne sont pas reliées mais tout simplement en contact et un joint d'étanchéité est installé entre elles bloquant ainsi le passage de l'eau. Cette forme des têtes permet de diriger les forces vers le contrefort. Le glissement et le renversement sont aussi, tout comme les barrages-poids, les paramètres de stabilité à prendre en compte.

2.1.3 Barrage-voûte

La géométrie du barrage-voûte est tout à fait différente de celle des barrages décrits précédemment. On a ici une forme de barrage qui s'apparente à celle de la portion centrale d'un fuseau (Fig. 2.4).

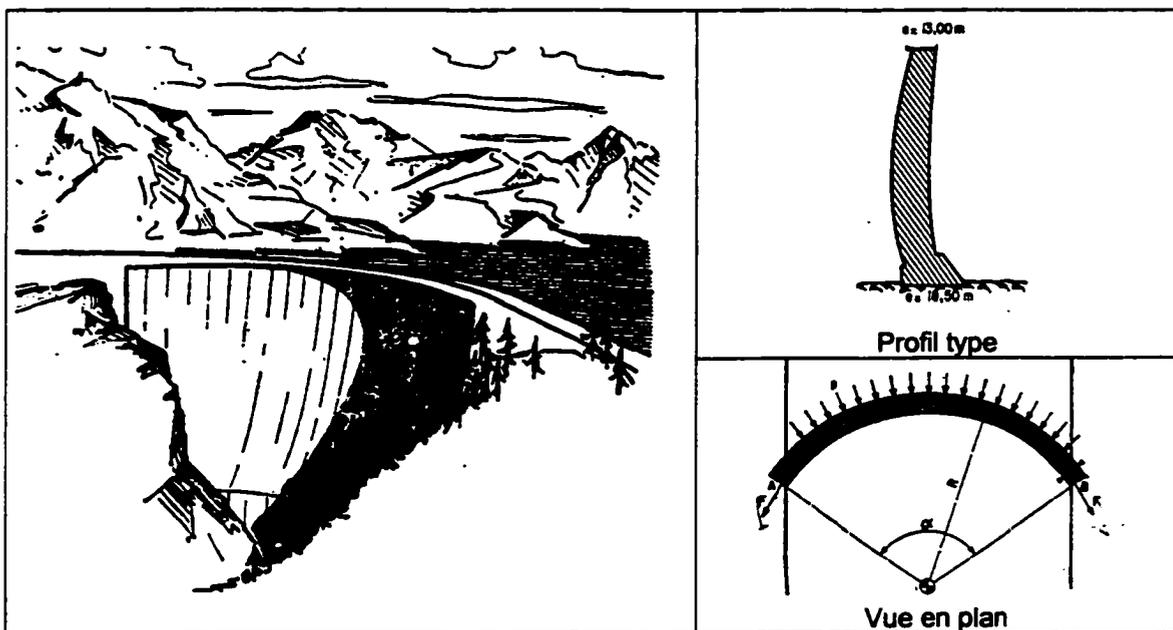


Figure 2.4 Illustration d'un barrage-voûte [tirée de Bellier, 1982]

On y retrouve alors une double courbure, l'une dans la direction amont-aval, avec la convexité tournée vers l'amont, et l'autre dans la direction perpendiculaire aux rives. Ces dernières, formées par le massif rocheux, sont par ailleurs d'une grande importance dans ce type de structure car elles constituent les appuis sur lesquels toute la pression générée par la masse d'eau bloquée sera

retransmise. Par conséquent, le massif rocheux doit faire l'objet d'études de mécanique des roches approfondies puisqu'il fait ni plus ni moins partie intégrante de la structure du barrage. D'ailleurs, les modélisations numériques des barrages-voûtes tiennent compte de l'interaction barrage-fondation [SWOBODA & LEI, 1994].

2.1.4 Barrage à voûtes multiples

À l'examen de ce modèle de barrage on repère rapidement le gabarit du barrage à contreforts et celui du barrage-voûte (Fig. 2.5). En effet, le barrage à voûtes multiples est une combinaison de ces deux architectures. Les contreforts sont de géométrie identique à ceux du barrage à contreforts. Quant à la voûte, celle-ci est pourvue d'une légère pente vers l'amont de manière à ce que le poids de l'eau agisse à la verticale pour stabiliser la structure. On ne peut passer sous silence, à titre d'exemple de ce type de structure, le barrage Daniel-Johnson (Manic 5). Ce barrage, d'une hauteur de 214 m et de 1 314 m de longueur et dont la construction s'est achevée en 1968, est toujours en service et connu à travers le monde à titre de grande réalisation de l'ingénierie des barrages. Semblables structures d'autant d'envergure nécessitent l'orchestration de diverses activités de surveillance. Avant d'en faire ressortir les grandes lignes, voyons les forces qui agissent sur celles-ci.

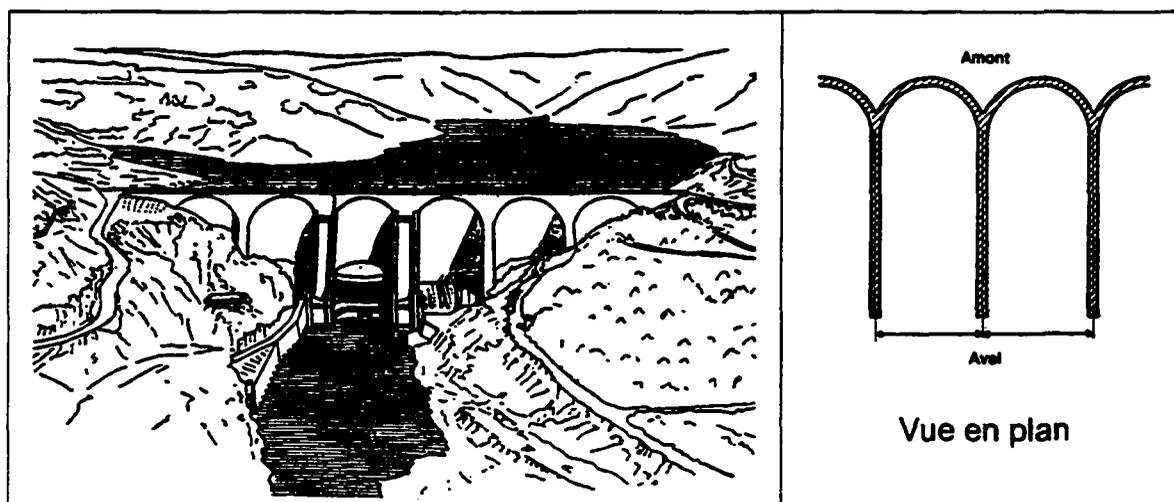


Figure 2.5 Illustration d'un barrage à voûtes multiples [tirée de Bellier, 1982]

2.1.5 Mécanique des barrages

Les barrages sont soumis à de nombreuses forces de diverses natures: hydrostatique, thermique, sismique, pressions internes. La figure 2.6 tente de regrouper en un schéma synthèse ces différents types de sollicitations.

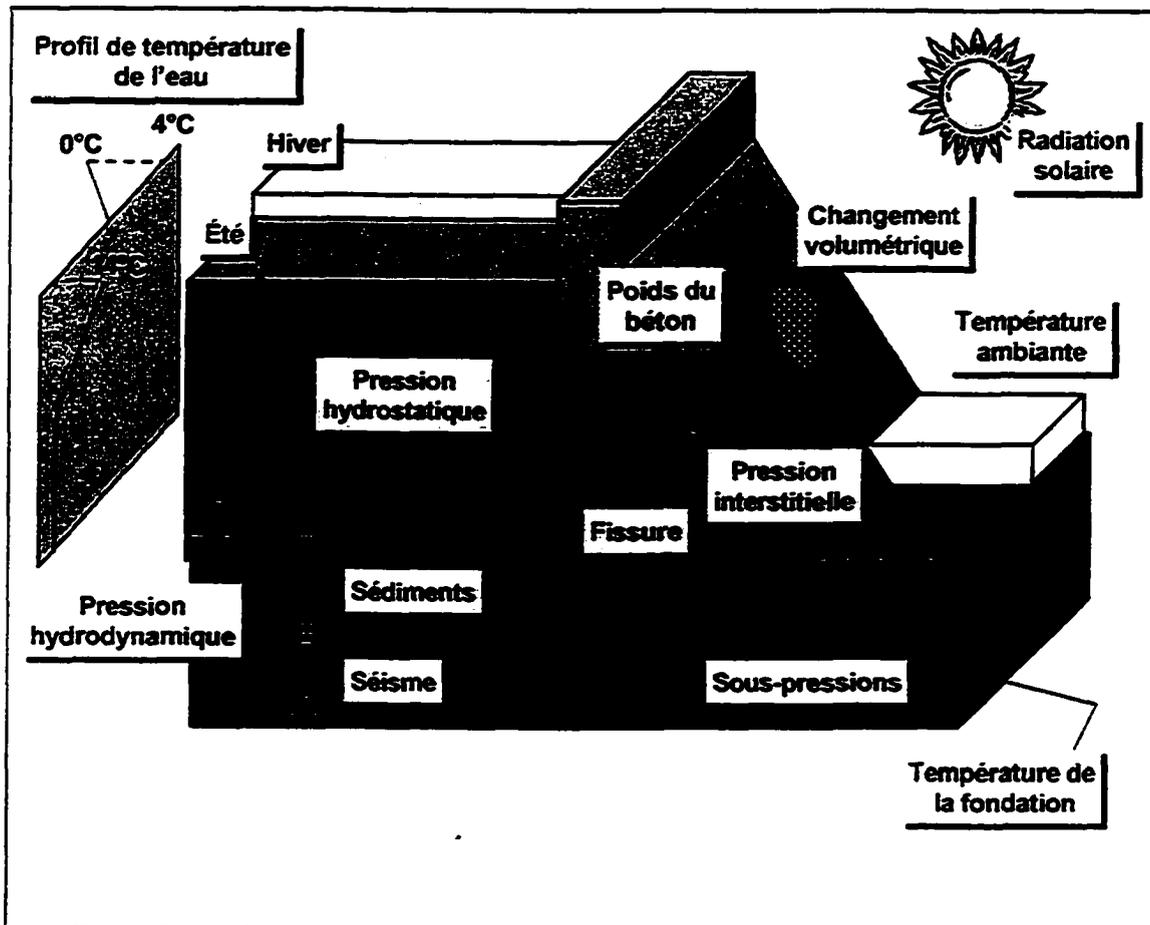


Figure 2.6 Forces agissant sur les barrages en béton [adapté de Léger & Tinawi, 1994]

Manifestement, la pression générée par l'eau sur le parement amont d'un barrage est celle qui vient immédiatement à l'esprit, car bloquer le passage de l'eau est l'objectif ultime de telles constructions. Par ailleurs, l'eau peut aussi agir par le développement de sous-pressions à la base du barrage (du moins pour les barrages-poids). Aussi, lors de séismes, on assiste, en plus du déplacement du socle rocheux, à la génération de vagues qui créeront des forces hydrauliques supplémentaires devant être contrées par le barrage. Parmi les forces externes, on compte aussi

les effets de la température, autant celle de l'air ambiant que celle de l'eau du réservoir et des fondations.

Divers phénomènes agissent, certains prenant même naissance, au sein de la structure. Par exemple, l'apparition d'une fissure horizontale, ouverte à partir du parement amont du barrage, autorise l'eau à y pénétrer avec une pression égale à la pression hydrostatique [BOURGIN, 1955]. Aussi, reliée à la présence de l'eau: la pression de pore. Il existe une relation entre la résistance mécanique du béton et la pression interstitielle qui se développe dans des éprouvettes de béton diversement sollicitées [IRMAN & PANTAZOPOULOU, 1996; MILLS, 1966]. La chaleur d'hydratation et le retrait du béton engendrent certaines modifications à court terme et d'autres effets, à plus long terme, comme le fluage et les réactions alcalis-granulats sont à considérer; ces dernières constituent d'ailleurs un problème d'actualité.

Il faut voir que dans le cas des barrages à contreforts et les barrages-voûtes, les forces en jeu sont pour tout dire les mêmes. Néanmoins, pour ce qui est des barrages à contreforts, les sous-pressions vont généralement se dissiper étant donné l'espace entre les nombreux appuis. Avec son modèle en arc, le barrage-voûte a la propriété singulière d'appuyer littéralement ses extrémités sur le massif rocheux et de nouvelles forces de réaction agissent alors aux parois latérales.

2.2 Surveillance des barrages

La figure 2.7 permet de situer l'activité de surveillance dans le schème global de la gestion du risque [CSA, 1991]. On observe que dans un processus de gestion du risque, deux notions interviennent : l'analyse du risque et le contrôle du risque. La première est, en grande partie, de nature sociologique où les probabilités tiennent aussi un rôle. L'analyse de risque constitue une importante source de données pour la phase de contrôle de risque et elle est aussi utile à l'étape de la surveillance. En effet, une identification précise des dangers conduit à l'élaboration d'un plan de surveillance taillé sur mesure.

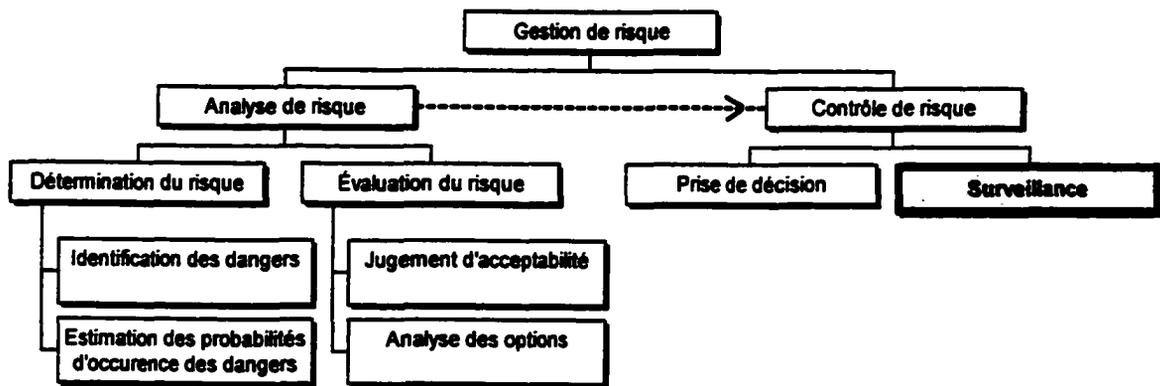


Figure 2.7 Organigramme des éléments de gestion de risque [d'après CSA, 1991]

Les méthodes d'analyse de risque ne sont pas, à l'heure actuelle, fréquemment utilisées en pratique mais il s'agit de méthodes acceptables et tout à fait applicables en matière de sécurité des barrages [HARTFORD & SALMON, 1997; LAFITTE, 1993]. Diverses méthodologies permettant d'estimer les coûts d'une rupture de barrage ont, par ailleurs, été développées et celles-ci peuvent servir d'aide dans l'élaboration d'analyses de risque [ELLINGWOOD & coll., 1993; SALMON & HARTFORD, 1995]

Quant à la notion de contrôle du risque, le rapprochement avec le thème de cette étude est plus aisé, puisqu'en rapport étroit avec la surveillance et par le fait même à l'instrumentation. En effet, la « surveillance » d'un barrage est l'ensemble des observations et des mesures que l'on dresse et poursuit à diverses étapes de la vie d'un barrage. L'ultime objectif est, aux suites des analyses et des interprétations de ces observations et mesures, de décider de poursuivre ou de cesser l'exploitation du barrage [BELLIER, 1982; DUSCHA & JANSEN, 1988].

La surveillance d'un barrage peut être réalisée à diverses étapes de la vie de ce dernier. DUSCHA & JANSEN [1988] donnent les cinq phases critiques où les activités de surveillance sont nécessaires; celles-ci sont regroupées au tableau 2.1.

Tableau 2.1
Surveillance et phases critiques de la vie d'un barrage

Phase	Description	Objectifs de la surveillance
1	Conception	Vérification et suivi des conditions externes auxquelles sera soumise la future structure
2	Construction	Vérification des charges structurales et des hypothèses de calcul
3	Premier remplissage	Observation des impacts créés par les charges hydrauliques et par l'écoulement
4	Premières opérations	Suivi global de la structure alors soumise à de nombreux efforts liés aux opérations
5	Viellissement	Suivi du comportement de la structure après avoir subi des sollicitations extrêmes (crues, séismes, etc.)

À cet égard, KHEIFITS [1995] effectue l'analyse de données statistiques de certaines ruptures et d'incidents relevés à travers le monde et compilées par la CIGB. Ces données sont ici reprises et présentées sous forme graphique à la figure 2.8.

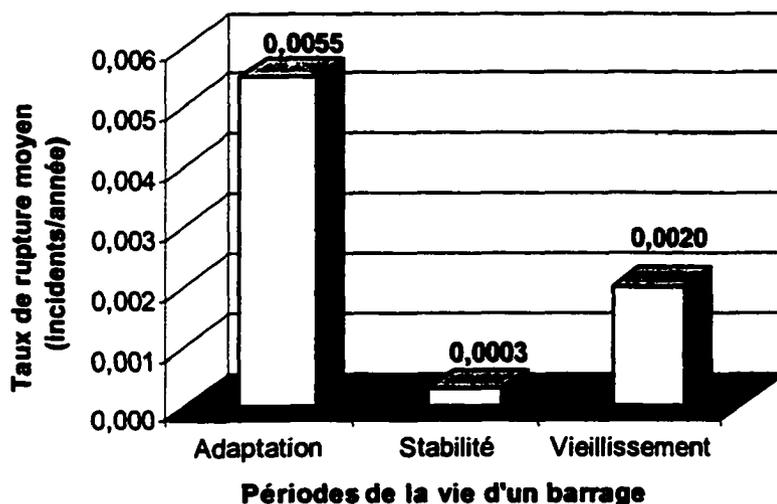


Figure 2.8 Nombre d'incidents par année en relation avec la période de la vie d'un barrage (adapté de Kheifits, 1995)

Dans cet histogramme, les trois grandes périodes de la vie d'un barrage forment l'abscisse; on retrouve la période d'adaptation (0 à 5-7 ans), la période de stabilité (7 à 30-50 ans) et la période de vieillissement (30-50 ans et plus). Quant à l'ordonnée, elle présente le nombre d'incidents par

année. La période d'adaptation est, comme on le voit, un moment critique de la vie d'un barrage; 70% des ruptures se sont produites dans les 10 premières années d'exploitation [CIGB, 1995]. La période de vieillissement n'est pas à négliger non plus, car pendant les 30 ou 50 années de stabilité, le personnel affecté à la surveillance sera sans doute remplacé deux ou même trois fois. Celui-ci laisse peut-être derrière lui une documentation ne notant pas, ou peu, de problèmes particuliers transmettant ainsi, aux générations suivantes, cette perception de sécurité. Au moment où commence le vieillissement de la structure, cette fausse perception de sécurité pourrait mener à ne pas prévoir certains événements qui du reste pourraient s'avérer catastrophiques.

Le vieillissement d'un barrage, d'un point de vue structural, se traduit généralement par la dégradation du béton du barrage autant à l'extérieur qu'à l'intérieur de la structure. En effet, il est possible d'observer à la face extérieure des barrages certaines altérations ou fissurations du béton, à proximité des joints de construction, souvent liées aux cycles de gel-dégel [BHATTI & coll., 1994]. Toutefois, depuis quelques années, les ingénieurs sont confrontés aux réactions alcalis-granulats (RAG); celles-ci prenant naissance à l'intérieur même de la structure [BALLIVY & coll., 1995; DANAY & coll., 1994; THOMPSON & coll., 1994]. En 1992, on répertoriait 78 cas de barrages présentant les symptômes de RAG [ROGERS & coll., 1994]. De telles réactions endommagent le béton et engendrent des déformations internes modifiant ainsi l'état de contrainte dans la structure. La phase 5 de la surveillance mettra donc à profit, sur une très longue période, divers appareils de mesures permettant de vérifier l'intégrité de la structure. La section qui suit est donc consacrée à l'instrumentation et à une description de quelques-uns des instruments d'auscultation.

2.3 Instrumentation des barrages en béton

De façon générale, l'instrumentation des barrages peut être réalisée pour vérifier les hypothèses de conception, le comportement global de l'ouvrage ou encore pour la mesure de paramètres spécifiques. Aussi, dans le cas des barrages plus anciens, la ré-instrumentation est utile dans les programmes de vérification de la stabilité et du comportement des barrages. Plus spécifiquement, l'instrumentation a pour objectifs [DEGOUTTE, 1993]:

- le suivi de l'ouvrage et de sa fondation pendant sa durée de vie pour vérifier qu'il continue à remplir son rôle et ne présente pas de risque pour la sécurité des personnes;
- la vérification, pendant la construction du comportement de l'ouvrage afin, si nécessaire, d'adapter le projet;
- la comparaison des mesures aux prévisions pour l'amélioration des projets futurs.

L'instrumentation fait partie du processus global de surveillance et ne présente pas à elle seule la solution à tous les maux, bien qu'à ce propos, KHEIFITS [1995] fait valoir que pour les barrages équipés de systèmes d'instrumentation, la probabilité de rupture ou d'incidents divers sont amenuisées d'au moins un ordre de grandeur. L'observation des sites et l'inspection visuelle des barrages ne doivent en aucun cas être négligés et qui plus est, ils devraient figurer, avec les mesures géodésiques, en tête de liste des activités de surveillance. Dans le cas où l'on repère d'éventuels désordres méritant une étude plus détaillée, ou encore si le suivi en continu de divers paramètres est souhaité, on recourt alors à l'instrumentation afin de compléter quantitativement le diagnostic [LEPS, 1985]. Aussi, en ce qui touche les données de l'instrumentation, il est impératif de les traiter, les analyser et les interpréter rapidement afin de prévenir, en excluant tout délai, une situation d'urgence; ce dernier point constitue d'ailleurs un article des recommandations pour la sécurité des barrages aux États-Unis [DANILEVSKY, 1993].

Les outils mathématiques comme la modélisation numérique et les calculs analytiques ne doivent pas non plus être laissés pour compte car ils sont utiles dans l'interprétation des données issues du réseau d'instruments, dans l'identification des mécanismes de rupture en fonction de différents scénarios de chargement ainsi que dans les études de performance des méthodes de réhabilitation [LÉGER & TINAWI, 1994; CIGB, 1992]. Enfin, certaines méthodes dites « non destructives » entrent maintenant dans la pratique, l'émission acoustique, la tomographie sismique, la gammagraphie, permettent une évaluation quantitative de l'état des matériaux des barrages [CIGB, 1988; KHARRAT, 1997]

2.3.1 Instruments et paramètres mesurés

Les instruments disponibles pour le suivi des structures, en l'occurrence des barrages en béton sont nombreux. On présente au tableau 2.2 une liste des principaux instruments qui trouvent application dans ce vaste domaine.

Tableau 2.2
Principaux instruments utilisés pour l'instrumentation des barrages en béton

Instrument	Paramètres mesurés
Pendule direct	Rotation et déplacements horizontaux
Pendule inversé	Rotation et déplacements horizontaux
Extensomètre de forage	Déplacements verticaux
Fissuromètre	Ouverture des joints (en surface ou enfoui)
Jauge extensométrique	Déformation unitaire du béton de la structure
Thermomètre	Mesure de la température interne et ambiante
Piézomètre	Sous-pressions
Capteur de pression	Sous-pressions
Inclinomètre	Rotation
Vase communicant	Déplacements verticaux
Flotteur	Niveau d'eau de la retenue et niveau d'eau aval
Accéléromètre	Accélération (séismes)

L'exposé détaillé de la construction et du fonctionnement de chacun de ces instruments n'est pas offert ici. De surcroît, pour constituer une documentation complète et rigoureuse, il faudrait traiter chacune des technologies disponibles pour chaque appareil, car effectivement, les instruments peuvent voir leur principe basé sur la mesure des fréquences (instruments à corde vibrante), sur une mesure de nature électrique (résistance, induction) et certains, plus récents cependant, basés sur la technologie fibre optique [CHOQUET & coll., 1997]. Pour les deux premiers types, plus classiques, des ouvrages comme celui de DUNNICLIFF [1988] et de HANNA [1985] se chargent de décrire de manière extensive les nombreux appareils de mesure en géotechnique en plus de recenser des applications types. En revanche, on s'attache ici à l'étude d'instruments qui permettent la mesure des déformations du béton, c'est-à-dire les jauges extensométriques, ainsi qu'aux cellules de mesure des déformations et contraintes.

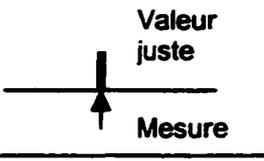
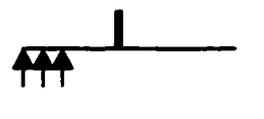
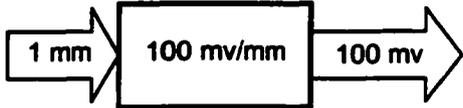
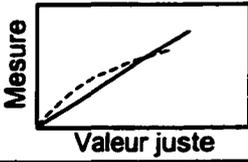
2.4 Mesure des déformations: jauges extensométriques

A priori, le simple fait qu'un matériau se déforme dans le temps, témoigne de l'existence de certains désordres structuraux. Si cette déformation s'accroît continuellement on peut anticiper la ruine éventuelle du matériau. Par ailleurs, les plus cartésiens vont se référer aux enseignements de la résistance des matériaux: la déformation est directement reliée à la résistance ultime d'un matériau donc à la contrainte maximale avec laquelle on peut le solliciter. Conséquemment, il devient alors important de faire le suivi des déformations. Pour ce qui est du béton, des jauges extensométriques issues de technologies diverses sont disponibles pour accomplir cette opération et peuvent être installées à l'extérieur, sur une face de la structure, ou noyées dans la masse; on s'intéresse particulièrement à cette dernière catégorie. Chacune des différentes jauges se distingue par ses performances spécifiques. Aussi, une terminologie décrivant ces mêmes performances est maintenant établie et présentée au tableau 2.3. Cette dernière sera utile dans la description et la validation, aux sections et chapitres suivants, de quelques-unes des jauges largement utilisées à l'heure actuelle.

2.4.1 Jauge à corde vibrante

En ce qui a trait aux mesures des déformations, l'extensomètre à corde vibrante est sans contredit très populaire pour la mesure des déformations et il reçoit la faveur de nombreux chercheurs et praticiens autant dans le domaine des structures que de la mécanique des roches [BORDES & DEBREUILLE, 1985; DASCAL & SUPÉRINA, 1985; TUNBRIDGE & ØIEN, 1988; MARTIN, 1989; McRAE & SIMMONDS, 1991]. La technologie des cordes vibrantes est considérée comme étant fiable et les instruments basés sur celle-ci présentent une longévité et une précision de mesure qui cadrent assez bien avec les conditions et objectifs de l'instrumentation de grandes structures. La figure 2.9 montre un type d'extensomètre à corde vibrante. Quant à son fonctionnement, disons simplement qu'il est basé sur la mesure de la fréquence d'oscillation d'un petit fil métallique tendu à l'intérieur d'un tube de protection qui constitue le corps même de la jauge. Si l'on connaît la variation de la fréquence d'oscillation du fil, il est possible de calculer la variation de déformation en combinant les équations décrivant les oscillations des corps à celles de la propagation des ondes [SEARS & coll. 1987].

Tableau 2.3
Termes liés à la performance des instruments de mesures

Terme	Définition	Schématisation
Exactitude	Lorsque la mesure s'approche de la valeur réelle de la quantité mesurée (justesse de la mesure).	
Précision	Lorsque les valeurs d'une série de mesures s'approchent de la moyenne de ces mesures (reproductibilité).	
Résolution	La plus petite division de l'échelle de mesure de l'instrument.	
Sensibilité	Fait référence à la réponse d'un instrument suite à l'application d'une quantité donnée; en pratique on dit souvent l'échelle. Par exemple, 100 mv/mm.	
Étendue	Valeurs minimale et maximale pouvant être mesurées avec l'instrument.	
Linéarité	Un instrument est dit linéaire lorsque les valeurs mesurées sont directement proportionnelles à la quantité mesurée. L'écart entre les courbes est une mesure de la linéarité exprimée en pourcentage.	
Hystérésis	Écart entre les valeurs mesurées lors du chargement et celles du déchargement. L'espace entre l'aller et le retour est une mesure de l'hystérésis.	

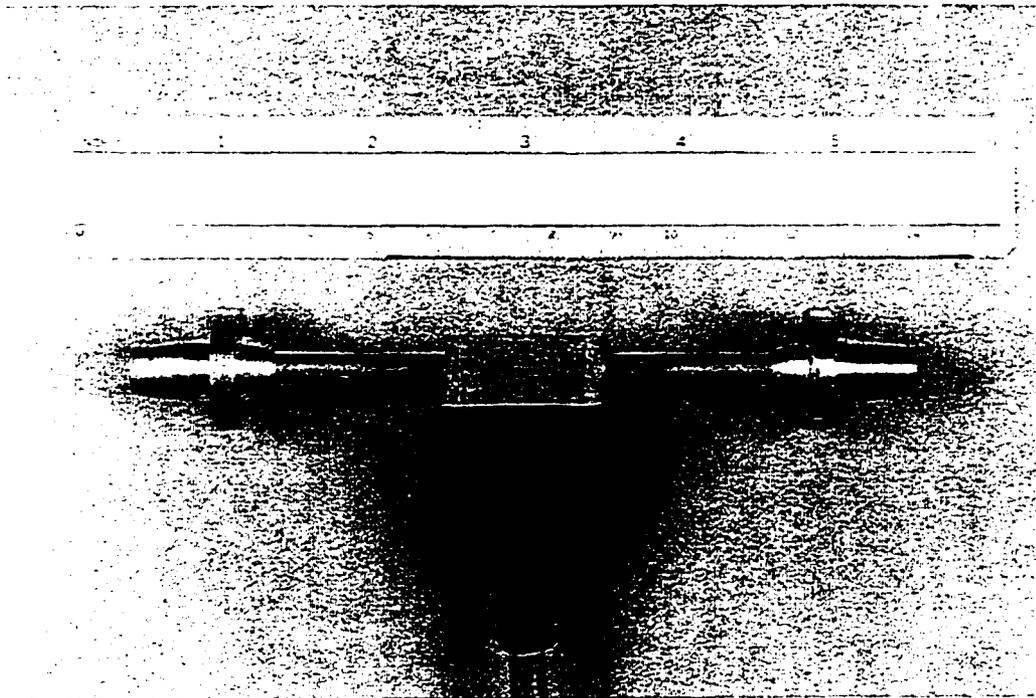


Figure 2.9 Extensomètre à corde vibrante

Les principaux avantages sont leur solidité, leur longévité et aussi le fait que le signal en fréquence peut parcourir, sans atténuation notable, plusieurs kilomètres de distance. Bien que ce type d'instrument soit performant, certaines appréhensions subsistent quant à leur encombrement et à leur rigidité. La jauge noyée dans le béton n'a généralement pas le même module d'élasticité que le béton qui l'entoure, ce qui a pour effet de modifier le champ, c'est-à-dire la répartition, des déformations dans le béton à l'endroit de la jauge: c'est l'effet d'inclusion. Mentionnons que ce phénomène n'est pas unique aux jauges à corde vibrante, toute jauge, instrument où objet dont les propriétés élastiques différent de la matrice dans laquelle il est enfoui provoque ce même effet avec une intensité plus ou moins grande [ESHELBY, 1957; 1959]. D'ailleurs, un modèle de jauge à corde vibrante de faible rigidité a été développé pour l'instrumentation du béton et voit une application dans le suivi de l'évolution des réactions alcalis-granulats [LARIVE & coll., 1995].

2.4.2 Jauge électrique

Les jauges électriques sont utilisées dans la conception de nombreux instruments géotechniques. Leur principe repose sur le fait que la résistance électrique d'un conducteur varie en directe proportion avec le changement de sa longueur. Il existe divers modèles de jauge électrique mais les plus couramment utilisés sont les jauges collées (*bonded foil gauge*) et les jauges noyées dans une matrice plastique ou composite; elles se présentent avec diverses configurations (rosettes) et longueurs. La figure 2.10 montre une jauge électrique pouvant être noyée dans le béton afin d'en mesurer les déformations. La technologie relativement simple de ces jauges constitue un avantage certain; elles sont peu coûteuses, les unités de lecture portatives sont couramment disponibles et la possibilité d'effectuer l'acquisition automatisée du signal est aisément obtenue puisque de nombreuses cartes et systèmes d'acquisition offrent cette option. Toutefois, ces jauges sont flanquées d'une étiquette d'instabilité à long terme; l'humidité, la température, les connexions et la perte du signal électrique sur de grandes distances sont autant de sources d'erreurs.

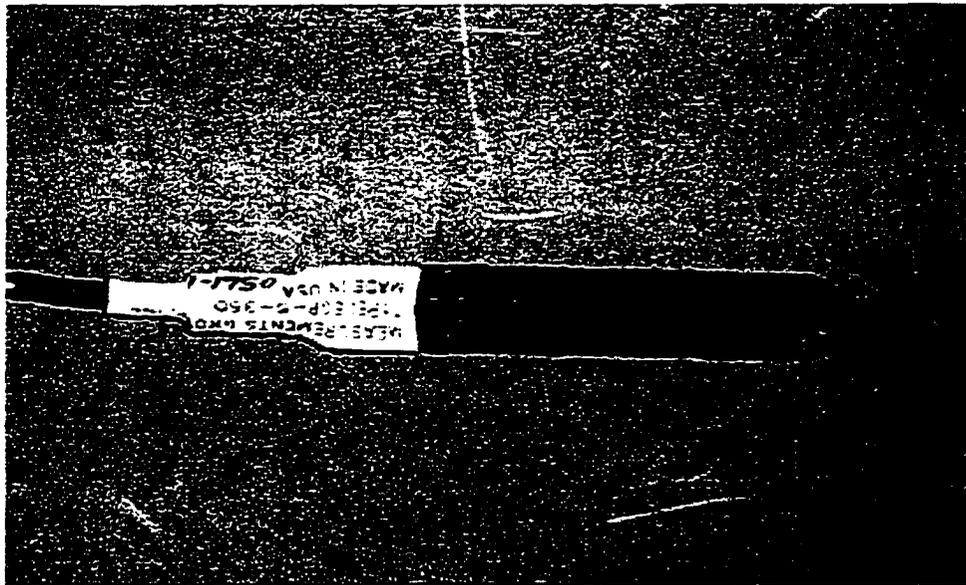


Figure 2.10 Jauge extensométrique électrique pouvant être noyée dans le béton

2.4.3 Jauge à fibre optique

Une toute nouvelle gamme de jauges connaît un essor marqué, soit celle des capteurs à fibre optique. En plus des jauges extensométriques, il existe des capteurs de pression, de température et même chimique basés sur cette dernière technologie. Ces derniers sont actuellement disponibles sur le marché ou, du moins, en sont à un stade avancé de leur développement [UDD, 1995]. En génie civil, cette technologie voit un nombre croissant d'applications [ANSARI, 1998].

On ne traitera pas pour l'instant de ces jauges. Puisque l'un des thèmes de cette thèse est la validation d'un type de jauge extensométrique à fibre optique, notamment la jauge Fabry-Pérot de type EFO (*embedment fiber optic*), on propose, au chapitre suivant, une revue de la technologie des capteurs à fibre optique. Néanmoins, on présente tout de même cette jauge à la figure 2.11.

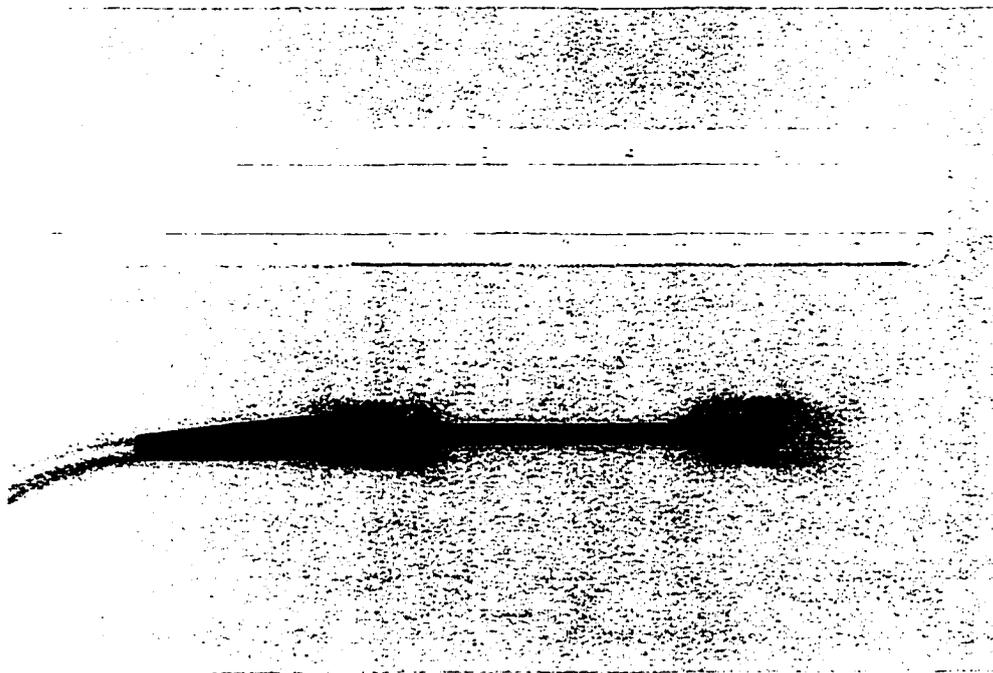


Figure 2.11 Jauge extensométrique à fibre optique de type EFO

L'idée d'avoir un capteur de déformation performant n'est pas étranger au fait qu'une telle mesure permet de calculer les contraintes. La section suivante traite des différentes cellules de mesures des déformations et contraintes. Ces dernières sont issues surtout du domaine de la mécanique des roches et on verra que leur utilisation dans un matériau comme le béton et, à plus

grande échelle, dans une structure aussi imposante qu'un barrage, le passage des déformations vers les contraintes n'est pas si aisé.

2.5 Mesure des déformations et des contraintes: cellules de mesure

Les mesures de contraintes dans les grands ouvrages de béton présentent, pour les praticiens et les chercheurs, certaines difficultés. Comparativement, dans le domaine de la mécanique des roches, les mesures de contraintes sont couramment effectuées pour la conception des ouvrages souterrains. AMADEI & STEPHANSSON [1997] épluchent d'ailleurs ce dernier sujet en plus d'inventorier les méthodes et instruments de mesures. Le comportement mécanique du béton est assurément similaire à celui des roches mais il faut bien dire que les valeurs de contraintes, absolues ou relatives, dans les ouvrages d'art sont beaucoup plus faibles que dans les profondeurs des massifs rocheux, d'où la difficulté de les évaluer [GILL & coll., 1993].

Au Laboratoire souterrain d'Énergie atomique du Canada (URL), la contrainte horizontale maximale in situ dans le massif granitique atteint 60 MPa à 420 m de profondeur. Avec l'excavation d'un tunnel de 3,5 m de diamètre au niveau 420 du massif, le déviateur des contraintes initial σ_1 - $\sigma_3 \cong 50$ MPa est passé approximativement à 70 MPa, soit une variation se situant autour de 20 MPa [MARTIN & READ, 1996]. Quant aux barrages, LEITE & coll. [1998] enregistrent, à l'aide d'une technique particulière qui sera décrite plus loin, des variations de contraintes de 0,54 MPa (σ_2) au barrage Daniel-Johnson. Ces deux exemples soulignent bien l'échelle à laquelle s'opèrent les variations de contraintes dans les travaux en rocher comparativement aux barrages. Déjà que le processus de détermination des contraintes in situ est fastidieux, on ajoute dans le cas des barrages une condition: les dispositifs de mesures doivent être sensibles et stables. Il existe de nombreux dispositifs, appelés cellules ou inclusions, pour la mesure des déformations (*strain cells*) et des contraintes (*stress cells*) dans les massifs rocheux; elles sont regroupées sous trois catégories: les inclusions souples, les inclusions semi-rigides et les inclusions rigides; les chercheurs ont adapté ces divers modèles d'inclusions au suivi des structures.

On classe dans la catégorie rigide, les inclusions dont le module élastique est de 3 à 4 fois supérieur à celui du milieu encaissant. Dans ces conditions, ces inclusions sont généralement peu sensibles aux faibles déformations et contraintes comme celles rencontrées dans les ouvrages en béton. S'ajoute à cela le fait que le milieu encaissant est susceptible de se fissurer lors de déformations à cause de cette rigidité élevée de l'instrument. Toutefois, son principal avantage est qu'il n'exige que la connaissance du coefficient de Poisson du milieu encaissant pour l'interprétation des mesures. RYALL [1996] et RAHMAN [1992] proposent tout de même un instrument de cette catégorie pour la mesure des contraintes dans les ouvrages d'art.

Dans la même veine, on comprendra qu'une inclusion ayant un module élastique qui s'approche du milieu encaissant est identifiée comme semi-rigide. Bien sûr, elle offre une meilleure sensibilité que les précédentes mais en revanche, elle exige de connaître les propriétés élastiques du milieu dans lequel elle est enfouie ainsi que celle de la cellule. Le Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS) est une inclusion semi-rigide fabriquée en béton. Cette cellule permet la mesure des variations de déformation dans les différentes directions de l'espace et, si l'on connaît les propriétés élastiques du milieu, on peut calculer les variations de contraintes grâce à certaines équations de transfert [BOIS & coll., 1994].

Enfin, la catégorie des inclusions souples regroupe les inclusions qui ne modifient pas le champ élastique du milieu encaissant. Ces dispositifs ne requièrent que la connaissance du module élastique du milieu encaissant pour le calcul et l'interprétation des résultats. Elles sont donc sensibles et un peu plus simples d'interprétation. Étant donné leur sensibilité, ce type de cellule trouve en effet application dans le domaine de l'instrumentation des barrages. GILL & coll. [1987] ont travaillé à la modification d'une cellule de type « doorstopper » pour la mesure des contraintes dans les massifs rocheux fissurés et anisotropes où prévalent de faibles contraintes et variations de contraintes. En regard de la similarité des conditions, le principe de cette cellule modifiée s'est rapidement transposé au suivi des contraintes relatives et mesures des contraintes absolues dans les barrages.

Les paragraphes suivants s'arrêtent à chacun de ces outils imaginés pour la mesure des déformations et contraintes internes de diverses structures de génie civil. Mentionnons qu'il

existe d'autres dispositifs de mesure directe des contraintes, sans intervention du module d'élasticité du béton, comme le *CARLSON Stressmeter* ou encore la Cellule GLÖTZL. Il n'en demeure pas moins que ces dernières sont unidimensionnelles et il est nécessaire d'en installer plusieurs dans les diverses directions de l'espace pour un suivi complet des déformations et contraintes. D'autre part, la CIGB [1988] mentionne que les déformations restent des mesures essentielles à partir desquelles on peut obtenir les contraintes où, à tout le moins, une valeur approchée.

2.5.1 Inclusion rigide instrumentée

Un appareil basé sur le principe de l'inclusion rigide a été développé spécifiquement pour l'instrumentation des structures en béton à la suite des travaux de RAHMAN [1992] et RYALL [1996] de *University of Surrey*. La cellule d'une longueur de 100 mm et de 40 mm de diamètre est fabriquée en acier et intègre des jauges électriques pour la mesure des déformations. Il s'agit d'une inclusion rigide biaxiale, et comme le mentionne RAHMAN [1992], celle-ci ne permet pas la détermination complète du tenseur de contraintes mais seulement les variations des contraintes principales, ce qui est tout de même utile dans de nombreuses applications en génie civil. Une jauge électrique (rosette) est collée à l'extrémité du cylindre d'acier et des jauges supplémentaires peuvent être installées longitudinalement (Fig. 2.12). Un aspect intéressant de cette cellule est la possibilité de combiner l'une à la suite de l'autre plusieurs cellules biaxiales puisque l'extrémité de chaque cylindre d'acier est filetée. Ces chercheurs ont aussi développé, en concomitance avec l'inclusion biaxiale rigide, deux cellules tridimensionnelles de mesures des contraintes en résine époxyde avec des jauges électriques collées.

Mentionnons simplement qu'un programme d'essais complet incluant des travaux en laboratoire et en chantier, essentiellement l'instrumentation de ponts, a été réalisé. À la suite de ce programme, les auteurs rapportent que les dispositifs nécessitent encore certains développements. Diverses difficultés liées aux facteurs environnementaux: variation de température, fissuration du milieu encaissant ainsi que d'autres reliées à la conception de l'instrument, entre autres la durabilité des connexions, le collage et l'alignement des jauges, commandent d'autres études.

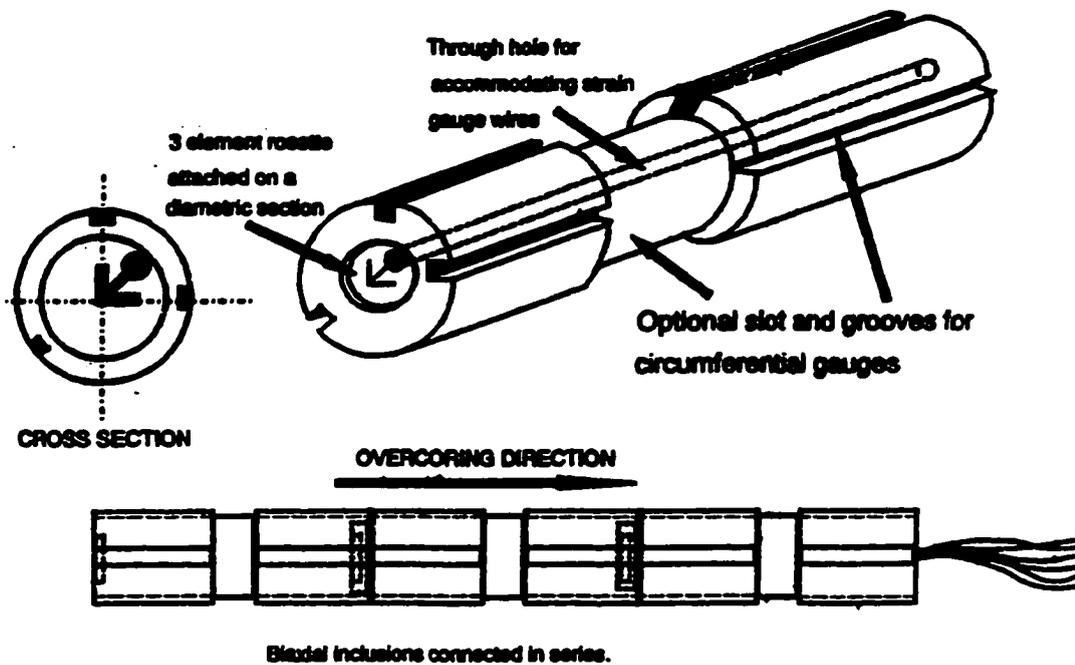


Figure 2.12 Inclusion rigide biaxiale [d'après Rahman, 1992].

2.5.2 Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS)

Le Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée de l'Université de Sherbrooke a initié, vers 1985, le développement du « Cylindre Instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS) ». Les objectifs étaient d'obtenir une technique simple, fiable et robuste permettant le suivi des variations tridimensionnelles de déformations et de contraintes dans le temps et à long terme. Notons aussi qu'il existe une version biaxiale du CIUS: le CIUS 2D [BALLIVY & BENMOKRANE, 1986; UNEMBU, 1989; BALLIVY & coll., 1990; BOIS, 1995].

Le CIUS est une cellule en béton qui intègre six extensomètres à corde vibrante, disposés dans les diverses directions de l'espace, ce qui rend possible la détermination du tenseur des déformations (Fig. 2.13). Il peut-être est installé à l'intérieur d'un barrage (ou toute autre structure ou massif rocheux) pour effectuer le suivi des variations de déformation et de contrainte. Il s'agit là d'un instrument de surveillance particulièrement intéressant pour les structures âgées dans le cas où

l'on désire remplacer les instruments défectueux ou encore instrumenter une section précise de la structure. Depuis les premières recherches sur le CIUS, de nombreuses applications ont pu être répertoriées et font l'objet de l'annexe A.

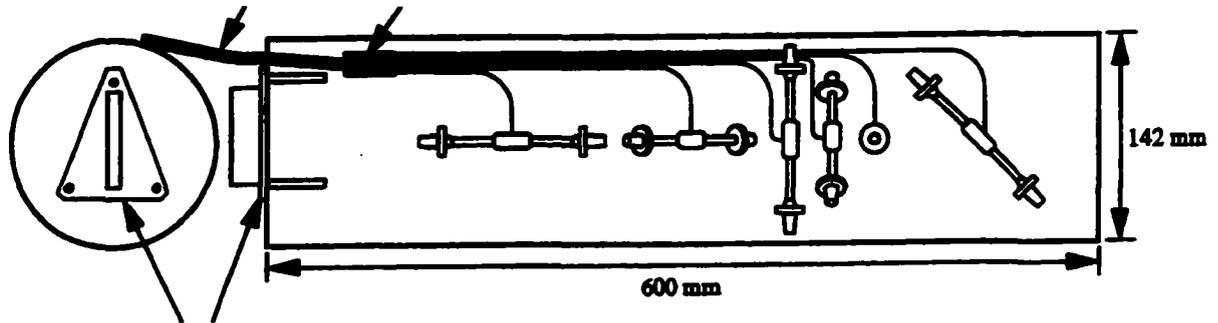


Figure 2.13 Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS) [d'après Bois, 1995]

Le béton du CIUS en est un à haute performance et il a des caractéristiques élastiques (E et ν) aussi proches que possible de celles du milieu dans lequel il est inséré. On évite ainsi de trop grandes concentrations de contrainte autour du cylindre (effet d'inclusion).

Le CIUS est installé dans un forage de 152 mm de diamètre et à une profondeur pouvant atteindre 25 mètres. Le cylindre est accompagné d'un cylindre témoin, constitué d'une jauge à corde vibrante en position axiale et dont le rôle est de permettre une compensation vis-à-vis des phénomènes environnementaux. Une fois les deux cylindres installés et orientés, un coulis contenant un agent expansif est injecté créant une parfaite continuité entre les inclusions et le milieu. Aussi, grâce au suivi des températures avec les jauges à corde vibrante, il est possible d'effectuer des corrections pour les déformations d'origine thermique. L'acquisition de données peut se faire soit par un poste de lecture manuel, soit par un système d'acquisition de données ou même à l'aide de la Carte d'acquisition intelligente de l'Université de Sherbrooke (CAIUS) développée par GHORBAL [1992]; on décrira d'ailleurs cette carte en annexe B. Enfin, le calcul des variations de déformation et de contrainte dans le milieu encaissant se fait à l'aide de diverses équations de transfert. Ces équations, relativement complexes, ont été développées

analytiquement et vérifiées expérimentalement et tiennent compte des propriétés élastiques des trois milieux présents: milieu encaissant, coulis et cylindre [BOIS & coll., 1994].

Les travaux les plus récents sur le CIUS sont ceux de BOIS [1995]. Dans sa thèse, l'auteur conclut que le CIUS est un instrument permettant un suivi des variations de déformation et de contrainte à long terme; cela est d'ailleurs démontré théoriquement et pratiquement (Annexe A). Selon toute vraisemblance, dans une optique de sécurité des barrages, il est de notre avis que le CIUS présente toutefois certaines limitations:

- comme en témoignent les équations de transfert proposées, le traitement des résultats est peu attrayant pour un utilisateur qui n'est pas familier avec ce type de mesure;
- les données emmagasinées dans des appareils comme le CR10 (appareil d'acquisition) sont traitées suite au transfert des données, ou au téléchargement, dans un ordinateur. Cette opération exige un certain délai entre la mesure et l'obtention des résultats traités;
- le suivi est ponctuel, à moins d'installer un réseau de CIUS, ce qui devient assez coûteux pour l'exploitant;
- la cellule est relativement longue, conduisant ainsi à un espacement qui n'est plus négligeable entre les extensomètres des extrémités et la mesure n'est alors plus exactement ponctuelle. Aussi, la dimension du CIUS rend l'installation impossible dans des éléments structuraux de taille réduite;
- le calcul des contraintes nécessite une bonne connaissance du module élastique du béton de la structure. Bien que des essais mécaniques sur éprouvettes de grand diamètre soient effectués, il ne sont pas toujours représentatifs de la section complète du barrage (fissure, RAG, etc.);
- étant donné sa dimension, l'étalonnage du CIUS est réalisé en cellule biaxiale. Un étalonnage à l'aide d'un montage triaxial serait plus complet.

Le CIUS offre donc la possibilité d'obtenir une mesure ponctuelle des variations locales de déformation et contrainte dans un élément de béton de grande dimension. Tous les facteurs énumérés auparavant conduisent à orienter les recherches vers le développement d'une cellule en béton spécialement conçue pour le suivi des déformations internes des structures, entre autres des barrages en béton. On explique plus loin le concept du détecteur de déformations que l'on envisage de développer.

2.5.3 Capteur de mesure de contraintes relatives de Polytechnique (CCRP)

Le CCRP est une cellule de mesure de type souple utilisant une jauge électrique collée pour capter les déformations du milieu où il est fixé. La figure 2.14 montre une vue en coupe du dispositif. Ce dernier est en fait basé sur la technique du « doorstopper »; il s'agit d'une modification de cette dernière technique [GILL & coll., 1993].

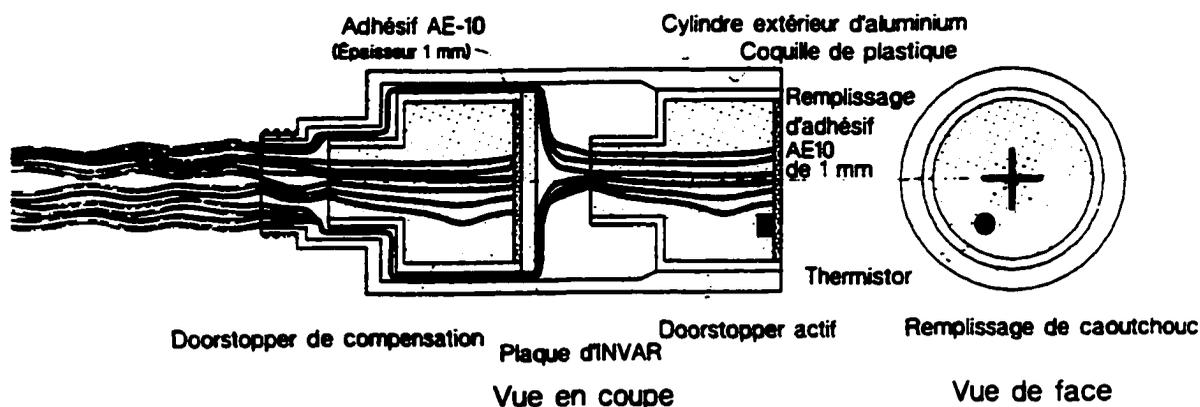


Figure 2.14 Vue en coupe du CCRP [d'après Leite et coll., 1998]

L'installation du CCRP se fait dans le fond d'un trou de forage nettoyé, asséché et poli, afin d'assurer une parfaite adhérence de la face du capteur à la surface de béton. La liaison est réalisée avec une résine époxyde et, soit dit en passant, la rosette (jauge électrique) est protégée d'un mince film d'un produit semblable. À proximité de la rosette, on trouve un capteur de température de type thermistor. Le dispositif complet intègre donc, en plus du doorstopper actif que l'on vient de décrire, un doorstopper de compensation, son utilité étant de minimiser voire même éliminer les dérives d'origine électrique. Les deux doorstoppers sont combinés dans une enveloppe cylindrique fabriquée en aluminium constituant ainsi le CCRP [LEITE & coll., 1998].

Puisque la longueur des fils constitue une limitation des jauges électriques (perte de signal), un module d'acquisition intelligent (MAI) branché immédiatement à la sortie du CCRP sert à l'acquisition des signaux; la longueur des fils est alors limitée à 7 cm. Le contrôle des paramètres d'acquisition et le suivi des données peut-être effectué à l'aide d'un ordinateur PC [LEITE & coll. 1996a].

Une particularité intéressante du CCRP est, qu'en plus de mesurer les déformations et contraintes relatives, il peut être employé pour la détermination des contraintes absolues par le biais des techniques de carottages successifs. Diverses applications du CCRP sont relatées; il est d'ailleurs considéré comme un capteur universel puisqu'applicable au domaine minier (court terme) et aux structures; par exemple une expérimentation s'est déroulée au barrage Daniel-Johnson. L'expérience montre le fonctionnement adéquat du CCRP sur une période de six mois, ce qui ne permet toutefois pas de statuer sur la longévité de l'instrument. Finalement, en ce qui a trait à l'interprétation des résultats, une méthode proposée par LEITE & coll. [1996b] appelée RPR permet le calcul du tenseur complet des contraintes. Cette méthode de calcul reste tout de même complexe et exige des mesures de grande qualité.

2.6 Développement d'un appareil de mesure des déformations internes

L'étude précédente des diverses cellules de mesures des déformations et des contraintes montre entre autres que le calcul des contraintes nécessite un exercice mathématique souvent complexe et qu'elles conduisent à des mesures ponctuelles des déformations et contraintes. Dans le cas où l'on désire un suivi global d'une section d'une structure, il pourrait s'avérer intéressant de travailler avec un réseau de cellules. On propose donc le développement d'une cellule de mesure essentiellement vouée à la détection précoce des anomalies de déformation dans les barrages.

Le prototype de cet appareil, dont la conception est dérivée du CIUS, est un cylindre de béton dont les dimensions seraient plus petites que le CIUS puisque l'on envisage l'utilisation de jauges extensométriques à fibre optique. La technologie des capteurs à corde vibrante n'est pas abandonnée puisque l'on tente de mettre au point un dispositif à fibre optique et à corde vibrante. On présente au chapitre 6, de manière détaillée, le concept et la validation de cet appareil. Enfin, dans une optique de détection rapide des anomalies de déformation, on propose le développement d'un programme simple d'acquisition et de détection des niveaux de déformation.

CHAPITRE 3

Fibres optiques et capteurs

Le domaine des télécommunications utilise, depuis environ une vingtaine d'années, les fibres optiques pour la transmission des données ou des conversations téléphoniques. Les nombreuses recherches sur les fibres optiques ont démontré l'influence de certains facteurs externes, comme la température, les champs magnétiques ou la pression, sur la fibre et sur la propagation de la lumière dans la fibre. La connaissance et la prise en compte de ces divers effets constituent le stade embryonnaire de nombreuses études ayant pour objectif l'utilisation des fibres optiques comme capteurs. Avant d'aborder le sujet des capteurs à fibre optique, il convient de donner quelques définitions et éléments de base concernant les fibres optiques.

3.1 Définition

Une fibre optique est un guide cylindrique de faible diamètre permettant de transmettre un faisceau lumineux. Il existe divers types de fibres optiques mais leur géométrie est assez semblable. Une fibre optique est composée d'un coeur en silice, d'une gaine optique, généralement en silice, et d'une gaine mécanique de nature variable selon le fabricant et l'application prévue. La gaine mécanique vise essentiellement à protéger la fibre contre les agressions physiques, chimiques et physico-chimiques et aussi d'en faciliter la manipulation [BARBACHI, 1995]. La figure 3.1 montre un schéma d'une fibre optique.

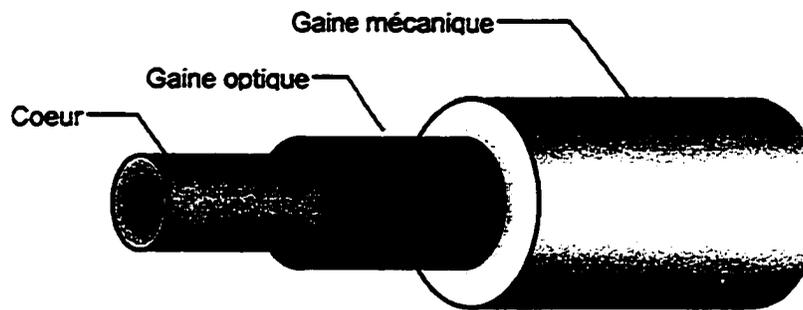


Figure 3.1 Représentation schématique d'une fibre optique

Le diamètre d'une fibre optique se situe autour de $250\ \mu\text{m}$ mais ceci varie légèrement selon le type. En effet, il existe deux types de fibre assez courants soit les fibres optiques monomodes et multimodes. Aussi, la nomenclature des fibres optiques se fait souvent par une séquence de chiffres, par exemple, 50/125/250 ou encore 62,5/125/250; ces chiffres correspondent en fait aux diamètres (en μm) des diverses parties de la fibre: cœur/gaine optique/gaine mécanique. Avant d'y aller avec les caractéristiques de chacun des types, il y a lieu de donner quelques précisions concernant la propagation de la lumière dans une fibre optique.

3.2 Propagation de la lumière dans une fibre optique

L'étude de la nature de la lumière ainsi que la description mathématique de la propagation de la lumière dans un milieu sont regroupées aux chapitres de l'optique et de l'électrodynamique des ouvrages de physique [SEARS & coll., 1987]. On ne décrira donc pas ici tous les phénomènes physiques complexes issus des interactions entre la lumière et différents milieux. On se limitera à la description de certains éléments essentiels utiles pour l'étude des fibres optiques et des capteurs à fibre optique.

La théorie indique que la lumière est, entre autres, de nature ondulatoire. Cependant, il est possible de représenter, de façon approximative, la propagation de la lumière dans un milieu

donné en utilisant la théorie des rayons. On peut définir un rayon lumineux comme une ligne imaginaire de lumière se propageant perpendiculairement aux fronts d'ondes et dans la même direction que ces derniers. Le rayon n'a pas de signification physique réelle, mais représente un concept très utile lorsqu'il s'agit de discuter de la trajectoire de la lumière. Ce concept peut être utilisé dans le cas où les longueurs d'onde de la lumière sont petites relativement à la section du guide optique; si tel n'était pas le cas, il faudrait s'en remettre aux équations de l'électromagnétisme.

Dans le coeur d'une fibre optique, la propagation de la lumière se fait selon diverses trajectoires. La représentation schématique de certaines trajectoires est donnée à la figure 3.2.

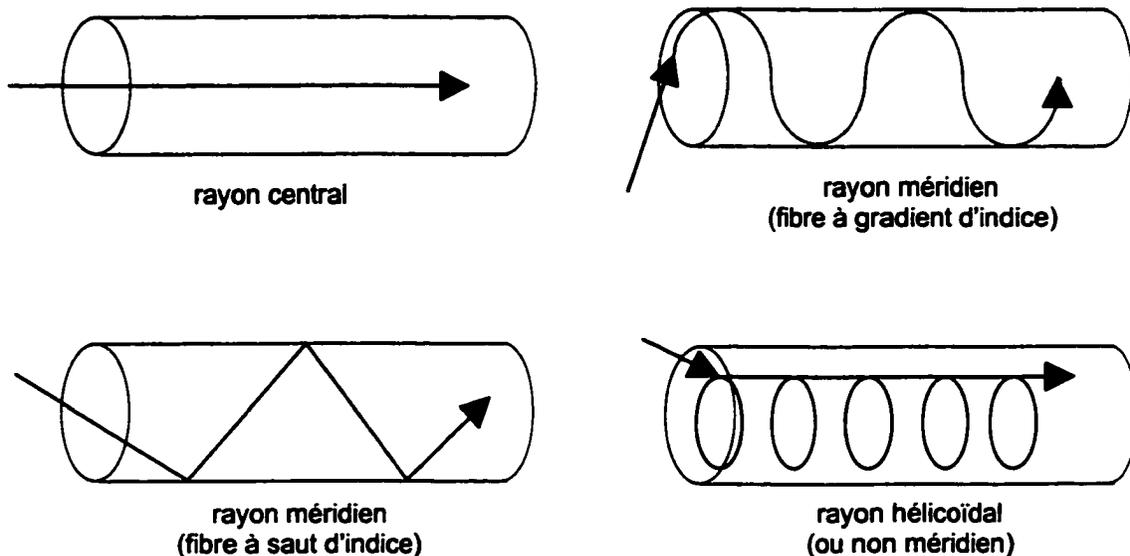


Figure 3.2 Différentes trajectoires de rayons lumineux dans le coeur d'une fibre optique (d'après Davies & coll., 1986)

En plus de ces trajectoires, signalons également que les rayons non méridiens existent aussi dans le cas des fibres à saut d'indice et contribuent grandement au transfert d'énergie. Cependant, la description géométrique de la propagation de ces rayons est relativement complexe. On se restreint ici à la description de la trajectoire des rayons méridiens dans une fibre à saut d'indice, qui est la forme la plus courante dans le cas des applications visées par cette thèse. Cette dernière approche, mettant à profit l'optique géométrique, permet tout de même de comprendre de quelle façon se propage la lumière dans une fibre optique.

3.2.1 Réflexion et réfraction

Prenons une fibre à saut d'indice dont le coeur est d'indice de réfraction¹ n_1 et la gaine d'indice n_2 . Un rayon lumineux acheminé au point P est réfléchi au point Q comme illustré à la figure 3.3.

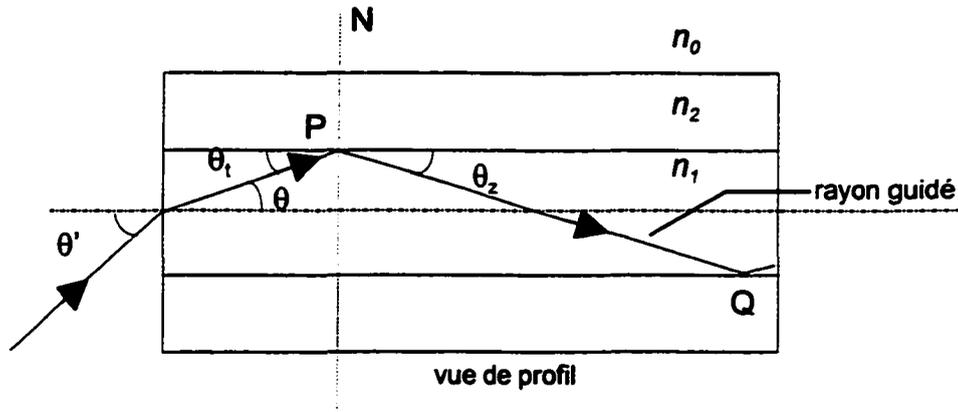


Figure 3.3 Trajectoire d'un rayon lumineux dans une fibre optique à saut d'indice

Un rayon lumineux incident à la face d'entrée de la fibre, d'inclinaison θ' par rapport à la normale de la face, est réfracté dans le coeur de la fibre suivant la loi de Descartes:

$$n_0 \sin \theta' = n_1 \sin \theta \tag{3-1}$$

avec n_0 , l'indice de réfraction du milieu d'injection; souvent l'air avec $n_0 = 1$.

Considérons maintenant le point P situé à l'interface coeur-gaine optique (Fig 3.3). On peut réécrire la loi de Descartes en fonction des angles complémentaires:

$$n_1 \cos \theta_2 = n_2 \cos \theta_1 \tag{3-2}$$

avec, entre autres, θ_1 l'angle de réfraction (Fig. 3.4b). Afin que la réflexion soit totale (aucune réfraction), l'angle θ_1 doit être nul. On peut alors définir l'angle critique de réflexion ($\theta_2 = \theta_c$ pour $\theta_1 = 0$) tel que:

$$\cos \theta_c = n_2 / n_1 \tag{3-3}$$

¹La lumière se propage plus lentement dans un matériau que dans le vide. Ainsi, le rapport des vitesses de propagation dans le vide (c) et dans le matériau (v) est égal à l'indice de réfraction (n): $n = c/v$.

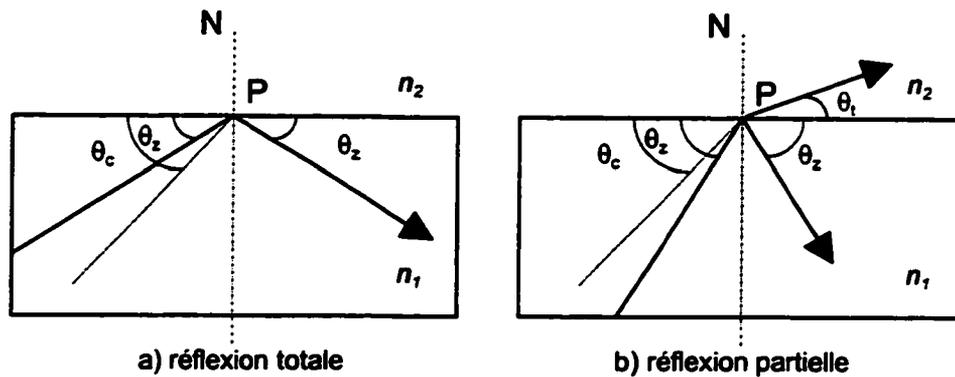


Figure 3.4 Représentation schématique des phénomènes de réflexion totale et de réflexion partielle

Cela dit, dans le cas où un rayon incident attaque l'interface avec un angle θ_z , compris entre 0 et θ_c , par rapport à l'interface, il y a réflexion totale. Si le rayon attaque l'interface avec un angle θ_z compris entre θ_c et $\pi/2$, on observera une perte par réfraction dans la gaine optique; les deux cas sont illustrés à la figure 3.4. BARBACHI [1995] mentionne que les rayons réfractés peuvent se propager dans la gaine optique et atteindre le détecteur. Ce couplage peut être éliminé par l'utilisation d'une gaine mécanique absorbante, d'indice de réfraction très proche de la gaine optique, afin de perdre, de façon définitive, le rayon réfracté. C'est ce qu'on appelle le « pompage de gaine ». Enfin, on peut relier les équations 3.1 et 3.3 afin de déterminer l'angle d'injection limite:

$$\sin \theta' = (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad \text{pour } n_0 = i \quad (3-4)$$

La quantité $(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$ est ce qu'on appelle l'ouverture numérique de la fibre. Ce paramètre est aussi appelé cône d'acceptance et tout rayon non contenu dans ce cône ne se propagera pas dans la fibre optique.

3.2.2 Absorption

Un flux énergétique, la lumière par exemple, traversant une substance matérielle peut interagir avec la matière, ce qui se traduit expérimentalement par la disparition apparente de l'énergie incidente [LEVY, 1988]. Dans le cas de l'énergie électromagnétique, selon la puissance de la

radiation, il peut y avoir interaction élastique ou inélastique avec les atomes et molécules du milieu. L'énergie manquante n'est pas perdue mais réapparaît sous diverses formes: émission d'ultraviolets, radiation thermique, ou encore sous forme d'énergie électromagnétique « diffusée ». À ce titre, on retrouve l'effet Rayleigh, l'effet Raman et l'effet Brillouin discutés brièvement à la section suivante.

3.2.3 Diffusion

La réflexion, telle que décrite à la section précédente, se produit sur des surfaces d'une extrême planéité ou, dans le cas des matériaux opaques, sur des surfaces polies. Si la surface du matériau présente certaines irrégularités, de dimension comparable ou plus grande que la longueur d'onde de la lumière, la réflexion ne se produira non pas dans une seule direction mais dans toutes les directions: c'est la réflexion diffuse ou *diffusion* [SEARS & coll., 1987].

Cependant, il est possible que la diffusion se produise à l'intérieur même du milieu diffusant à cause de la présence de fines particules étrangères ou impuretés. Dans un milieu relativement pur et cristallin, il y a interaction avec les molécules mêmes du matériau créant ainsi une dispersion (*scattering*) de l'énergie incidente.

Effet Rayleigh

Le verre, un matériau amorphe, présente certaines fluctuations de densité moléculaire dues à sa structure aléatoire. Ces fluctuations provoquent des variations locales de l'indice de réfraction de la fibre. Lorsque la lumière traverse ces zones de densité moléculaire élevée (variation d'indice) le faisceau est dispersé dans diverses directions et à diverses longueurs d'ondes; un peu à la manière de la lumière traversant un prisme.

Le fait que la lumière soit dirigée dans diverses directions s'explique par la présence de dipôles dans la structure [NEUMANN, 1988]. Dans certaines molécules électriquement neutres, il est possible que le centre des charges négatives ne coïncide pas précisément avec le centre des

charges positives; il s'agit d'une molécule dipolaire [COTTON & WILKINSON, 1972]. On peut associer la molécule dipolaire à un dipôle. Le dipôle (ou doublet) électrique est un ensemble de deux charges électriques ponctuelles, très près l'une de l'autre, égales mais de signes opposés. La droite (imaginaire) qui relie les centres de charge (q) du dipôle est l'axe du dipôle (Fig. 3.5). La valeur donnée par le produit de la charge et de la longueur (l) de l'axe est le moment dipolaire. Par ailleurs, on observe, à une certaine distance du dipôle, un champ électrostatique [LEVY, 1988]. Dans le cas d'une molécule, on observe un moment dipolaire global lié à l'interaction des diverses parties de la molécule.

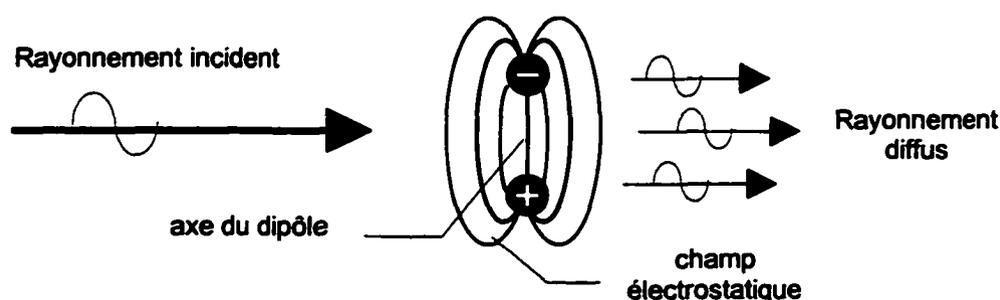


Figure 3.5 Représentation schématique de l'effet Rayleigh

Lorsque le dipôle est soumis à un champ électrique externe (la composante électrique de la lumière par exemple), il y a variation du moment dipolaire. Dans le cas d'un édifice moléculaire, l'interaction entre le dipôle et l'énergie incidente crée une source de rayonnement électromagnétique (Fig. 3.5). Ce dernier peut contenir des rayonnements de longueurs d'ondes différentes de celles contenues dans le spectre de la lumière (longueurs d'ondes optiques). Il résulte une dispersion de la lumière et donc une perte de signal lumineux [DAVIES & coll., 1986]. Ce type de dispersion est appelé *l'effet Rayleigh*.

Effet Brillouin

On peut décrire l'état de stabilité d'un milieu solide comme étant le résultat de la superposition d'ondes élastiques stationnaires. On associe à l'onde élastique se propageant dans un milieu

solide une particule que l'on appelle phonon; c'est le pendant du photon associé, lui, à une onde électromagnétique. Puisque la fibre optique est utilisée à une température supérieure au zéro absolu, ceci provoque l'oscillation de sa structure et, par le fait même, la propagation d'ondes élastiques, donc de phonons. L'interaction entre les phonons du milieu cristallin et les photons du rayonnement lumineux provoque une diffusion de la lumière incidente et perte du signal lumineux: c'est *l'effet Brillouin*.

Effet Raman

Dans le cas où la lumière excite une substance, le spectre de la lumière diffusée par la substance contient la radiation initiale en plus d'autres radiations. Ces dernières possèdent diverses fréquences qui se répartissent symétriquement de part et d'autre de la radiation excitatrice. Ce type de diffusion s'appelle *l'effet Raman* [LEVY, 1988].

Lorsqu'une molécule, de niveau d'énergie fondamental E , est attaquée par un photon exciteur, elle absorbe une partie de l'énergie de ce photon et diffuse un photon d'énergie plus faible. La molécule est maintenant à un niveau excité (E_1). Il est aussi possible que la molécule excitée cède de l'énergie au photon et diffuse alors un photon d'énergie plus élevé. Cependant, dans des conditions normales, le niveau fondamental est celui à plus forte population et le niveau excité à population plus faible. Globalement, on observera la diffusion de photons d'énergie plus faible que le photon exciteur. L'effet Raman est donc lié à une absorption et une radiation secondaire, à des énergies plus faibles, de l'énergie lumineuse incidente [DAVIES & coll., 1986].

3.2.4 Diffraction

Lorsque la lumière, passant à travers une petite ouverture, est projetée sur un écran, on peut observer une image constituée de franges d'intensités variables espacées régulièrement. Ce phénomène « d'éparpillement » de la lumière incidente est ce qu'on appelle la diffraction. Ce phénomène est lié à la nature ondulatoire de la lumière et ne peut s'expliquer à l'aide de l'optique géométrique. Enfin, on notera que l'interférence entre deux sources lumineuses donne aussi

divers systèmes de franges d'interférence. Par ailleurs, certains capteurs à fibre optique sont basés sur le principe d'interférence entre deux sources de lumière. Les phénomènes de diffraction sont bien connus. Pour cette raison nous proposons, pour plus de détails, la consultation d'ouvrages de physique, entre autres, SEARS & coll. (1987).

3.2.5 Polarisation

Rappelons que la lumière naturelle est formée d'ondes qui se propagent dans tous les plans de l'espace et dans une direction donnée (Fig. 3.6a). Il est possible de filtrer la lumière afin d'obtenir une seule composante du rayonnement, c'est-à-dire une onde vibrant dans un seul plan et dans la direction de propagation (Fig. 3.6b): on dit alors de la lumière qu'elle est polarisée de façon linéaire.

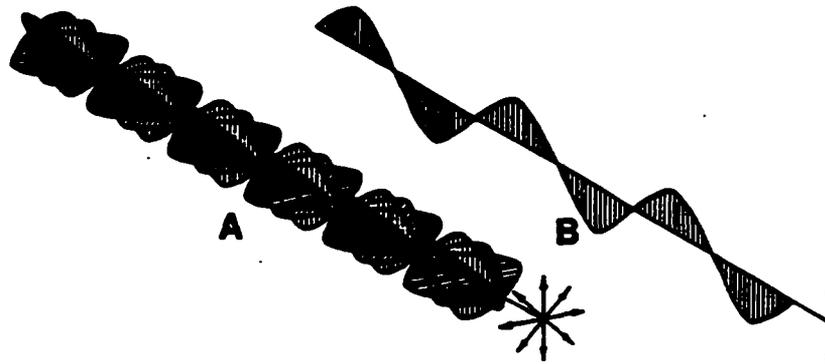


Figure 3.6 Polarisation de la lumière. a) représentation du rayonnement de la lumière naturelle et b) polarisation linéaire de la lumière

La polarisation de la lumière peut être réalisée de diverses façons, entre autres, à l'aide de filtres polarisants disposés entre la lumière naturelle incidente et l'observateur (ou un détecteur quelconque). Les filtres polarisants sont fabriqués avec des polymères dont les chaînes moléculaires possèdent une orientation préférentielle.

Par ailleurs, lorsque la lumière polarisée traverse un milieu cristallin, son état de polarisation peut être modifié. Ce phénomène, fortement exploité en minéralogie, est lié à la variation des indices

de réfraction du solide cristallin. En effet, dans certains cristaux, l'indice n varie selon la direction considérée (x, y, z). Il n'est alors plus possible de représenter la distribution des indices de réfraction par une sphère des indices; il faut plutôt utiliser un ellipsoïde des indices. Le milieu de propagation de la lumière est maintenant caractérisé par les divers indices de réfraction, par exemple n_x, n_y, n_z . Aussi, à cause de cette anisotropie des indices, la propagation des fronts d'ondes du rayonnement lumineux n'est elle plus représentée par des enveloppes sphériques mais par des ellipsoïdes car la vitesse de propagation varie avec la direction de propagation. On dira d'un milieu présentant une anisotropie des indices de réfraction qu'il est biréfringent.

La biréfringence d'un solide cristallin peut être naturelle ou induite. En effet, certaines substances transparentes isotropes deviennent anisotropes lorsqu'on les soumet à des contraintes extérieures d'origine mécanique, électrique, magnétique, etc. Dans le cas des fibres optiques, celles-ci peuvent présenter une biréfringence dite intrinsèque due au procédé de fabrication (coeur légèrement elliptique, défauts à l'interface coeur-gaine optique, etc.). En revanche, les contraintes thermiques, la courbure, l'écrasement de la fibre comptent parmi les phénomènes conduisant à l'apparition d'une biréfringence extrinsèque ou induite [YEH, 1990]. L'analyse de la modification de la polarisation d'un faisceau lumineux, issu d'une fibre optique, peut conduire à une mesure de l'effet ayant provoqué ce changement.

3.3 Types de fibre optique

Actuellement, divers types de fibre optique sont d'utilisation courante pour les applications en télécommunication et pour celles regroupées sous la dénomination de capteurs à fibre optique. On retrouve les fibres multimodes à saut d'indice, multimodes à gradient d'indice et monomode.

3.3.1 Fibre optique multimode à saut d'indice

Ce type de fibre présente un coeur ayant un indice uniforme n_1 et une gaine d'indice, uniforme lui aussi, n_2 . La limite coeur-gaine est donc caractérisée par une variation brusque des indices de réfraction, c'est-à-dire un saut d'indice (Fig. 3.7).

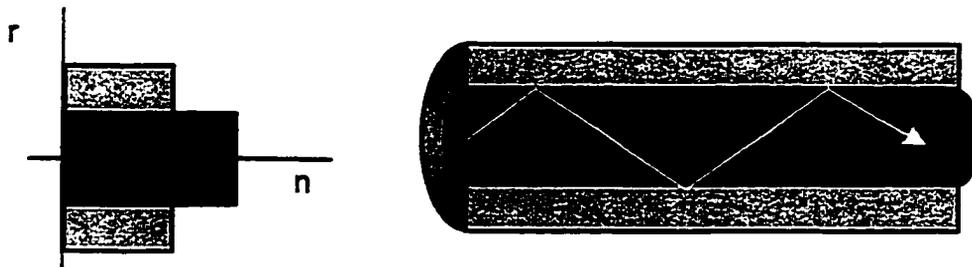


Figure 3.7 Profil des indices de réfraction dans une fibre optique multimode à saut d'indice (d'après Surmely, 1995)

La propagation de la lumière se fait par réflexion interne totale. Le désavantage de ce type de fibre est la forte « dispersion intermodale » générée par la différence de temps de parcours des rayons lumineux guidés; il en résulte, à la sortie, un élargissement de l'impulsion de départ (Fig. 3.8).

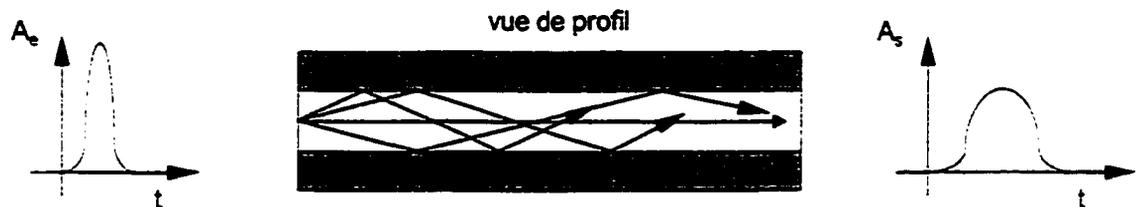


Figure 3.8 Représentation schématique de la propagation de la lumière dans une fibre multimode à saut d'indice (d'après Surmely, 1995)

3.3.2 Fibre optique multimode à gradient d'indice

Dans le but de limiter le phénomène d'élargissement de l'impulsion observé avec les fibres à saut d'indice, les fibres à gradient d'indice furent développées. L'indice de réfraction du coeur de la fibre varie graduellement du centre vers la gaine optique selon une loi parabolique (Fig. 3.9).

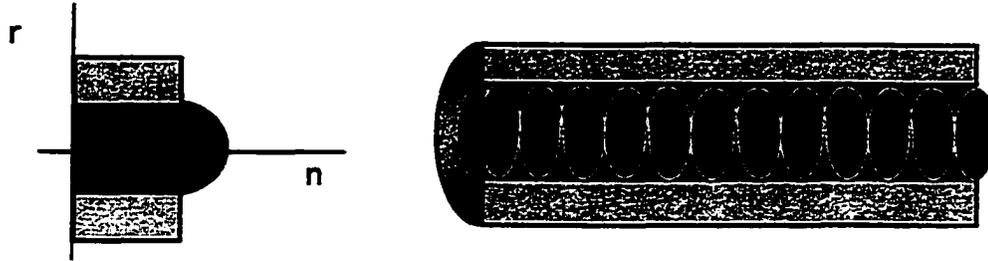


Figure 3.9 Profil des indices de réfraction dans la fibre multimode à gradient d'indice (d'après Surmely, 1995)

Dans cette dernière, les rayons se propagent en ondulant autour de l'axe plutôt qu'en zigzaguant (Fig. 3.10). Cette géométrie sinusoïdale de la trajectoire a pour effet de ramener les temps de parcours à des valeurs très proches les unes des autres [BARBACHI, 1995; SURMELY, 1995]. Mentionnons cependant que l'état de polarisation de la lumière est perdu rapidement, après quelques dizaines de centimètres, dans les fibres optiques multimodes [SURMELY, 1995].

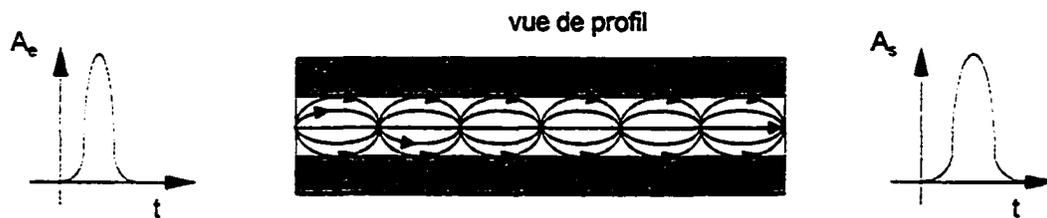


Figure 3.10 Représentation schématique de la propagation de la lumière dans une fibre multimode à gradient d'indice (d'après Surmely, 1995)

3.3.3 Fibre optique monomode

Les fibres monomodes sont caractérisées par un coeur très petit par rapport à la gaine optique, ce qui a pour effet de ne laisser passer qu'un seul mode ou une seule onde. Le profil d'indice est identique à celui de la fibre multimode à saut d'indice excepté que le coeur de la fibre est beaucoup plus petit, 4 à 10 μm , comparativement à environ 200 μm . L'avantage de la fibre monomode est que le phénomène d'élargissement disparaît, permettant ainsi la transmission de la

lumière sur de très grandes distances (Fig. 3.11). Par ailleurs, le coeur étant très petit, ceci rend la connexion très délicate. L'alignement parfait entre deux fibres est difficile à obtenir.

Mentionnons finalement que les fibres optiques multimodes seront préférées pour les applications où on utilise une source lumineuse non cohérente (DEL, lampe) et s'il y a de nombreuses connexions en ligne car elles sont d'alignement facile. Les fibres monomodes, quant à elles, seront réservées entre autres pour des applications où il y a de longues distances et où le débit d'information est élevé [GAFSI, 1997; SURMELY, 1995].

3.3.4 Autres types de fibres optiques

Il existe sur le marché d'autres types de fibres optiques mais elles sont souvent dédiées à des applications spéciales. Notamment, les fibres plastiques constituées de divers matériaux synthétiques [CLUB FIBRES OPTIQUES PLASTIQUES, 1994]. Elles offrent une grande souplesse ainsi qu'une bonne résistance mécanique; par contre, l'atténuation du signal est relativement élevée ce qui les confine à des applications où la transmission du signal se fait sur de courtes distances [GAFSI, 1997]. Un autre type de fibre, à coeur elliptique, a été utilisé pour la fabrication de capteurs [MURPHY & coll., 1990]. Toutefois, ce type de fibre est assez rare sur le marché et les raccordements sont difficiles à réaliser.

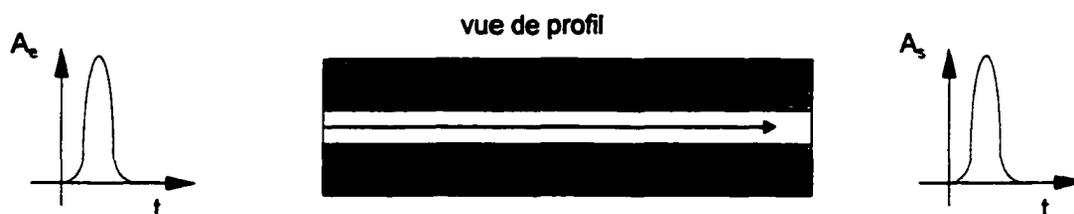


Figure 3.11 Représentation schématique de la propagation de la lumière dans une fibre monomode (d'après Surmely, 1995)

3.4 Caractéristiques des fibres optiques

Les fibres optiques sont fabriquées soit de verre à composants multiples à base de silice et de divers oxydes et carbonates, ou à partir de verre à haute teneur en SiO_2 . Bien que de tels verres soient considérés parfaits, ils contiennent néanmoins certaines impuretés. À titre comparatif, on estime le taux d'impuretés dans le verre de bouteille à 10 kg/tonne tandis qu'il est de 1 mg/tonne dans le verre de silice [SURMELY, 1995]. Les impuretés et les divers défauts comme les bulles d'air ou les microfissures conduisent à l'atténuation du signal optique ainsi qu'à la dégradation de la résistance mécanique de la fibre. La figure 3.12 montre certains défauts d'une fibre optique.

3.4.1 Atténuation

Un signal optique de puissance P_0 , injecté à l'entrée d'une fibre, subit après une propagation de x km dans la fibre, une perte de puissance. On récupère alors en sortie un signal de puissance P égale à:

$$P = P_0 e^{-\alpha x} \quad (3-5)$$

où α est le coefficient d'atténuation linéique, en dB/km. Ce coefficient représente la somme des pertes dans la fibre. Les causes de l'atténuation peuvent être divisées en trois catégories: absorption, courbures et microcourbures, dispersion.

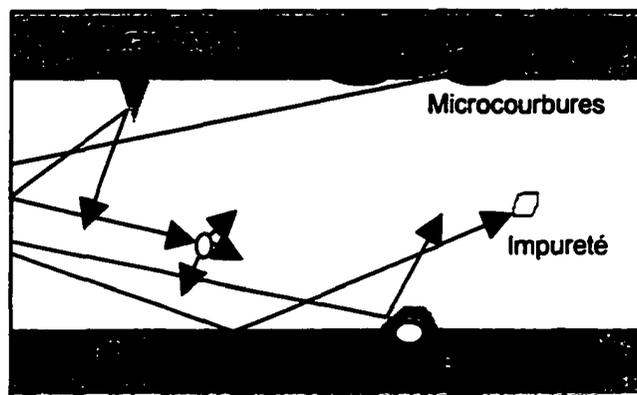


Figure 3.12 Défauts des fibres optiques (d'après Surmely, 1995)

Ces divers phénomènes ont été brièvement expliqués à la section 3.2. Ajoutons seulement que l'absorption est liée à l'interaction avec divers ions (impuretés) dans la structure. Quant aux courbures et microcourbures, elles modifient localement l'angle d'incidence du faisceau lumineux, causant ainsi sa réfraction donc l'éjection de ce dernier dans la gaine optique. Finalement, les effets Rayleigh, Brillouin et Raman sont responsables des pertes par dispersion [DAVIES & coll., 1986].

3.4.2 Résistance

Le comportement mécanique d'une fibre optique est très différent de celui d'un fil métallique. Les fils métalliques se brisent lorsqu'ils atteignent des déformations de l'ordre de 0,5% et des contraintes de 1500 MPa en traction. Du reste, une fibre optique exempte de microfissure demeure dans le domaine élastique à des déformations d'environ 10%, ce qui correspond à des contraintes de l'ordre de 5000 MPa en traction [DAVIES & coll., 1986]. Mentionnons qu'une fibre optique comportant des défauts présente des valeurs typiques de résistance à la traction se situant autour de 1400 MPa [GOFF, 1996].

La principale différence entre ces matériaux, du point de vue du comportement mécanique, est leur ductilité. Le métal présente un comportement ductile ce qui le rend malléable tandis que le verre est fragile. Une microfissure dans le verre constitue une zone de concentration de contrainte qui, sous une sollicitation mécanique, peut se propager rapidement jusqu'à provoquer la rupture de la fibre. La résistance mécanique des fibres optiques est intimement liée à la présence de défauts dans celles-ci et les calculs de résistance font alors intervenir les concepts de mécanique de la rupture [KURKJIAN & coll., 1993].

Du point de vue de la résistance aux agressions chimiques, si on fait référence au cas particulier d'une fibre enfouie dans le béton, celle-ci est très vulnérable si elle n'est pas bien protégée. HABEL & coll. [1997] présentent une étude du comportement de capteurs et de fibres optiques enfouis dans des mortiers ou placés dans des solutions de composition qui s'apparentent à celle d'un béton. Les fibres optiques et capteurs sont protégés; parmi les divers types de protection on

note le polyimide, l'acrylate et un matériau thermoplastique. Il ressort de cette étude que la longévité des fibres avec les diverses protection varie de 21 jours à 5 mois et diverses dégradations sont observées: microfissures, écaillage, bombement, déformations concentriques.

En ce qui a trait à la résistance des fibres optiques, il faut mentionner que les fibres à nu sont rarement utilisées directement. Toutefois, lors des étapes d'installation et de connexion, il faut dégainer la fibre, la rendant ainsi mécaniquement vulnérable. Lorsque la fibre ne sert que de support pour la transmission du signal, on utilise diverses gaines de protection extérieures. Ainsi, on parlera de câble à fibre optique. Selon le type de protection extérieure, les câbles à fibre optique ont une bonne résistance mécanique et chimique pour les applications pratiques autant pour les télécommunications que pour l'instrumentation. La figure 3.13a montre une représentation schématique d'un câble à fibre optique disponible sur le marché.

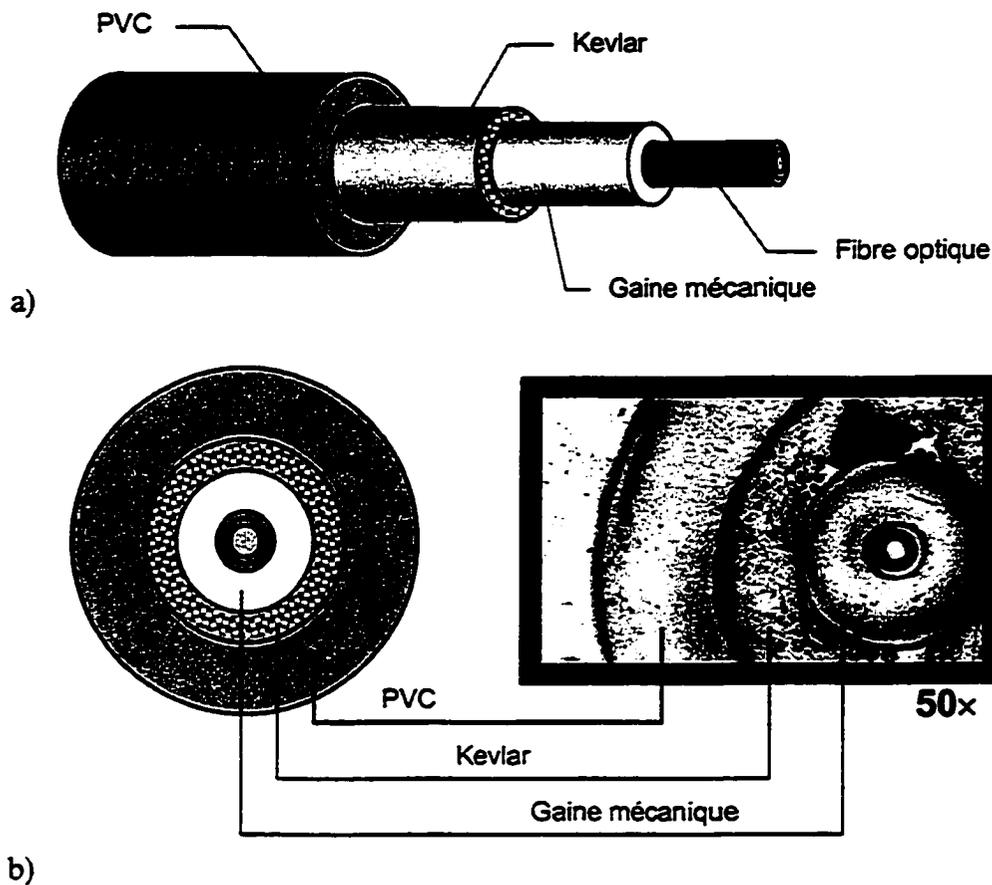


Figure 3.13 Câble à fibre optique. a) représentation schématique des diverses protections de la fibre optique et b) schéma et photographie d'une section de câble à fibre optique.

La gaine mécanique constitue une gaine primaire qui est installée par le fabricant de fibre optique. À partir de là, on construit le câble à fibre optique en choisissant une jaquette de protection externe et, selon le domaine d'application, divers matériaux peuvent être employés: PVC, élastomère, Hypalon®, Kynar®, Tefzel®, Teflon®, etc. De plus, le câble est constitué d'un organe de renfort comme le Kevlar, généralement placé entre la gaine mécanique primaire et la jaquette externe, permettant ainsi de résister à des forces de tension allant de 200 à 2500 N. Le tableau 3.1 présente diverses caractéristiques d'un câble de type Simplex comme celui illustré à la figure 3.13. Mentionnons que certaines des valeurs de ce tableau sont obtenues par des essais normalisés. En effet, il existe toute une panoplie de normes applicables au domaine des fibres optiques.

Tableau 3.1
Caractéristiques d'un câble à fibre optique
Type Thrifty-Bit™ Simplex 50/125
(d'après Northern Light Cable inc.)

Diamètre du câble (nominal)	2,95 mm
Poids du câble	24 lbs/km
Résistance aux impacts	50 impacts
Flexion	1000 cycles
Température d'opération	-20 à +70 °C
Température d'installation	0 à +70°C
Charge de tirage maximum	400 N
Charge max. en opération	100 N
Rayon de courbure min. (sans charge)	3 cm
Diamètre du cœur	50 ±3 µm
Diamètre de la gaine optique	125 ± 2 µm
Diamètre de la gaine mécanique	250 µm
Atténuation maximale 850nm/1300nm	3,5/1.2 dB/km

3.5 Connexion, interconnexion et multiplex

Le branchement des fibres optiques fut l'un des éléments qui a retardé leur utilisation à grande échelle. En effet, puisque la fibre optique constitue le médium de transport d'un faisceau de lumière, son branchement diffère beaucoup de celui d'un fil métallique. La connexion des fibres optiques se fait à l'aide d'un dispositif mécanique appelé connecteur. Il existe plusieurs types de connecteurs et de diverses générations car ce domaine a beaucoup évolué au fil des ans. On

retrouve donc sur le marché des connecteurs appelés Biconique, ST, SC, FC, SMA etc, lequel est souvent choisi en fonction du domaine d'application (télécommunication, transfert de données, communication haute-vitesse). Le connecteur de type ST est illustré à la figure 3.14.

Bien que les nombreux types de connecteurs présentent des caractéristiques diverses, ils sont néanmoins tous constitués de certaines pièces de base. L'embout (*ferrule*) est un petit cylindre de céramique, métal ou plastique dans lequel est inséré la fibre optique. Ce cylindre sert de support et permet l'alignement de la fibre lors du branchement. Le corps (*body*) du connecteur maintient l'embout et présente différents mécanismes permettant de maintenir la fibre en place. Dans le cas du connecteur ST, une douille à baïonnette munie d'un ressort empêche la rotation de la fibre et de l'embout lors du branchement. Enfin, le câble est fixé au corps du connecteur soit à l'aide d'une colle ou par sertissage; la jonction est protégée par un élément de caoutchouc (*strain relief boot*). L'installation de connecteur à fibre optique nécessite diverses étapes: dégainage de la fibre, insertion dans le connecteur, collage, clivage et, finalement, polissage; SURMELY [1995] et GOFF [1996] donnent des détails sur l'installation.

Dans le domaine de l'électronique, on retrouve, la plupart du temps, des connecteurs mâles et femelles permettant les branchements. Il n'en est pas de même pour les fibres optiques; seuls des connecteurs mâles sont disponibles [GOFF, 1996]. Pour réaliser un branchement à une source de lumière, on doit avoir recours à une embase, laquelle peut recevoir un dispositif optoélectronique ou encore, si l'on désire effectuer une épissure entre deux fibres optiques, on utilise une traversée de cloison (*mating sleeve*). Ce dispositif mécanique, toujours femelle-femelle et du même nom que les connecteurs qu'il reçoit, assure la continuité optique d'une fibre à l'autre (Fig. 3.14). La soudure, le collage et le sertissage sont autant de méthodes permettant l'épissure des fibres. Elles exigent toutefois beaucoup de minutie de la part de l'opérateur. Par ailleurs, il existe des adaptateurs pour fibre nue très utiles lors de montages temporaires. La fibre, dégainée et insérée dans l'adaptateur, est retenue par un mécanisme à ressort [SURMELY, 1995].

Dans le cas où un signal optique doit être dirigé vers une ou plusieurs fibres optiques, le multiplex peut être réalisé à l'aide de commutateurs multicanaux (Fig. 3.15). Ces dispositifs permettent d'acheminer un signal vers différentes fibres sans conversion optique/électrique. La

plupart des commutateurs sont de type opto-mécanique, construits avec un élément optique mobile et des lentilles ou prismes permettant de diriger le signal. Actuellement, il existe sur le marché des commutateurs de 2 à 100 canaux. De tels dispositifs pourraient être utiles dans le développement de systèmes d'acquisition de données.



Figure 3.14 Connecteur et traversée de cloison de type ST

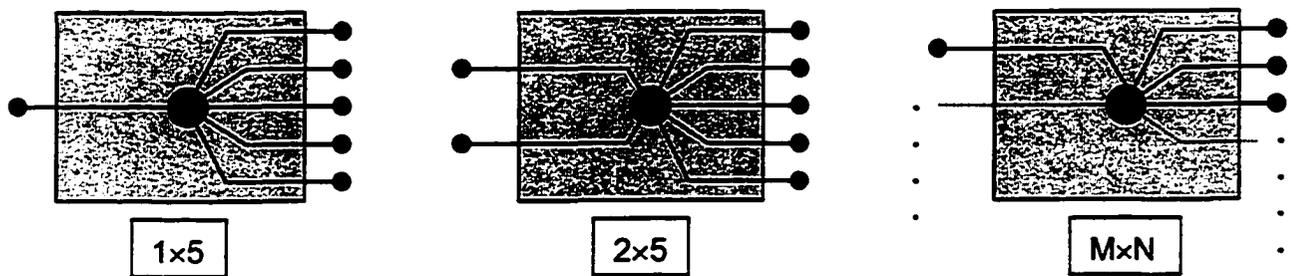


Figure 3.15 Exemple schématique de commutateurs à fibre optique

3.6 Capteurs à fibre optique

La popularité des capteurs à fibre optique est toujours croissante et les applications sont nombreuses dans des domaines aussi variés que la médecine, la chimie, le génie mécanique et civil. Il existe plusieurs types de capteurs basés sur des principes physiques différents. Actuellement, des capteurs à fibre optique sont conçus pour la mesure des températures, des pressions, des déformations, du pH, de l'opacité des fluides, de la concentration des gaz, etc.

Parmi les avantages de ces capteurs, on note, bien sûr, leur petite taille permettant de les intégrer dans des endroits jusqu'à maintenant inaccessibles. Aussi, ils sont insensibles aux interférences électromagnétiques, ils peuvent résister à des températures et des pressions élevées, l'installation de plusieurs capteurs sur une même fibre est possible, et le capteur sert en même temps de support pour le signal. Finalement, la technologie des capteurs à fibre optique bénéficie des développements incessants (composants plus performants et moins coûteux) de l'industrie optoélectronique.

Dans le domaine des télécommunications, on exige de la fibre optique qu'elle soit le moins possible affectée par les sollicitations externes et cela afin d'éviter l'altération du signal depuis sa source. Pour les capteurs à fibre optique, contrairement à ce qui précède, on mise sur la variation des diverses propriétés de la fibre pour détecter un événement. Dans les sections précédentes, la propagation de la lumière dans une fibre a été étudiée, donnant lieu à la mise en perspective de divers phénomènes physiques influençant cette propagation. En effet, la variation de l'intensité de la lumière, de sa polarisation, ou encore l'interférence entre deux rayonnements provenant de diverses fibres, sont à la base des mesures par fibre optique.

Un capteur à fibre optique consiste en une fibre optique d'une longueur donnée qui module la lumière passant à l'intérieur en réponse à des modifications de son environnement. En plus de la fibre optique, il faut ajouter un émetteur pour injecter la lumière, généralement une diode électroluminescente (DEL) ou laser et un récepteur, soit un photodétecteur, afin de capter le signal à la sortie. Il s'agit là d'un modèle assez simple de capteur à fibre optique; toutefois, il existe divers types de capteurs classés selon les phénomènes par lesquels est modulée la lumière ou encore selon leur distribution.

Dans les sections qui suivent, on donnera les grandes classes de capteurs, en plus de décrire quelques types de capteurs, essentiellement ceux permettant la mesure des déformations puisque cet aspect particulièrement important en instrumentation géotechnique et structurale.

3.7 Classification des capteurs à fibre optique

Les capteurs à fibre optique sont généralement groupés selon le phénomène par lequel est modulée la lumière voyageant dans la fibre; on retrouve donc les capteurs interférométriques, polarimétriques et intensimétriques (Tab. 3.2). La variation des phénomènes listés au tableau 3.2 est, bien sûr, intimement liée à la modification de l'état de la fibre soit par un écrasement, un allongement, etc.

Principe physique	Phénomène mesuré
Interférométrie	Mesure du déphasage d'une onde lumineuse
Polarimétrie	Mesure de la variation de la polarisation par une mesure du déphasage entre les modes orthogonaux de la lumière polarisée
Intensimétrie	Mesure de la variation d'intensité d'une onde lumineuse

D'autre part, il existe une sous-classification en relation avec le lieu d'interaction [YEH, 1990]:

- capteur extrinsèque: la fibre ne sert que de support pour la transmission du signal entre le point de mesure et le récepteur; la zone sensible est externe à la fibre;
- capteur intrinsèque: la fibre optique est l'élément sensible qui sert à mesurer une grandeur donnée.

3.7.1 Distribution des capteurs

Les capteurs à fibre optique offrent la possibilité de réaliser la mesure d'un paramètre donné selon divers arrangements. Un capteur peut être positionné à un point spécifique pour effectuer un contrôle uniquement à ce point précis; on peut aussi utiliser un capteur plus long afin de procéder

à des mesures dans une zone étendue [ROGERS, 1986; SPILLMAN, 1996]. On peut réaliser des mesures ponctuelles ou distribuées, et cela, selon divers schémas; on parlera de capteurs ponctuels ou distribués (Fig. 3.16).

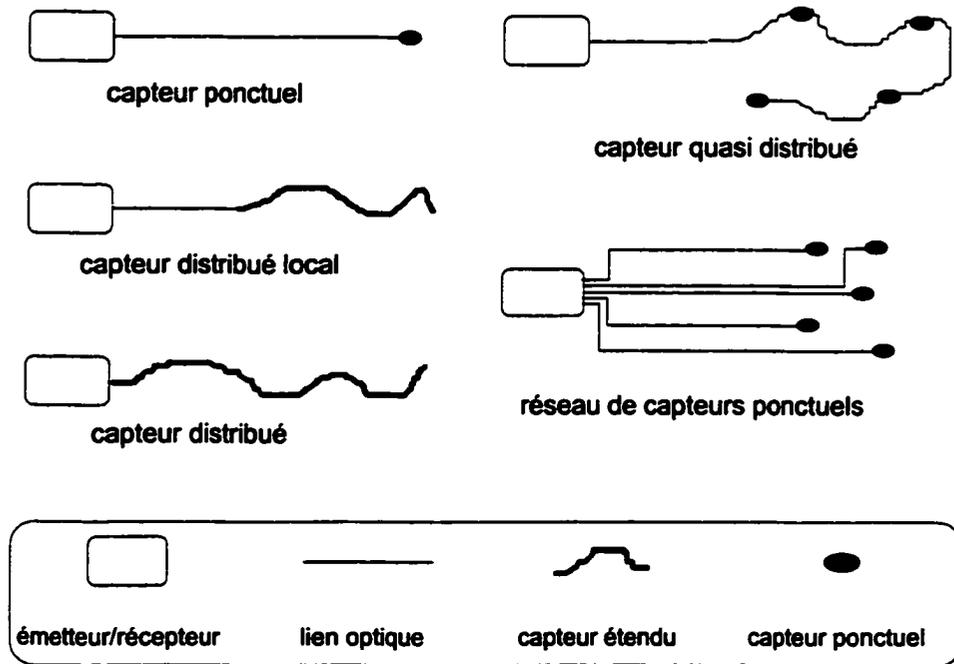


Figure 3.16 Différents réseaux de mesures avec les fibres optiques (d'après Spillman, 1996)

3.7.2 Modes d'interrogation des capteurs

Les capteurs distribués se présentent donc sous diverses formes et permettent la mesure d'un effet (ex. déformation, température) à un endroit donné (localisation spatiale) ainsi que la variation du phénomène dans le temps (variation temporelle). Dans le cas des capteurs quasi distribués, la mesure est faite à différents points sur la fibre. Pour les capteurs distribués, la mesure est faite en continu en fonction de la position sur la fibre. La plupart des capteurs distribués sont basés sur la méthode de réflectométrie optique temporelle, connue sous l'abréviation OTDR (*Optical Time Domain Reflectometry*). Il s'agit là d'une méthode d'interrogation des capteurs à fibre optique. Il existe divers modes d'interrogation: la transmission, la rétrodiffusion et la rétroréflexion.

La transmission consiste tout simplement à émettre un signal; ce dernier se propage dans la fibre optique, et un détecteur disposé à la sortie récupère le signal. Le principal désavantage de cette technique est que les deux extrémités de la fibre doivent être accessibles [MAHLKE & GÖSSING, 1989].

La rétrodiffusion ou réflectométrie optique (OTDR) a l'avantage de ne nécessiter l'accès qu'à une seule extrémité de la fibre; la lumière est injectée et récupérée à l'entrée de la fibre. On ne donne ici que le principe de base de cette méthode ; GARSIDE [1996] en fait une présentation complète. De la lumière est injectée à une certaine puissance dans la fibre et une certaine quantité, diffusée dans toutes les directions (cf. sect. 3.2.3 Effet Rayleigh), est guidée vers l'entrée; on dira de la lumière qu'elle est rétrodiffusée. La puissance lumineuse rétrodiffusée subit une atténuation lors de son voyage de retour et on mesure cette puissance. On peut établir un diagramme montrant la puissance optique rétrodiffusée en fonction de la distance sur la fibre (Fig. 3.17). On connaît alors les pertes liées à la présence d'un coupleur, une épissure (raccordement par collage ou fusion) ou encore une modification de la fibre (capteur distribué) à un point donné. Notons que la puissance lumineuse réfléchiée en bout de fibre si on dispose un miroir à cet endroit peut aussi être analysée.

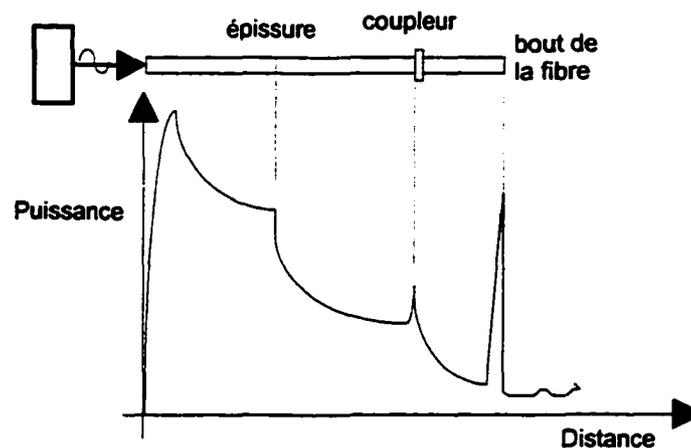


Figure 3.17 Représentation schématique de la réflectométrie optique

3.8 Description des phénomènes de modulation de la lumière

Attachons-nous maintenant à la description, sommaire disons-le, des phénomènes de modulation de la lumière dans les capteurs à fibre optique.

3.8.1 Interférométrie

Un interféromètre est un dispositif qui, grâce à l'utilisation du phénomène d'interférence des ondes, permet de mesurer diverses grandeurs physiques. Il existe un type d'interféromètre dit « à deux ondes ». Dans ce type d'interféromètre, une onde incidente est dédoublée à l'entrée du dispositif et les deux ondes parcourent des chemins différents. À la fin du trajet, on recombine les ondes afin qu'elles viennent interférer en un point [LEVY, 1988]. Le système d'interférence produit en un point donné dépend de la différence de phase $\Delta\phi$ (Fig. 3.18) entre les deux ondes:

$$\Delta\phi = 2\pi(n'l' - n''l'')/\lambda \quad (3-6)$$

où l' et l'' sont les longueurs géométriques des deux trajets, n' et n'' les indices de réfraction des milieux traversés et λ la longueur d'onde de la lumière utilisée. Si on connaît n' , n'' , l' et $\Delta\phi$, on peut calculer l'' . Les interféromètres de Mach-Zehnder et de Michelson, par exemple, sont des interféromètres à deux ondes utilisés comme capteur à fibre optique, et leur fonctionnement est basé sur ce principe.

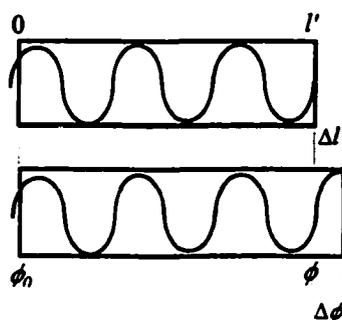


Figure 3.18 Représentation du déphasage d'une onde lumineuse dans une fibre optique (d'après Davies & coll., 1986)

Les capteurs interférométriques mesurent donc une variation de phase spatiale d'une onde. Une version de ces capteurs est l'interféromètre Mach-Zehnder. Ce dernier est constitué de deux bras,

c'est-à-dire une fibre de référence et d'une fibre servant à mesurer un événement, essentiellement un déplacement, une température, une pression, etc. (Fig. 3.19).

Un faisceau lumineux est séparé avec un dispositif de séparation et injecté dans les deux fibres. Puisqu'il s'agit de la même source de lumière, on devrait retrouver à la sortie de chaque fibre deux faisceaux ayant la même phase et être en mesure d'observer, sur un écran, un système d'interférence donné. Toutefois, si le bras de mesure s'allonge ou se contracte légèrement, alors le chemin optique est différent de celui du bras de référence. Ainsi, une différence de phase est créée entre les deux faisceaux de lumière à la sortie des deux fibres.

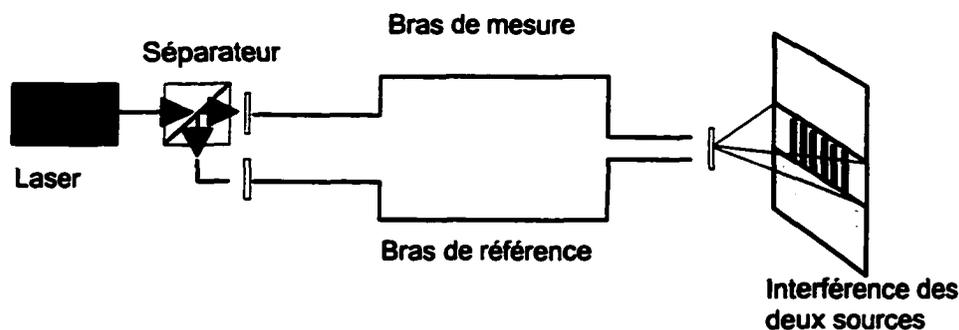


Figure 3.19 Schéma simplifié de l'interféromètre Mach-Zehnder

Cette différence de phase conduit à l'observation d'un système d'interférence des ondes différent du système initial. L'étude de l'interférence ondes électromagnétiques nous enseigne que les systèmes d'interférence sont constitués de nombreuses franges dont les intensités sont différentes. Il est possible de relier l'intensité du signal de sortie au déphasage des deux ondes [SEARS & coll., 1987]. Eventuellement, on pourra aussi relier ce déphasage au déplacement subit par le bras de mesure.

Il existe d'autres interféromètres, entre autres, l'interféromètre de Michelson de conception semblable au Mach-Zehnder mais au lieu de récupérer le signal à la sortie des deux bras, il est récupéré à l'entrée. En effet, on dispose un miroir (ou substance réfléchissante) à l'extrémité des deux bras; ainsi on observe seulement deux fibres optiques sortant de l'élément instrumenté [GANDHI & THOMPSON, 1992]. L'interféromètre Sagnac est composé d'une fibre optique

enroulée. La lumière est injectée aux deux extrémités de la fibre voyageant ainsi dans des directions opposées. Il est, entre autres, utilisé pour la mesure de rotations [DAVIES & coll., 1986; YEH, 1990]. L'interféromètre Fabry-Pérot, quant à lui, est constitué de deux miroirs séparés d'une certaine distance et monté sur une seule fibre optique. L'explication plus détaillée du fonctionnement de ce type de capteur sera donnée à la section 3.9.

Les capteurs de type réseau de Bragg utilisent le principe des interférences produites par un réseau longitudinal. RUSSELL & ARCHAMBAULT (1996), KERSEY (1997) et OTHONOS (1997) présentent en détail la fabrication et le fonctionnement de ces capteurs. Diverses techniques permettent de graver de petits réflecteurs, qui sont en fait des zones d'indices de réfraction différente du coeur de la fibre, à l'intérieur d'une fibre optique (Fig. 3.20). Ces inhomogénéités, connues sous le nom de réseau de Bragg sont en quelque sorte des miroirs sensibles à la longueur d'ondes, et seules les longueurs d'ondes satisfaisant à la loi de Bragg seront réfléchies. Le spectre de la lumière réfléchie fait donc apparaître la longueur d'onde $\lambda=2nA$. La modification de l'indice n ou de la distance entre les réflecteurs (périodicité du réseau) par une déformation longitudinale ou une variation de température provoque le changement de la longueur d'onde réfléchie.

En dernière analyse, disons que les capteurs interférométriques sont essentiellement basés sur la séparation d'une source lumineuse en deux ou plusieurs portions. Après s'être propagés selon différents chemins, les faisceaux sont combinés pour produire une interférence qui excitera un photodétecteur.

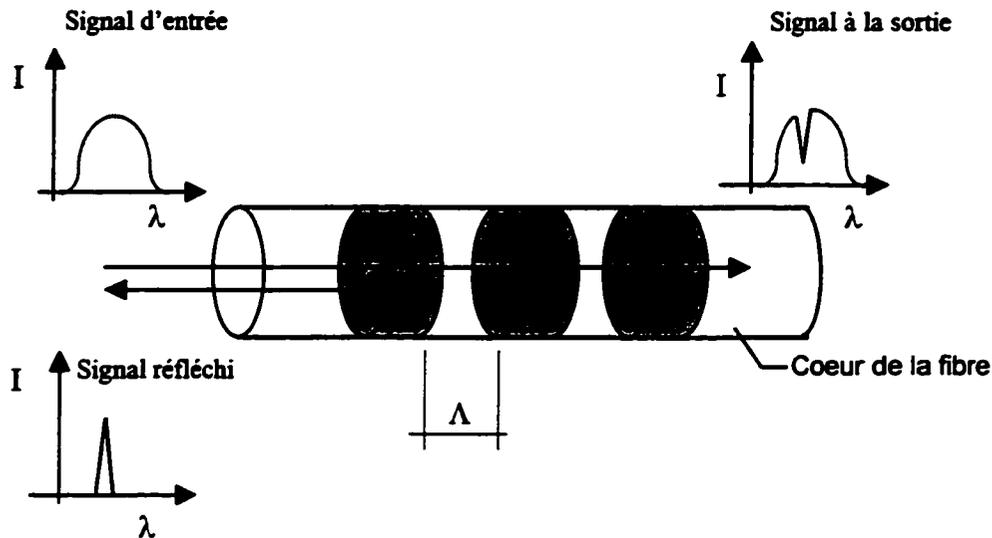


Figure 3.20 Représentation schématique du fonctionnement du réseau de Bragg (d'après Spillman, 1996)

3.8.2 Polarimétrie

La polarisation de la lumière a été brièvement décrite à la section 3.2.5. La polarimétrie consiste à mesurer la variation de l'état de polarisation de la lumière à la sortie d'une fibre optique. La lumière est polarisée (Fig. 3.6) dans une direction donnée avant d'être injectée dans une fibre optique. La fibre optique utilisée est généralement une fibre de type haute biréfringence (Hi-Bi), c'est à dire qu'elle présente une variation des indices n_x et n_y .

On peut aussi utiliser une fibre optique monomode ; c'est la biréfringence artificielle qui est alors évaluée [BARBACHI, 1995]. Lorsque le faisceau polarisé incident (E_z) entre dans cette fibre, il demeure polarisé mais il est séparé en deux composantes E_x et E_y (Fig. 3.21).

Suite à une perturbation de la fibre, la modification des indices de réfraction de la fibre entraîne une modification de la polarisation. En réalité, on mesure la différence de phase entre les directions orthogonales de polarisation. On peut mettre en équation l'intensité du signal de sortie avec le déphasage des deux composantes E_x et E_y de la polarisation [BARBACHI, 1995; BOBY & coll., 1994]. Tout comme les capteurs de type interférométrique, le déphasage peut être relié à

la force appliquée sur la fibre ou à son allongement. Notons que l'étude du phénomène de photoélasticité nous renseigne sur la variation des indices de réfraction d'une fibre optique à la suite de l'application d'une force [SIRKIS & HASLACH, 1991; GAFSI, 1997].

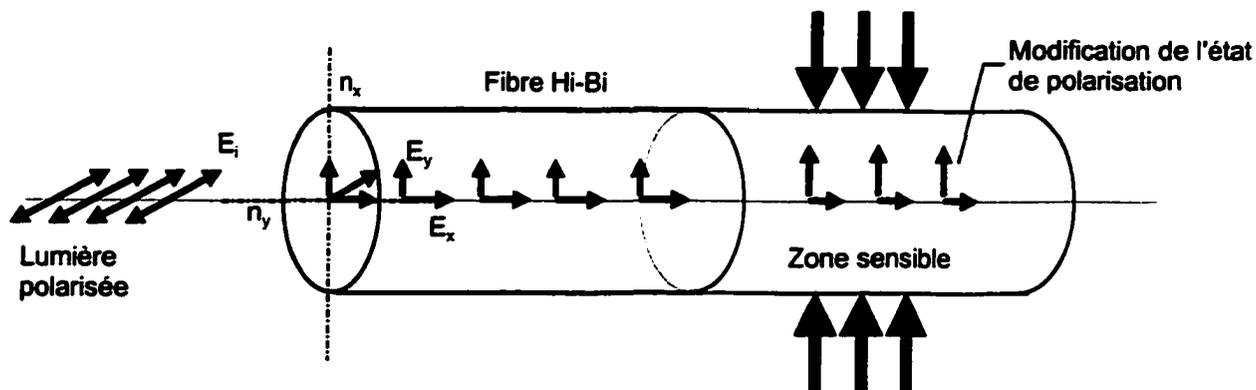


Figure 3.21 Illustration du principe des capteurs polarimétriques

3.8.3 Intensimétrie

Les capteurs intensimétriques sont les plus simples à réaliser puisqu'ils sont essentiellement basés sur une modification de l'intensité du signal. Un signal I_0 est injecté à l'entrée d'une fibre et récupéré en sortie ; ce dernier possède alors une intensité I . Il s'agit là d'une mesure de l'atténuation du signal. Il a été mentionné auparavant que les microcourbures dans une fibre conduisent à l'altération du signal optique (cf. sect. 3.4.1). Rappelons que le faisceau incident est réfracté dans la gaine par suite d'une modification locale de l'orientation de l'interface. Il est alors possible de générer des microcourbures dans une fibre et de mesurer les pertes [UDD, 1996] (Fig. 3.22). MAHUT & coll. (1997) ont utilisé ce type de capteurs dans un programme expérimental d'instrumentation d'un pont. Bien que les perspectives soient particulièrement intéressantes, certaines difficultés entre autres liées à la mise en place dans le béton et à la compensation thermique devront être résolues afin d'en arriver à une utilisation simple et fiable pour la surveillance des structures.

La génération de microcourbures peut être réalisée en disposant un microressort à un endroit sur la fibre ou encore en utilisant deux fibres optiques torsadées. Enfin, mentionnons que la précision des capteurs intensimétriques est inférieure à celle des capteurs polarimétriques et interférométriques.

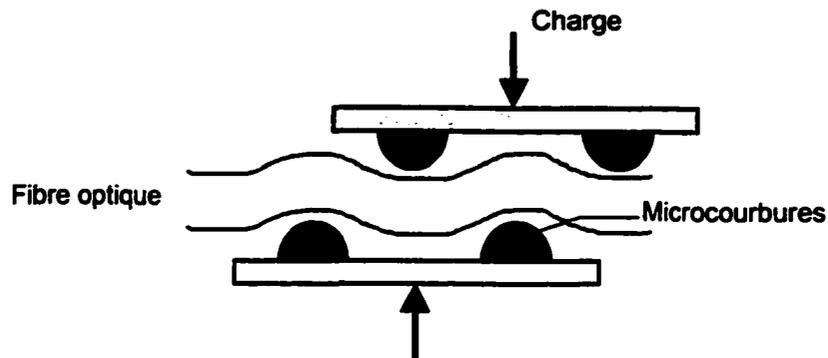


Figure 3.22 Illustration du principe des capteurs intensimétriques à microcourbures

3.9 Capteur de type Fabry-Pérot

Le capteur Fabry-Pérot figure parmi les capteurs les plus précis. L'interféromètre Fabry-Pérot est d'abord et avant tout considéré comme un montage extrêmement efficace en physique. Cet instrument a été utilisé pour la mesure précise de longueurs d'ondes, la détermination des indices de réfraction des gaz, la mesure de déplacements très petits etc. [KALITÉEVSKI, 1980; TOLANSKY, 1966]. Ce type d'interféromètre est maintenant disponible sur le marché de l'instrumentation géotechnique sous forme de capteur à fibre optique [CHOQUET & LEROUX, 1995; CHOQUET & coll., 1997].

L'interféromètre Fabry-Pérot est un interféromètre à « ondes multiples » comparativement aux interféromètres Mach-Zehnder et Michelson décrits auparavant. Le Fabry-Pérot est un dispositif constitué de deux lames de verre séparées d'une distance d (Fig. 3.23). De la lumière, dont les rayons sont parallèles après le passage dans une lentille, est injectée dans le dispositif Fabry-Pérot. La figure 3.23 montre les réflexions internes que subit un rayon de lumière passant entre les lames de verre.

Le rayon incident donne lieu à l'apparition d'un système d'interférence émergent de l'interféromètre. Les rayons parallèles sont focalisés en un point P à l'aide d'une lentille. Chacun des rayons qui émerge de l'interféromètre a parcouru une distance différente; les rayons présentent donc une différence de phase les uns par rapport aux autres.

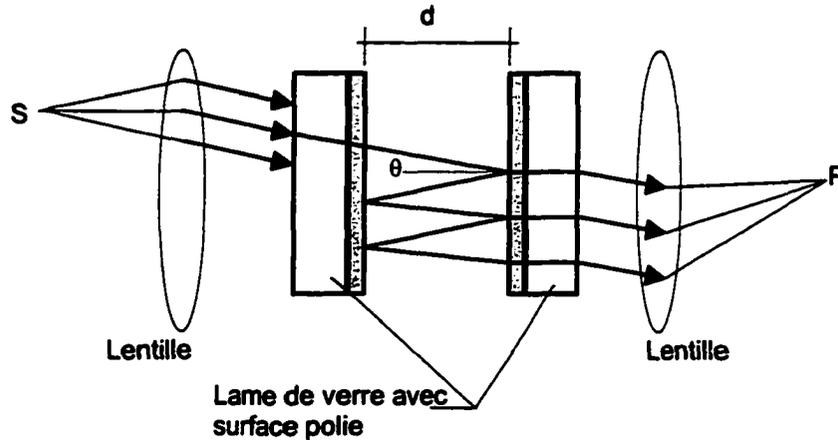


Figure 3.23 Schéma de l'interféromètre Fabry-Pérot (d'après Morrison, 1962)

La combinaison des rayons au point P donne lieu à l'apparition d'un patron de diffraction puisqu'il y a interférence entre les rayons émergents de l'interféromètre [MORRISON, 1962]. Notons que le système d'interférence apparaît sous forme de disques concentriques, anneaux d'interférence, au lieu de franges espacées régulièrement. Advenant une variation de la distance d entre les lames de verre, on observe alors un décalage du système d'interférence. La description de ce type de capteur, plus particulièrement celui développé par la compagnie FISO TECHNOLOGIES [BELLEVILLE & DUPLAIN, 1993] est expliquée en détail au chapitre 4 puisque l'on en fait la validation en vue d'applications en génie civil.

3.10 Applications des capteurs à fibre optique en génie civil

En génie civil, de nombreuses applications des capteurs à fibre optique sont répertoriées, surtout dans le domaine de la structure. Les capteurs de type réseaux de Bragg ont été étudiés pour la mesure des déformations dans des poutres de béton à haute performance et en matériaux compo-

sites [CHEN & coll., 1994 ; MAHER & NAWY, 1993]. D'autre part, une étude par ZIMMERMANN & CLAUS (1993) visait à vérifier l'efficacité de la méthode par réflectométrie optique (OTDR) pour la mesure de la tension dans des tirants d'ancrages. Les ancres sont couramment utilisés pour la stabilisation des massifs rocheux ou des murs de soutènement. Des capteurs intensimétriques à microcourbures ont été installés aux appuis d'un pont afin de suivre les réactions aux appuis. L'objectif était de mesurer la redistribution des charges causée par le vieillissement de la structure [CAUSSIGNAC & coll., 1992]. Un capteur polarimétrique à fibre biréfringente est actuellement développé pour la mesure du poids des véhicules en mouvement. De tels capteurs sont intégrés dans la chaussée et peuvent, en plus, servir, pour la mesure du débit du trafic routier [BOBY & coll., 1994]. UDD (1995) mentionne la possibilité d'utiliser les capteurs interférométriques pour la mesure du déplacement le long des grandes failles géologiques. Enfin, la localisation d'impacts dans une structure en matériau composite intégrant un réseau de fibres optiques peut être réalisée [MICHEL & coll., 1996]. Les ions chlore qui viennent en contact avec les barres d'armature du béton en provoquent la corrosion. HUSTON & FUHR (1998) proposent un capteur à fibre optique pour la détection des ions chlore dans un tablier de pont. CHEN & ANSARI (1998) travaillent au développement d'un capteur acoustique à fibre optique utile pour l'évaluation non destructive des structures.

CHAPITRE 4

Validation expérimentale et numérique de la jauge Fabry-Pérot EFO

La technologie des jauges à fibre optique reçoit actuellement une attention particulière dans le domaine de l'instrumentation des structures. Ce nouvel instrument est en compétition avec les extensomètres à corde vibrante largement utilisés depuis la fin des années 60. Bien que la technologie à corde vibrante soit utilisée depuis un bon nombre d'années, il n'en reste pas moins que l'intérêt des chercheurs et des praticiens sur la nature même de la mesure effectuée est apparu bien après les premières utilisations. Ceci dit, pour ce qui est des jauges à fibre optique, on s'intéresse avant tout à mieux connaître leur comportement une fois enfouies dans le béton. En effet, l'application des jauges à fibre optique pour l'instrumentation du béton ainsi que pour le développement de dispositifs de mesure basés sur cette technologie, demande que l'on effectue certains essais de validation. Ces expérimentations peuvent, par ailleurs, être comparées à des modélisations numériques. Dans le présent chapitre, on décrit en détail l'extensomètre à fibre optique étudié et on donne les résultats d'expérimentations et modélisations réalisées sur ce dernier.

4.1 Description de la jauge Fabry-Pérot EFO

Dans le chapitre précédent, le principe général de l'interféromètre Fabry-Pérot a été décrit. Toutefois, dans le cas des capteurs à fibre optique, bien que la forme de l'interféromètre soit

très similaire, la mesure de la variation de la distance entre les lames du dispositif est un peu plus complexe. La figure 4.1 montre une représentation schématique d'un capteur Fabry-Pérot.

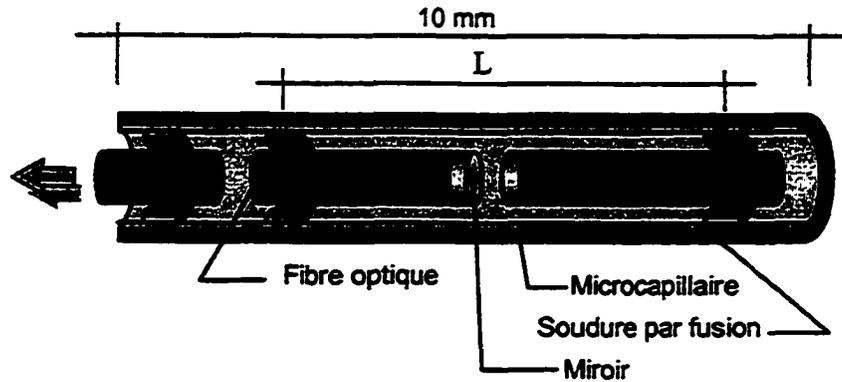


Figure 4.1 Schéma du capteur Fabry-Pérot

À partir de cette figure, on est en mesure de voir l'analogie avec l'interféromètre Fabry-Pérot de la figure 3.23; toutefois, dans le cas présent, il fonctionne en lumière blanche. Ce capteur extrinsèque est monté sur une fibre optique multimode soudée par fusion dans un microcapillaire. Par ailleurs, une petite longueur de fibre optique, servant de miroir, est soudée à l'autre bout du microcapillaire. Une onde lumineuse arrivant entre les fibres optiques, c'est-à-dire dans la cavité Fabry-Pérot, est partiellement transmise. La transmission varie en fonction de la longueur d'onde de la lumière λ et de la distance d entre les miroirs. La forme mathématique de la courbe de transmission s'apparente à une fonction périodique (*transmittance function*) $T(\lambda, d)$:

$$T(\lambda, d) = \frac{1}{1 + F \cdot \sin^2 \left[\frac{2\pi d}{\lambda} \right]} \quad (4-1)$$

où F est la finesse de l'interféromètre:

$$F = \left[\frac{4R}{(1-R)} \right]^2 \quad (4-2)$$

Dans cette équation, R est le coefficient de réflexion des miroirs, soit le pourcentage de lumière réfléchi. Notons que, pour un capteur donné, la finesse est constante puisque la réflectance est fixe. Pour une distance d entre les miroirs, la transmission en fonction de la longueur d'onde présente une signature caractéristique. Si on mesure l'intensité de la lumière transmise (ou réfléchi) modulée par l'interféromètre, on pourra déduire la distance d entre l'extrémité des fibres optiques. Le spectre de la lumière modulée $X(\lambda)$ par l'interféromètre est comparé à une fonction de transmission $T(\lambda)$ et lorsque que l'on retrouve une fonction $T(\lambda)$ identique à $X(\lambda)$, alors la distance d est retrouvée. Afin de comparer les fonctions $X(\lambda)$ et $T(\lambda)$, on utilise une méthode de traitement du signal que l'on appelle l'intercorrélation des signaux. Disons seulement que pour vérifier la similarité des signaux, on calcule un coefficient d'intercorrélation. Si deux signaux identiques sont comparés, ce coefficient devient alors maximal et décroît à mesure que les signaux ne correspondent plus [AMBARDAR, 1995; STANLEY & coll., 1984].

La réalisation du calcul d'intercorrélation est relativement fastidieuse et, pour cette raison, un intercorrélateur optique a été mis au point [BELLEVILLE & DUPLAIN, 1993]. C'est d'ailleurs là l'originalité des jauges développées par FISO TECHNOLOGIES. L'intercorrélateur optique est en fait un interféromètre Fizeau. Cet interféromètre est construit avec deux lames de verre entre lesquelles on introduit une cale de verre à une extrémité (Fig. 4.2). Prenons la lumière modulée par l'interféromètre Fabry-Pérot. Si cette lumière est dirigée vers un second interféromètre, disposé immédiatement après le premier, le spectre de la lumière transmise est maximal si le second interféromètre possède la même largeur de cavité d . L'interféromètre Fizeau est construit de telle sorte qu'il possède plusieurs longueurs de cavité. Ainsi, la lumière qui traverse cet interféromètre est transmise de façon maximale à l'endroit qui correspond exactement à la distance d du Fabry-Pérot par lequel a été modulée la lumière avant d'attaquer le Fizeau. Une barrette de photodiodes, codée en pixels, permet d'enregistrer la position du signal maximum. Chaque pixel correspond à une valeur de la distance d de la cavité Fabry-Pérot. (Fig. 4.2)

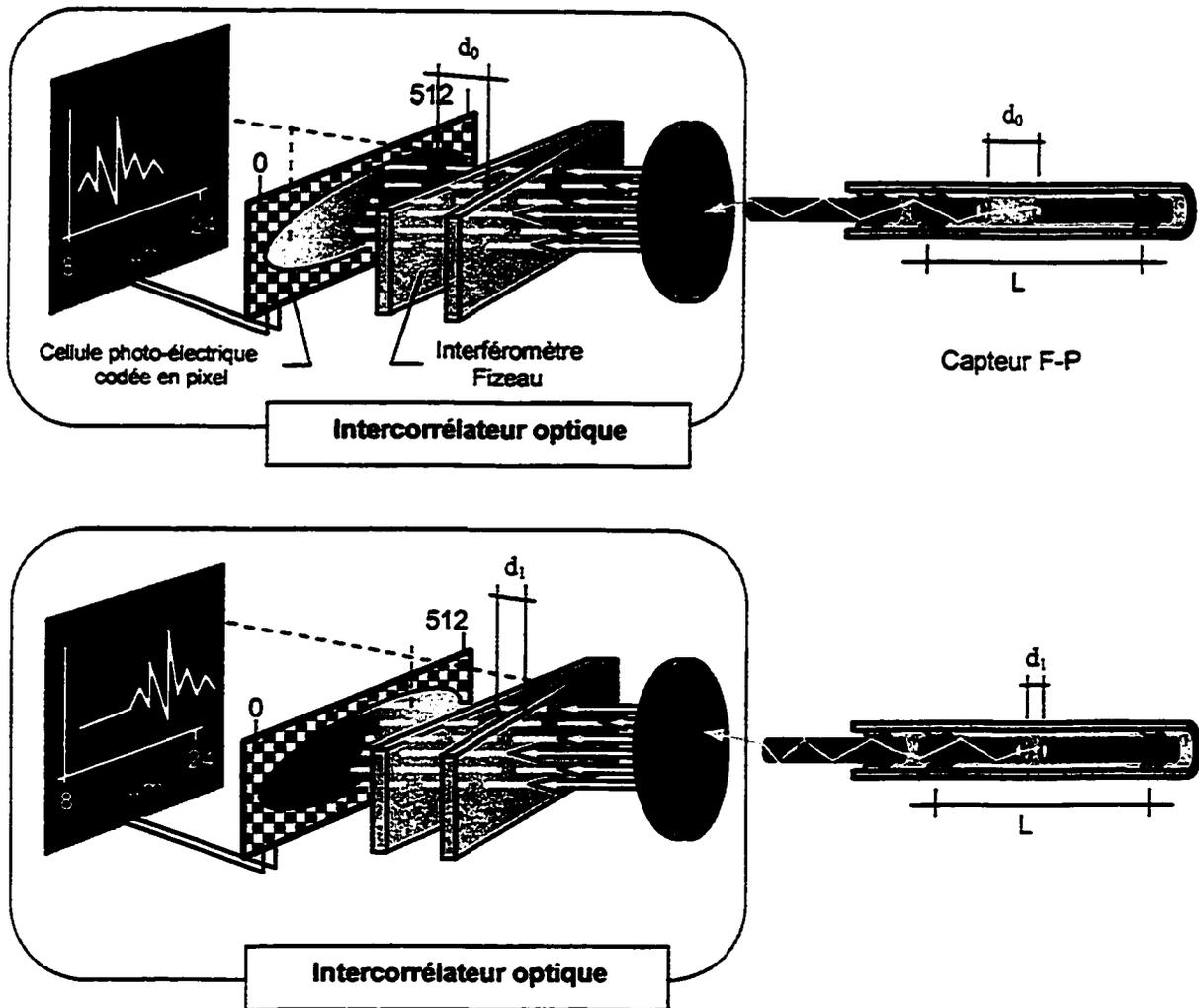


Figure 4.2 Schéma du fonctionnement de l'intercoeurlateur optique

La déformation est calculée à l'aide de la valeur de d ainsi que la distance entre les points de soudure par fusion du microcapillaire. En fait, la distance entre les points de soudure par fusion constitue la longueur L de la jauge; cette valeur fixe correspond généralement au facteur de jauge. Lorsque le microcapillaire est soumis à une déformation dans le sens longitudinal, la distance d de la cavité change, donnant ainsi la variation Δd . Il est alors possible de calculer la déformation $\varepsilon = \Delta d / L$. Les capteurs Fabry-Pérot avec corrélation optique offrent une sensibilité de $0,25 \mu\epsilon$ et une plage de mesures de ± 1000 , ± 1500 , ± 2000 , $\pm 5000 \mu\epsilon$ et même plus selon les exigences. L'utilisation des capteurs Fabry-Pérot pour l'instrumentation

des déformations internes du béton nécessite d'insérer le capteur dans un corps en acier. On a vu à la figure 2.11 une photographie de l'extensomètre EFO; par ailleurs la figure 4.3 montre une représentation schématique de la conception de cet extensomètre qui intègre le capteur Fabry-Pérot. Quant à la lecture des données, diverses unités de lectures intégrant l'interféromètre Fizeau sont disponibles et une unité portable à quatre canaux a été utilisé dans le cadre des présents travaux (Fig. 4.4).

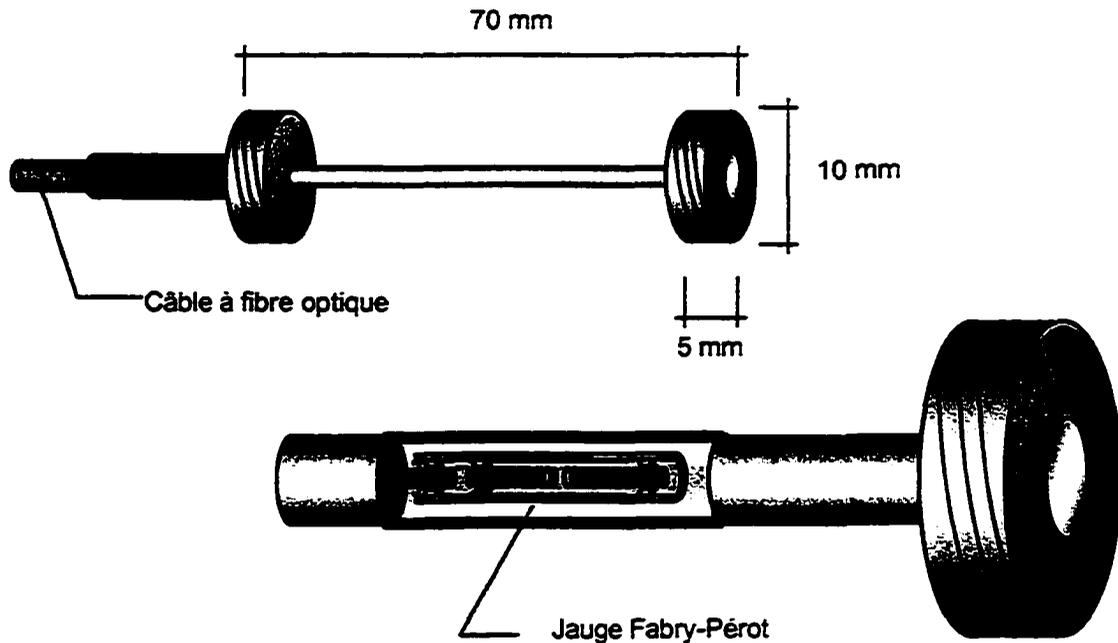


Figure 4.3 Extensomètre Fabry-Pérot de type EFO

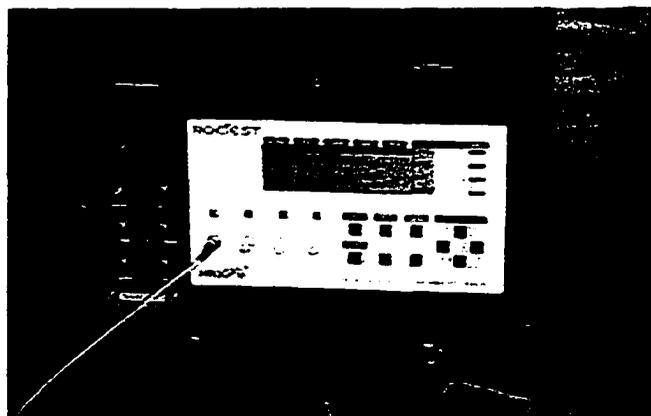


Figure 4.4 Unité portable d'acquisition à quatre canaux

4.2 Étude du comportement de la jauge

Avant d'étudier la jauge Fabry-Pérot EFO enfouie dans le béton, on s'intéresse à vérifier son comportement à l'air libre. Le comportement de diverses jauges sollicitées en compression est analysé. Aussi, on soumet la jauge à un gradient de température afin de vérifier son comportement sous sollicitation thermique.

4.2.1 Comportement en compression

Chaque jauge EFO utilisée dans le cadre des présents travaux a été vérifiée par le manufacturier avant d'être acheminée au Laboratoire. Il s'agit en fait d'une validation du bon fonctionnement de la jauge réalisée par le biais d'un essai en compression. Étant donné que le capteur Fabry-Pérot est collé dans une enveloppe d'acier, les résultats obtenus doivent correspondre de très près au module de Young de l'acier. C'est d'ailleurs ce que l'on trouve au tableau 4.1 pour les différentes jauges utilisées.

No. de Jauge	Pente de la montée en charge	Pente de la descente en charge	Écart entre les pentes (%)
1002873	202	202	0
1003038	199	200	0,5
1002970	208	209	0,5
1003067	203	204	0,5
1002555	207	208	0,5
Moyenne	204	204	0,4
Écart-type	3,2	3,4	0,2

4.2.2 Dilatation thermique

Concernant la dilatation thermique des diverses jauges, afin d'en connaître le comportement sous gradient de température, on a procédé à un essai de laboratoire simple. En effet, les jauges ont été placées dans une enceinte munie d'un thermorégulateur et la déformation des

jauges en fonction de leur conditionnement en température a été notée. La figure 4.5 montre un graphique de la déformation en fonction de la température. Les pentes obtenues pour chaque capteur sont tout à fait comparables au coefficient de dilatation thermique de l'acier 410 ($9,9 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ selon ASM 1990) avec lequel sont conçues les jauges EFO. Il est à noter que la plage de températures varie de 25 à 65 °C pour toutes les jauges, toutefois, pour les besoins de la représentation graphique, un décalage de 5°C et 10 °C a été ajouté aux jauges EFO 1003021 et 1002876.

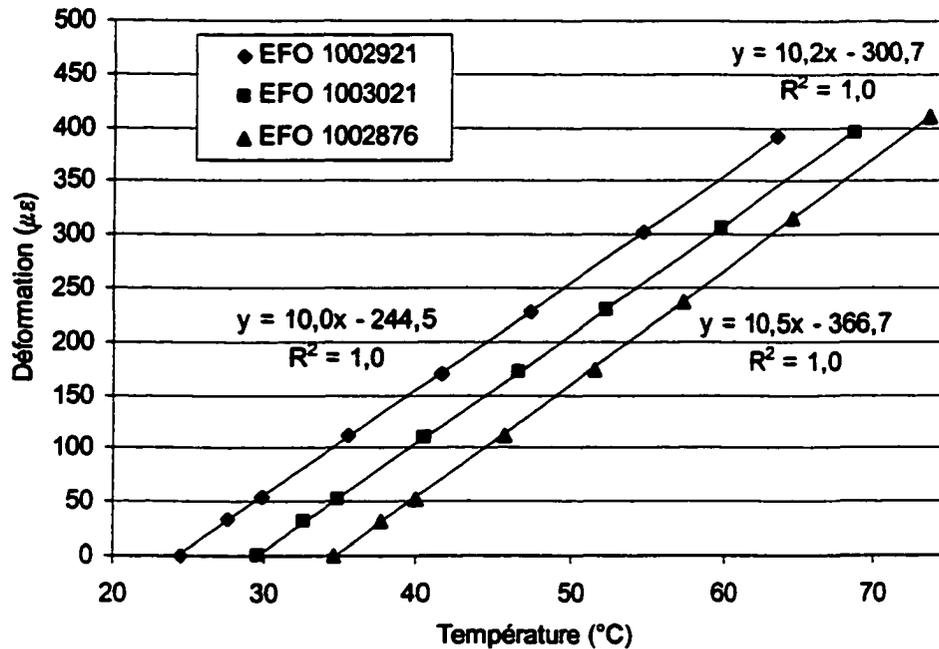


Figure 4.5 Dilatation thermique des jauges EFO

4.3 Étude du comportement de la jauge EFO noyée dans le béton

Les jauges EFO sont conçues pour la mesure des déformations internes d'éléments de béton dans la direction parallèle à l'axe longitudinal de la jauge. Divers essais mécaniques ont été effectués et comparés à un modèle numérique afin de vérifier la validité des mesures de déformations du béton obtenues avec cette jauge.

4.3.1 Conception du cylindre d'essais

Un cylindre de béton de 100 mm de diamètre et d'environ 200 mm de hauteur, dans lequel on a enfoui une jauge de type EFO, a été préparé afin de procéder aux divers essais de validation. Le cylindre est constitué d'un béton à haute performance et la jauge EFO est disposée au centre du cylindre de manière à ce que l'axe longitudinal de la jauge et celui du cylindre soient confondus. La figure 4.6 montre un schéma et une photographie du cylindre d'essais flanqué d'une jauge EFO identique à celle enfouie dans ce dernier. Le tableau 4.2 présente le mélange de béton utilisé dans la préparation du cylindre d'essais. L'affaissement mesuré pour ce mélange est de 95 mm et la teneur en air de 3%. En plus du cylindre d'essais, plusieurs éprouvettes supplémentaires ont été préparées afin de procéder aux essais mécaniques sur ce béton. Aussi, des granulats calcaire de calibre 5-10 mm ont été utilisés dans ce mélange de béton et plusieurs éprouvettes ont été préparées afin de procéder à la détermination des propriétés mécaniques de ce béton à divers âges.

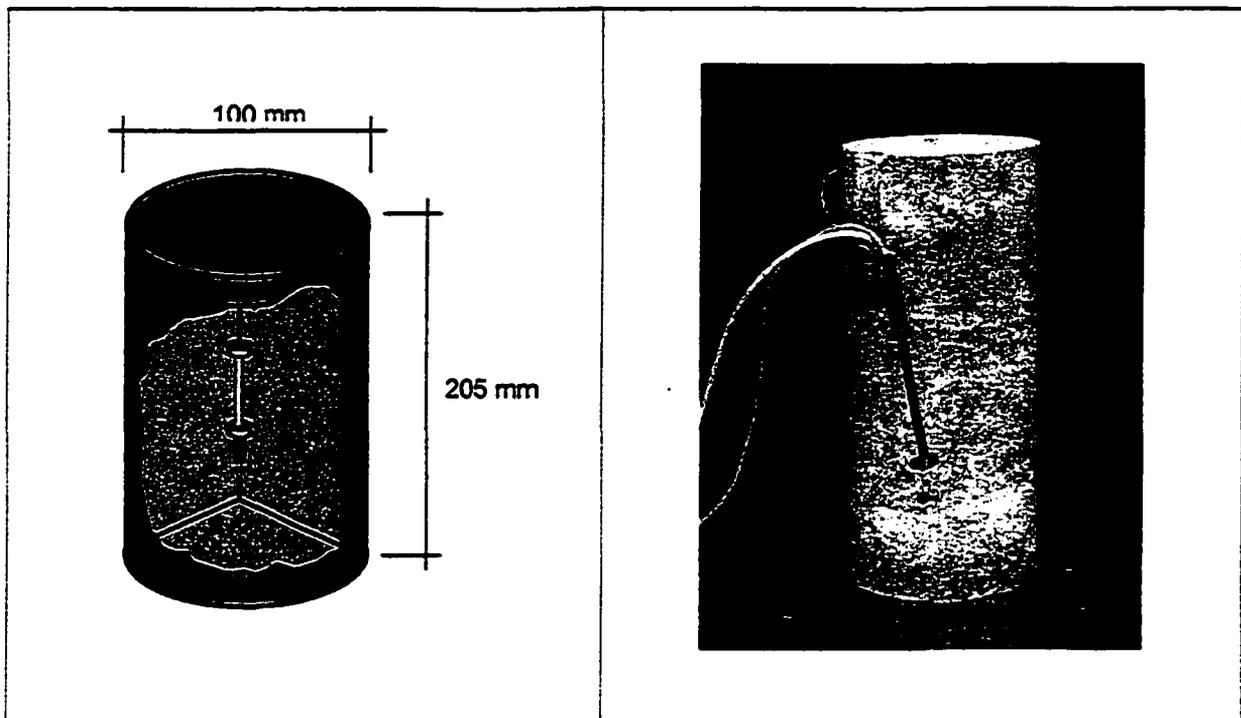


Figure 4.6 Cylindre de béton intégrant une jauge Fabry-Pérot EFO

Constituants	Quantité par m ³
Ciment type 10 (Lafarge)	380 Kg
Eau	150 Kg
Sable	895 Kg
Granulats 5-10 mm	1000 Kg
Superplastifiant (42% de matière solide)	3,6 litres
Total:	2418 Kg/m³

4.3.2 Propriétés mécaniques du béton et du cylindre d'essais

Des essais mécaniques sur des éprouvettes de béton ont permis de déterminer la résistance du béton et des constantes élastiques (tab. 4.3). La détermination du module élastique et du coefficient de Poisson des éprouvettes a été effectuée sur une presse à asservissement en utilisant un dispositif à anneaux pour la mesure des déformations. Ce dispositif est équipé de trois LVDT axiaux et de trois LVDT diamétraux d'une résolution de 0,25 mm. Le module élastique et le coefficient de Poisson du béton sont mesurés sur deux éprouvettes à 7 j, 35 j et à plus d'un an. La résistance à la compression a été déterminée sur un cylindre de béton âgé de 7 j et un autre âgé de plus d'un an. Par ailleurs, dans le but de vérifier s'il y a une modification de la rigidité du béton liée à la présence de la jauge EFO, les constantes élastiques du cylindre d'essais contenant la jauge EFO ont été déterminées de la même façon et sont aussi présentées au tableau 4.3.

Âge du béton	f _c MPa	E' _c GPa	v	E _{cyl} GPa	v _{cyl}
7 j	50	33	0,21	34	0,22
35 j	nd	37	0,22	nd	nd
> 1 an	85	43,5	0,22	44,5	0,23

La figure 4.7 montre le dispositif équipé de LVDT monté sur le cylindre instrumenté avec la jauge EFO. Il s'agit du même dispositif utilisé pour la détermination des constantes élastiques du béton; ce dernier est relié à un système d'acquisition de données. Les courbes contrainte-déformation enregistrées pour les diverses éprouvettes de béton (sans jauge) sont présentées plus loin sur les figures 4.8a, 4.9a, 4.10a et 4.11a.



Figure 4.7 Dispositif externe avec LVDT pour la mesure des déformations de cylindre de béton de 100 mm de diamètre

4.3.3 Déformation interne du béton mesurée avec la jauge EFO

À la suite de la détermination des propriétés mécaniques du béton, on a procédé au chargement en compression simple du cylindre instrumenté avec la jauge EFO à 7 j, 35 j et à plus d'un an. La déformation du cylindre mesurée par la jauge à fibre optique est notée manuellement à différents paliers de chargement à l'aide d'une unité de lecture. Quant au chargement, il est suivi à l'aide d'une cellule de charge d'une capacité de 300 kN pour les essais à faible charge et une autre de 1000 kN pour les essais à charge élevée. En effet, les essais ont été effectués à des niveaux de charge se situant autour de $0,2f_c$ afin de vérifier la réponse de la jauge lors de faibles déformations du béton. Par ailleurs, pour le béton âgé de

plus d'un an, des essais atteignant un niveau de chargement de plus de $0,4f_c$ ont été réalisés. Les figures 4.8a, 4.9a, 4.10a et 4.11a montrent les déformations mesurées avec la jauge EFO lors de la montée et de la descente en charge du cylindre d'essais ainsi que les déformations des éprouvettes de béton non instrumentées mesurées avec le dispositif à LVDT. On présente aussi un agrandissement de la partie linéaire de la montée en charge (fig. 4.8b, 4.9b, 4.10b et 4.11b) en incluant les équations de régression linéaire pour chaque série de mesures.

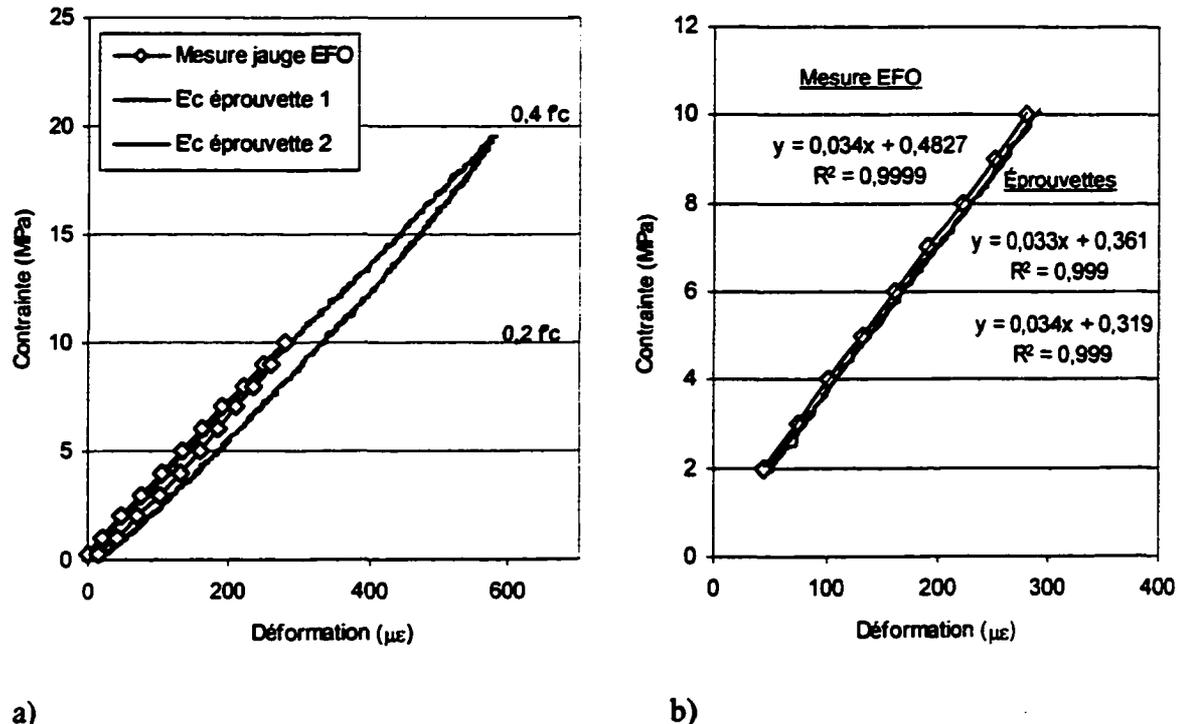
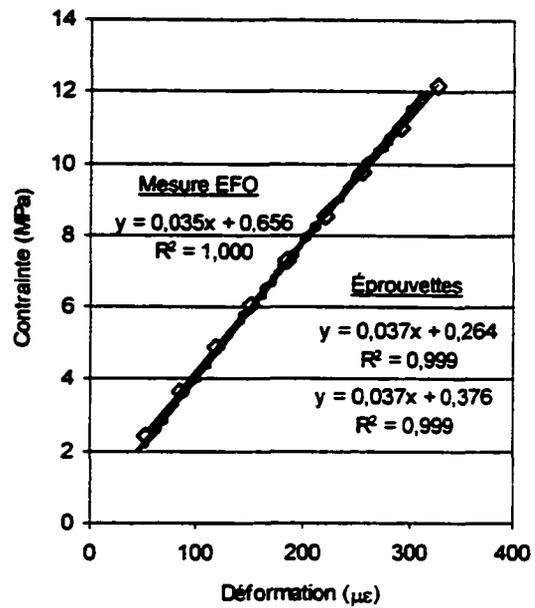
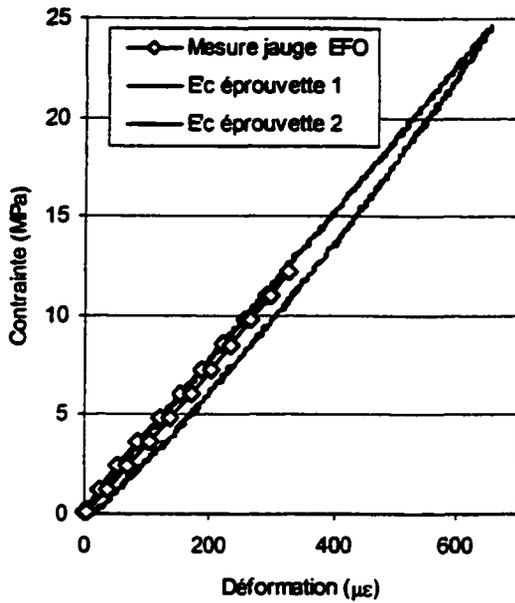


Figure 4.8 Déformation du béton mesurée à 7 jours avec la jauge EFO et les LVDT externes; a) courbe contrainte-déformation b) agrandissement de la partie de montée en charge

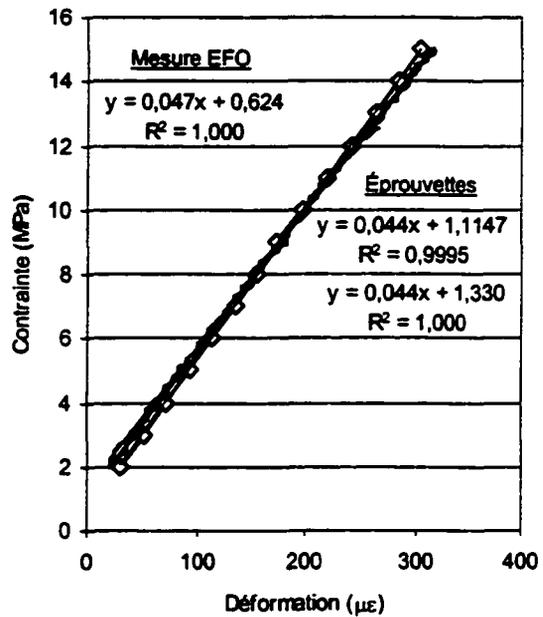
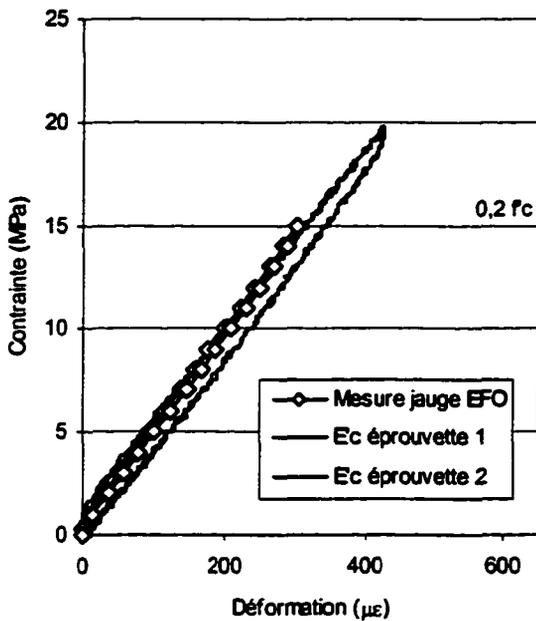
Les mesures obtenues avec la jauge EFO aux différents âges s'accordent bien avec les déformations mesurées avec les LVDT sur les cylindres de béton non instrumentés et cela pour les deux niveaux de chargement ($0,2f_c$ et $0,4f_c$). De manière générale, on observe que la pente des courbes de régression est plus élevée dans le cas des mesures avec la jauge EFO que celle des éprouvettes de béton. Cette tendance correspond d'ailleurs aux valeurs de module élastique plus élevées du cylindre instrumenté en comparaison avec les éprouvettes de béton (tab. 4.3). En effet, pour le cylindre de béton contenant la jauge, une augmentation de la rigidité de 1 GPa est observée. En ce qui a trait à l'hystérésis, la figure 4.11a montre que l'effet mesuré avec la jauge EFO est similaire à celui enregistré avec les LVDT.



a)

b)

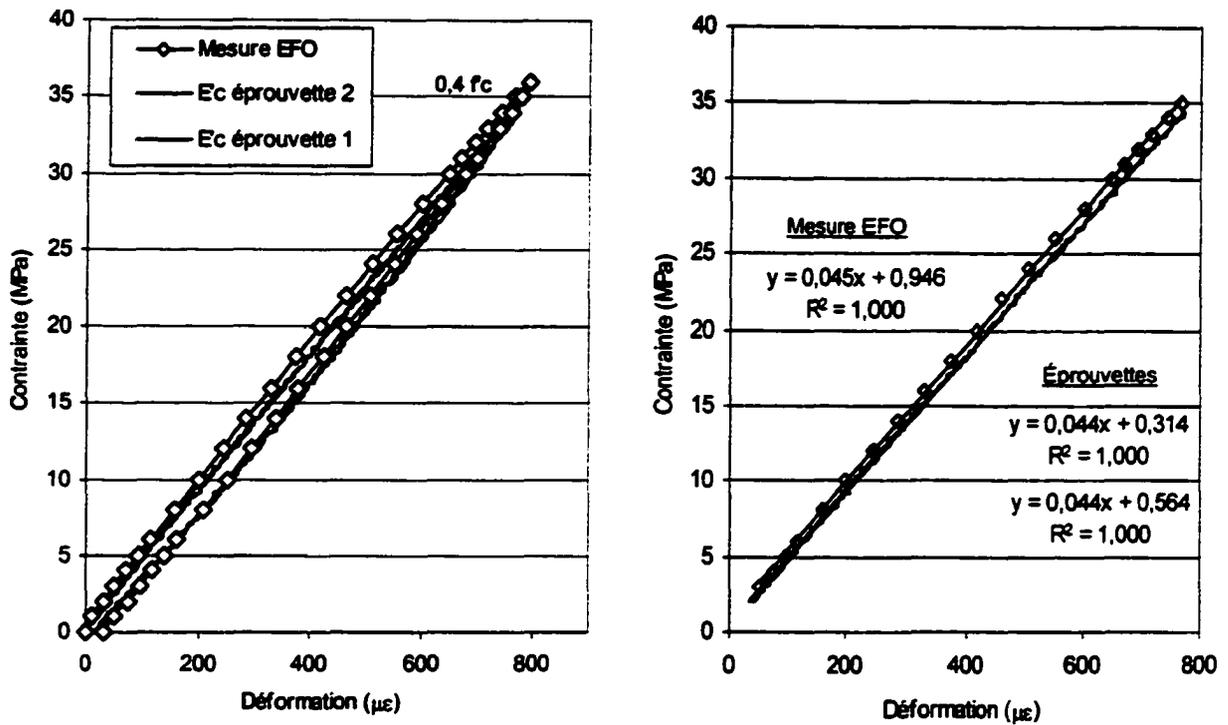
Figure 4.9 Déformation du béton mesurée à 35 jours avec la jauge EFO et les LVDT externes; a) courbe contrainte-déformation b) agrandissement de la partie de montée en charge



a)

b)

Figure 4.10 Déformation du béton mesurée à plus d'un an avec la jauge EFO et les LVDT externes à un niveau de charge de 0,2fc; a) courbe contrainte-déformation b) agrandissement de la partie de montée en charge

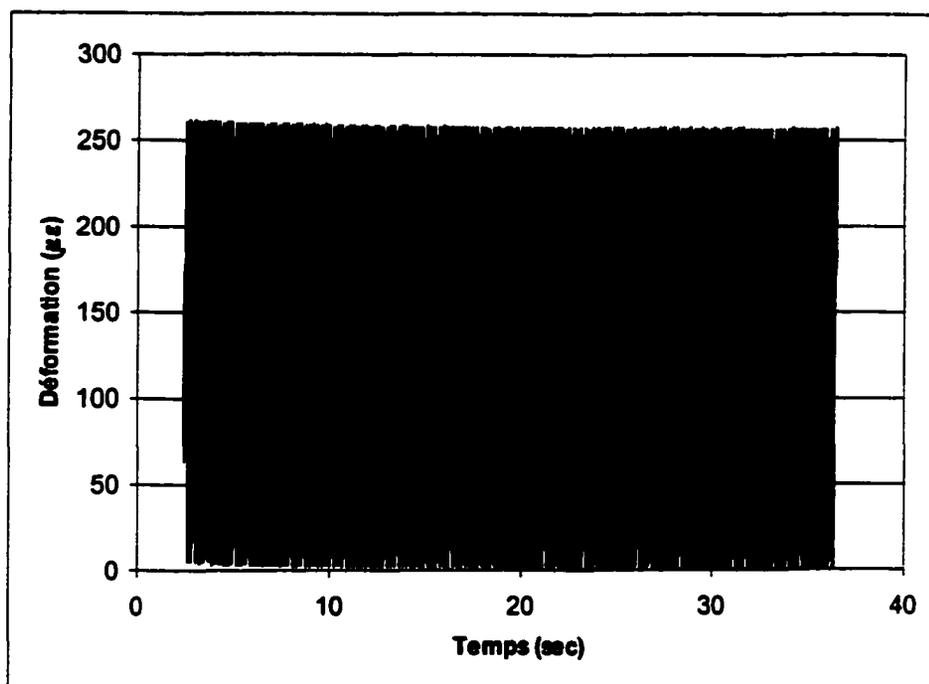


a)

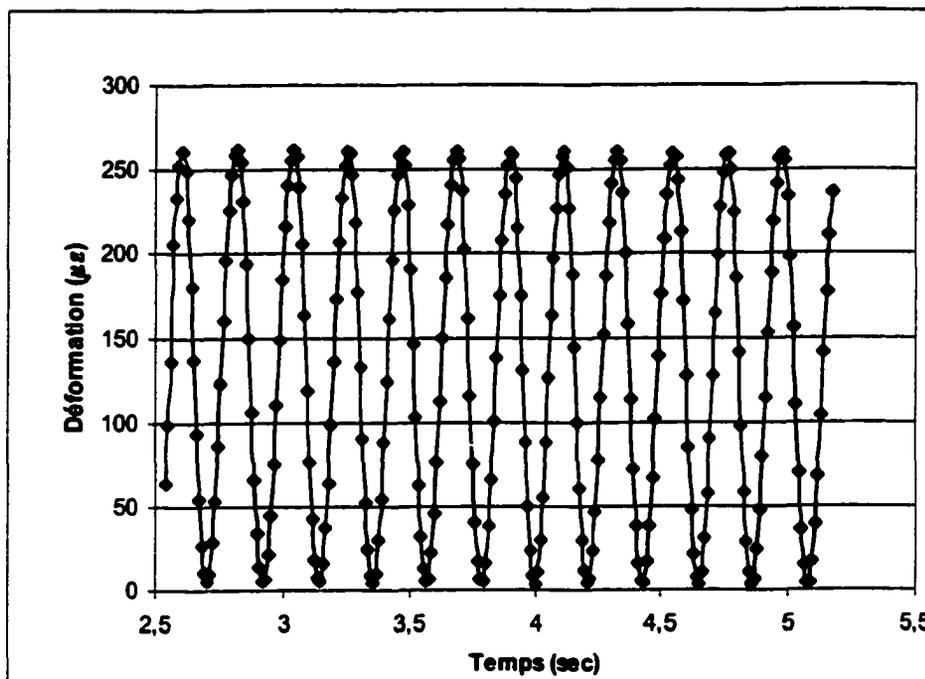
b)

Figure 4.11 Déformation du béton mesurée à plus d'un an avec la jauge EFO et les LVDT externes à un niveau de charge de $0,4f_c$; a) courbe contrainte-déformation b) agrandissement de la partie de montée en charge

L'un des avantages de la jauge Fabry-Pérot est la rapidité de lecture soit 100 lectures/sec. Le cylindre d'essais a donc été soumis à des sollicitations dynamiques à basses fréquences variant de 1 à 5 Hz avec un patron de chargement sinusoïdal. La contrainte maximale appliquée est de 10 MPa. La figure 4.12a montre les résultats obtenus pour l'essai à 5 Hz pour une période d'environ 35 secondes et la figure 4.12b montre les mêmes résultats mais pour une période de 5 secondes environ.



a)



b)

Figure 4.12 a) Déformations du cylindre d'essais sous une charge dynamique de 5 Hz b) Portion de 2,5 à 5 secondes de la figure 4.12a

4.4 Modélisation numérique du comportement de la jauge EFO dans le béton

La modélisation du comportement de la jauge EFO enfouie dans le béton est effectuée avec le logiciel d'analyse par éléments finis COSMOS/M. L'objectif est de corroborer les résultats expérimentaux obtenus avec le cylindre d'essais et aussi d'étudier l'effet d'inclusion décrite au chapitre 2. GOODIER [1933] et ESHELBY [1957, 1959] se sont intéressés à la description du champ de déformation modifié par la présence d'une inclusion ayant des propriétés élastiques différentes du matériau dans lequel elle prend place. Il apparaît que les inclusions parfaitement rigides, plus rigides que le milieu encaissant, ont pour effet de modifier le champ élastique à proximité de l'inclusion. La présence de la jauge EFO dans le béton pourrait donc modifier localement le champ de déformation et la déformation mesurée du béton n'est alors pas celle qui se produit en réalité.

On procède donc, en premier lieu, à une simulation en associant au modèle numérique les propriétés des matériaux déterminées aux sections précédentes et l'on compare les résultats avec les expérimentations faites sur le cylindre d'essais. Par la suite, on effectue, à l'aide du modèle numérique, une analyse paramétrique qui consiste à faire varier le module élastique du béton. On sera alors en mesure de vérifier l'effet de la présence de la jauge EFO dans des bétons ayant différentes rigidités.

4.4.1 Modèle physique et maillage

Le modèle physique est le cylindre d'essais présenté à la figure 4.6, soit un cylindre de béton contenant une jauge EFO installée au centre du cylindre. Les deux parties du modèle, la jauge et le cylindre, sont des solides de révolution; ceci facilite grandement l'élaboration du maillage, car il s'agit d'un cas axisymétrique. Mentionnons que l'on suppose une adhérence parfaite entre la jauge et le béton; le filetage des extrémités de la jauge crée une bonne adhérence entre la jauge et la pâte de ciment durcie.

Puisqu'il s'agit d'un modèle axisymétrique relativement simple, un maillage 2D de la moitié du cylindre a été préparé en utilisant des éléments triangulaires à 6 nœuds. MESTAT [1997]

mentionne au sujet de ce type d'élément que les contraintes et les déformations varient de façon linéaire sur l'élément et qu'ils donnent une meilleure description des variations de contraintes. Aussi, il indique que l'élément triangulaire est particulièrement bien adapté lorsque l'on fait appel à des générateurs automatiques de maillage.

Dans le modèle numérique, la portion centrale revêt un intérêt particulier puisque c'est à cet endroit que le capteur Fabry-Pérot est localisé. L'objectif est d'obtenir les déformations au centre de la jauge EFO dans l'enveloppe d'acier ainsi qu'au pourtour de la jauge. Afin d'avoir une évaluation adéquate des déformations, ceci nécessite la génération d'éléments de très petite taille au centre. À mesure que l'on s'éloigne de cette région, on observe des éléments de taille plus importante. Afin d'assurer une transition graduelle entre les différentes tailles d'éléments, on découpe le modèle en 6 régions distinctes. La figure 4.13 montre le maillage du modèle, soit un total de 6769 éléments.

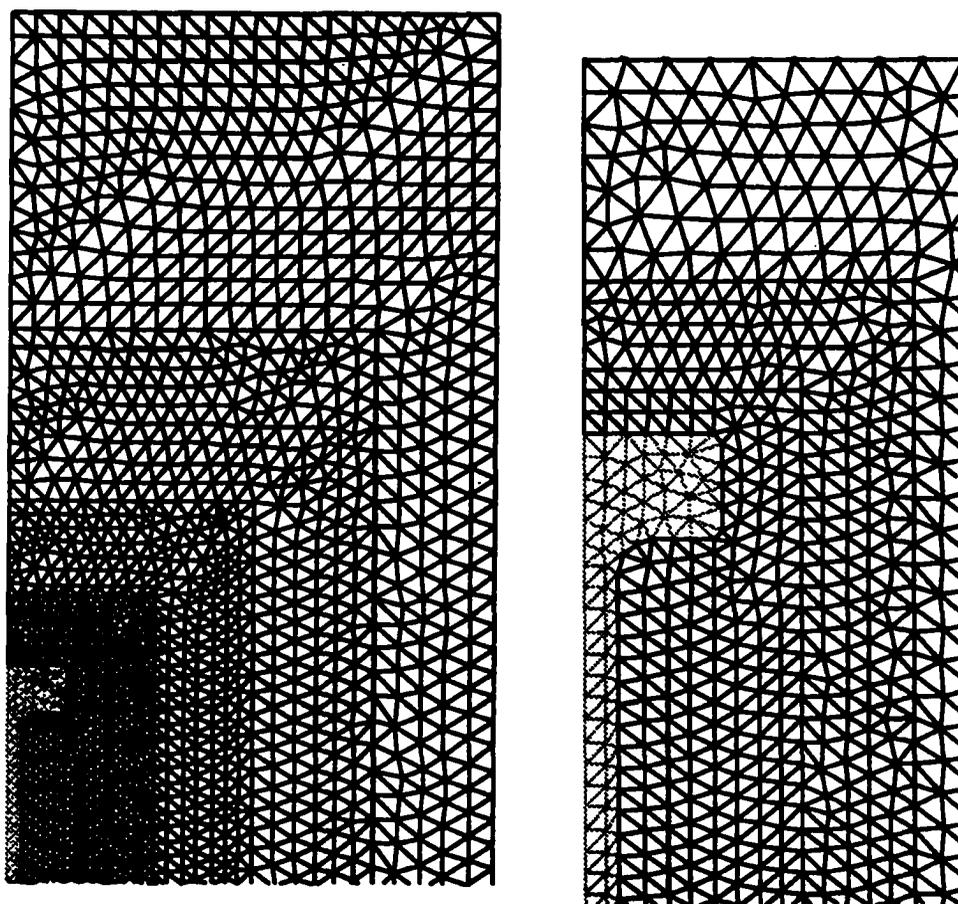


Figure 4.13 Maillage du quart du modèle étudié, avec agrandissement de la portion centrale

4.4.2 Conditions aux limites et vérification du maillage

Les conditions limites simulent celles que l'on peut observer lors d'un essai de compression uniaxiale sur une éprouvette cylindrique. Lors d'un essai en compression, des forces de friction se développent au contact entre les plateaux de la presse et les extrémités de l'éprouvette ce qui cause le développement de contraintes non uniformes à l'intérieur de l'éprouvette [AL-CHALABI & HUANG, 1974]. On simule les conditions de l'essai de compression en associant une condition d'encastrement à la limite supérieure du modèle et en fixant, dans la direction horizontale, les nœuds situés sur la limite inférieure. Il est à remarquer que l'on applique sur la limite inférieure, dans la direction y , des déplacements qui correspondent à la contrainte désirée. La vérification du maillage est réalisée en associant les mêmes propriétés élastiques à la partie représentant la jauge et à celle représentant le béton. On procède à une simulation en élasticité linéaire pour une contrainte donnée et on vérifie que les niveaux de déformation s'approchent de ceux prévus par la loi d'élasticité linéaire. Une seconde vérification consiste à comparer les déformations obtenues avec un second maillage plus simple représentant une éprouvette cylindrique. En effet, un maillage utilisant 3000 éléments quadratiques à 4 nœuds a été réalisé et la distribution des déformations pour ce modèle est très comparable à celle calculée avec le modèle précédent (fig. 4.14).

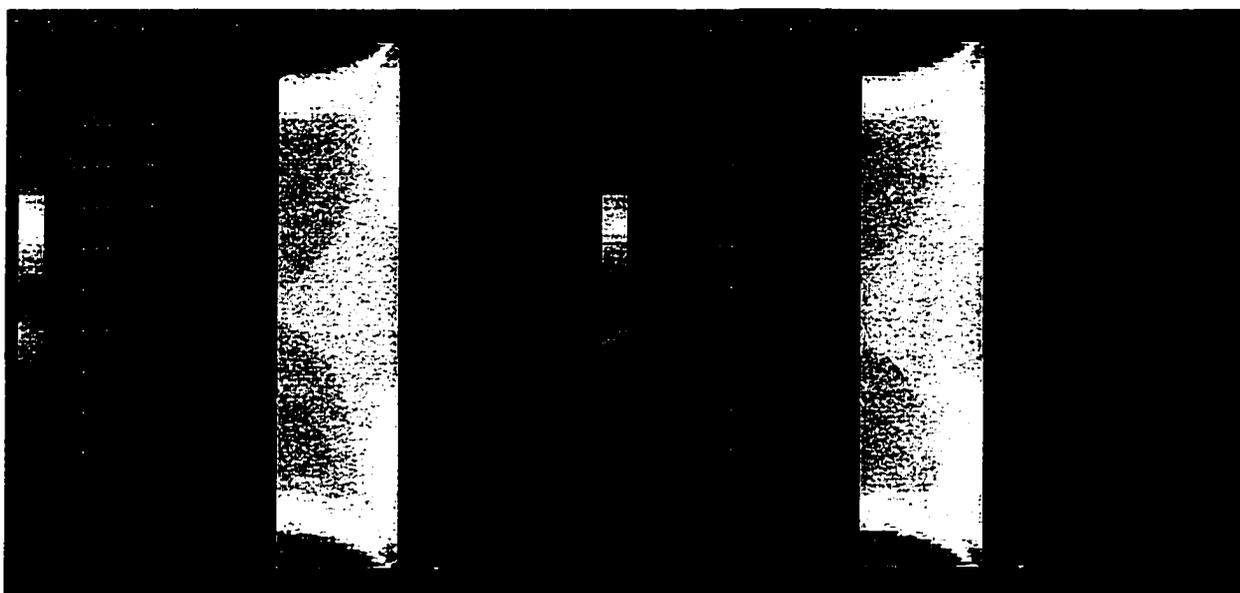


Figure 4.14 Vérification du maillage construit avec des éléments triangulaires à 6 nœuds

4.4.3 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux

Pour la simulation numérique, on a associé à la jauge un module élastique de 212,8 GPa et un coefficient de Poisson de 0,28, tandis que pour la partie béton, une valeur de 35 GPa pour le module élastique et de 0,20 pour le coefficient de Poisson ont été fixées. La figure 4.15 montre le champ de déformation axiale du cylindre contenant la jauge. Aussi, on compare les déformations axiales obtenues avec ce modèle à celles obtenues à la suite des essais de compression uniaxiale. Le graphique de la figure 4.16 montre la courbe contrainte-déformation axiale obtenue par la mise en graphique des données issues du capteur à fibre optique. Superposées à ces résultats, on a les données obtenues par modélisation et celles calculées avec la loi d'élasticité linéaire. La figure 4.17 montre un graphique du même type mais cette fois le niveau de chargement du cylindre atteint 0,4 f'c.

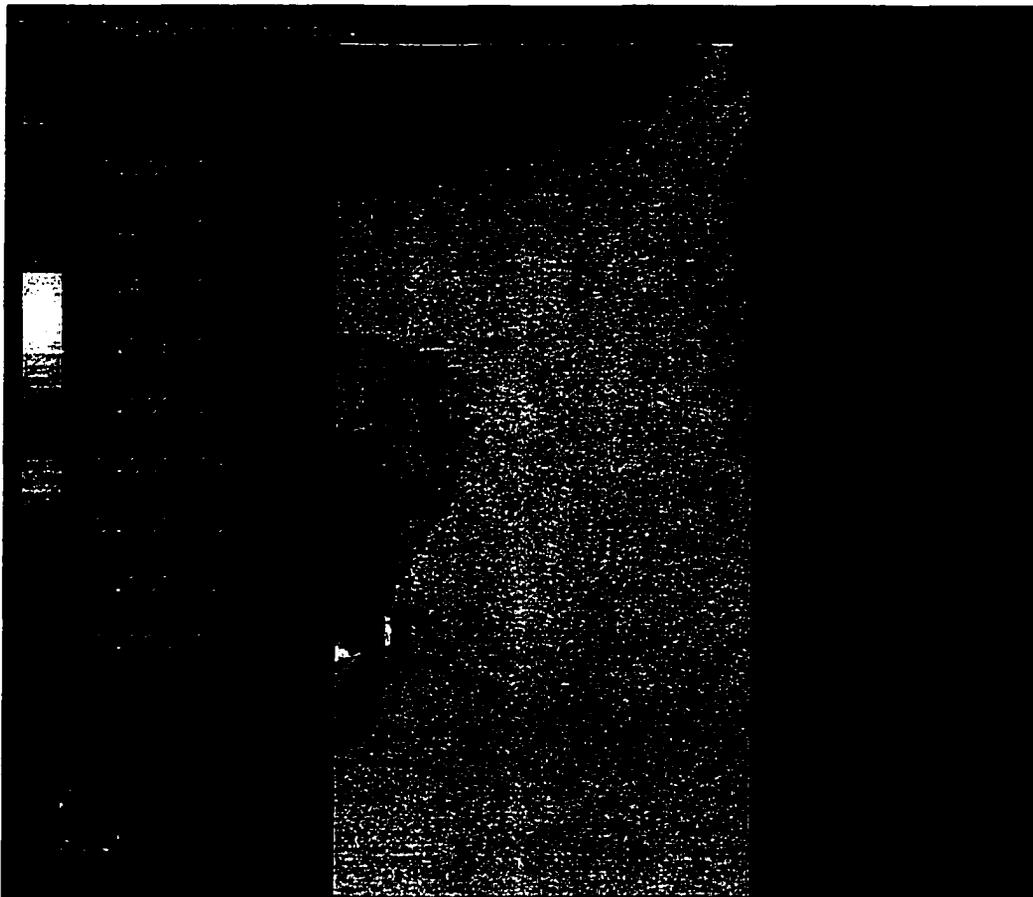


Figure 4.15 Champ de déformation axiale du cylindre contenant la jauge EFO

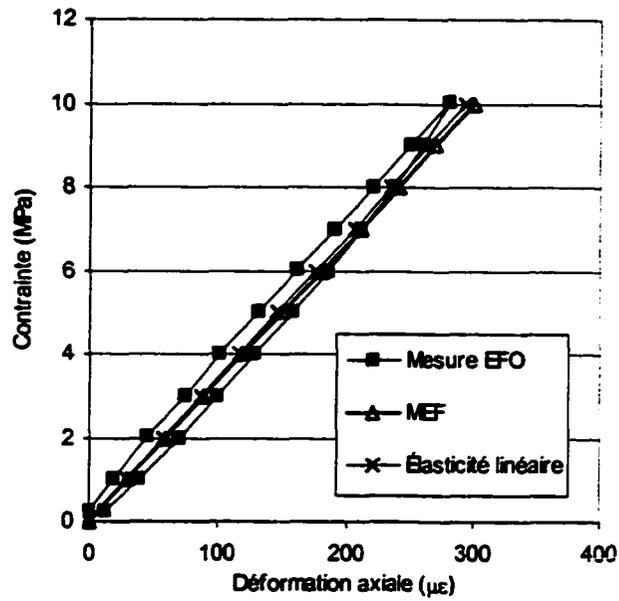


Figure 4.16 Essai sur le cylindre EFO à 0,2 f_c ; comparaison entre les résultats expérimentaux, numériques et la loi d'élasticité linéaire

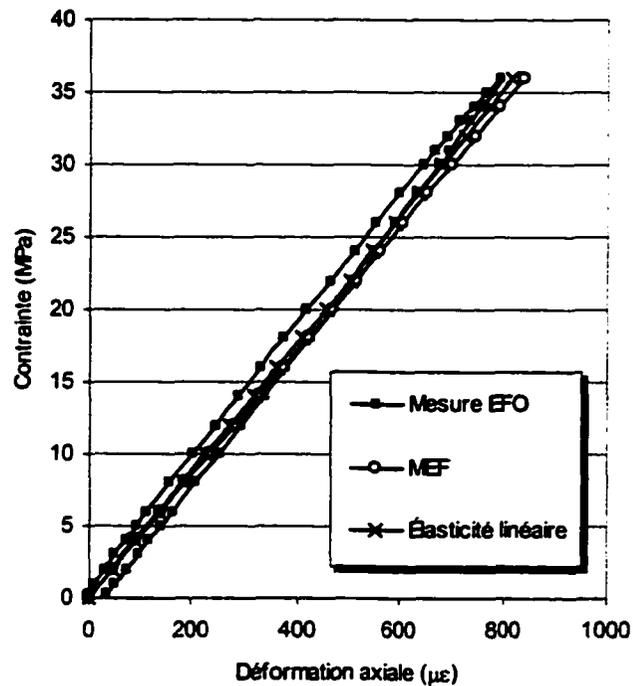


Figure 4.17 Essai sur le cylindre EFO à 0,4 f_c ; comparaison entre les résultats expérimentaux, numériques et la loi d'élasticité linéaire

4.4.4 Analyse paramétrique

Pour l'analyse paramétrique, diverses simulations ont été effectuées et pour chacune d'elle on a associé un module élastique différent à la partie béton du modèle. Les modules élastiques choisis sont 10, 30, 50, 80 GPa et, quant au coefficient de Poisson, il est gardé constant à 0,20. Cette fourchette de valeurs des constantes élastiques se retrouve dans la littérature. En effet, des modules élastiques aussi faibles que 20 à 25 GPa sont rapportés [CPCA, 1984] pour des bétons normaux. BAALBAKI & coll. [1992] donnent des valeurs allant de 27 à 45 GPa pour des bétons à haute performance selon la nature du granulat grossier.

En ce qui a trait au béton de poudres réactives (BPR), des valeurs allant de 62 à 74 GPa peuvent être observées [DUGAT & coll., 1995]. Quant au coefficient de Poisson, il varie généralement de 0,20 à 0,24 pour les différents types de béton et il peut atteindre 0,28 pour certains types de BPR. Pour ce qui est des propriétés élastiques de la jauge EFO, on a opté pour un module élastique de 200 GPa et un coefficient de Poisson de 0,30; il s'agit de valeurs typiques pour de l'acier inoxydable.

On explique ici la présentation graphique des résultats de cette analyse paramétrique montrés à la figure 4.18. Premièrement, pour chaque valeur de module élastique du béton, on peut calculer un rapport E_i/E_c qui est le rapport du module élastique de l'inclusion (la jauge) avec celui du béton. On obtient donc des rapports compris entre 2,5 et 20. En théorie, pour un rapport des modules des divers matériaux s'approchant de 1, on devrait observer un minimum de perturbation due à la présence de l'inclusion. Un rapport E_i/E_c faible indique donc que le module élastique de l'inclusion s'approche de celui du milieu encaissant. Les différentes courbes de la figure 4.18 représentent donc divers rapports E_i/E_c et chaque courbe correspond à un profil $\varepsilon_{y \text{ béton-inclusion}} / \varepsilon_{y \text{ béton}}$ relevé selon l'axe longitudinal au centre du cylindre (représenté par le trait discontinu sur la portion droite de la figure 4.18). En effet, on compare le champ de déformation axial d'un béton contenant la jauge à un autre exempt de toute inclusion. Pour ce faire, l'axe des x de la figure 4.18 présente le rapport $\varepsilon_{y \text{ béton-inclusion}} / \varepsilon_{y \text{ béton}}$. Il s'agit du rapport de la déformation axiale calculé avec le modèle contenant la jauge à celle

du même modèle ne contenant pas de jauge; pour le modèle ne contenant pas de jauge, on associe simplement à tout le modèle la même valeur de module élastique.

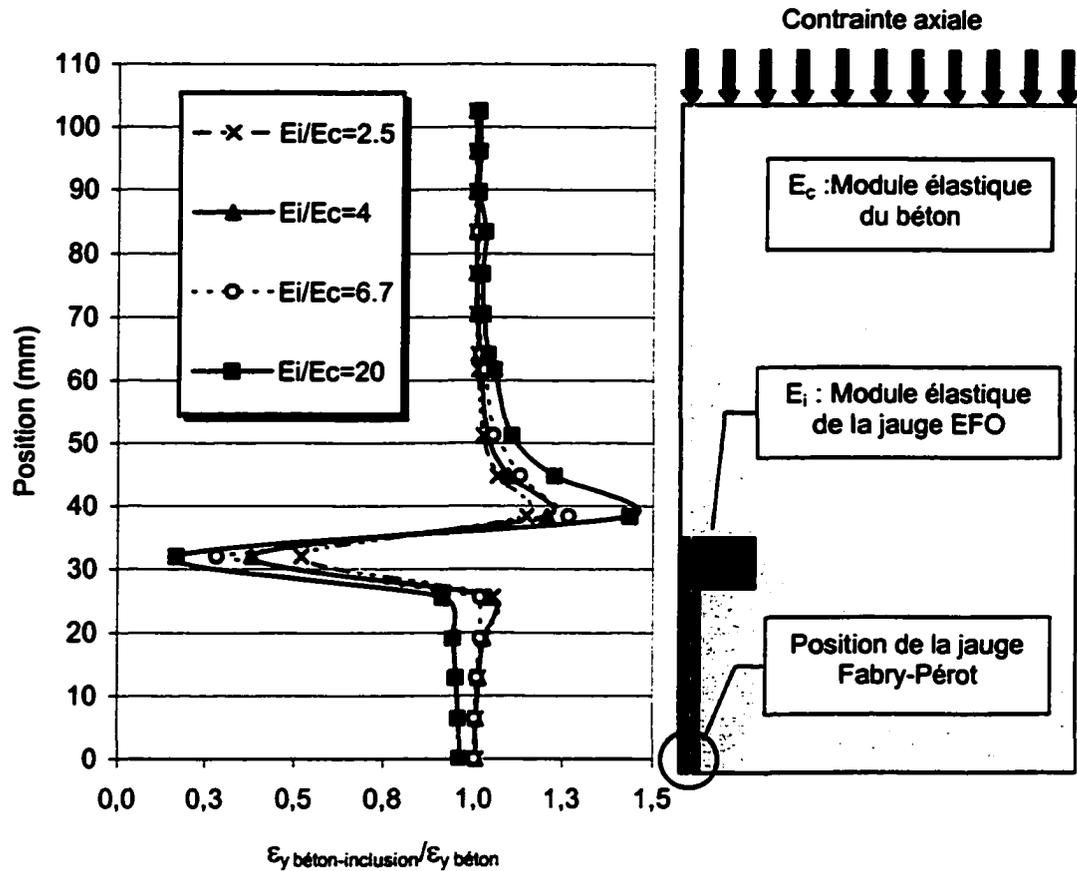


Figure 4.18 Profils de déformation axiale calculés par éléments finis

4.5 Comparaison avec divers extensomètres

Lors du moulage du cylindre d'essais contenant la fibre optique, d'autres cylindres ont été préparés, l'un contenant une jauge à corde vibrante (CV) et un autre a été muni d'une jauge électrique (JE). Ces cylindres sont de plus grande dimension soit de 150 mm de diamètre par 300 mm de hauteur. Quant au béton de ces deux cylindres, il est de propriétés identiques à celui du cylindre d'essais à fibre optique puisqu'ils sont constitués du même mélange. La figure 4.19 montre les trois cylindres flanqués des jauges utilisées pour leur instrumentation. On propose donc une étude comparative mettant en parallèle les mesures des déformations axiales obtenues pour chaque cylindre.

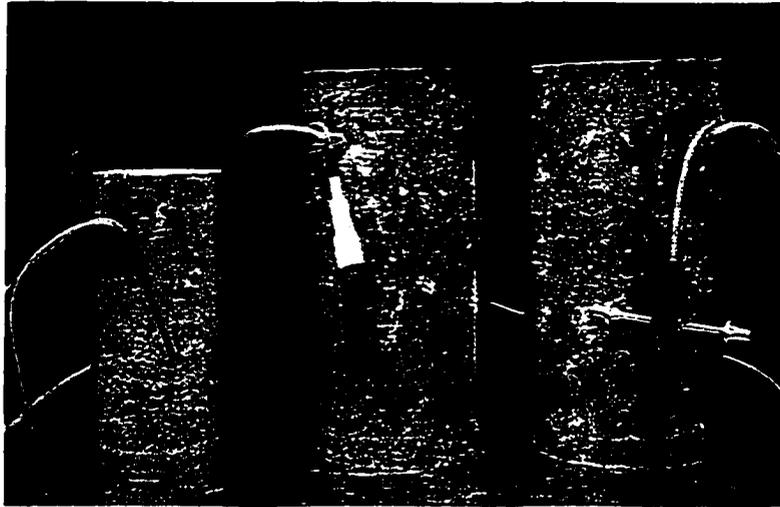


Figure 4.19 Cylindres de béton flanqués des divers extensomètres servant à leur instrumentation

Chacune de ces jauges présente diverses caractéristiques, la jauge EFO est construite avec de l'acier tout comme la jauge à corde vibrante et, quant à la jauge électrique, elle est protégée d'une gaine en béton polymère qui s'apparente à un béton. La forme, les dimensions et la conception de ces dernières sont très différentes.. Étant donné que ces jauges sont de plus grande taille que la jauge EFO, elles ont été enfouies dans des cylindres de 150 mm de diamètre par 300 mm de longueur. On verra plus loin que la dimension supérieure de ces cylindres n'influence pas les mesures d'élasticité du béton.

4.5.1 Chargement en compression simple des divers cylindres

Dans un premier temps, la contrainte maximale appliquée sur chaque cylindre est de 15 MPa, soit $0,2f_c$, et le chargement a été effectué par palier de 1 MPa. Le graphique de la figure 4.20a montre les déformations obtenues avec la jauge électrique et la jauge à corde vibrante. On présente aussi sur ce graphique les déformations des éprouvettes de béton obtenues avec le dispositif équipé de LVDT. La figure 4.20b présente la partie linéaire de la montée en charge. Sur ce graphique, on met en parallèle les résultats obtenus pour tous les cylindres instrumentés: jauge EFO, corde vibrante et jauge électrique ainsi que la pente moyenne des courbes contrainte-déformation des éprouvettes de béton non instrumentées. Rappelons que le module élastique du béton à plus d'un an est de 43,5 GPa et le coefficient de Poisson de 0,22.

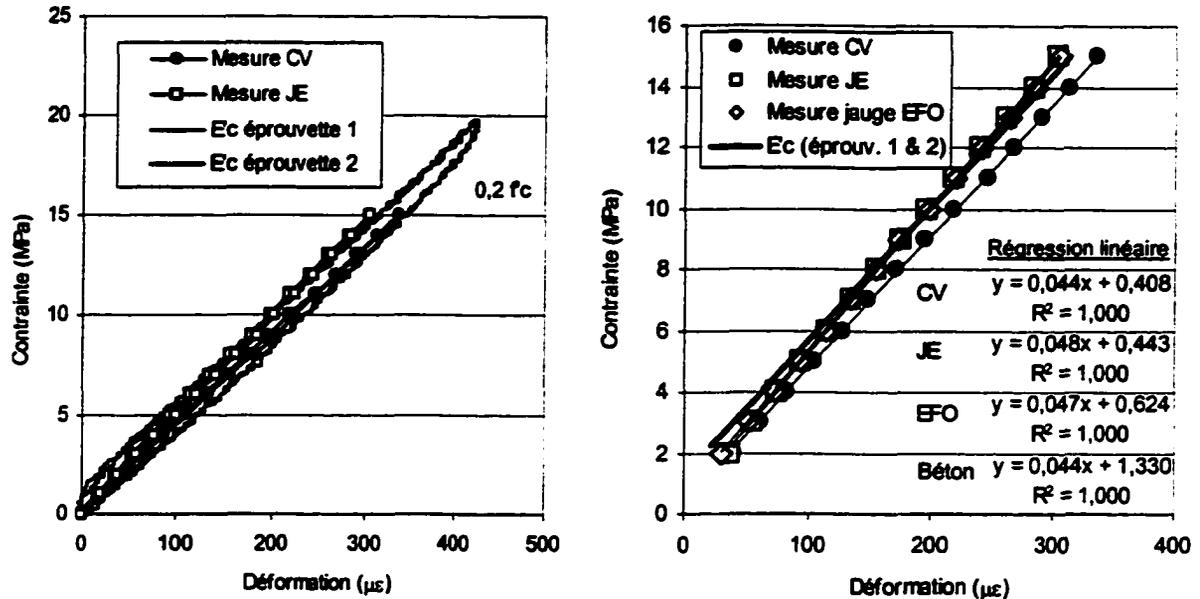


Figure 4.20 Déformation du béton mesurée à plus d'un an avec la jauge électrique, à corde vibrante et les LVDT externes à un niveau de charge de 0,2 f_c; a) courbe contrainte-déformation b) agrandissement de la partie de montée en charge incluant la jauge EFO

Par la suite, des essais où le chargement atteint plus de 0,4f_c ont été effectués et les résultats sont présentés aux figures 4.21a et 4.21b. On remarque que la jauge EFO et la jauge électrique répondent bien, et cela même à charge élevée; on note toujours la valeur de rigidité supérieure de 1 GPa pour les mesures avec la jauge EFO comparativement au béton. À faible charge, entre 0 et 5 MPa, on observe la cohérence entre les mesures des divers capteurs. Au-delà du palier de 5 MPa, les mesures effectuées avec la jauge électrique s'accordent bien avec celles de la jauge EFO et toutes deux s'approchent de la déformation moyenne des éprouvettes de béton. Par ailleurs, un écart notable des résultats obtenus avec la corde vibrante est observé. Afin de s'assurer que les cylindres contenant la jauge électrique et la corde vibrante, qui sont de dimensions plus grandes, soient de rigidité comparable, on a déterminé le module élastique avec un dispositif constitué de deux LVDT axiaux, comme présenté à la figure 4.22. Ce dispositif permet de déterminer le module élastique des deux cylindres et les figures 4.23 et 4.24 montrent que le module élastique du cylindre à corde vibrante est de 43 GPa et celui contenant la jauge électrique est de 44 GPa. Ces valeurs sont donc tout à fait comparables à celles mesurées sur les cylindres de 100 mm de diamètre.

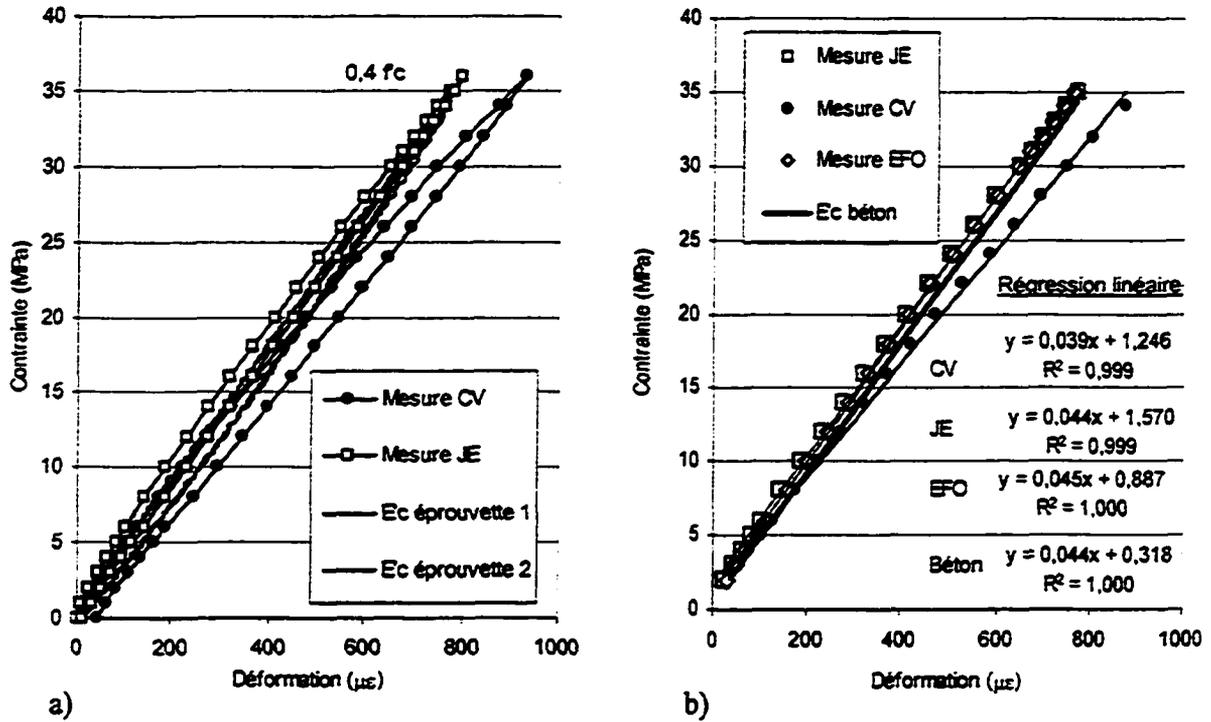


Figure 4.21 Déformation du béton mesurée à plus d'un an avec la jauge électrique, à corde vibrante et les LVDT externes à un niveau de charge de $0,4 f_c$; a) courbe contrainte-déformation b) agrandissement de la partie de montée en charge incluant la jauge EFO

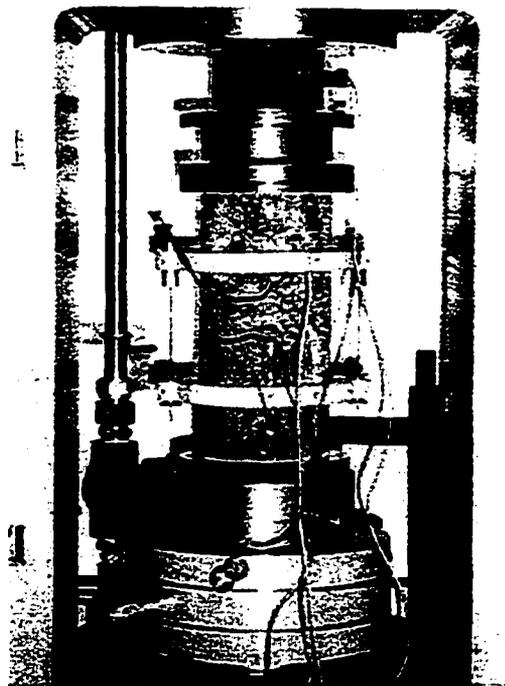
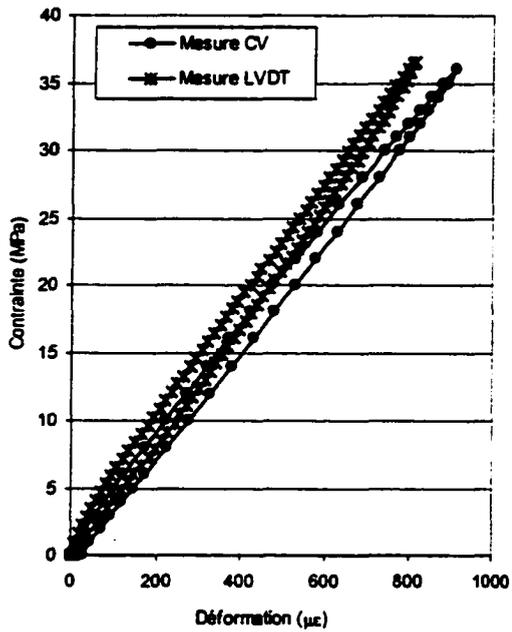
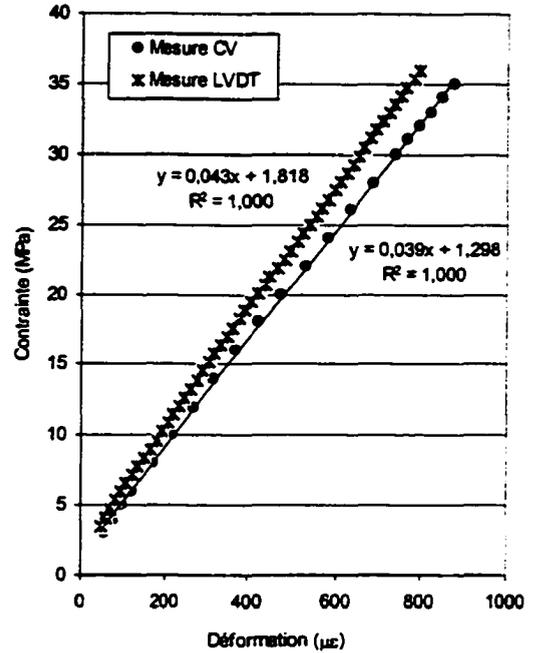


Figure 4.22 Dispositif externe avec LVDT pour la mesure des déformations axiales de cylindre de béton de 150 mm de diamètre

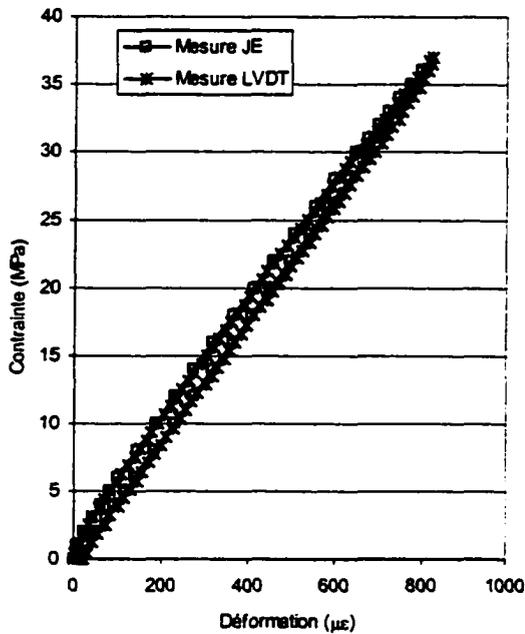


a)

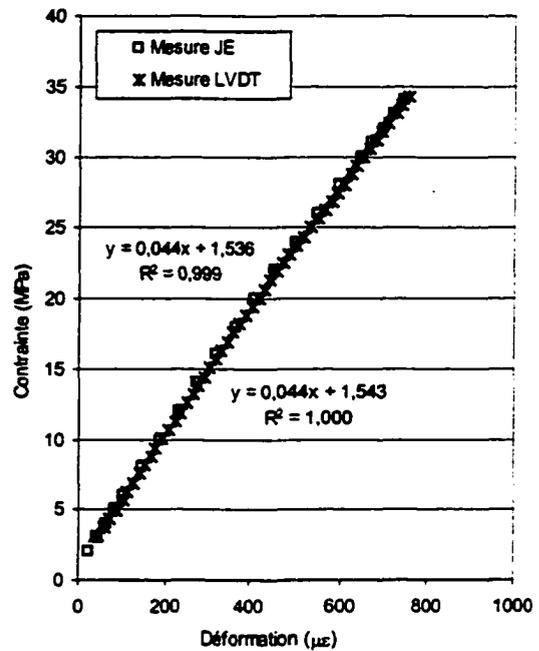


b)

Figure 4.23 Déformation du cylindre de béton contenant la corde vibrante mesurée avec des LVDT externes et avec la corde vibrante; a) courbe contrainte-déformation b) montée en charge



a)



b)

Figure 4.24 Déformation du cylindre de béton contenant la jauge électrique mesurée avec des LVDT externes et avec la jauge électrique; a) courbe contrainte-déformation b) montée en charge

La différence entre les résultats obtenus avec la corde vibrante et la jauge EFO a suscité un certain intérêt. Lors des essais, les mesures étaient relevées manuellement à l'aide d'unités de lecture portables. On remarquait alors que la stabilisation de la corde vibrante à la suite d'une augmentation rapide de la charge était difficile à obtenir comparativement à la jauge EFO. Un essai consistant à maintenir une charge constante a été effectué afin de vérifier le temps requis pour obtenir une lecture plus stable des capteurs. Le graphique de la figure 4.25 présente les déformations obtenues, avec la jauge EFO et la corde vibrante, à la suite de l'application d'une charge de 20 MPa. Cette charge est maintenue et on note la déformation après un temps donné. Les valeurs de déformation obtenues avec la corde vibrante et la jauge EFO sont similaires après une période de 30 minutes.

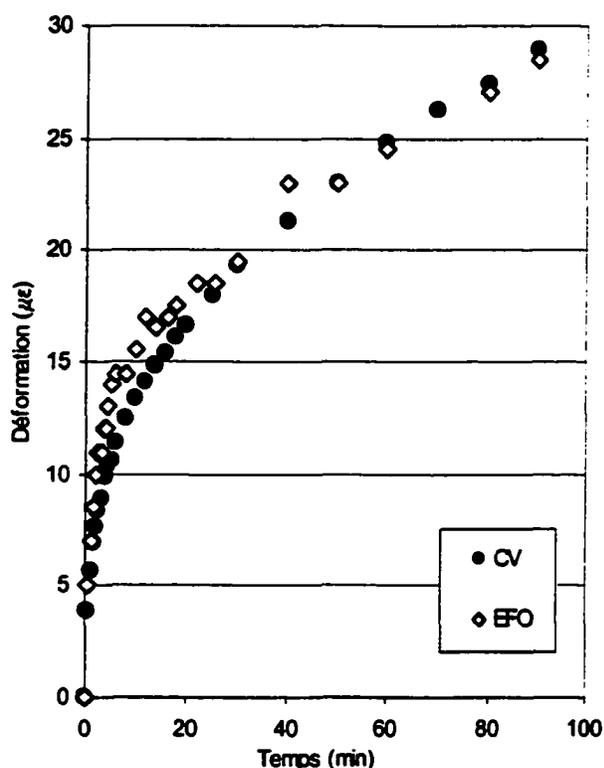


Figure 4.25 Réponse en déformation de la jauge EFO et de la corde vibrante dans les cylindres soumis à une charge constante

Dans la période 0 à 30 minutes, les lectures de la jauge EFO sont supérieures à celles de la corde vibrante. Il en est de même pour les essais de chargement présentés auparavant; le temps d'un cycle de montée et de descente en charge se situe dans la plage 0-30 minutes et là aussi les déformations enregistrées avec la jauge EFO sont supérieures. Par ailleurs, la stabilité

des lectures n'est pas atteinte; il y toujours une augmentation continue des déformations même après 30 minutes. Bien que la presse à asservissement tente de maintenir le plus constant possible le niveau de la charge, il augmente tout de même légèrement pendant l'essai.

Enfin, pour la corde vibrante, le calcul des déformations fait intervenir un facteur de jauge qui intègre certaines propriétés de la corde, notamment sa masse volumique, son module élastique et sa longueur. La déformation obtenue est donc liée à la justesse des valeurs de ces diverses propriétés. Par ailleurs, l'équation utilisée pour le passage des fréquences aux déformations mérite une attention particulière. En effet, une théorie simplifiée, supposant qu'il n'y pas de friction aux extrémités (point de fixation) de la corde lorsqu'elle oscille, est actuellement d'usage. Toutefois, LARIVE & coll. [1995] ont observé, pour des jauges à corde vibrante de type souple mais dont la fixation est similaire à la corde vibrante classique, qu'il y avait friction aux extrémités de la corde. Aussi, ils proposent l'utilisation de la théorie complète des cordes vibrantes qui fait intervenir le rayon de la corde pour le calcul des déformations. Pour ce qui est du capteur Fabry Pérot, la précision de la déformation obtenue est liée à la sensibilité de la barrette de cellules photo-électriques ainsi qu'à la valeur de la distance (L) entre les microsoudures (Fig. 4.1). Cependant, le point de microsoudure possède une certaine largeur et, bien que cette distance soit mesurée avec précision, le point de contact peut être difficile à localiser précisément. Ces divers facteurs peuvent aussi contribuer à expliquer les divergences entre les mesures expérimentales obtenues.

4.5.2 Comportement thermique des extensomètres

Des essais de dilatation thermique sur les cylindres de béton contenant les jauges ont permis de vérifier leur réponse sous sollicitation thermique. Les cylindres contenant la jauge EFO, la jauge à corde vibrante et la jauge électrique ont été installés, en plus d'une éprouvette de béton sans jauge, dans un dispositif muni de LVDT permettant de mesurer leur expansion thermique. La figure 4.26 montre le dispositif avec les cylindres, le tout placé dans une enceinte à thermorégulateur. Les cylindres, emballés dans un papier permettant de conserver l'humidité du béton, ont été soumis à diverses températures allant de 27 à 50 et parfois 55°C.

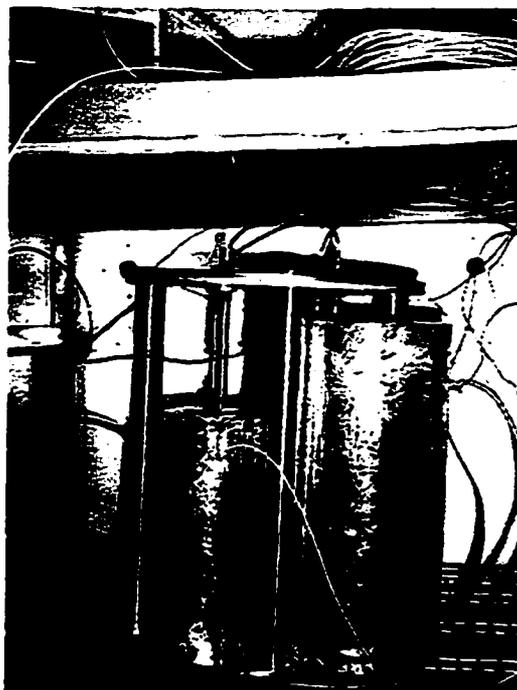


Figure 4.26 Dispositif de mesure du coefficient de dilatation thermique des divers cylindres

Une période de stabilisation de plus de 12 heures était observée entre chaque palier de température après quoi le relevé des valeurs de chacune des jauges enfouies dans les cylindres était effectué ainsi que la lecture des LVDT du dispositif. Comme la jauge électrique donne une lecture relative de la déformation, elle a donc été branchée à un amplificateur et à un système d'acquisition de type CR21X. De cette façon, on évite la manipulation et l'ajustement d'un appareil de lecture manuel à chaque relevé, éliminant ainsi les erreurs d'étalonnage initial.

Les résultats obtenus sont présentés au tableau 4.4 où l'on donne le coefficient de dilatation thermique (CDT) du béton calculé avec les mesures des LVDT ainsi que celui calculé avec les résultats des différentes jauges. Par ailleurs, des jauges du même type ont été placées directement dans l'enceinte chauffante et le tableau présente aussi la dilatation thermique de jauges qui ne sont pas enfouies dans le béton. On obtient un CDT de $10 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ pour l'éprouvette de béton sans jauge tandis que des valeurs de 9,0, de 8,9 et de $0,6 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ sont obtenues respectivement avec les jauges à corde vibrante, fibre optique et électrique. Dans le cas de la corde vibrante, la correction usuelle, liée à la dilatation thermique de $11,5 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ du fil d'acier constituant le capteur, a été appliquée.

Tableau 4.4			
CDT du béton et des divers extensomètres			
	CDT de la jauge ($\mu\epsilon/^\circ\text{C}$)		CDT du béton ($\mu\epsilon/^\circ\text{C}$)
	Mesuré avec la jauge	Mesuré avec jauge enfouie	Mesuré avec le LVDT
Béton	--	--	10,0
EFO	10,2	8,9	8,9
CV	11,8	9,0	9,1
JE	18,0	0,6	9,2

Quant à la jauge EFO, aucune correction n'est appliquée, il s'agit de la valeur brute de la déformation enregistrée et il en est de même pour la jauge électrique. La figure 4.27 montre la déformation en fonction de la variation de température mesurée avec les divers capteurs.

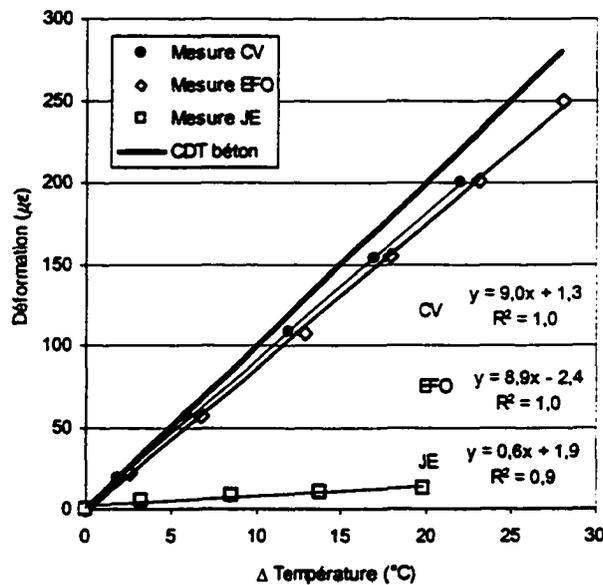


Figure 4.27 Coefficient de dilatation thermique des cylindres de béton mesuré avec les divers extensomètres

La réponse de la corde vibrante et de la fibre optique s'accorde bien avec les mesures enregistrées avec les LVDT qui sont, par ailleurs, très près de la valeur du CDT du béton (tab. 4.4). Une différence de $1 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ entre le CDT de l'éprouvette de béton sans jauge et les mesures avec les divers capteurs est observée. Quant à la jauge électrique, la faible valeur obtenue s'explique par le fait qu'une compensation thermique s'opère entre les différents

matériaux lorsque la jauge est enfouie dans le béton, comme indiqué dans les spécifications du fabricant. Seule la déformation liée à une charge est donc enregistrée avec ce type de jauge.

En dernière analyse, disons que les diverses jauges répondent bien à la sollicitation thermique; cependant, on pourrait croire que cela est dû au fait que le CDT du béton étudié ($10 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$) est près de la valeur du CDT des jauges EFO ($10,2 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$) et à corde vibrante ($11,8 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$). Actuellement, des essais sur site sont en cours où les jauges à corde vibrante et à fibre optique sont enfouies dans un béton fibre ayant un CDT de $17,1 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ et la réponse est comparable. Aussi, les résultats obtenus pour le béton sont compris dans la fourchette de valeurs, allant de 6 à $12 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$, proposées pour divers types de béton [NEVILLE, 1996].

CHAPITRE 5

Applications sur sites des jauges Fabry-Pérot EFO

Divers projets d'instrumentation sur sites sont actuellement en cours et permettent d'évaluer la robustesse, la longévité et la réponse de ces jauges. La réfection du stationnement Webster (Fig. 5.1) et la construction de la passerelle piétonnière de Sherbrooke (Fig. 5.2) ont débuté respectivement au cours des années 1996 et 1997. Les sections qui suivent présentent ces projets ayant pour dénominateur commun l'application, en parallèle, de jauges à fibre optique et à corde vibrante pour le suivi des déformations du béton. Il est présenté ici les résultats de suivi, sur une période d'environ deux ans, des extensomètres à corde vibrante et à fibre optique installés dans divers éléments structuraux. Pour chaque projet, l'installation d'instruments a un objectif spécifique mais dans les deux cas, on s'intéresse à comparer la performance des deux types de capteurs utilisés à diverses applications: l'instrumentation d'une structure réhabilitée et d'une structure récente, toutes deux en béton. La mesure de déformations ponctuelles à des endroits précis des ces structures permettra, dans le cas de Webster, de vérifier l'adhérence des matériaux de réhabilitation et, pour la passerelle, de mieux connaître le comportement structural.



Figure 5.1 Stationnement à étages Webster



Figure 5.2 Passerelle piétonnière de Sherbrooke

5.1 Jauges de déformation considérées

Les projets d'instrumentation qui sont présentés aux sections suivantes intègrent plusieurs instruments de mesures. On compte parmi ceux-ci la jauge à fibre optique Fabry-Pérot EFO et la corde vibrante conventionnelle de type Telemac. D'autres instruments tels des fissuromètres, inclinomètres, thermocouples, cordes vibrantes de surface et jauges Tensmeg pour l'instrumentation des câbles ont aussi été utilisés [ADELINE & coll., 1998]. Pour les deux projets, les instruments conventionnels sont tous reliés à un système d'acquisition en continu permettant le stockage des données. En ce qui a trait aux capteurs à fibre optique, toutes les données ont été relevées manuellement avec une unité de lecture portable et, dans la mesure du possible, un relevé était effectué à toutes les deux semaines. Un système d'acquisition automatique pour fibre optique a été installé et soumis à des essais de performance (cf. sect. 5.3.4).

Pour ce qui est des jauges à corde vibrante, les jauges conventionnelles pouvant être enfouies dans le béton ont été installées. La dimension des jauges à corde vibrante est de 90 mm de longueur comparativement à 70 mm pour la jauge EFO. En termes d'encombrement, la jauge à corde vibrante nécessite un espace plus grand pour l'installation afin de s'assurer d'une mesure représentative de la déformation. Dans le cas de la passerelle, l'espace dans les membrures était limité et la dimension réduite des jauges EFO constituait alors un grand avantage. Quant à la correction thermique, on applique la correction de $11,5 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$, tel qu'indiqué par le manufacturier, pour la dilatation du fil d'acier de la corde vibrante. Les divers essais de validation menés en laboratoire (cf. Chap. 4) montrent que la jauge EFO est très peu influencée par la température lorsqu'elle est enfouie dans le béton, aucune correction n'a donc été effectuée sur les données de cette jauge.

5.2 Stationnement à étages Webster

Le stationnement à étages Webster est situé au centre-ville de Sherbrooke. Ces dernières années, des signes importants de dégradation étaient visibles sur de nombreuses poutres et colonnes ainsi que sur les dalles de béton. À la suite d'une entente entre la Ville de

Sherbrooke, les chercheurs de l'Université de Sherbrooke et un consultant local, la réhabilitation de ce stationnement fut effectuée. Outre la remise en état de la structure, l'utilisation de techniques innovatrices figurait parmi les objectifs de cette réhabilitation. En effet, sur une section du stationnement, diverses technologies de pointe pour le diagnostic et la réparation ont été utilisées: la tomographie sonore pour l'évaluation de la dégradation de certaines poutres et colonnes, des mélanges spéciaux de béton projeté, des matériaux composites et l'installation d'instruments. Des jauges de déformation à fibre optique et à corde vibrante ont été installées pour le suivi à long terme des éléments réhabilités. Ce dernier point constitue d'ailleurs l'essentiel des sections qui suivent puisque l'on compare les résultats obtenus avec ces divers instruments.

5.2.1 Structure et matériaux de réhabilitation

Le stationnement Webster comporte six étages s'élevant au-dessus du niveau du sol; les quatre premiers paliers sont construits en béton tandis qu'une ossature métallique constitue les deux derniers paliers. La figure 5.3 montre le profil typique des deux premiers niveaux; l'instrumentation fut, par ailleurs, installée dans certaines poutres du premier niveau.

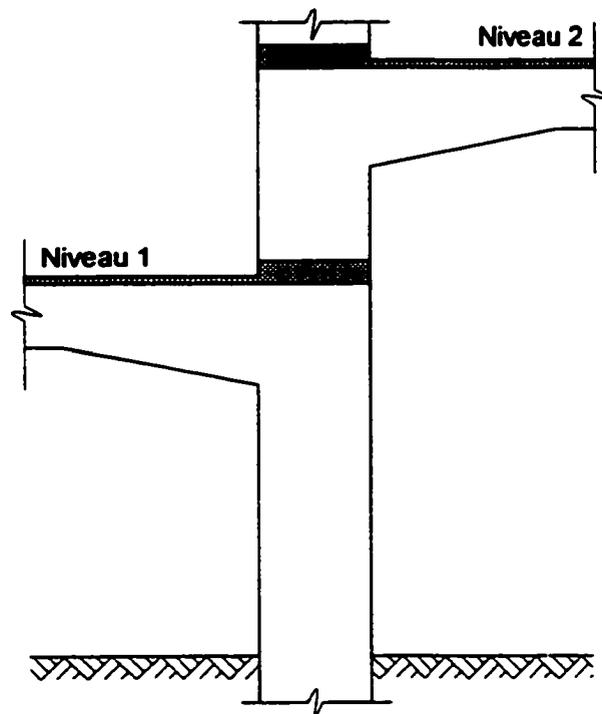


Figure 5.3 Profil typique des deux premiers niveaux du stationnement Webster

Une évaluation de la structure en béton a été effectuée et les conclusions indiquent que la structure était encore viable mais qu'une réfection s'imposait; ceci afin d'éviter que ne se produise un effondrement local. Aussi, le niveau de dégradation avancée s'accroîtrait inévitablement avec le temps à cause des cycles de gel/dégel et de l'infiltration de l'eau dans les nombreuses fissures relevées. La figure 5.4 montre des fissures relevées dans la poutre 24 supportant le premier niveau.



Figure 5.4 Fissures relevées dans la poutre 24 avant la réhabilitation

Lors de la réfection du stationnement, une section fut réservée à l'expérimentation de divers mélanges de béton pour la réparation des poutres. Cette section, comportant six poutres encastrées, a ainsi été réhabilitée avec divers types de béton. Aussi, différents types d'instruments ont été installés dans quatre de ces poutres lors de la réfection afin de suivre l'efficacité à long terme des diverses techniques de réhabilitation et, plus précisément, l'adhérence du nouveau béton aux poutres existantes. Les matériaux utilisés pour la réfection comprennent du béton conventionnel ainsi que du béton projeté contenant divers ajouts. Le tableau 5.1 présente les matériaux utilisés seulement pour les poutres instrumentées.

Tableau 5.1
Matériaux de réhabilitation utilisés dans les
poutres du stationnement Webster

Poutre	Matériau de réhabilitation
20	Béton armé conventionnel
22	Béton projeté par voie humide avec support de grillage métallique
24	Béton avec fibres d'acier projeté par voie humide
25	Béton avec fibres de polyoléfine projeté

5.2.2 Instrumentation

La figure 5.5 présente un schéma montrant la jonction des poutres transversales 20 à 25 avec la poutre longitudinale. La localisation des extensomètres à corde vibrante et à fibre optique, des thermocouples et des fissuromètres est montrée sur cette figure. Lors de l'installation, on a pris soin de placer une jauge à fibre optique et une à corde vibrante à proximité l'une de l'autre afin d'établir les comparaisons qui suivent.

La réhabilitation de ces poutres a été, en majeure, partie effectuée à l'aide de béton projeté; les jauges ont donc été préalablement noyées dans une petite briquette du même béton employé. Cette dernière est ensuite fixée le lendemain sur la surface à réparer, ce qui évite d'endommager les capteurs lors de la projection du béton. Par ailleurs, trois fissuromètres de type potentiométrique ont été installés (Fig. 5.5) dans le but de suivre des fissures importantes détectées dans les poutres. On s'intéresse aux données enregistrées avec le fissuromètre FISS 2, ancré dans la poutre 22, car il permet de suivre une fissure oblique active localisée à proximité des diverses jauges EFO et CV de cette poutre.

5.2.3 Résultats

Les figures 5.6 à 5.10 montrent les variations de déformation des diverses poutres mesurées à partir du 28 novembre 1996 avec les jauges à corde vibrante et à fibre optique.

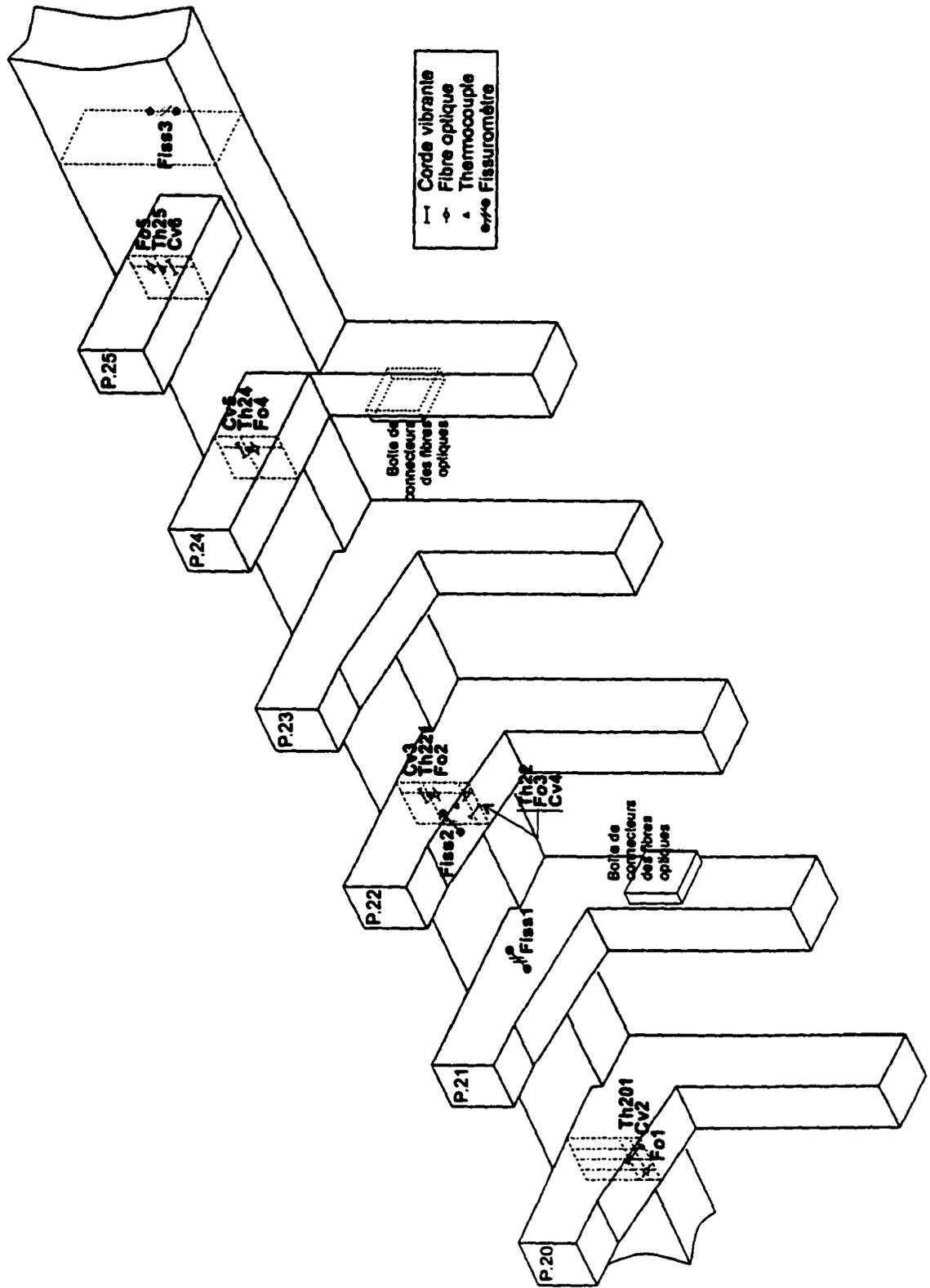


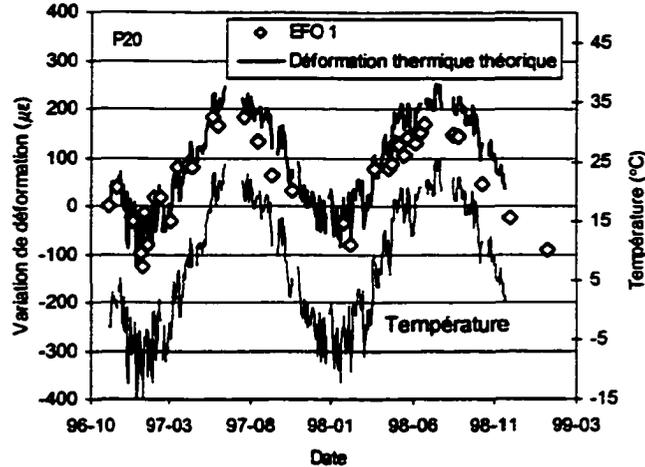
Figure 5.5 Schéma montrant la position des instruments dans les poutres réhabilitées

Dans un premier temps on compare, à titre indicatif, les données des jauges EFO avec la dilatation thermique théorique du béton (Fig. 5.6a, 5.7a, 5.8a, 5.9a et 5.10a). Pour cela, on prend pour acquis un coefficient de dilatation thermique de $10 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ pour les divers matériaux; la variation de température est obtenue à partir des divers thermocouples. Par la suite, on compare les données des extensomètres à corde vibrante avec ceux à fibre optique (Fig. 5.6b, 5.7b, 5.8b, 5.9b et 5.10b). L'analyse des résultats montre que les données de la jauge EFO correspondent bien à la dilatation thermique théorique des éléments structuraux ainsi qu'aux données des cordes vibrantes.

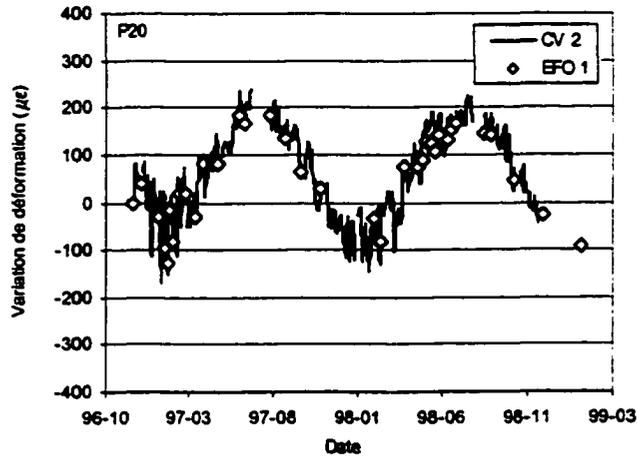
Les instruments de la poutre 20, noyés directement dans un béton conventionnel, enregistrent des déformations variant de -100 à $+200 \mu\epsilon$ et cela, pour deux années consécutives; le comportement est donc stable après la réhabilitation. Les résultats de la jauge EFO s'écartent de la dilatation thermique théorique mais le coefficient de dilatation thermique (CDT) fixé à $10 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ ne sert que d'indication pour obtenir l'ordre de grandeur des variations de déformation (Fig. 5.6a et b). Quant aux instruments CV 4 et EFO 3, fixés dans des briquettes et installés à la base de la poutre 22, ils présentent un écart notable entre eux ainsi qu'avec la dilatation thermique théorique (Fig. 5.7a et b). Avant la réfection, une fissure importante, située à la base de la poutre, a été relevée. Aussi, compte tenu de l'importance de cette fissure, un fissuromètre (FISS 2) a été installé dans le but de vérifier le mouvement éventuel de cette fissure après la réfection. La figure 5.7c, montre que les déplacements enregistrés avec le FISS 2 sont certainement liés aussi à un mouvement de la fissure. Par ailleurs, les instruments EFO 3 et CV 4 sont placés à la base de la poutre et disposés symétriquement de part et d'autre de celle-ci; ceci peut expliquer l'écart enregistré entre les deux capteurs.

Les capteurs EFO 2 et CV 3 sont aussi montés dans des briquettes et placés dans la partie latérale de la poutre 22. L'absence de données des instruments pour la période de mars à juillet 1997 s'explique simplement par l'impossibilité de relever les lectures car l'un des connecteurs n'était pas accessible. Ceci a été corrigé par l'ajout d'une rallonge subséquentement. L'analyse de la figure 5.8a montre que les déformations correspondent à la dilatation thermique théorique. Par contre, la figure 5.8b montre que le niveau de déformations enregistrées,

correspondant à une traction, est plus élevé autour du mois de juillet 98 comparativement à celui de juillet 97. Il est probable qu'un décollement du matériau de réfection se soit produit.



a)



b)

Figure 5.6 Poutre 20: Variations de déformation a) thermique théorique et mesures de la jauge EFO 1 et b) mesures de la jauge EFO 1 et de la CV 2

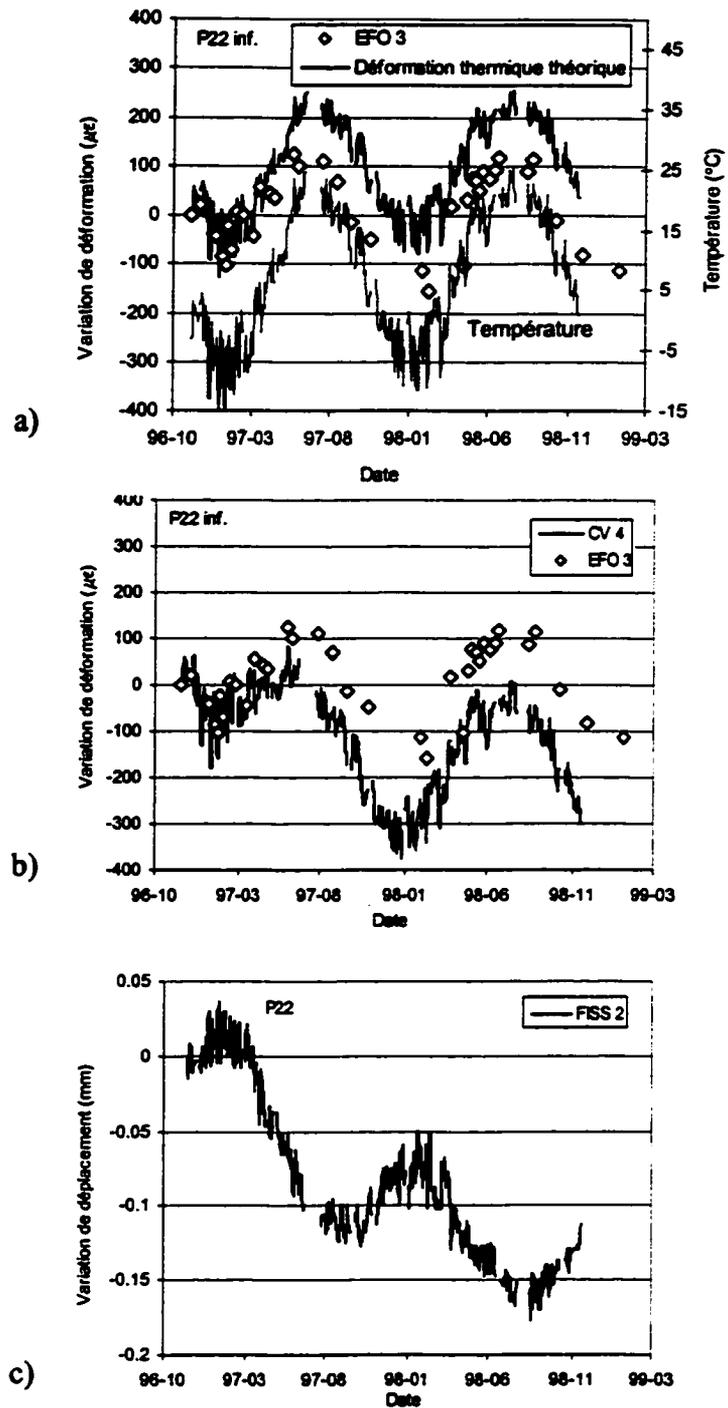
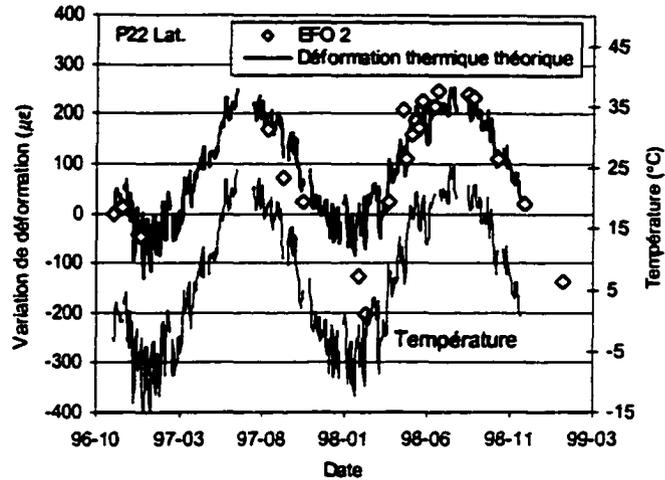
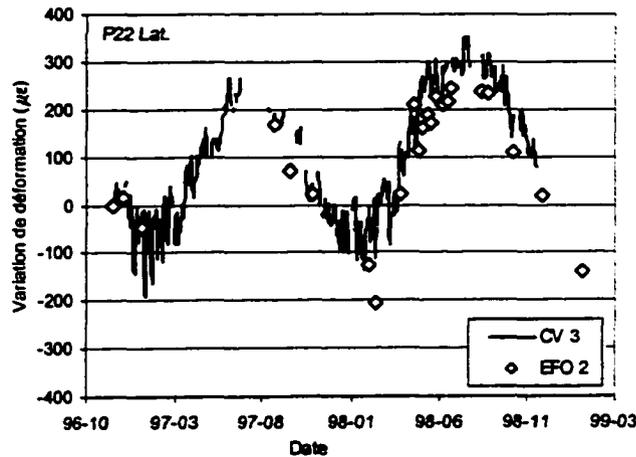


Figure 5.7 Poutre 22: a) Variations de déformation thermique théorique et mesures de la jauge EFO 3 et b) mesures de la jauge EFO 3 et de la CV 4 et c) Variations de déplacement mesurées avec le FISS 2



a)

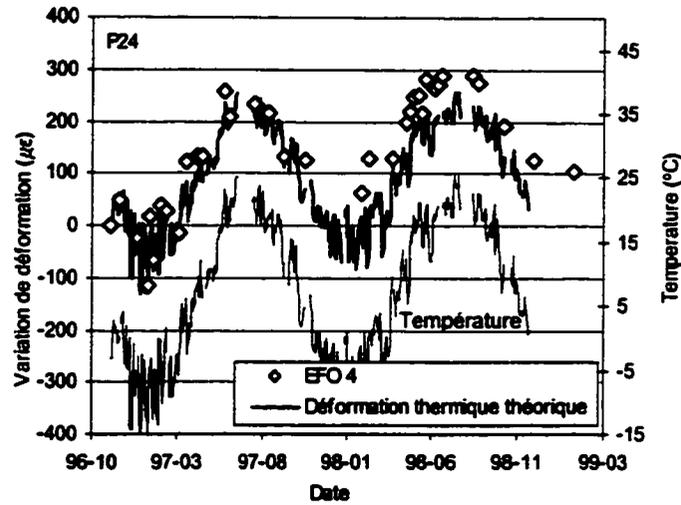


b)

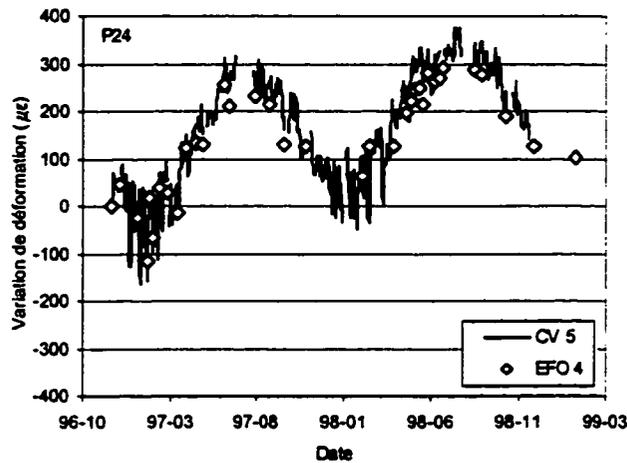
Figure 5.8 Poutre 22: variations de déformation a) thermique théorique et mesures de la jauge EFO 2 et b) mesures de la jauge EFO 2 et de la CV 3

Les instruments EFO 4 et CV 5 sont montés dans des briquettes et installés dans la poutre 24. Les données de ces instruments s'écartent de la dilatation thermique théorique calculée (Fig. 5.9a). Le béton projeté de la poutre 24 est constitué de fibres métalliques et la valeur retenue de CDT de $10 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ est probablement trop faible. Par contre, une valeur du CDT de $12 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ fournit une bonne corrélation avec les données des instruments. Ces derniers sont aussi dédiés à la détection d'un éventuel décollement du parement de béton projeté et on observe un comportement similaire à la poutre 22. En effet, les déformations enregistrées avec les jauges

EFO 4 et CV 5 sont plus élevées au mois de juillet 98 comparativement à celles obtenues un an plus tôt (Fig. 5.9b).



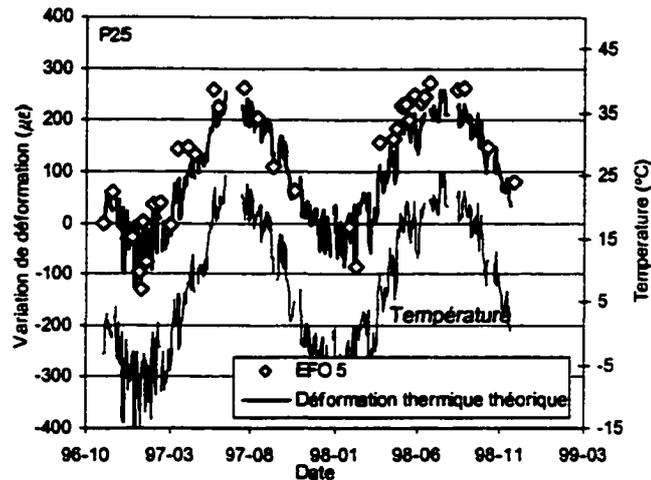
a)



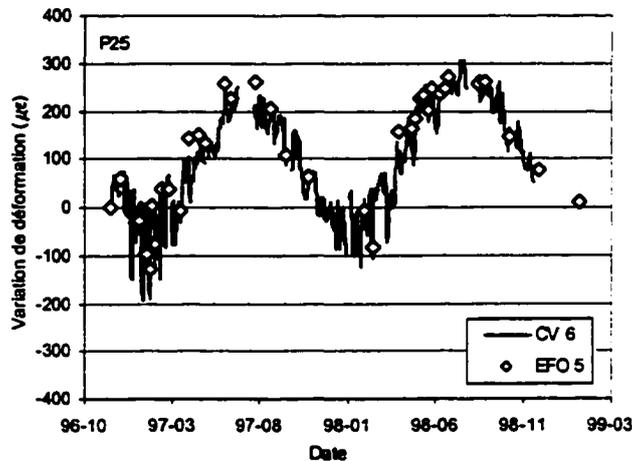
b)

Figure 5.9 Poutre 24: variations de déformation a) thermique théorique et mesures de la jauge EFO 4 et b) mesures de la jauge EFO 4 et de la CV 5

Pour la poutre 25, les instruments EFO 5 et CV 6 sont aussi montés dans des briquettes de béton. Dans ce cas, les lectures de déformations ne montrent pas de signe clair de décollement; elles sont à peu près du même niveau, variant de -100 à près de $300 \mu\epsilon$ après deux ans (Fig. 5.10a et b).



a)



b)

Figure 5.10 Poutre 25: variations de déformation a) thermique théorique et mesures de la jauge EFO 5 b) mesures de la jauge EFO 5 et de la CV 6

Ces résultats montrent que l'application des jauges à corde vibrante et à fibre optique dans des projets de réfection, où l'épaisseur de la réparation est relativement mince comparativement à l'élément structural, est possible. Aussi, les déformations mesurées avec les deux types d'instruments sont similaires. L'installation au préalable des instruments dans des briquettes de béton, de même composition que le béton utilisé pour la réhabilitation, ne perturbe pas les mesures de déformation. Enfin, avec les deux types d'instruments, on détecte bien les anomalies de déformation probablement liées à des décollements dans le cas des poutres 22 et

24 ou à l'évolution d'une fissure comme pour la base de la poutre 22. Par ailleurs, le comportement des poutres 20 et 25 est stable depuis la réhabilitation.

5.3 Passerelle piétonnière de Sherbrooke

La passerelle piétonnière de Sherbrooke, qui enjambe la rivière Magog, est fabriquée de béton de poudre réactive (BPR) et les approches, situées de chaque côté, sont en béton à haute performance (BHP). L'utilisation de BPR pour la construction d'une structure de ce type constitue une première mondiale. La conception et la réalisation de cette structure est le fruit d'une collaboration franco-québécoise regroupant plusieurs intervenants dont la compagnie Bouygues en France et les chercheurs de l'Université de Sherbrooke. L'un des objectifs de ce projet est l'instrumentation de plusieurs éléments structuraux de la passerelle qui permettront de mieux comprendre son comportement à long terme. Ces résultats serviront ultérieurement au dimensionnement de structures construites avec ce nouveau béton. On s'intéresse ici aussi à l'installation et à la réponse des jauges à fibre optique et à corde vibrante enfouies dans le béton.

5.3.1 Béton de poudre réactive (BPR)

Les bétons ordinaires offrent une résistance en compression maximale se situant autour de 40 MPa tandis que les BHP atteignent facilement 90 à 100 MPa. Selon le mélange utilisé et le procédé de fabrication, le BPR peut atteindre une résistance de 350 Mpa grâce au confinement. La microstructure particulière du BPR permet d'atteindre une telle résistance; la matrice du BPR est beaucoup plus homogène que les autres types de béton car le diamètre maximal des particules entrant dans sa composition est de 300 μm . Typiquement, le BPR est constitué de ciment, fumée de silice, quartz broyé, sable, eau, superplastifiant et de fibres d'acier. En effet, ce type de béton intègre des fibres d'acier afin d'en augmenter la ductilité. La résistance et la ductilité du BPR peuvent aussi être augmentées en effectuant un confinement du béton en cours de mûrissement et aussi en améliorant la microstructure par un traitement thermique. DUGAT & coll. [1995] présentent une étude détaillée du comportement mécanique de tels bétons.

La résistance en compression et le module élastique du BPR de la passerelle de Sherbrooke sont respectivement de 200 MPa et 50 GPa [DALLAIRE & coll. 1998]. Les membrures diagonales ont, quant à elles, subi un confinement lors du mûrissement et toute la structure a été soumise à un traitement thermique. En effet, après l'assemblage complet d'un voussoir, celui-ci était acheminé dans une section de l'usine où la température atteignait 90°C.

Dans le cas de cette structure, la source majeure des déformations est liée aux variations de la température extérieure allant de -30 à +35 au Québec. Dans le but de corroborer les variations de déformation mesurées avec les capteurs, on a effectué un essai de dilatation thermique sur des éprouvettes du BPR. Le coefficient de dilatation thermique obtenu à partir d'un essai dans une enceinte à thermorégulateur est de 17,1 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ contre 9 $\mu\epsilon/^\circ\text{C}$ pour un béton usuel.

5.3.2 Description de la structure

L'utilisation du BPR vise à obtenir un ouvrage léger et d'assemblage facile. La passerelle, d'une longueur de 60 m et d'une largeur de 3,3 m, est construite de six voussoirs de 10 m de longueur préfabriqués et assemblés sur le site. Les poutres supérieures et inférieures sont, tout comme les membrures diagonales (Fig. 5.11), fabriquées en BPR, à la différence près que le béton des membrures est coulé dans un cylindre d'acier.

Pour la conception des membrures, le BPR est coulé dans un tube d'acier qui contient deux câbles d'acier précontraints, et qui permettront de fixer la membrure aux poutres supérieure et inférieure. Par ailleurs, après le coulage dans le tube d'acier, on comprime, à l'aide d'un bâti spécial en usine, le BPR à l'état frais dans le tube afin de créer un confinement qui augmentera sa résistance et sa ductilité.

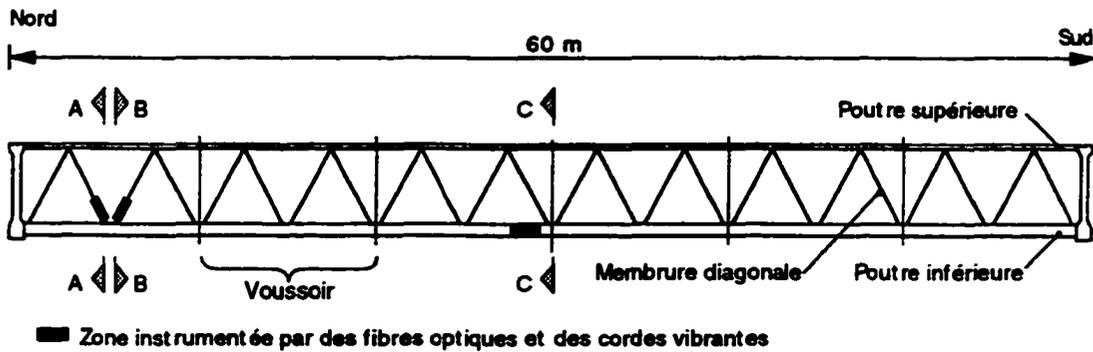


Figure 5.11. Schéma des voussoirs en BPR constituant la passerelle piétonnière et position des zones instrumentées

La figure 5.12 montre deux membrures d'essais installées dans le bâti avec lequel est appliqué le confinement. Lors de cet essai préliminaire on a vérifié la procédure d'installation des jauges à corde vibrante et à fibre optique dans les membrures. Quant aux poutres supérieure et inférieure, elles sont moulées et assemblées en usine avec les membrures pour former un voussoir.

5.3.3 Instrumentation

Afin de suivre le comportement à long terme de cet ouvrage ainsi que ses performances lors d'essais de chargement, des extensomètres à corde vibrante (CV) et à fibre optique (EFO) ont été enfouis dans la structure en plus de nombreux thermocouples. Les instruments dans les membrures sont fixés à différents niveaux sur l'un des câbles d'acier traversant ces dernières. Des fixations en plastique ont permis de centrer l'instrument par rapport au diamètre de la membrure (Fig. 5.13). Pour ce qui est des jauges enfouies dans les poutres, celles-ci ont été installées dans les moules à l'usine avant le coulage du béton. Le câblage et le branchement des instruments aux systèmes d'acquisition ont été réalisés une fois les voussoirs arrivés sur le site.

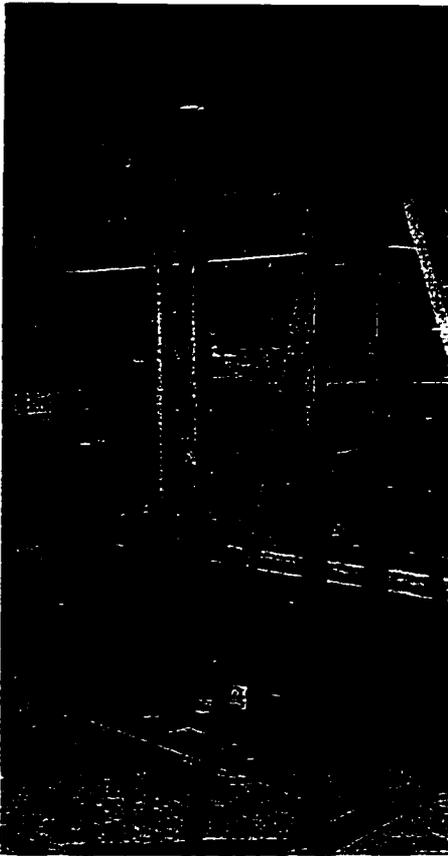


Figure 5.12 Tubes métalliques servant de membrures installés dans le bâti permettant de comprimer le BPR lors du mûrissement

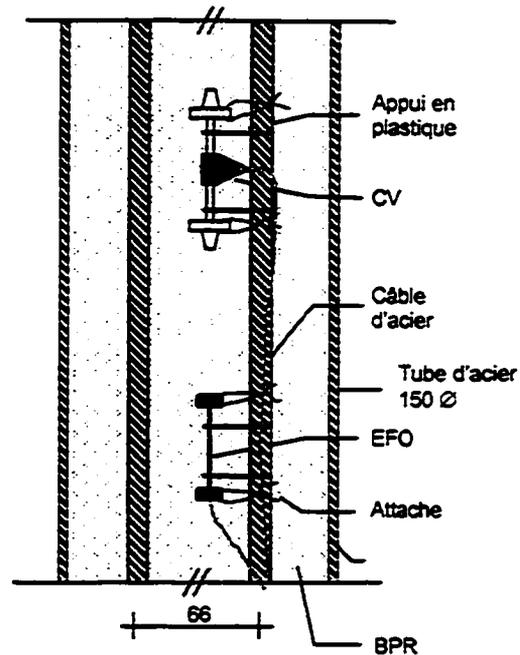


Figure 5.13 Schéma de fixation des cordes vibrantes et des jauges à fibre optique Fabry-Pérot EFO dans les membrures

Étant donné la complexité de la structure et les nombreuses étapes de montage, certains instruments ne sont plus fonctionnels, autant ceux à corde vibrante qu'à fibre optique. Le nombre d'instruments dans les membrures et les poutres avait du reste été doublé afin de s'assurer qu'un suivi à long terme de la structure demeure possible. La position précise des instruments est montrée aux figures 5.14, 5.15 et 5.16. Au total, trois jauges à corde vibrante ont été perdues complètement (CV 163, 164, et 169) tandis que certaines fonctionnent sporadiquement (CV 170 et 171). Pour ce qui est des fibres optiques, deux jauges ont été perdues (EFO 13 et 17) sur un total de cinq. Mentionnons que les jauges n'étaient pas fonctionnelles à l'arrivée des sections sur le chantier; les câbles ou les instruments ont peut-être été endommagés soit lors du coulage du BPR, de la compression du BPR dans les membrures, de l'assemblage en usine ou encore lors de la manutention et cela, malgré la multitude de précautions prises. Néanmoins, un nombre suffisant d'instruments permet d'effectuer le suivi et d'établir certaines comparaisons.

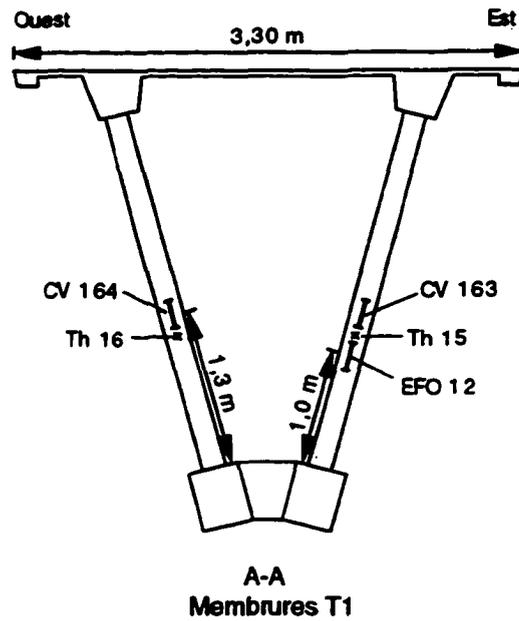


Figure 5.14 Position des instruments enfouis dans les membres en tension T1

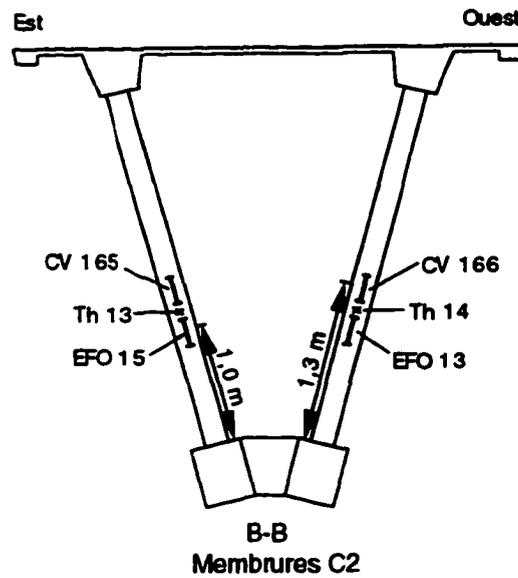


Figure 5.15 Position des instruments dans les membres en compression C2

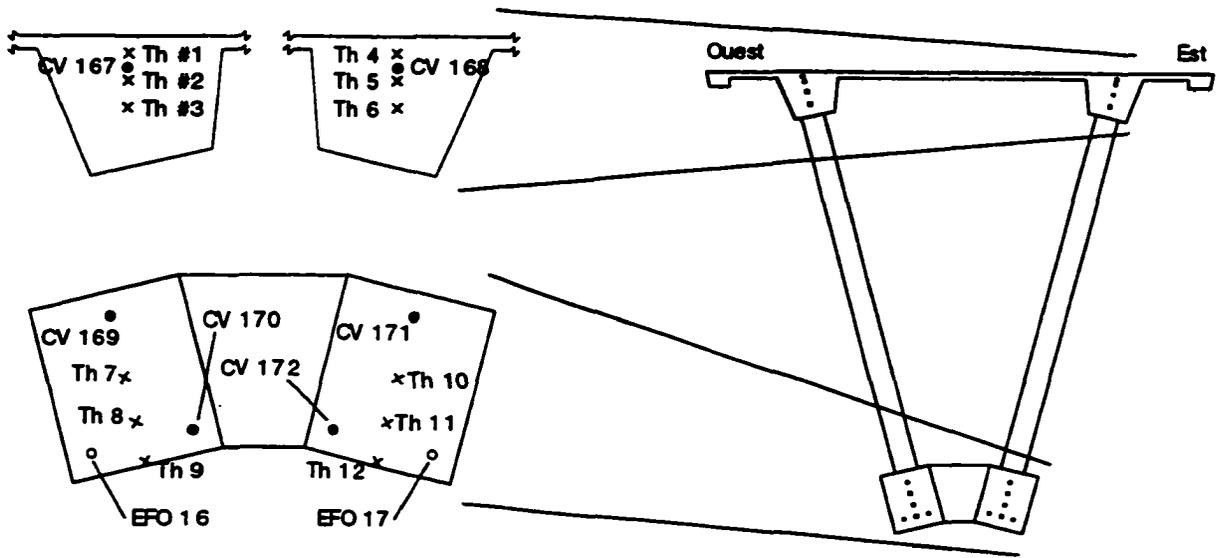


Figure 5.16 Position des instruments dans les poutres inférieure et supérieure

5.3.4 Résultats

Les résultats obtenus avec les jauges à fibre optique et à corde vibrante couvrent la fin de 1997 jusqu'au début du mois de juin 1999. Les graphiques des figures 5.17, 5.18a et 5.19a montrent les variations de déformation relevées avec les jauges à fibre optique en comparaison avec la dilatation thermique du BPR. Le coefficient de $17,1 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ déterminé préalablement est utilisé et la variation de température est obtenue avec les thermocouples localisés à proximité. Les figures 5.18b et 5.19b montrent les résultats obtenus respectivement pour les couples de jauges EFO 15-CV 165 et EFO 16-CV 170. Comme mentionné auparavant, la jauge CV 170 fonctionne sporadiquement. La jauge EFO 12, localisée dans une membrure, permet de mesurer les variations de déformation.

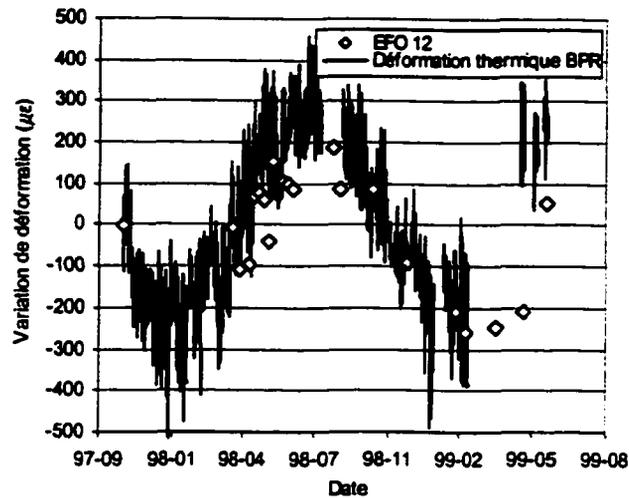
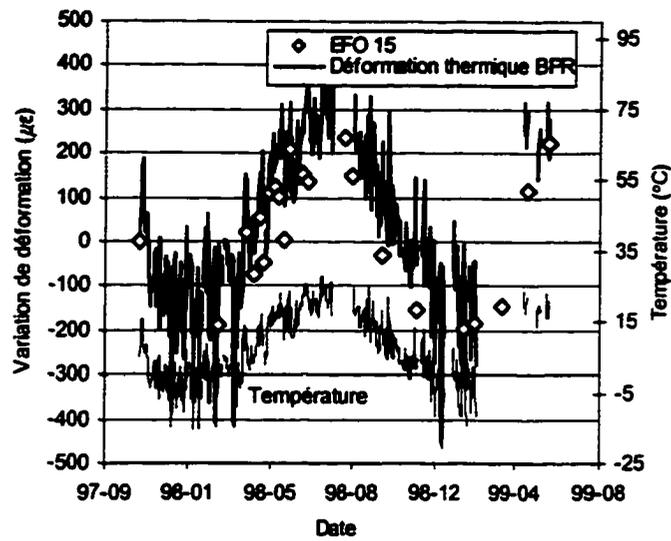


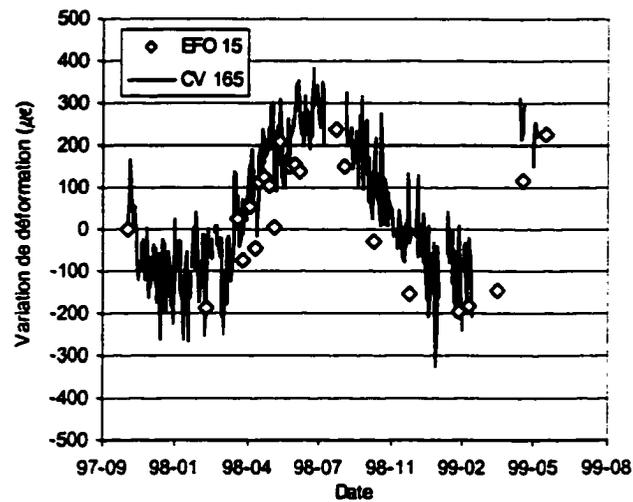
Figure 5.17 Variations de déformation thermique et mesures de la jauge EFO 12 installée dans la membrure T1-Est

L'examen des figures 5.18a et 5.18b indique qu'il y a une bonne correspondance entre les variations de déformation mesurées par la jauge EFO 15, variant entre $-200 \mu\epsilon$ et $+300 \mu\epsilon$, la dilatation thermique du béton et les valeurs de la CV 165. Par ailleurs, les déformations enregistrées avec la EFO sont légèrement inférieures aux déformations thermiques. Cela dit, la valeur de $17,1 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ ne tient pas compte du fait que le béton de la membrure est encaissé dans un tube d'acier (CDT d'environ $10 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$) et ni de la présence des deux câbles d'acier pouvant modifier le comportement thermique de la membrure.

La même observation est faite pour la jauge EFO 12. Ainsi, la corde vibrante et la fibre optique n'étant pas tout à fait au même endroit dans la membrure, ceci amène certainement quelques différences dans les résultats des deux instruments. Par ailleurs, les déformations enregistrées par la jauge EFO 16, localisée dans la poutre inférieure, suivent mieux la dilatation thermique de la poutre qui, elle, n'est pas confinée dans l'acier (Fig. 5.19a). On voit aussi que les résultats de la EFO 16 correspondent bien avec la CV 170 sur la courte période de lecture de cette dernière (Fig. 5.19b). Les déformations thermiques calculées varient de $\pm 300 \mu\epsilon$ tandis que celles mesurées avec la jauge EFO varient de $\pm 200 \mu\epsilon$; ces mesures ne sont pas prises de façon continue; aussi, elles ne représentent pas l'étendue complète des déformations.



a)



b)

Figure 5.18 Variations de déformation a) thermique et mesures de la jauge EFO 15 et b) mesures des jauges EFO 15 et CV 165 installées dans la membrure C2-Est

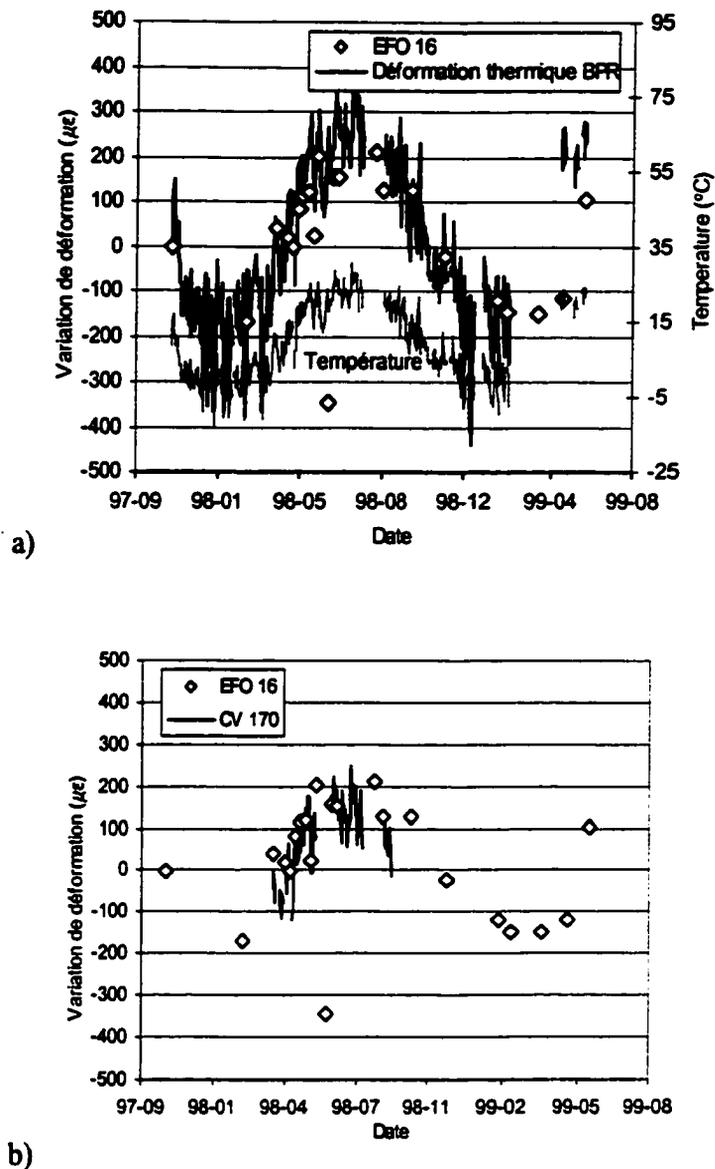


Figure 5.19 Variations de déformation a) thermique et mesures de la jauge EFO 16 et b) mesures des jauges EFO 16 et CV 170 installées dans la poutre inférieure

À partir des divers calculs et mesures de dilatation thermique, on peut affirmer que la déformation des éléments structuraux de la passerelle est essentiellement liée aux variations de température. Les variations de déformation sont de l'ordre de $\pm 300 \mu\epsilon$ dans les membrures et dans la poutre inférieure. Aussi, la valeur du CDT de $17,1 \mu\epsilon/^\circ\text{C}$ pour le BPR est confirmée par les diverses mesures de déformation.

5.3.5 Systèmes d'acquisition de données et autres instruments à fibre optique

Récemment, de nouveaux systèmes de lecture et d'acquisition de données ont été développés, notamment une unité de 32 canaux. Celle-ci a été testée sur le site de la passerelle sur une courte période afin de vérifier son fonctionnement (Fig. 5.20). Par ailleurs, d'autres instruments à fibre optique ont été branchés, soit un capteur de température (FOT) et un capteur de déplacement (FOD). Le capteur de déplacement a été fixé à la jonction entre deux sections en BHP (Fig. 5.21) et le capteur de température a été placé dans la boîte contenant le système d'acquisition de données à 32 canaux. La figure 5.22 montre les résultats de l'acquisition, sur trois jours d'essais, de la jauge EFO 15, du capteur de déplacement et du capteur de température.

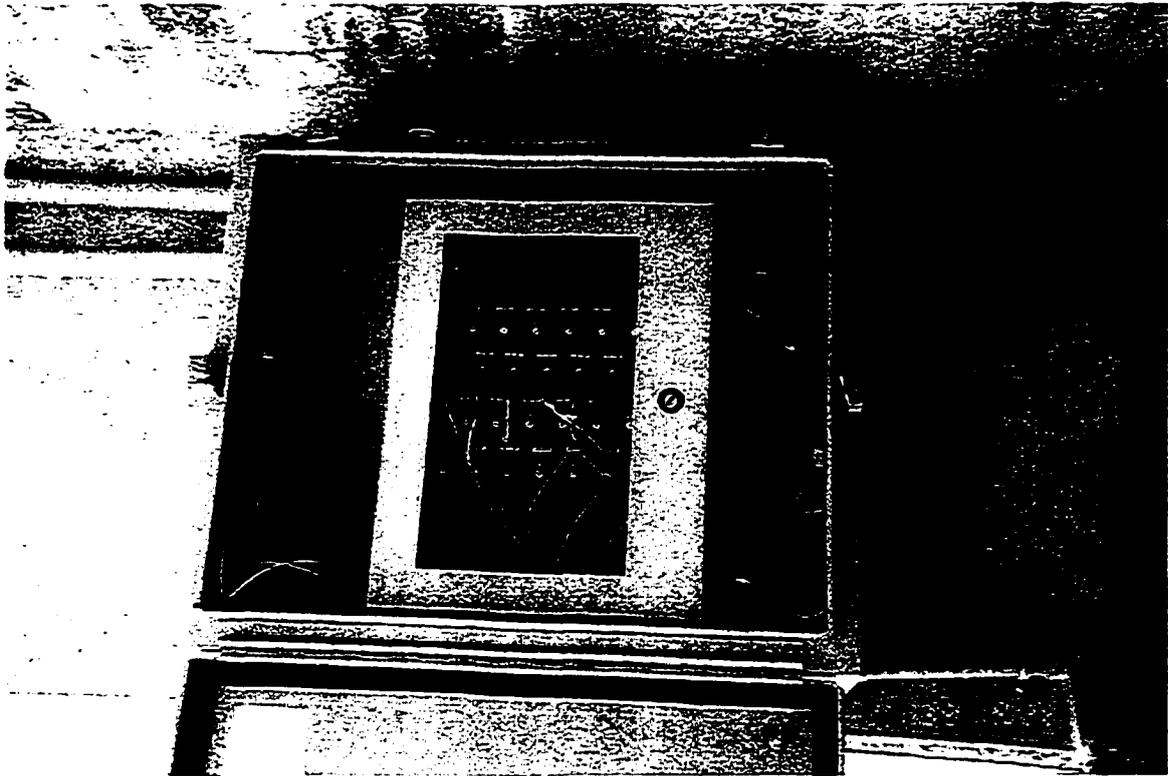


Figure 5.20 Prototype du système d'acquisition à 32 canaux

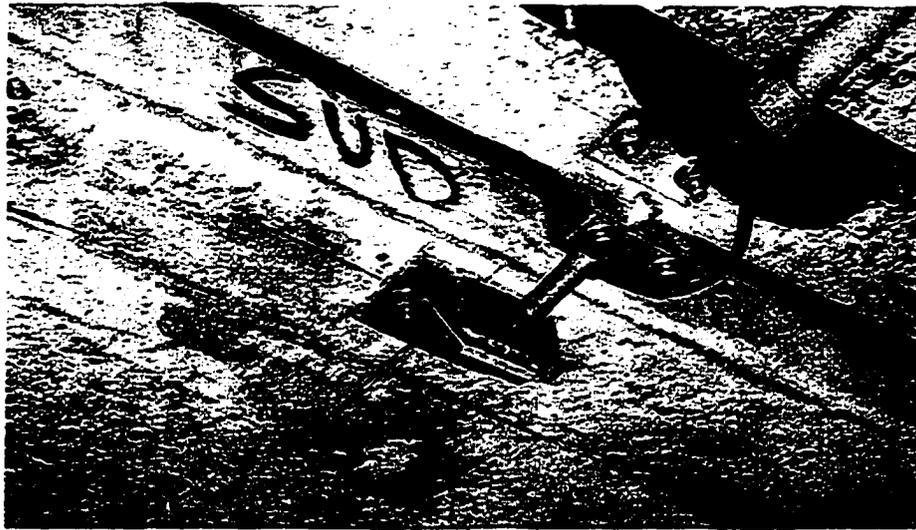


Figure 5.21 Capteur de déplacement à fibre optique (FOD) installé sous un joint de dilatation des approches en BHP de la passerelle piétonnière

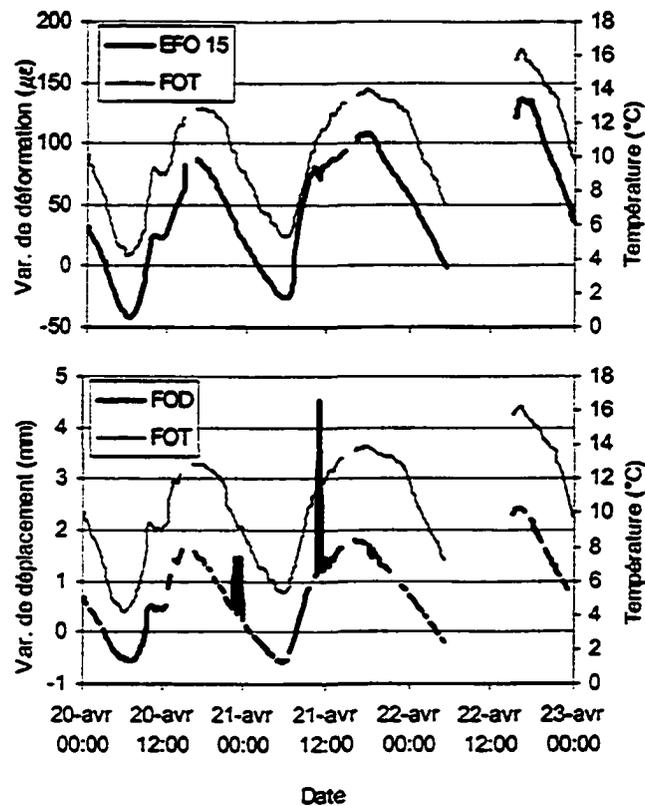


Figure 5.22 Variations de déplacements et de déformations enregistrées avec le prototype du système d'acquisition à 32 canaux

Tout d'abord le suivi avec le prototype du système de 32 canaux fonctionne bien et permet l'acquisition en continu des divers capteurs. Le système a par ailleurs été arrêté le 22 avril pour faire diverses vérifications, ce qui explique les résultats manquants. Quant aux déformations de la structure et aux déplacements vis-à-vis le joint de dilatation, ceux-ci sont intimement liés aux variations de la température.

5.4 Synthèse

Les projets de la passerelle piétonnière de Sherbrooke et de la réhabilitation du stationnement Webster ont permis de valider le comportement des jauges à fibre optique Fabry-Pérot EFO sur site. Les jauges EFO, tout comme les cordes vibrantes, ont été soumises lors de l'installation à des conditions sévères en usine et en chantier; certaines ont même été soumises à une cure de température allant jusqu'à 90°C. Au terme de deux ans de suivi, il apparaît que la robustesse et la longévité des deux types de capteur sont comparables bien qu'il faille tout de même porter un minimum d'attention au câble à fibre optique sur le chantier. Par ailleurs, la réponse en déformation des capteurs à fibre optique et à corde vibrante est similaire. Contrairement aux cordes vibrantes, aucune correction thermique n'est requise pour les jauges EFO; il n'y a pas d'effet notable dans la plage de températures à laquelle elles ont été soumises (environ $\pm 25^\circ\text{C}$). Ces capteurs conviennent également pour le suivi de travaux de réhabilitation de structures en béton. Le suivi se poursuit actuellement, dans le but premier de vérifier le comportement de la passerelle piétonnière et des travaux de réhabilitation du stationnement Webster. Dans le cas de Webster, les données futures des capteurs contribueront à connaître la performance des techniques de réhabilitation utilisées et une attention particulière devrait être portée aux poutres 22 et 24. Quant à la passerelle en BPR, l'essentiel de la déformation est lié aux variations de température étant donné le coefficient de dilatation thermique élevé. Par ailleurs, le développement du système d'acquisition de données multicanaux permettra le suivi en continu de ces structures.

Cellules de mesure 2D des déformations internes du béton

L'initiation du développement de cellules miniaturisées pour la mesure des déformations utiles à l'instrumentation des barrages ou autres structures en béton constitue l'essentiel du présent chapitre. Deux prototypes de cellules de déformation, l'une à fibre optique et l'autre à corde vibrante, ont été fabriqués. Les prototypes de cellules sont faits en béton à haute performance et sont de géométrie identique; la seule différence réside dans le choix des jauges extensométriques placées à l'intérieur. Ce chapitre présente les détails techniques reliés à la conception des cellules, soit la géométrie, les types de jauges et le béton utilisé. Les essais et montages permettant de vérifier le comportement des jauges et des prototypes ainsi que les résultats des essais mécaniques sont présentés. Ces sections sont suivies par une analyse des résultats obtenus et sont aussi mis en parallèle avec ceux obtenus au chapitre 4. Les dernières sections de ce chapitre donnent les lignes directrices pour la suite du développement des cellules ainsi que des systèmes de suivi en temps réel pour une utilisation éventuelle en réseau.

6.1 Prototypes de cellules de déformation

La conception de la cellule de mesure des déformations s'inspire du Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS). La cellule de déformation est un cylindre en béton, d'une longueur d'environ 200 mm et d'un diamètre de 100 mm, qui intègre trois jauges

extensométriques de déformation. Les jauges sont disposées orthogonalement et de manière à ce que le centre des jauges soit aligné sur l'axe longitudinal du cylindre. Ces cellules sont conçues de manière à être enfouies dans un forage pratiqué dans une structure ce qui permettra de suivre, les déformations dans un plan donné de l'ouvrage. La figure 6.1 montre une photographie des deux cellules tandis que la figure 6.2 montre un schéma de la cellule à fibre optique avec la position des diverses jauges; la conception de la cellule à corde vibrante est similaire. Pour la fabrication, les jauges à fibre optique et à corde vibrante sont fixées dans un moule en PVC à l'aide de fils métalliques (Fig. 6.3). Le béton est coulé dans ces moules et le démoulage est effectué après une journée. Par la suite, les cellules sont placées dans l'eau pour le mûrissement du béton et cela, pour une durée de 28 jours. Les surfaces des cellules sont ensuite aplanies afin d'assurer le parallélisme entre les extrémités de chaque cylindre. Les prototypes de cellules de déformation ont été fabriqués à quelques semaines d'intervalle. Bien que le mélange de béton utilisé soit le même, les propriétés mécaniques du béton des cellules peuvent être légèrement différentes.



Figure 6.1 Cellules de mesure des déformations à fibre optique (à gauche) et à corde vibrante (à droite)

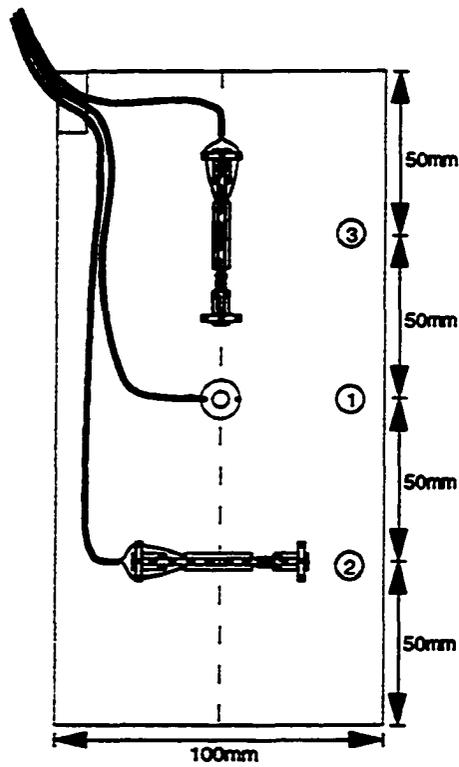


Figure 6.2 Schéma de la cellule de mesure des déformations à cordes vibrantes de conception identique à celle à fibres optiques

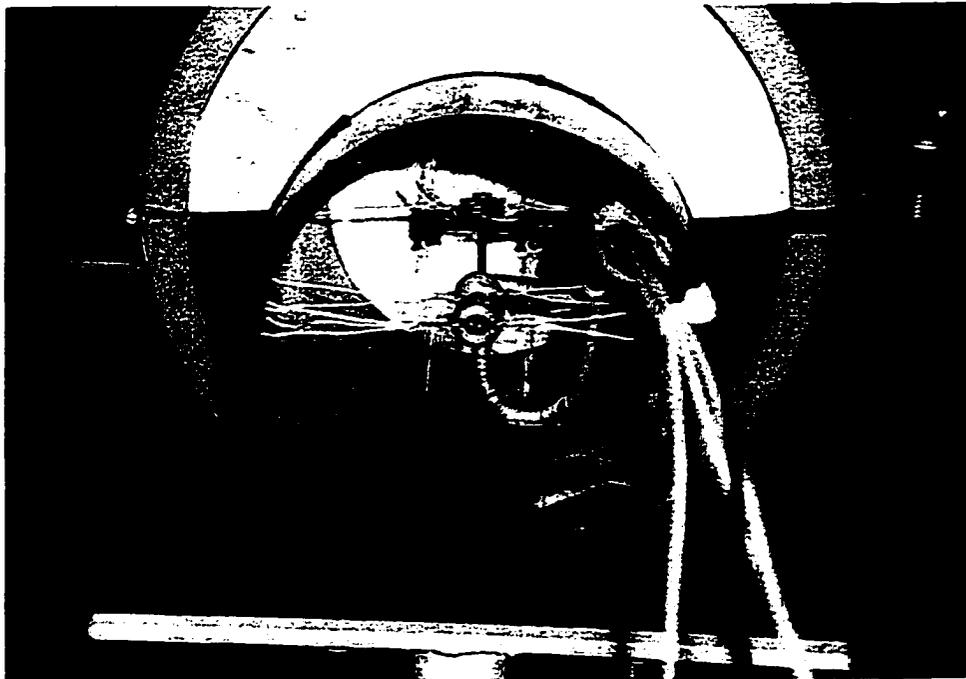


Figure 6.3 Fabrication de la cellule de déformation à fibres optiques

6.1.1 Mélange et propriétés mécaniques du béton

Le mélange de béton utilisé pour les cellules a déjà été employé lors des essais préliminaires sur les jauges à fibre optique. Il s'agit d'un mélange de béton à haute performance fabriqué avec des granulats grossiers calcaire de calibre 5-10 mm maximum, cela afin d'éviter que ceux-ci se logent entre les têtes des jauges pour en modifier le bon fonctionnement. Le tableau 4.2 donne les constituants du mélange. Ce même mélange a été réalisé à deux reprises, soit pour le moulage de la cellule à corde vibrante et plus tard pour le moulage de la cellule à fibre optique. En plus du moulage des cellules, des éprouvettes ont été fabriquées dans le but de procéder à des essais mécaniques sur ce béton. La résistance à la compression uniaxiale et le module d'élasticité ont été déterminés suivant les normes en vigueur. Le tableau 6.1 présente les résultats des essais mécaniques (moyenne de trois essais) sur le béton des deux cellules.

Paramètre	Cellule de déformation EFO	Cellule de déformation CV
Résistance à la compression (f'_c)	55 Mpa	52 MPa
Module d'élasticité (E'_c)	33 Gpa	32 GPa
Coefficient de Poisson (ν)	0,21	0,20

6.1.2 Jauges extensométriques

Des jauges extensométriques à corde vibrante ainsi que des jauges extensométriques à fibre optique ont été utilisées dans la conception des cellules. L'un des objectifs poursuivis lors de la conception des cellules était de développer une cellule de petite taille comparativement au cylindre instrumenté (CIUS); des jauges extensométriques de petite dimension ont donc été utilisées.

Les jauges à fibre optique pour enfouissement dans le béton sont conçues à partir d'une jauge de type interférométrique Fabry-Pérot; cette technologie a déjà été décrite au chapitre 4. Dans le but de miniaturiser les cellules de déformation, les jauges à fibre optique pour béton ont été fabriquées selon nos exigences par le manufacturier. La figure 6.4 montre la jauge à fibre optique

utilisée. La dimension de cette jauge est de 25 mm entre les têtes, la longueur totale est de 35 mm et le diamètre des têtes est de 10 mm. Les jauges utilisées ont une sensibilité de $0,25 \mu\epsilon$ et une plage de $\pm 1000 \mu\epsilon$.



Figure 6.4 Jauge à fibre optique utilisée dans la conception de la cellule de déformation à fibre optique

Quant aux jauges à corde vibrante, celles utilisées sont d'une longueur totale de 50 mm et le diamètre des têtes est de 15,5 mm. Le facteur de jauge théorique pour ce type de jauge est 0,391; il s'agit là de la valeur donnée par le fabricant. Cependant, un étalonnage mécanique a été réalisé et la figure 6.5 montre la jauge à corde vibrante et le montage d'acier dans lequel est placée la jauge pour effectuer l'étalonnage mécanique sur presse.

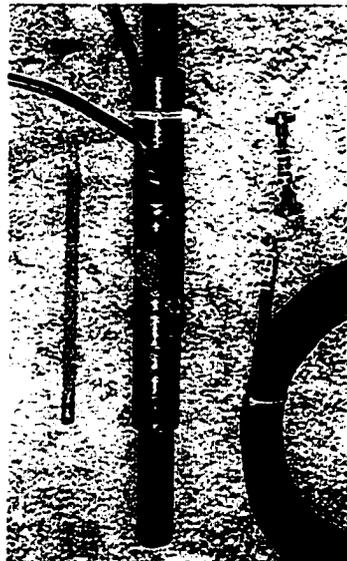


Figure 6.5 Jauge à corde vibrante de petite dimension et montage pour étalonnage

Les résultats de l'étalonnage mécanique permettent de déterminer des facteurs expérimentaux de jauges légèrement différents de la valeur 0,391 donnée par le fabricant (Tab. 6.2). Les facteurs de jauges déterminés en laboratoire ont donc été utilisés pour les calculs des déformations de la cellule à corde vibrante.

Jauge	Facteur de jauge expérimental
1	0,339
2	0,344
3	0,345

6.2 Étude de la jauge à corde vibrante de faible dimension

Au chapitre 4, une attention particulière a été portée à la jauge à corde vibrante conventionnelle de type TELEMAT C90. Maintenant, un cylindre de béton avec trois jauges parallèles a été préparé spécifiquement pour vérifier le comportement de la jauge à corde vibrante de 50 mm et le comparer à d'autres jauges extensométriques dont une jauge EFO de 70 mm. Les jauges étudiées sont de technologie identique à celles étudiées au chapitre 4 mais les modèles de jauges sont différents. Cette section présente le cylindre d'essais fabriqué ainsi que les résultats des essais de compression uniaxiale.

6.2.1 Cylindre de béton à jauges parallèles

Le cylindre d'essais, que l'on appellera cylindre à jauges parallèles afin de ne pas le confondre avec les différents cylindres d'essais décrit au chapitre 4, est fabriqué en béton et contient trois jauges extensométriques disposées symétriquement par rapport au centre du cylindre. La figure 6.6 montre un schéma du cylindre avec la position des diverses jauges. En plus des jauges à l'intérieur du cylindre, les déformations ont été mesurées avec des LVDT. En effet, lors des essais de chargement du cylindre, une jaquette a été placée sur le cylindre; sur cette jaquette deux LVDT sont fixés de manière à être diamétralement opposés (Fig 6.7).

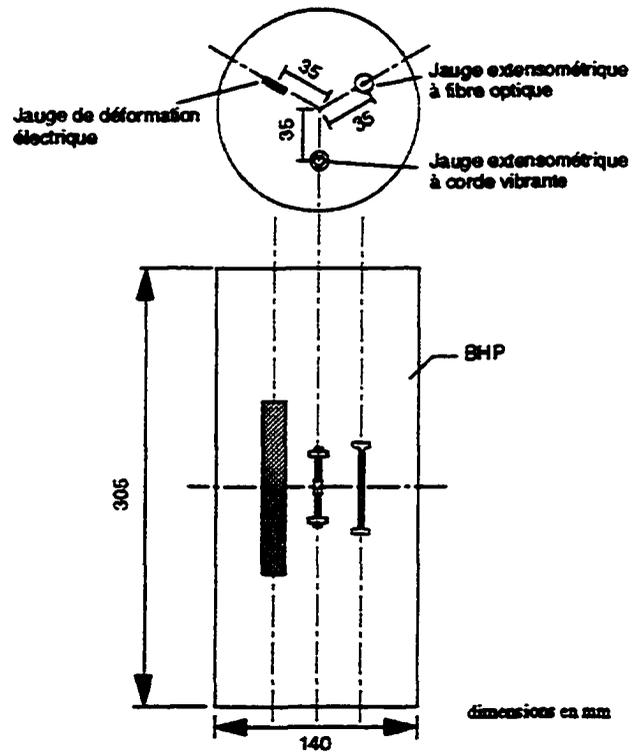


Figure 6.6 Représentation schématique du cylindre de béton à jauges parallèles

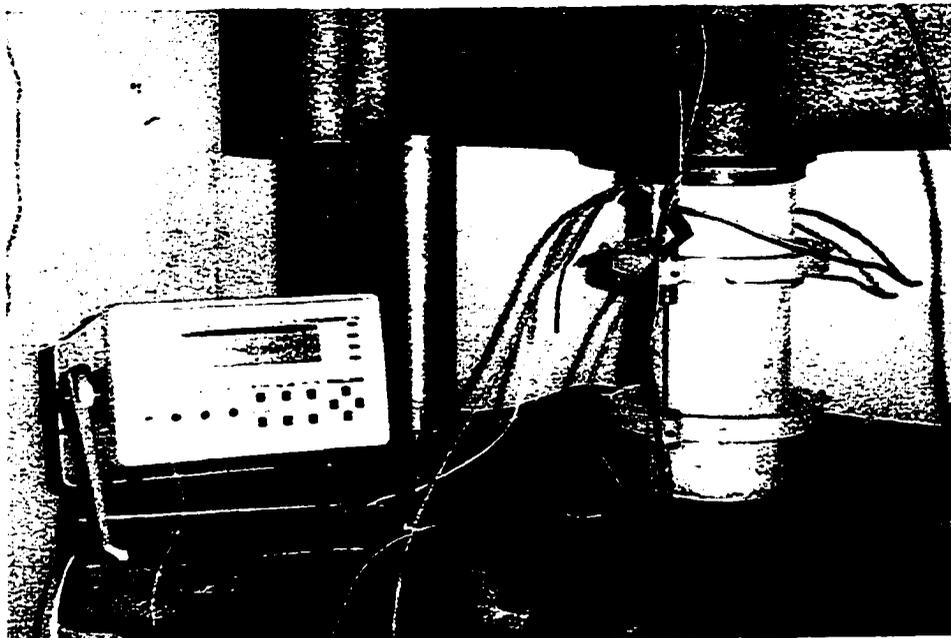


Figure 6.7 Cylindre de béton à jauges parallèles monté sur la presse pour les essais de validation

6.2.2 Jauges extensométriques

La figure 6.8 montre les jauges enfouies dans le cylindre à jauges parallèles. Tout comme pour les jauges de la cellule de mesure des déformations à corde vibrante, le facteur de jauge théorique fourni par le manufacturier est de 0,391. Toutefois, un étalonnage tel que décrit auparavant a permis de trouver un facteur de jauge de 0,367. Notons que la jauge a été enduite de silicone et protégée avec un ruban adhésif afin d'éviter que le coulis ne s'infilte dans le mécanisme. La jauge électrique utilisée est noyée dans une résine plastique dont le module d'élasticité est de 2,7 GPa. Ce modèle est conçu spécialement pour être installé dans le béton ou autre matériau composite. Les LVDT, quant à eux, sont montés sur une jaquette fixée sur le cylindre d'essais. La longueur entre les plots de mesure des LVDT est de 152 mm.

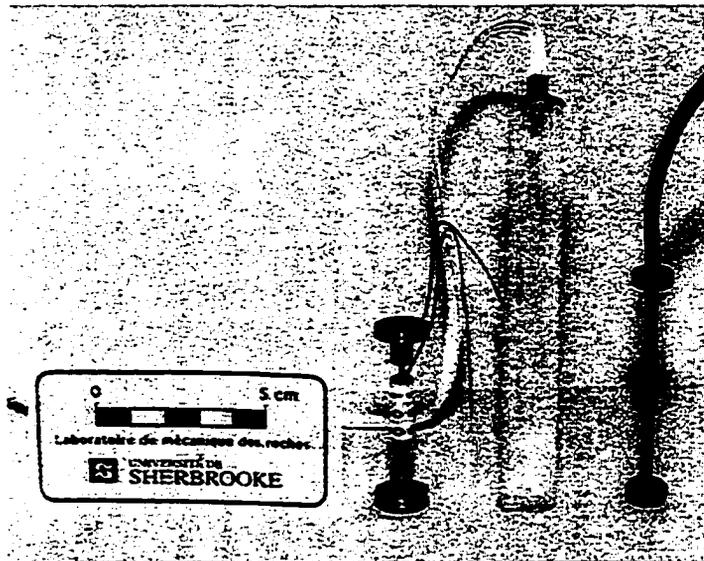


Figure 6.8 Diverses jauges extensométriques utilisées; à gauche la corde vibrante, au centre la jauge électrique et à droite la jauge EFO

6.2.3 Propriétés mécaniques du cylindre

Divers essais mécaniques ont été effectués sur des éprouvettes du même béton que celui du cylindre à jauges parallèles; on donne les résultats obtenus dans les sections suivantes. Aussi, étant donné la présence de plusieurs jauges dans ce cylindre, on s'est intéressé de plus près à la rigidité de ce dernier.

Essais mécaniques sur béton

Lors du moulage du cylindre, plusieurs cylindres de béton ont aussi été confectionnés dans le but d'effectuer une caractérisation mécanique du béton. Trois essais de résistance à la compression uniaxiale ont été réalisés ainsi que trois essais de détermination du module d'élasticité et du coefficient de Poisson. Les résultats obtenus sont indiqués au tableau 6.3 Le béton du cylindre en est un à haute performance. La résistance en compression visée était de 50 MPa et le module d'élasticité autour de 35 GPa. Le mélange de béton utilisé pour la fabrication du cylindre est le même que celui présenté au chapitre 4.

Tableau 6.3
Paramètres mécaniques du béton du cylindre à jauges parallèles

Résistance à la compression ($f'c$)	54 MPa
Module d'élasticité ($E'c$)	35 GPa
Coefficient de Poisson	0,22

Élasticité du cylindre à jauges parallèles

Puisque le cylindre contient trois jauges localisées au centre, ceci peut influencer la rigidité dans la zone centrale. Un essai supplémentaire de détermination du module élastique sur ce cylindre a donc été effectué. Pour cet essai, deux extensomètres à couteaux (MTS 632.11c-20) d'une longueur de 65 mm ont été fixés à l'extérieur du cylindre et vis-à-vis du centre (Fig. 6.9). La détermination du module d'élasticité a été faite à deux reprises; pour la seconde détermination, les extensomètres ont été déplacés de 90° sur la surface du cylindre. L'avantage d'utiliser les extensomètres est qu'ils mesurent les déformations vis-à-vis du centre du cylindre ($l_0 = 65$ mm) là où sont installées les jauges. Avec les LVDT externes, les plots de mesure sont situés à l'extérieur de la zone centrale du cylindre ($l_0 = 152$ mm).

Le module d'élasticité moyen obtenu pour la zone centrale du cylindre d'essais est de 31,7 GPa (moyenne de 2 essais) tandis qu'il est de 35,2 GPa pour les cylindres de béton (moyenne de 3 essais). À la lumière de ces résultats, la rigidité au centre du cylindre d'essais est plus faible que

celle du béton utilisé pour le cylindre. Notons qu'une jauge à corde vibrante de type souple ainsi qu'une jauge électrique noyée dans une résine de faible rigidité ont été utilisées dans le cylindre. Cette valeur de 31,7 GPa sera utile pour l'analyse des résultats de validation.



Figure 6.9 Montage des extensomètres MTS sur le cylindre d'essais pour la détermination du module d'élasticité de la zone centrale

6.2.4 Comportement de la jauge à corde vibrante

Au total, trois essais de chargement uniaxial ont été effectués sur le cylindre d'essais. Les résultats suivants ont été obtenus au troisième chargement. Afin de vérifier la réponse sous faible charge, c'est à dire dans les conditions d'utilisation des cellules de mesure des déformations, la charge maximale appliquée sur le cylindre est de 4,5 MPa; ceci évite aussi tout développement de microfissures. Le graphique de la figure 6.10 montre les courbes contrainte-déformation du cylindre obtenues pour la montée en charge (aller) et la descente en charge (retour) avec les diverses jauges extensométriques.

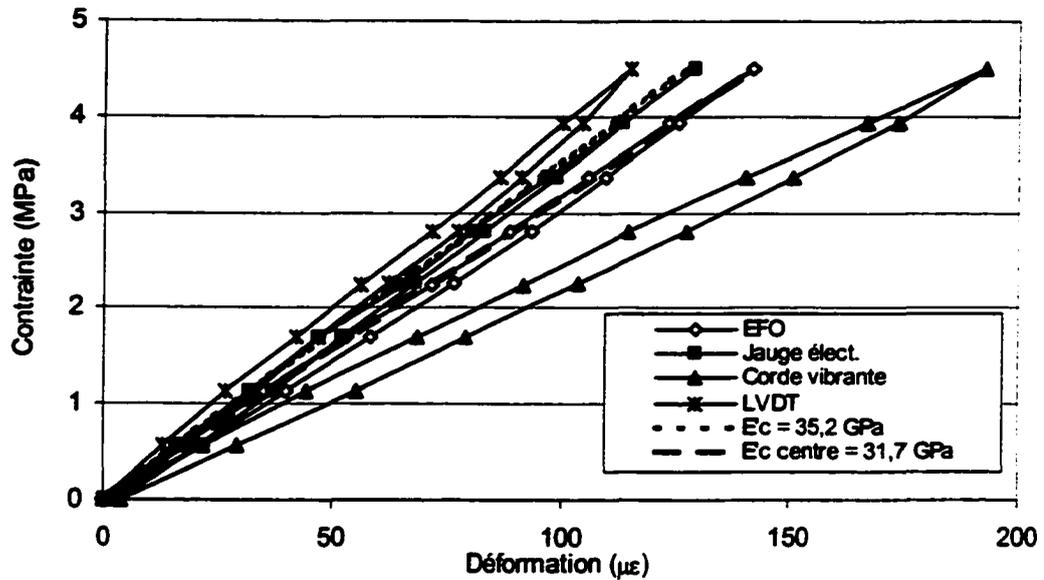


Figure 6.10 Courbes contrainte-déformation du cylindre à jauges parallèles obtenues avec les diverses jauges

Sur le graphique de la figure 6.10, la courbe contrainte-déformation du béton (loi de Hooke), calculée avec le module d'élasticité (35,2 GPa), est tracée ainsi que la courbe correspondant à l'élasticité de la zone centrale (31,7 GPa) du cylindre d'essais. Premièrement, on constate que les courbes correspondant au chargement et déchargement ne suivent pas le même cheminement. Ceci est lié, entre autres, à l'effet d'hystérésis du béton et aussi à l'hystérésis intrinsèque de chaque capteur. Le tableau 6.4 montre l'écart maximum enregistré entre la montée en charge et la descente en charge.

Tableau 6.4
Écart maximum des déformations mesurées entre la montée et la descente en charge du cylindre

Jauge	$\Delta\mu\epsilon$ maximum (chargement-déchargement)
Électrique	5
Fibre optique	5,3
LVDT	6,5
Corde vibrante	12,8

Les résultats obtenus avec les diverses jauges sont dans le même ordre de grandeur, à l'exception de ceux enregistrés avec la corde vibrante. Rappelons que le palier de chargement maximum correspond à une contrainte 4,5 MPa et les déformations sont relativement faibles à cette contrainte. Il est possible que la corde vibrante n'ait pas encore atteint sa plage de lecture optimale. En ce qui concerne les LVDT, les déformations mesurées sont inférieures à celles mesurées par la jauge électrique et la jauge à fibre optique. Tel que mentionné auparavant, la zone de mesure des LVDT est de 152 mm soit environ 75 mm de part et d'autre du centre du cylindre. La possibilité que la zone centrale du cylindre d'essais ait un module d'élasticité différent du reste du cylindre a été envisagée. À la suite de cette hypothèse, des essais de détermination du module élastique ont été réalisés en effectuant les mesures sur la zone centrale et un module de 31,7 GPa a été mesuré. La courbe contrainte-déformation calculée avec ce module (loi de Hooke) est tracée sur la figure 6.10. Cette dernière se confond avec la courbe contrainte-déformation mesurée avec la jauge à fibre optique pour la montée en charge.

Les déformations mesurées avec la jauge électrique s'accordent plutôt avec la courbe contrainte-déformation calculée avec le module d'élasticité obtenu sur les éprouvettes de béton (35,2 GPa). La jauge électrique est légèrement plus longue que les autres jauges, donc la rigidité du béton autour de la jauge n'est peut-être pas la même. Pour une charge de 4,5 MPa, la différence entre les mesures faites avec la jauge électrique et celles à fibre optique est d'environ 9%.

6.3 Expérimentations sur les cellules de mesure des déformations

Les objectifs du programme expérimental consistent à vérifier le comportement des cellules à l'aide d'essais de chargement uniaxial et triaxial et, dans le cas des essais triaxiaux, la conception d'un montage d'essais s'ajoute aux objectifs. En compression uniaxiale, les cellules ont été soumises à des contraintes allant de 1 à 15 MPa successivement. En chargement triaxial, des pressions de confinement allant jusqu'à 5 MPa ont pu être atteintes avec le montage développé ainsi qu'une contrainte axiale maximale de 5 MPa. Ces niveaux de contraintes triaxiales ont été dictés par ceux relativement faibles qui prévalent dans les barrages en béton comme mentionné au chapitre 2.

6.3.1 Compression uniaxiale

Chaque prototype de cellule de déformation a été soumis à des essais de compression uniaxiale. Ces essais ont été réalisés sur une presse à servo-contrôle en prenant soin de placer la jaquette de déformation munie de LVDT sur les cellules de déformation. La figure 6.11 montre le montage de la cellule à fibre optique au-dessus de laquelle un disque de béton a été installé pour permettre le passage des câbles. En plus de permettre de comparer les déformations enregistrées avec les divers capteurs des cellules, la jaquette de déformation est utile à la détermination des paramètres élastiques de chaque cellule. Les essais uniaxiaux présentés sont ceux réalisés alors que le béton des cellules de déformation est âgé de plus de deux ans. La résistance en compression du béton était de 68 MPa et les valeurs du module élastique et du coefficient de Poisson étaient respectivement de 42 GPa et de 0,23.

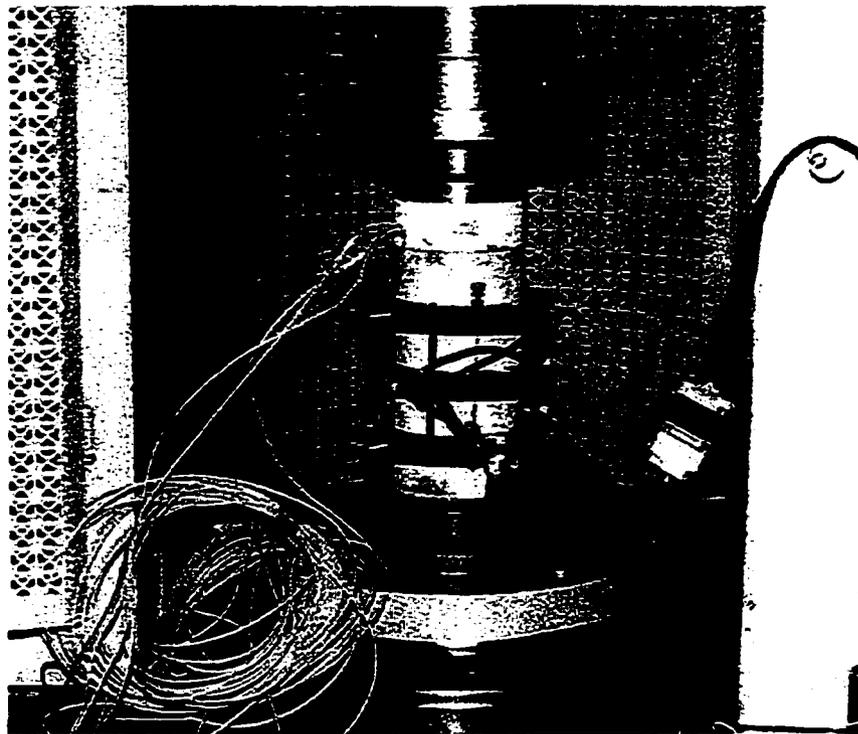


Figure 6.11 Montage pour les essais de compression uniaxiale sur la cellule à fibre optique

Le niveau de contrainte atteint est de 15 MPa avec des paliers de chargement de 1 MPa. Les résultats obtenus pour les deux prototypes sont présentés à la figure 6.12. Dans cette figure et les

figures subséquentes, une déformation positive représente une contraction tandis qu'une déformation négative indique une extension.

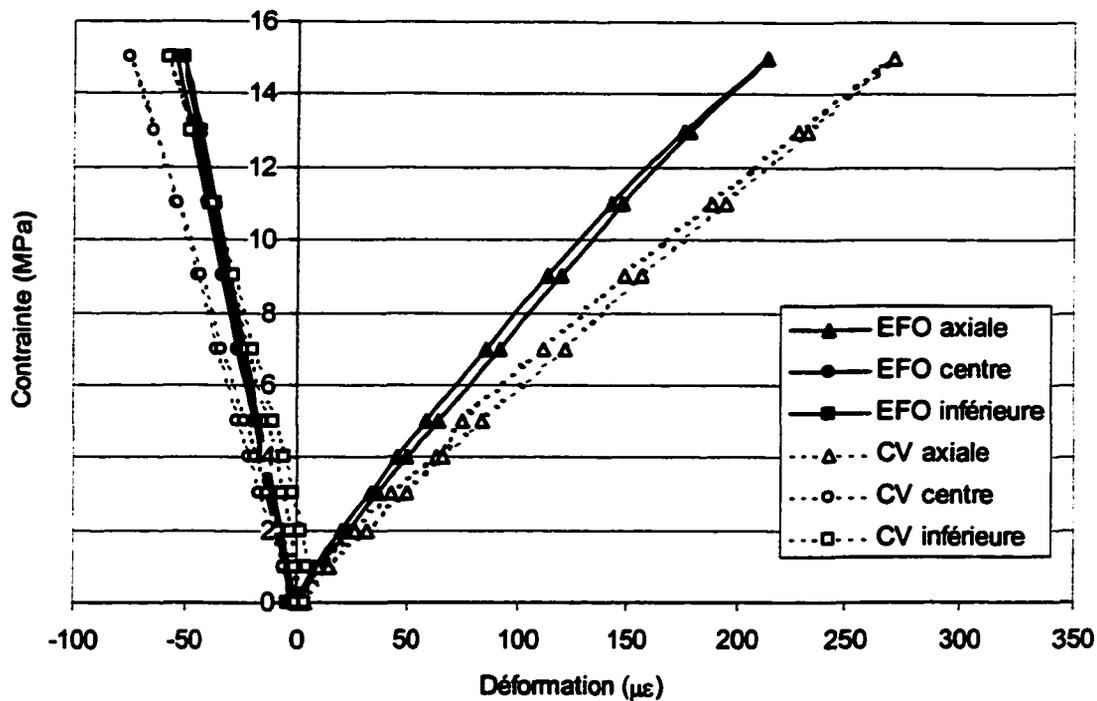


Figure 6.12 Courbes contrainte-déformation obtenues avec les cellules à fibres optiques et à cordes vibrantes

Une première analyse de ces résultats permet de montrer que le comportement des capteurs à corde vibrante est similaire à celui observé lors des essais de validation de ce type de jauge. Toutefois l'écart entre les données de la fibre optique et celles de la corde vibrante est inférieur dans le cas présent, soit $26 \mu\epsilon$ pour un niveau de contrainte de 4,5 MPa, comparativement à celui de $51 \mu\epsilon$ mesuré lors de la validation préliminaire présentée à la section 6.2.

Dans le but de comparer le niveau de déformation mesuré avec les jauges internes, les résultats obtenus avec chacune des jauges sont mis en parallèle avec les déformations mesurées avec les LVDT fixés sur la surface extérieure des cellules. Les figures 6.13 et 6.14 montrent les déformations axiales et diamétrales mesurées avec les jauges internes et les LVDT externes.

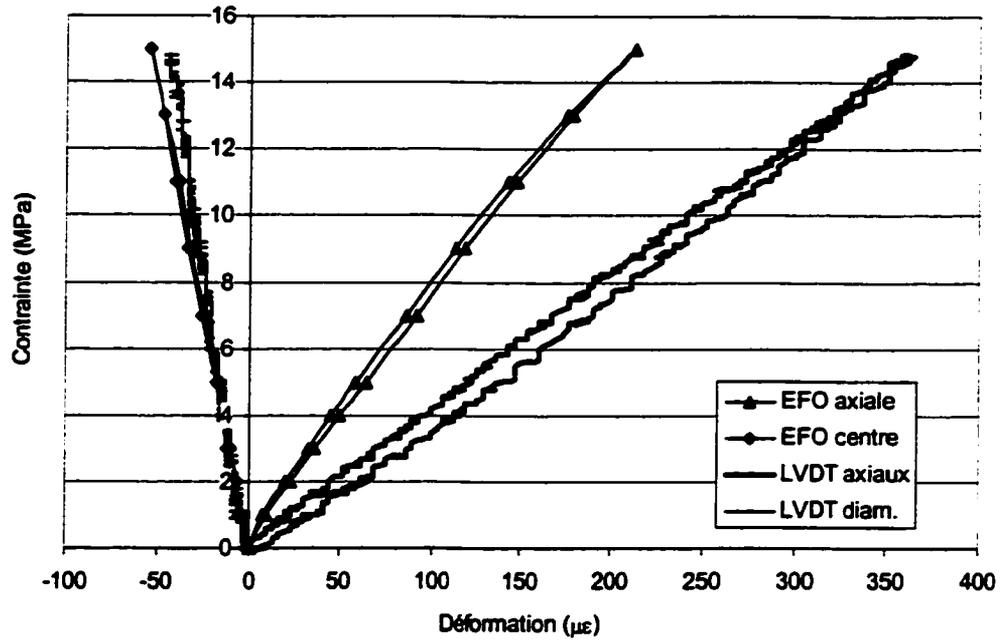


Figure 6.13 Mesure des déformations effectuées avec les jauges EFO internes et les LVDT externes

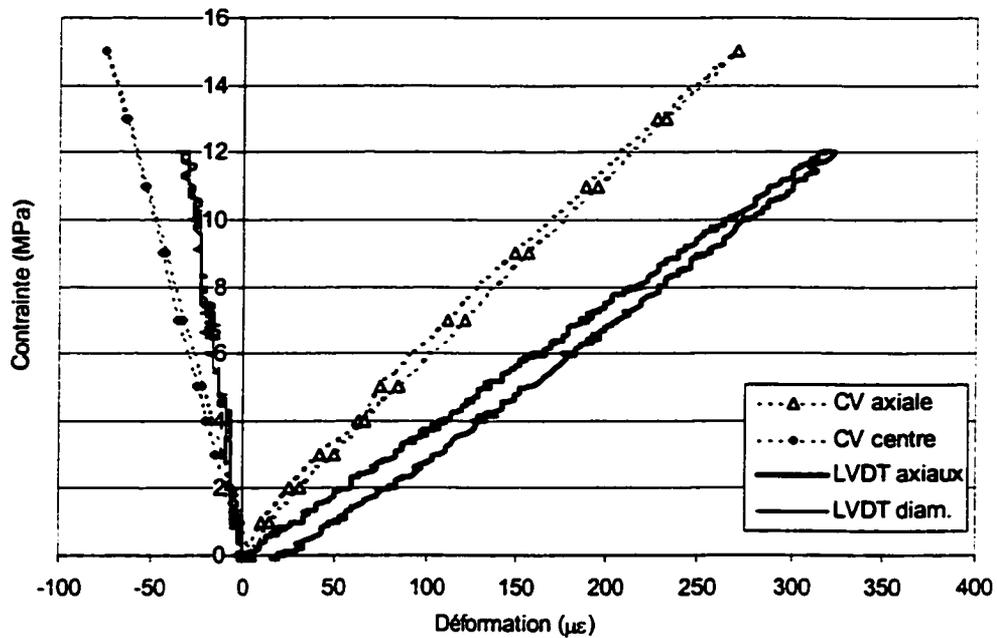


Figure 6.14 Mesure des déformations effectuées avec les jauges à corde vibrante internes et les LVDT externes

Pour les deux cellules, les déformations mesurées avec les jauges axiales enfouies sont plus faibles que celles mesurées avec les LVDT placés en surface. Les déformations diamétrales, mesurées au centre des cellules, sont similaires pour les deux types de capteurs; il faut tenir compte de l'écart observé avec la corde vibrante. Dans le cas de la cellule à fibre optique, la jauge diamétrale inférieure se conforme bien au comportement en extension détecté avec la jauge diamétrale du centre. Pour la cellule à corde vibrante, une déformation plus faible est enregistrée par le capteur à corde vibrante inférieur comparativement à celui du centre.

Les valeurs obtenues avec les LVDT externes permettent de déterminer les paramètres élastiques de chaque cellule soit $E'_c = 42$ GPa et $\nu = 0,23$ pour la cellule à fibre optique, et $E'_c = 40$ GPa et $\nu = 0,21$ pour celle à corde vibrante. Ces valeurs sont du même ordre que celles obtenues pour les éprouvettes de béton ayant servi à fabriquer les cellules. Les cellules mêmes ne semblent pas plus rigides étant donné la présence de capteurs. À la lumière des résultats issus des essais uniaxiaux, il est possible de dire que les capteurs à fibre optique et à corde vibrante permettent la mesure des déformations internes du béton. Toutefois, l'écart important entre les résultats des déformations internes, principalement les déformations axiales, laisse croire au développement d'un champ de déformation interne plus complexe. Les mesures réalisées lors d'essais triaxiaux effectués sur les cellules de déformation permettront de compléter ces résultats.

6.3.2 Compression triaxiale

Les sections suivantes portent sur la description du montage expérimental développé pour effectuer les essais triaxiaux sur les prototypes de cellules de déformation ainsi que sur les résultats obtenus.

Description du montage expérimental

Le montage pour l'essai de compression triaxiale a comme noyau une cellule triaxiale de grand diamètre montée sur une presse rigide. L'objectif pour cet essai était d'atteindre une pression de confinement de 5 MPa. La figure 6.15 montre une partie du montage expérimental, soit une

cellule triaxiale de grand diamètre installée sur une presse MTS asservie triaxial tandis que le schéma de la figure 6.16 présente le montage expérimental pour l'essai. Le système permet de maintenir une pression de confinement allant jusqu'à environ 7 MPa dans la cellule triaxiale. Mentionnons que la montée de la pression de confinement est faite à la suite de l'application d'une contrainte axiale initiale équivalente. L'un des problèmes à contourner était d'arriver à sortir les câbles des différentes jauges tout en conservant l'étanchéité de la cellule triaxiale. Bien que la limite du montage expérimental soit de 7 MPa, il y avait fuite dans le système, notamment au point de sortie des câbles, à partir de 5 MPa de confinement.



Figure 6.15 Cellule triaxiale installée sur la presse MTS du Laboratoire

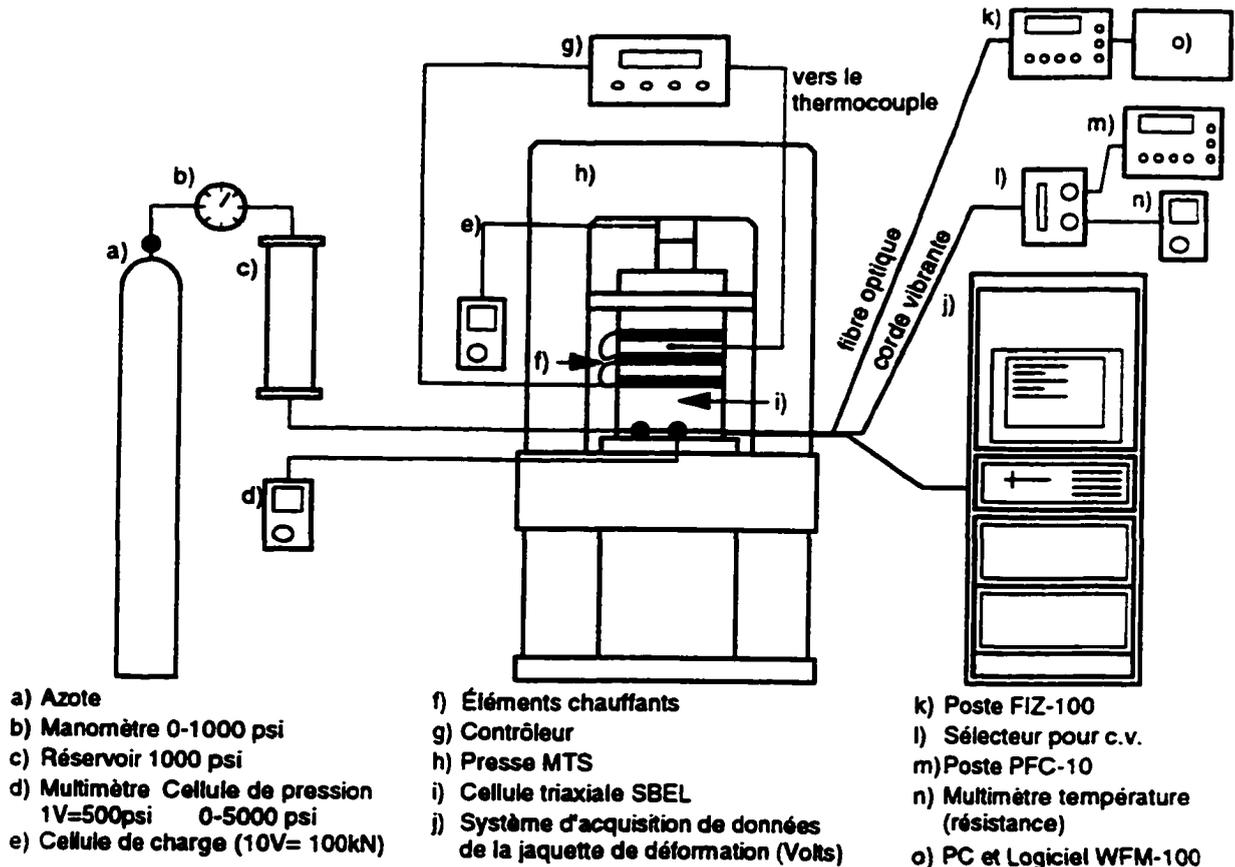


Figure 6.16 Schéma du montage expérimental pour les essais triaxiaux

Afin d'assurer l'étanchéité, le montage pour l'essai triaxial nécessite l'installation d'une membrane de latex sur la cellule de déformation en béton en plus de joints toriques aux extrémités. Un plateau en acier, spécialement conçu pour le passage des câbles, est disposé sur la partie supérieure de la cellule en béton avec les tubes servant à acheminer les fils à travers la base de la cellule triaxiale (Fig. 6.17). À l'intérieur, la cellule de déformation en béton est disposée sur le plateau et les fils des jauges sortent par la base de la cellule triaxiale; l'étanchéité est assurée par un système d'écrous étanche. La figure 6.18 montre la cellule à corde vibrante; une installation similaire a été réalisée pour la cellule à fibre optique. Comparativement aux jauges à corde vibrante, les jauges à fibre optique possèdent des connecteurs de type ST d'environ 8 mm de diamètre qui permettent de les brancher au poste de lecture. Afin de pouvoir traverser la base de la cellule, ces derniers ont dû être coupés et remplacés par des adaptateurs de fibre à nu.

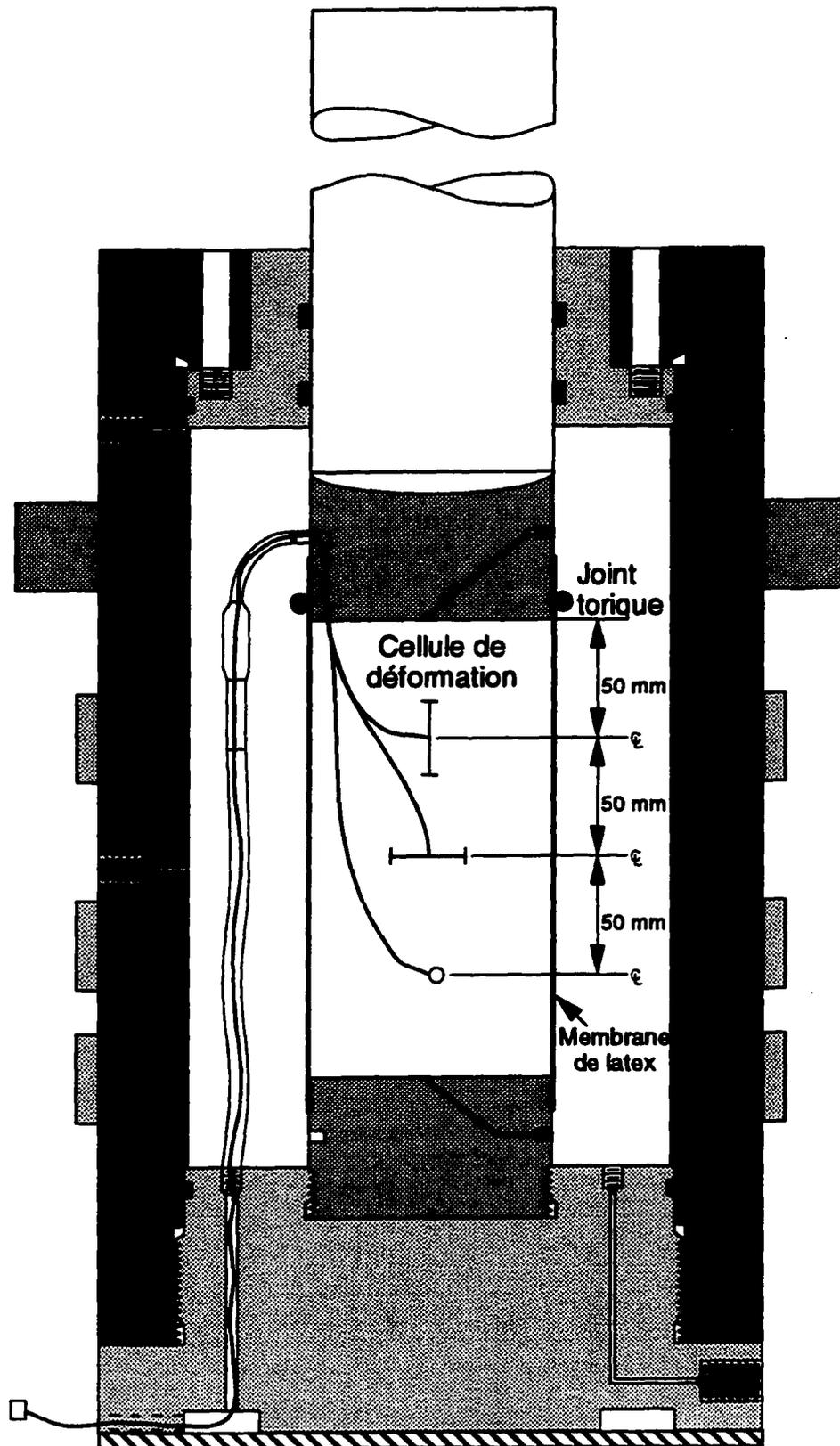


Figure 6.17 Schéma de l'assemblage de la cellule triaxiale intégrant une cellule de déformation en béton



Figure 6.18 Cellule de déformation à corde vibrante disposée sur la base de la cellule triaxiale

Résultats des essais triaxiaux

Les résultats des essais triaxiaux effectués sur les prototypes de cellules de déformation sont présentés aux figures 6.19, 6.20, 6.21. La figure 6.19 montre la courbe contrainte-déformation obtenue avec les mesures des capteurs à fibre optique ou à corde vibrante axiaux (partie supérieure des cellules de déformation). Les différentes courbes de cette figure représentent chaque niveau de pression de confinement à partir de $\sigma_1 = \sigma_3 = 1$ MPa. La procédure d'essai consiste à appliquer la pression de confinement après avoir augmenté la contrainte axiale afin de ne pas briser la cellule de déformation. Pour cette raison, il y a moins de données à enregistrer à mesure que le niveau de confinement augmente. La figure 6.20 présente les données obtenues avec les jauges diamétrales du centre tandis que la figure 6.21 montre les données des jauges diamétrales localisées à la base des prototypes.

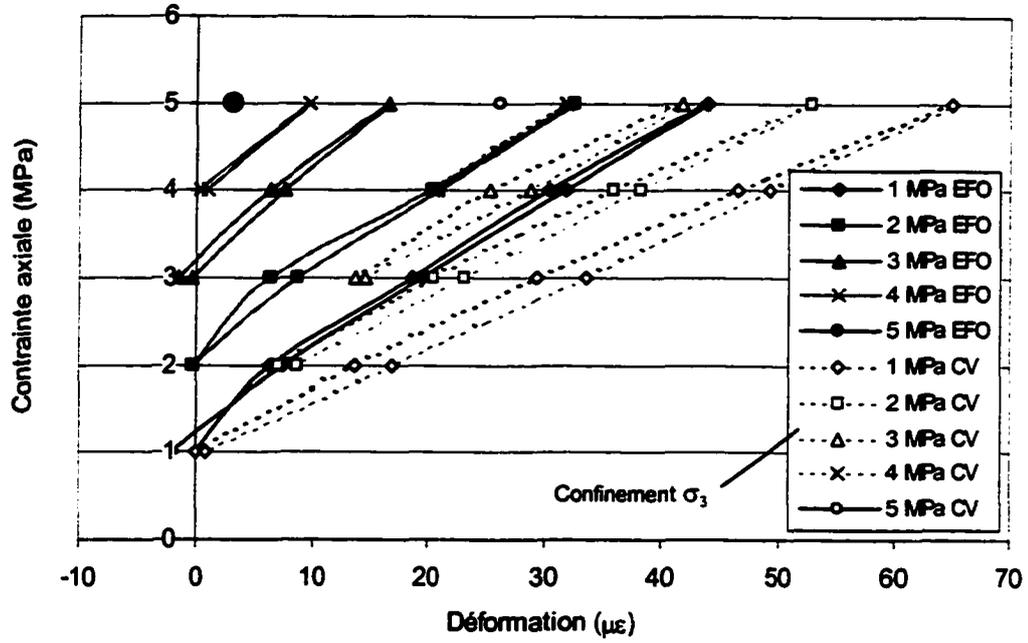


Figure 6.19 Déformations mesurées avec les jauges axiales dans la partie supérieure des prototypes

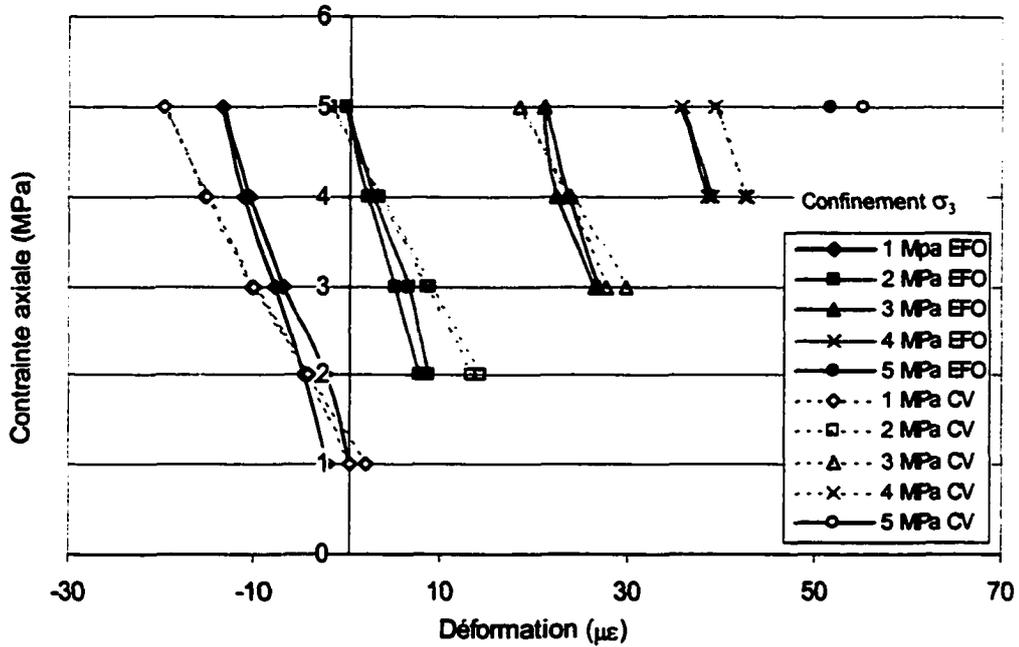


Figure 6.20 Déformations mesurées avec les jauges diamétrales au centre des prototypes

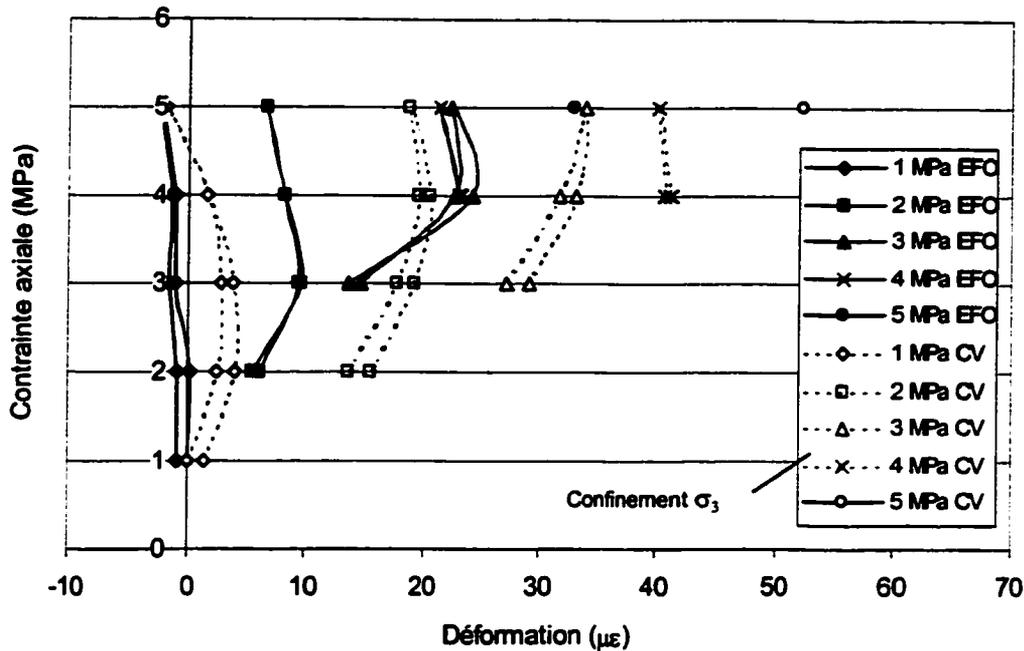


Figure 6.21 Déformations mesurées avec les jauges diamétrales dans la partie inférieure des prototypes

Le comportement des prototypes sous sollicitations triaxiales est sensiblement du même ordre bien que les niveaux de déformation enregistrés avec les deux cellules diffèrent légèrement. Le comportement anticipé, soit l'augmentation graduelle des déformations avec la contrainte est vérifié. Les graphiques précédents montrent que les réponses en déformation des deux prototypes s'accordent pour les déformations centrales mais que des différences notables sont observées entre les capteurs axiaux et diamétraux inférieurs. En effet, pour chaque palier de chargement, la déformation de la jauge axiale à fibre optique s'écarte peu de sa valeur initiale. Elle passe de -1 à $4 \mu\epsilon$ environ comparativement à la jauge axiale à corde vibrante qui, elle, passe graduellement de 0 à $30 \mu\epsilon$ environ. Par ailleurs, bien que le niveau de déformation enregistré soit différent, le comportement des jauges diamétrales inférieures est similaire. En effet, une forme incurvée des courbes contrainte-déformation est visible pour les paliers de chargement inférieurs à 3 MPa. Une anomalie avec la jauge à corde vibrante diamétrale inférieure est aussi détectée au palier 4 MPa et elle est certainement due à une baisse de la pression de confinement alors que s'amorçait une fuite dans le système.

6.4 Analyse du comportement des prototypes

Pour l'analyse des performances respectives des prototypes, on compare les résultats obtenus pour chacun et aussi avec une modélisation numérique relativement simple qui a été effectuée afin de situer les résultats par rapport à un comportement idéalisé. En effet, un modèle de cylindre soumis à diverses contraintes axiales et pressions de confinement, correspondant à celles employées dans les essais mécaniques, a été réalisé. Les résultats des essais triaxiaux sont comparés en mettant en graphique la contrainte déviatorique ($\sigma_1 - \sigma_3$) en fonction de la déformation (Fig. 6.22). Pour construire un tel graphique, on fait la moyenne des valeurs de déformation obtenues pour un déviateur donné et cela, pour chaque jauge de déformation. De cette façon, on est en mesure de comparer la réponse des cellules en fonction de la variation $\sigma_1 - \sigma_3$ auxquelles elles sont soumises. Le modèle d'éléments finis préparé est similaire à celui présenté au chapitre 4. Il s'agit d'un modèle axisymétrique, représentant un cylindre de béton fait de 4556 éléments quadratiques à huit nœuds. Les conditions limites sont définies de manière à simuler diverses sollicitations subies par les cellules de déformation. Des contraintes axiales et des pressions de confinement variant de 1 à 5 MPa ont été appliquées au modèle et les résultats sont reportés sur la figure 6.22.

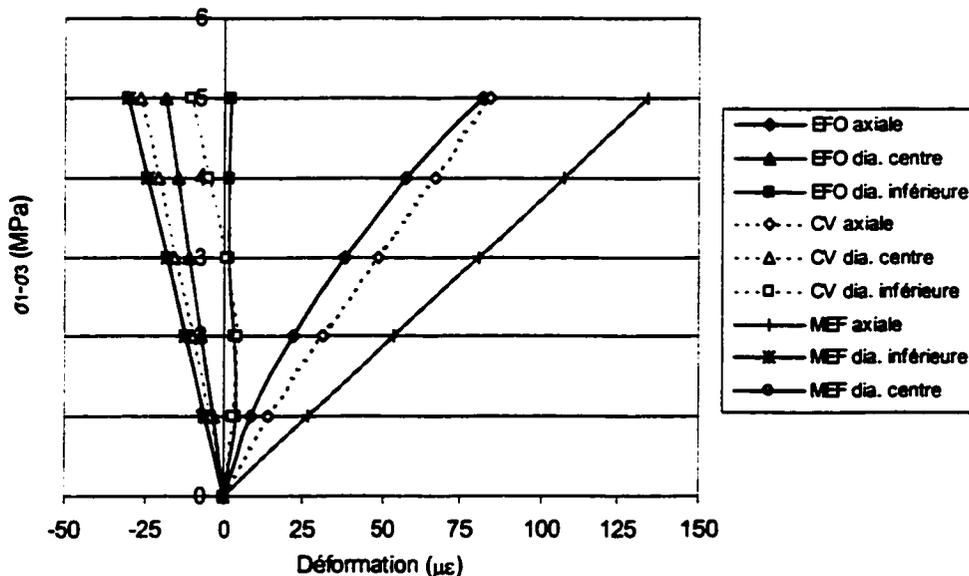


Figure 6.22 Contrainte déviatorique ($\sigma_1 - \sigma_3$) en fonction de la déformation pour les deux prototypes de cellules de déformation et résultats des simulations numériques.

L'analyse de ce graphique permet de dire que la réponse des deux prototypes est similaire. La cellule à fibre optique montre une déformation légèrement inférieure à la cellule à corde vibrante. Rappelons les résultats présentés à la sections 6.2, ainsi que ceux de l'étude comparative du chapitre 4, à partir desquels il est démontré que les déformations enregistrées avec les cordes vibrantes sont inférieures à celles mesurées avec la jauge EFO. De plus, on pouvait s'attendre, intuitivement, à ce que la jauge axiale (ϵ_x) présente un comportement en compression et qu'une dilatation, du même ordre de grandeur, soit mesurée avec les deux jauges diamétrales (ϵ_r). Il s'agit bien du comportement observé à l'exception de la jauge diamétrale inférieure avec laquelle on mesure une faible compression atteignant $4 \mu\epsilon$ pour les deux prototypes de cellules. Cependant, pour la cellule à corde vibrante, une dilatation de $10 \mu\epsilon$ est mesurée avec cette même jauge au-delà du palier $\sigma_1 - \sigma_3 = 3$.

Les résultats obtenus avec le modèle numérique montre que les déformations ϵ_x au centre et à la base du cylindre sont identiques, ce qui n'est pas le cas avec les prototypes de cellules de déformation. Quant aux jauges axiales et diamétrales inférieures, les résultats expérimentaux s'écartent respectivement d'environ 50 et 30 $\mu\epsilon$. Afin d'expliquer cet écart notable, divers aspects, liés à la conception et à la procédure d'essai méritent un attention particulière, notamment la localisation des jauges dans les cellules de déformation, les dimensions des prototypes et la rigidité des diverses jauges.

En ce qui a trait à la localisation des jauges dans la cellule de déformation, le centre des jauges axiales et diamétrales inférieures est localisé à 50 mm des extrémités dans une zone où le champ de déformation est modifié par les effets de friction entre les plateaux rigides de la presse. Aussi, l'extrémité de la jauge axiale (tête) et une partie de l'arbre central sont entièrement inclus dans ce cône de friction. L'analyse du modèle numérique montre que des contraintes de compression et de cisaillement se développent aux extrémités du cylindre. Cependant, l'importance des contraintes σ_{xx} et σ_{zz} développées ne permet pas d'expliquer l'augmentation significative de la rigidité à ces positions. La présence de contraintes de cisaillement combinées à la friction interne dans le béton, qui n'est d'ailleurs pas prise en compte dans le modèle numérique, contribue certainement au développement d'un champ de déformation complexe aux extrémités.

Aussi, les jauges à fibre optique et à corde vibrantes utilisées sont de conception différente. En effet, la jauge EFO est fabriquée d'une seule pièce d'acier comparativement à celle à corde vibrante qui est dite souple grâce à un ressort disposé sur l'arbre central. Ces aspects liés aux jauges permettent d'émettre deux hypothèses quant à la réponse des deux prototypes. Les résultats des essais triaxiaux laissent voir que la jauge axiale à fibre optique se déforme moins que celle à corde vibrante bien que toutes les deux soient localisées dans le cône de friction supérieur. Ceci dit, le fait que la jauge à corde vibrante soit plus souple permet de pallier en partie à cet état de confinement. Il a été montré au chapitre 4 et à la section 6.2 que la réponse en déformation des jauges EFO enfouies dans le béton est excellente. Cependant, la présence de trois jauges rigides très près l'une de l'autre, comme dans la cellule à fibre optique, contribue sans nul doute à une augmentation de la rigidité du cœur de la cellule. Au chapitre 4, l'augmentation de 1 GPa, due à la présence de la jauge EFO avait été détectée. Dans le cas présent, les jauges EFO sont beaucoup plus petites et les LVDT externes restent alors insensibles à cet effet. Ce phénomène doit aussi s'observer avec les jauges à corde vibrante mais, étant donné leur souplesse, il est certainement moins important.

Le développement de cellules de mesure des déformations de petite taille est, à notre avis, possible. Les résultats présentés ici démontrent que les méthodes de validation utilisées ne sont pas tout à fait compatibles avec la forme des prototypes construits. Les dimensions pourraient être adaptées afin de permettre une validation valable en laboratoire. Aussi, les capteurs à fibre optique répondent à nos attentes en termes de réponse en déformation, de taille, de robustesse et de facilité d'utilisation. Toutefois, si des capteurs à fibre optique plus souples étaient développés, leur utilisation pour la conception d'une cellule de déformation un peu plus longue permettrait de limiter, voire peut-être d'éliminer les modifications importantes du champ de déformation interne de la cellule.

6.5 Acquisition de données et réseau de cellules

Au fil des travaux sur les cellules de déformation, l'acquisition des données en temps réel de plusieurs cellules de déformation est un thème qui a mérité une attention particulière. Les cellules de déformation ont pour objectif de suivre en temps réel les déformations afin de

détecter immédiatement toute anomalie de comportement. Cela dit, la programmation d'un système d'alarme compatible avec les cordes vibrantes a été entamé et est présenté à l'annexe B. Ce système fonctionne actuellement avec le CIUS mais il pourrait être adapté à la cellule de déformation à corde vibrante présentée dans ce chapitre. Quant à la cellule à fibre optique, la programmation d'un logiciel de suivi et de détection d'anomalies de déformation a été initiée. Une première approche a été réalisée avec l'essai de deux langages de programmation soit VisualBasic et LabVIEW. Actuellement, la communication entre les unités de lecture et l'ordinateur a été effectuée, ce qui permet d'affirmer que le développement de logiciels de suivi compatibles avec la technologie à fibre optique est aisément envisageable.

CONCLUSION

Le présent travail de recherche est en lien étroit avec l'évolution récente des technologies métrologiques, plus précisément avec l'arrivée des capteurs à fibre optique appliqués à l'instrumentation géotechnique et structurale. De plus, la recherche cadre aussi avec la suite du développement du Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS). Les objectifs de recherche étaient axés sur l'analyse du comportement des jauges à fibre optique de type Fabry-Pérot pour l'instrumentation du béton et la miniaturisation du CIUS. Ce dernier aspect se concrétise d'ailleurs par le développement de prototypes de cellules de mesure des déformations internes du béton.

Les conclusions de cette recherche peuvent être regroupées sous trois thèmes particuliers, soit la validité des capteurs à fibre optique Fabry-Pérot pour la mesure des déformations internes du béton, l'applicabilité de ces capteurs pour l'instrumentation de structures en béton et la possibilité de développer une cellule de mesure des déformations miniaturisée à fibre optique et à corde vibrante. L'étude de la réponse des capteurs à fibre optique Fabry-Pérot EFO enfouis dans le béton a permis de démontrer que:

- théoriquement, la perturbation du champ de déformation par la présence de la jauge se concentre aux extrémités de celle-ci et l'influence sur la mesure des déformations vis-à-vis du centre de la jauge est négligeable, soit moins de 2% pour des bétons avec des modules élastiques variant de 30 à 80 GPa.
- un cylindre de béton contenant ce type de jauge disposée parallèlement à son axe longitudinal voit sa rigidité (E_y) augmentée d'environ 1 GPa;

-
- l'effet de la variation de la température est minime sur le résultat mesuré soit de l'ordre de $1 \mu\epsilon/^{\circ}\text{C}$;
 - dans le cas de chargement rapide, à charge faible et élevée (0,2 à 0,4 f'c), la jauge à fibre optique donne une valeur plus exacte que la technologie conventionnelle à corde vibrante;
 - les sollicitations cycliques sont bien détectées dans la plage de fréquences étudiée soit 1 à 5 Hz.
 - la jauge EFO offre, à court terme, une réponse comparable à une jauge électrique pour enfouissement mais la jauge EFO a l'avantage d'être un capteur absolu.

Quant à l'applicabilité de cette technologie en génie civil, les applications menées en chantier, notamment à la passerelle piétonnière de Sherbrooke et au stationnement Webster montrent que ces jauges:

- sont assez robustes pour être manipulées en chantier bien que certaines précautions doivent être prises lors de la manipulation des câbles et des connecteurs car les conditions de chantier peuvent ne pas être propices à la réparation immédiate;
- offrent des avantages techniques comme la possibilité d'installer rapidement, en utilisant des connecteurs mécaniques, des rallonges afin d'acheminer les fils sur de grandes distances sans modification notable du signal optique;
- ont été performantes pour le suivi des déformations d'éléments structuraux d'une construction récente ainsi que dans le cas d'une réhabilitation utilisant le béton projeté;
- sont toujours fonctionnelles sur les sites après une période de près de trois ans et permettent le suivi des déformations des éléments structuraux;
- les récents systèmes d'acquisition de données laissent entrevoir d'énormes possibilités quant au suivi en temps réel et à distance.

En ce qui a trait à l'instrumentation des barrages, les conclusions tout juste mentionnées s'appliquent bien sûr à ce type de structure. Aussi, le développement d'instruments à fibre optique spécifiquement dédiés à l'instrumentation des barrages peut être envisagé. Tel que montré dans la rétrospective sur le CIUS, cet appareil permet le suivi à long terme des

contraintes et déformations des barrages ainsi que de diverses structures. Les performances de longévité et de sensibilité du CIUS ont fait que le concept a été conservé pour la conception d'une cellule de mesure à fibre optique pour le suivi des déformations internes du béton. Les résultats obtenus montrent que ce dernier concept est valable mais certaines améliorations devront être apportées dans les travaux futurs.

Les activités de recherche et de développement des cellules de mesure des déformations internes du béton réalisées dans le cadre de ces travaux conduisent aux observations suivantes:

- l'intégration de capteurs à fibre optique EFO rigide à proximité les uns des autres et disposés de surcroît orthogonalement perturbe localement le champ de déformation dans la cellule de béton menant à une augmentation de la rigidité du milieu;
- la dimension réduite des prototypes proposés les rend incompatibles avec les méthodes d'essais usuelles en raison du développement de contraintes aux limites des cellules;
- le montage d'essais développé permettant de tester les cellules sous sollicitations triaxiales permet d'atteindre 5 MPa en confinement; ce montage pourrait, par ailleurs, subir certaines modifications afin d'obtenir une meilleure étanchéité pour des pressions de confinement élevées;
- l'utilisation des capteurs à corde vibrante de taille réduite reste applicable mais un facteur de correction ou d'étalonnage devra être déterminé pour rendre compte des déformations exactes;
- une cellule de déformation plus longue permettant d'espacer les capteurs en plus de les éloigner des extrémités permettrait d'améliorer la réponse en déformation des cellules de mesure des déformations;
- le développement de capteurs à fibre optique plus souples pour le béton serait, de toute évidence, souhaitable pour cette application;
- l'évolution de la rigidité du béton utilisé pour la fabrication des cellules indique que dans le cas d'une installation sur site, la cellule à être installée devrait l'être après huit mois de mûrissement; ceci afin d'éviter les déformations parasites liées aux transformations internes du béton.

De toutes ces considérations, il ressort que la technologie à fibre optique étudiée est sans contredit applicable au suivi des déformations internes du béton. Aussi, en ce qui concerne les cellules de mesure des déformations, les résultats obtenus combinés avec les améliorations proposées, rendent le développement de cellule de taille réduite tout à fait possible.

Somme toute, cette nouvelle technologie laisse place à d'innombrables perspectives de recherche. Il est évidemment souhaité que les travaux présentés ici soient poursuivis. Il importe donc de signaler certains axes de recherche jugés pertinents pour de nouvelles études, notamment sur le capteur EFO:

- l'étude du comportement thermique dans des béton avec des CDT variés;
- analyse du comportement sous sollicitations dynamiques à des fréquences supérieures à 10 Hz;
- le développement d'une jauge avec un corps plus souple que l'acier, éventuellement en polymère ou composite.

Pour ce qui est de la cellule de mesure des déformations internes à fibre optique, les sujets suivants pourront être abordés:

- la fabrication d'une cellule de géométrie différente;
- la modélisation en 3D de la cellule de déformation afin de mieux comprendre l'interaction entre les divers capteurs;
- la validation en laboratoire de la cellule de déformation noyée un élément (bloc) de béton soumis à diverses sollicitations mécaniques et thermiques;
- l'installation dans une structure réelle;
- le développement d'un logiciel de suivi en temps réel dédié au suivi d'un réseau de cellules;
- l'utilisation des mesures de déformation, effectuées avec un réseau de cellules de mesure, dans un modèle numérique permettant de calculer le champ de déformation dans un plan de la structure.

BIBLIOGRAPHIE

- ADELIN, R., LACHEMI, M., BLAIS, P. (1998) *Design and behaviour of the Sherbrooke footbridge*, International Symposium on High Performance and Reactive Powder Concretes, Sherbrooke, Québec, Canada, August 1998, Vol. 3, p. 89-97.
- AL-CHALABI, M., HUANG, C.L. (1974). *Stress Distribution Within Circular Cylinders in Compression*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 11, no.2, p. 46-56.
- AMADEI, B., STEPHANSSON, O. (1997) *Rock Stress and its Measurement*, Chapman & Hall, London, 490 p.
- AMBARDAR, A. (1995) *Analog and Digital Signal Processing*, PWS Publishing Company, Boston, USA, 700 p.
- ANSARI, F. (1998) *Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges*, Technomic Publishing Co., International Workshop, May 3-6, 1998, Newark, New Jersey, USA, 267 p.
- ASM International. (1990) *Metal Handbook 10th ed.*, Vol. 1 – Properties and Selection: Iron, Steels, and High-Performance Alloys, USA, 1063 p.
- BAALBAKI, W., AÏTCIN, P.C., BALLIVY, G. (1992). *On Predicting Modulus of Elasticity of High-Strength Concrete*. ACI Material Journal, vol. 89, no.5, p. 517-520.
- BALLIVY, G., BENMOKRANE, B. (1986) *Research and development of a technique of installing strain gauges in an operating concrete dam in India - Idukki II Hydroelectric Projects*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Sherbrooke, Québec, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke.
- BALLIVY, G., BENMOKRANE, B., POULIN, R., SALEH, K. (1990) *Une nouvelle technique d'inclusion pour la mesure à long terme des déformations dans les barrages en béton*, Revue canadienne de génie civil, vol. 17, no. 6, p. 919-930.

-
- BALLIVY, G., BOIS, A.P., SALEH, K., RIVEST, M. (1995) *Monitoring the stresses induced by AAR in the Beauharnois concrete gravity dam*, Second International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams, United State Committee on Large Dams (USCOLD), Chattanooga, Tennessee, p. 343-357.
- BARBACHI, M. (1995) *Comportement de capteurs à fibres optiques noyés dans un matériau diversement sollicité – Applications en génie civil*, Thèse de doctorat, École nationale des ponts et chaussées, 166 p.
- BELLEVILLE, C., DUPLAIN, G. (1993) *White-light interferometric multimode fiber strain sensor*, Optics Letters, vol. 18, no. 1, p. 78-80.
- BELLIER, J. (1982) *Les barrages*, Presses Universitaires de France, coll. Que sais-je, Paris, 127 p.
- BHATTI, M.A., TENG, S., ASHTON, W.D. (1994) *Simplified Finite Element Analysis of a Cracked Concrete Arch Dam*, Concrete International, vol. 16, no. 1, p. 53-57.
- BOBY, J., TERAL, S., CAUSSIGNAC, J.M., SIFFERT, M. (1994) *Weighing of vehicles in motion using fiber optic sensors*, Measurement and control, Vol. 26, no. 2, p. 45-47.
- BOIS, A.P. (1995) *Auscultation des ouvrages en rocher ou en béton à l'aide du cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS)*, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, 382 p.
- BOIS, A.P., BALLIVY, G., SALEH, K. (1994) *Monitoring stress changes in three dimensions using a solid cylindrical cell*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 31, no. 6, p. 707-718.
- BORDES, J.L., DEBREUILLE, P.J. (1985) *Some facts about long-term reliability of vibrating wire instruments*, National Research Council, Transportation Research Board Symposium on Reliability of Geotechnical instrumentation, Washington, 16 p.
- BOURGIN, A. (1955) *Cours de calcul de barrages*, Éditions Eyrolles, Paris, 394 p.
- CANADIAN DAM SAFETY ASSOCIATION (CDSA) (1995) *Dam Safety Guidelines*, p. 3.1-3.9.
- CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION (CSA) (1991) *Risk analysis Requirements and Guidelines - CAN/CSA-Q634-91*, Ontario, Canada, 42 p.
- CAUSSIGNAC, J.M., CHABERT, A., MOREL, G., ROGER, P., SEANTIER, J. (1992) *Bearings of a bridge fitted with load measuring devices based on optical fiber technology*, First European Conference on Smart Structures and Materials, SPIE, p. 207-210.

- CHEN, B., MAHER, M.H., NAWY, E.G. (1994) *Fiber-optic Bragg grating sensor for nondestructive evaluation of composite beams*, Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers, vol. 120, no. 12, p. 3456-3470.
- CHEN, X., ANSARI, F. (1998) *Pulse-echo fiber optic sensor for nondestructive evaluation of concrete bridges*, Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges, International Workshop, May 3-6, 1998, Newark, New Jersey, USA, Technomic Publishing Co., p. 136-147.
- CHOQUET, P., LEROUX, R. (1995) *A Fabry-Perot fiber optic strain gauge - Application to geotechnical and structural instrumentation*, Geotechnical Instrumentation for Field Measurements, Cocoa Beach, Florida,
- CHOQUET, P., LEROUX, R., JUNEAU, F. (1997) *New Fabry-Perot fiber optic sensors for structural and geotechnical monitoring applications*, Transportation Research Record, no. 1596, p. 39-44.
- CHOUNARD, L.E., BENNET, D.W., FEKNOUS, N. (1995) *Statistical analysis of monitoring data for concrete arch dams*, Journal of Performance of Constructed Facilities, vol. 9, no. 4, p. 286-301.
- CIGB (1988) *Auscultation des barrages - Considérations générales*, CIGB, bulletin 60, Paris, 69 p.
- CIGB (1989) *Auscultation des barrages et de leurs fondations - Techniques actuelles*, CIGB, bulletin 68, Paris, 69 p.
- CIGB (1992) *Amélioration de l'auscultation des barrages - Recommandations et exemples*, CIGB, bulletin 87, Paris, 119 p.
- CIGB (1995) *Ruptures de barrages - analyse statistique*, CIGB, Bulletin 99, Paris, 73 p.
- CLUB FIBRES OPTIQUES PLASTIQUES (1994) *Les fibres optiques plastiques - Mise en œuvre et applications*, Masson, Paris, 164 p.
- COTTON, F.A., WILKINSON, G. (1972) *Advance Inorganic Chemistry - A Comprehensive Text*, Interscience Publisher, New York, 1145 p.
- CPCA. (1984) *Dosage et contrôle des mélanges de béton*, Canadian Portland Cement Association.
- DALLAIRE, E., AÏTCIN, P.-C., LACHEMI, M. (1998) *High Performance Powder*, Civil Engineering, vol. 68, no.1, p. 48-51.

-
- DANAY, A., ADEGHE, L., DOBROWOLSKI, E. (1994) *Design, Installation & Automatic Monitoring of Structural and Equipment Instrumentation for Concrete Growth Mitigation Project at Saunders GS*, American Power Conference - Proceedings of the 56th Annual American Power Conference, Chicago, USA, vol. 56, no. 1, p. 41-46.
- DANAY, A., ADEGHE, L., HINDY, A. (1993) *Diagnosis of the cause of progressive concrete deformations at saunders dam*, Concrete International, Vol. 15, no. 9, p. 25-33.
- DANILEVSKY, A. (1993) *Dam safety legislation in the USA*, Water Power and Dam Construction, vol. 45, no. 8, p. 24-27.
- DASCAL, O., SUPERINA, Z. (1985) *Fiabilité des instruments à corde vibrante pour l'auscultation des barrages*, Commission Internationale des Grands Barrages - Quinzième Congrès des Grands Barrages, vol. I, Question 56, p. 125-151.
- DAVIES, C.M., CAROME, E.F., WEIK, M.H., EZEKIEL, S., EINZIG, R.E. (1986) *Fiber Optic Sensor Technology Handbook*, Optical Technologies, USA, (6 chapitres) p.
- DEGOUTTE, G. (1993) *Auscultation des barrages*, Sécurité des barrages en service, CEMAGREF-ENGREF, Montpellier, p. 49-52.
- DUGAT, J., ROUX, N., BERNIER, G. (1995). *Étude expérimentale de la déformation sous contrainte et du comportement à la rupture du béton de poudres réactives (BPR)*. Annales de l'Institut technique du bâtiment et des travaux publics, N° 532, p. 112-121.
- DUNNICLIFF, J. (1988) *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance*, John Wiley & Sons, New York, 577 p.
- DUSCHA, L.A., JANSEN, R.B. (1988) *Surveillance - Basic considerations*, Advanced Dam Engineering for Design, Construction and Rehabilitation, Van Nostrand Reinhold, New York, p. 777-778.
- ELLINGWOOD, B., COROTIS, R.B., BOLAND, J., JONES, N.P. (1993) *Assessing cost of dam failure*, Journal of Water Resources Planning and Management, vol. 119, no. 1, p. 64-82.
- ESHELBY, J.D. (1957) *The determination of the elastic strain field of an ellipsoidal inclusion, and related problems*, Proceedings of the Royal Society of London - Series A. Mathematical and Physical Sciences, vol. 241, p. 376-396.
- ESHELBY, J.D. (1959) *Elastic field outside an ellipsoidal inclusion*, Proceedings of the Royal Society of London - Series A. Mathematical and Physical Sciences, vol. 252, p. 561-569.
- FANELLI, M. (1994) *Évaluation et renforcement de la sécurité des barrages en service - Rapport Général*, Commission Internationale des Grands Barrages - Dix-huitième Congrès des Grands Barrages, Durban, 1994, vol. I, Question 68, p. 1523-1583.

- GAFSI, R. (1997) *Capteurs de contraintes et de perturbations à fibres optiques*, Thèse de Doctorat, École Centrale Paris, 169 p.
- GANDHI, M.V., THOMPSON, B.S. (1992) *Smart Materials and Structures*, Chapman & Hall Ltd., London, 309 p.
- GARSIDE, B. (1996) *Advances in High-Speed OTDR Detection Technique*, in Dakin and Culshaw, *Optical Fiber Sensors - Components and Subsystems* vol. 3, Artech House, Boston, . 145-189.
- GHORBAL, A. (1992) *Développement d'un système d'acquisition de données pour l'auscultation des infrastructures (roche ou béton)*, Mémoire de maîtrise, Département de génie électrique, faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 79 p.
- GILL, D., CORTHESEY, R., OUELLET, J., DUBE, P.B., NGUYEN, D. (1987) *Improvements to standard doorstopper and Leeman cell stress measuring techniques*, Proceedings of the 2nd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, p. 148-156.
- GILL, D., CORTHESEY, R., AISSAOUI, F., NGUYEN, D. (1993) *Mesure des contraintes absolues et relatives dans les ouvrages de béton*, Comptes-rendus du 3^e colloque CRIB-Sherbrooke sur la réfection des infrastructures de béton - Auscultation et instrumentation des ouvrages en service, p. 295-309.
- GOFF, D.R. (1996) *Fiber Optic Reference Guide - A practical guide to the technology*, Focal Press, Boston, USA, 199 p.
- GOLZÉ, A.R. (1977) *Handbook of Dam Engineering*, Van Nostrand Reinhold, New York, 793 p.
- GOODIER, J.N. (1933). *Concentration of Stress Around Spherical and Cylindrical Inclusions and Flaws*. Transactions of the American Society of Mechanical Engineers. ASME, AER-WDI 55, 39-44.
- HABEL, W.R., HOFMANN, D., HILLEMEIER, B. (1997) *Deformation measurements of mortars at early ages and of large concrete components on site by means of embedded fiber optic microstrain sensors*, *Cement & Concrete Composites*, vol. 19, no. 1, p. 81-102.
- HANNA, T.H. (1985) *Field Instrumentation in Geotechnical Engineering*, Trans Tech Publications, USA, 843 p.
- HARTFORD, D.N.D, SALMON, G.M. (1997) *Risk Assessment and the CDSA Dam Safety Guidelines*, Proceedings of CDSA/CANCOLD Joint Dam Safety Conference, CDSA-ICOLD, Montréal, Québec, p. 2.17-2.26.
- HUSTON, D.R., FUHR, P.L. (1998) *Distributed and chemical fiber optic sensing and installation in bridges*, *Fiber Optic Sensors for Construction Materials and Bridges*, International Workshop, May 3-6, 1998, Newark, New Jersey, USA, Technomic Publishing Co., p. 79-88.

-
- IRMAN, I., PANTAZOPOULOU, S.J. (1996) *Experimental study of plain concrete under triaxial stresses*, ACI Material Journal, vol. 93, no. 6, p. 589-601.
- JANSEN, R.B. (1988) *Advanced Dam Engineering for Design, Construction and Rehabilitation*, Van Nostrand Reinhold, New York, 811 p.
- KALITÉVSKI, N. (1980) *Optique ondulatoire*, Éditions Mir, Moscou, 451 p.
- KERSEY, A.D. (1997) *Multiplexing techniques for fiber optic sensors*, in Dakin and Culshaw, *Optical Fiber Sensors - Applications, Analysis, and Future Trends* vol. 4, Artech House, Boston, p. 369-407.
- KHARRAT, Y. (1997) *Auscultation des structures en béton par tomographie sonore de vitesse et d'atténuation*, Thèse de doctorat, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 314 p.
- KHEIFITS, V.Z. (1995) *Routine instrumental monitoring - A guarantee of dam safety*, *Hydrotechnical Construction*, vol. 29, no. 5, p. 287-289.
- KURKJIAN, C.R., SIMPKINS, P.G., INNIS, D. (1993) *Strength, degradation, and coating of silica lightguides*, *Journal of American Ceramic Society*, vol. 76, no. 5, p. 1106-1112.
- LAFITTE, R. (1993) *Probabilistic risk analysis of large dams: its value and limits*, *Water Power & Dam Construction*, vol. 45, no. 3, p. 13-16.
- LARIVE, C., JOLY, M., DUBOIS, J.P., CHOQUET, P. (1995) *Theoretical and experimental validation of the vibrating wire principle - Application to a low stiffness strainmeter for embedment in concrete*, *Proceedings of the 4th International Symposium on Field Measurements in Geomechanics*, Bergamo, p. 341-348.
- LEGER, P., TINAWI, R. (1994) *A Bibliography on Structural Analysis Behaviour and Safety of Concrete Dams*, Report No. EPM/GCS-1994-17, École Polytechnique de Montréal, Montréal, Québec, (13 sections) p.
- LEITE, M.H., CORTHESEY, R., GILL, D.E., ST-ONGE, M., NGUYEN, D. (1996a) *The IAM - A down hole conditioner/data logger for the modified doorstopper technique*, *Rock Mechanics-tools and Techniques*, *Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium (NARMS 96)*, A.A. Balkema, Rotterdam, vol. 1, p. 897-904.
- LEITE, M.H., CORTHESEY, R., GILL, D.E. (1996b) *Field application of the RPR in situ stress calculation method*, *Rock Mechanics-tools and Techniques*, *Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium (NARMS 96)*, A.A. Balkema, Rotterdam, vol. 1, p. 921-927.
- LEITE, M.H., CORTHESEY, R., GILL, D., NGUYEN, D. (1998) *Un nouveau capteur pour la mesure des contraintes relatives et absolues*, 5^e colloque CRIB-Sherbrooke sur les infrastructures de béton - Nouvelles techniques d'auscultation et d'instrumentation, p. 101-114.

- LEPS, T.M. (1985) *Instrumentation and the judgment factor*, Commission Internationale des Grands Barrages - Quinzième Congrès des Grands Barrages, vol. I, Question 56, p. 643-652.
- LEVY, E. (1988) *Dictionnaire de physique*, PUF, Paris, 892 p.
- MAHER, M.H., NAWY, E.G. (1993) *Evaluation of fiber bragg grating strain sensor in high strength concrete beams*, Applications of Fiber Optics Sensors in Engineering Mechanics, American Society for Civil Engineers, New York, p. 120-133.
- MAHLKE, G., GOSSING, P. (1989) *Câble à fibres optiques*, Teknea, Marseille, 284 p.
- MAHUT, B., CAUSSIGNAC, J.M., LAVIGNE, J., MARTIN, J. (1997) *Mesure de déformations à l'aide de fibre optique - Enseignements tirés d'une application expérimentale sur un pont*, Bulletin des Laboratoires des ponts et chaussées, LCPC, Paris, France, vol. 212, p. 95-101.
- MARTIN, A. (1989) *La surveillance des grands barrages en béton a l'aide des mesures extensométriques par corde vibrante*, Thèse de doctorat, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, (7 chapitres) p.
- MARTIN, C.D., READ, R.S. (1996) *AECL's Mine-by Experiment: A test tunnel in brittle rock, Rock Mechanics-tools and Techniques*, Proceedings of the 2nd North American Rock Mechanics Symposium (NARMS 96), A.A. Balkema, Rotterdam, vol. 1, p. 13-24.
- MARTIN, C.D. (1993) *Strength of massive Lac du Bonnet granite around underground openings*, Ph. D. Thesis, Department of Civil and Geological Engineering, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada,
- McRAE, J.B., SIMMONDS, T. (1991) *Long-Term stability of vibrating wire instruments: one manufacturer's perspective*, Third International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Balkema, Rotterdam, p. 283-293.
- MESTAT, P. (1997) *Maillages d'éléments finis pour les ouvrages de géotechnique - Conseils et recommandations*, Bulletin des Laboratoires des ponts et chaussées, no. 212, p. 39-64.
- MICHEL, L., LABARRERE, M., GAFSI, R., MALKI, A., LECOY, P. (1996) *Impact detection and vibration sensing for material composite structures by integrated optic fibre sensors*, International Conference on Intelligent Materials, Lyon, p. ---.
- MILLS, R.H. (1966) *Effects of sorbed water on dimensions, compressive strength and swelling of hardened cement paste*, Highway Research Board, Special Report no. 90, p. 84-11.
- MORRISON, R.B. (1962) *Concise Physics for Ancillary Degree Students*, Edward-Arnold Ltd, London, 559 p.
- MURPHY, K.A., MILLER, M.S., VENGSARKAR, A.M., CLAUS, R.O. (1990) *Elliptical-core two-mode optical-fiber sensor implementation methods*, Journal of Lightwave Technology, vol. 8, no. 11, p. 1688-1696.

-
- NEUMANN, E.G. (1988) *Single-Mode Fibers - Fundamentals*, Springer Series in Optical Sciences 57, Springer-Verlag, New York, 530 p.
- NEVILLE, A.M. (1996) *Properties of Concrete*, 4th ed., John-Wiley and Sons, New York, 844 p.
- OTHONOS, A. (1997) *Fiber Bragg gratings*, Review of Scientific Instrumentation, American Institute of Physics, vol. 68, no. 12, p. 4309-4341.
- POUPART, M. (1994) *Contrôle de la sécurité par l'auscultation - Apport de la télémessure et des méthodes de dépouillement des mesures*, Commission Internationale des Grands Barrages - Dix-huitième Congrès des Grands Barrages, Durban, 1994, vol. V, p. 74-79.
- RAHMAN, A.A. (1992) *Instrumented Inclusion technique for stress measurement in concrete structures*, Ph.D. Thesis, University of Surrey, England.
- ROGERS, J.A. (1986) *Distributed optical-fibre sensors*, Journal of Physics D: applied physics, vol. 19, p. 2237-2225.
- ROGERS, M.F., YEH, C.H., JONES, J.C., POLK, B.J. (1994) *Alkali-Aggregate Reactivity at the Raised Santeetlah Dam*, Commission Internationale des Grands Barrages - Dix-huitième Congrès des Grands Barrages, Durban, 1994, vol. III, Question 70, p. 791-803.
- RUSSELL, P.S.J., ARCHAMBAULT (1996) *Fiber Gratings, in Dakin and Culshaw, Optical Fiber Sensors - Components and Subsystems* vol. 3, Artech House, Boston, p. 9-67.
- RYALL, M.J. (1996) *Measurement of stresses in concrete structures using an instrumented hard-inclusion technique*, The Structural Engineer, vol. 74, no. 15, p. 255-260.
- SALMON, G.M., HARTFORD, D.N.D (1995) *Risk analysis for dam safety*, International Water Power and Dam Construction, vol. 47, no. 3, p. 42-47.
- SCHNITTER, N.J. (1994) *A History of Dams - The useful pyramids*, A.A. Balkema, Rotterdam, 266 p.
- SEARS, F.W., ZEMANSKY, M.W., YOUNG, H.D. (1987) *University Physics*, 7 ed., Addison-Wesley Publishing Co, USA, 1096 p.
- SIRKIS, J.S., HASLACH, H.W. (1991) *Complete phase-strain model for structurally embedded interferometric optical fiber sensors*, Journal of Intelligent Material Systems and Structures, vol. 2, p. 3-24.
- SPILLMAN, W.B. (1996) *Sensing and processing for smart structures*, Proceedings of the IEEE, vol. 84, no. 1, p. 68-77.
- STANLEY, W.D., DOUGHERTY, G.R., DOUGHERTY, R. (1984) *Digital Signal Processing*, 2nd ed., Reston Publishing Company Inc. Reston, Virginia, 514 p.

- SURMELY, P. (1995) *La fibre optique - Technologie et applications*, Masson, Paris, 223 p.
- SWOBODA, G., LEI, X.Y. (1994) *Simulation of arch dam - Foundation interaction with a new friction element*, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, vol. 17, no. 9, p. 601-617.
- THOMPSON, G.A., CHARLWOOD, R.G., STEELE, R.R., CURTIS, D.D. (1994) *Mactaquac Generating Station Intake and Spillway Remedial Measures*, Commission Internationale des Grands Barrages - Dix-huitième Congrès des Grands Barrages, Durban, 1994, vol. I, Question 68, p. 347-368.
- TOLANSKY, S. (1966) *An Introduction to Interferometry*, Longmans, London, 223 p.
- TUNBRIDGE, L.W., ØIEN, K. (1988) *The advantages of vibrating-wire instruments in geomechanics*, Second International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, Balkema, Rotterdam, p. 3-15.
- UDD, E. (1995) *Fiber Optic Smart Structures*, John Wiley & Sons, New York, 671 p.
- UNEMBU, D. (1989) *Instrumentation de barrages en béton en service par la technique d'inclusion instrumentée et injectée*, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 102 p.
- VERZENI, G., ROBICHAUD, J.G. (1998) *La gestion de la sécurité des barrages à Hydro-Québec*, 5^e colloque CRIB-Sherbrooke sur les infrastructures de béton - Nouvelles techniques d'auscultation et d'instrumentation, p. 85-95.
- YEH, C. (1990) *Handbook of Fiber Optics - Theory and Applications*, Academic Press Inc, New York, 382 p.
- ZIMMERMAN B.D., CLAUS, R.O. (1993) *Spatially multiplexed optical fiber time domain sensors for civil engineering applications*, Applications of Fiber Optics Sensors in Engineering Mechanics, American Society for Civil Engineers, New York, p. 280-287.

Rétrospective des applications du CIUS

L'ensemble des anomalies de comportement des grands barrages et structures en béton se résume à des problèmes de vieillissement du béton ou à des défauts. Le vieillissement du béton est caractérisé par une baisse des propriétés mécaniques des matériaux causée par une diversité de phénomènes: fatigue thermique, retrait excessif, gel-dégel, infiltration, lessivage, phénomène physico-chimique de gonflement.

Après la construction d'un ouvrage, il est indispensable d'en faire le suivi afin de s'assurer de sa stabilité ou encore, s'il s'agit d'une réhabilitation, de vérifier son comportement et cela grâce à des techniques appropriées. Pour les ouvrages qui ne sont pas munis initialement d'extensomètres à corde vibrante, une technique d'inclusion (CIUS) a été mise au point au Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée de l'Université de Sherbrooke. Cet appareil, décrit au chapitre 2, est adapté pour le suivi des ouvrages en béton, surtout des barrages, et les excavations souterraines (piliers de mine et tunnels). Depuis 1988, près de 60 cylindres ont été installés dans différents barrages, mines et autres structures. Le tableau A1 présente une compilation des sites où sont installés les CIUS et on donne les grandes lignes, aux sections suivantes, de ces applications. Cette rétrospective constitue une synthèse de nombreux rapports techniques et articles scientifiques sur le CIUS et ces derniers sont répertoriés à la section A6.

Tableau A1				
Sites instrumentés avec le CIUS				
Site	Année	Nombre	Type	Nature du projet
Beauharnois	1987	3	2D	• Suivi des réactions alcalis-granulats
	1992	7	3D	• Recherche et développement
Manic 5	1988	5	2D	• Suivi des déformations structurales
	1988	3	3D	• Recherche et développement
	1993	2	3D	
	1994	1	3D	
Niobec	1989	2	2D	• Suivi des déformations d'un pilier de mine
	1992	4	3D	• Développement d'un système d'alarme
	1994	1	3D	
É.A.C.L.	1992	3	3D	• Suivi des déformations du massif rocheux
Biodôme	1992	2	3D	• Suivi des déformations structurales de la fondation
Idukki	1992	8	3D	• Suivi des déformations structurales
Portneuf	1992	1	3D	• Suivi du mûrissement du béton d'une culée de pont
Saunders	1992	3	3D	• Suivi des déformations structurales liées à des coupures
	1993	6	3D	
Témiscouata	1994	2	3D	• Suivi des réactions alcalis-granulats • Recherche et développement
La Tuque	1995	2	3D	• Suivi des déformations structurales liées à des coupures
	1996	1	3D	• Recherche et développement

A1 Applications dans les barrages

Les cylindres instrumentés de l'Université de Sherbrooke ont été installés dans de nombreux barrages au Québec et dans d'autres régions. Cette section présente donc une rétrospective des applications du CIUS dans les barrages.

A1.1 Barrage Daniel-Johnson (Manic 5)

Le barrage Daniel-Johnson est un barrage en béton à voûtes multiples, de 1 310 m de longueur et de 214 m de hauteur à la voûte centrale. Il possède 13 voûtes et 14 contreforts; le quatorzième contrefort étant en fait un barrage-poids. Ce barrage étant situé à un peu plus de 200 km au nord de Baie-Comeau, Québec, Canada, il est donc soumis à un climat très sévère; la température atteint $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ l'hiver et $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ l'été. La construction a débuté en 1963, le niveau du béton a progressé d'environ 30 m par année jusqu'en 1968. Le niveau du réservoir est monté parallèlement à environ 45 m sous le niveau du béton. Dès la construction du barrage, des fissures ont commencé à apparaître autant du côté amont que du côté aval dans la presque totalité de ses voûtes. La plupart de ces fissures sont d'origine thermique. Par conséquent, la base de la plupart des voûtes est protégée par un abri thermique afin de stabiliser les mouvements de la base et donc, diminuer la propagation de ces fissures.

Dans le cadre de l'auscultation et de la surveillance du barrage Daniel-Johnson, Hydro-Québec a confié au Laboratoire de mécanique des roches le mandat, en 1988, d'instrumenter la voûte 8-9 (Phase I) du barrage à l'aide de huit CIUS. Ces inclusions permanentes constituaient à l'époque des prototypes permettant, à partir des déformations relevées avec les extensomètres à corde vibrante, de déterminer les variations de contrainte à long terme aux points de mesure dans le barrage. Au total, huit inclusions ont été installées dans la voûte 8-9, soit trois inclusions de type 3D et cinq de type 2D. À la fin de cette phase d'une durée de deux ans, on tire les conclusions suivantes:

- Les CIUS permettent, à partir des lectures des extensomètres à corde vibrante, de déterminer les variations de déformation et de contrainte à long terme aux points de mesure dans le barrage;
- Tous les extensomètres à corde vibrante fonctionnent bien tant du point de vue du suivi des températures que des déformations;
- La mesure de la température en aval de la voûte 8-9 présente une variation entre 8°C et 12°C ce qui montre bien l'efficacité des abris thermiques à la base de la voûte;
- Quant au comportement de la voûte, on observe un champ de variation de contrainte en compression détecté par les CIUS F, D et E. Les autres CIUS situés vers le centre de la voûte détectent une tension dans le barrage. La partie centrale de la voûte est en traction relative tandis que le contrefort 8 est en compression relative;

- Les variations de contraintes sont faibles, ce qui est rassurant en ce qui a trait au comportement global de la voûte;
- À l'époque, il fallait envisager rapidement l'utilisation d'un système automatique d'acquisition de données. Le Laboratoire travaillait déjà à cette époque au développement d'un tel système connu aujourd'hui sous le nom de CAIUS (carte d'acquisition intelligente de l'Université de Sherbrooke).

Depuis la construction et la mise en eau du barrage, la voûte 5-6 a présenté divers phénomènes ayant attiré l'attention. Récemment, dans le cadre de l'étude de la voûte 5-6 (Phase II), Hydro-Québec a entrepris un programme de recherche avec le Laboratoire de mécanique des roches. Ce programme portait sur l'installation, en 1993, de trois CIUS ainsi que l'interprétation des résultats obtenus. En fait, deux cylindres ont effectivement été installés en 1993, alors que le troisième l'a été l'année suivante. Ce délai dans l'installation a été causé par une présence abondante d'eau dans le forage initialement prévu pour l'installation du cylindre. Les figures A1 et A2 montrent la position des CIUS dans la voûte 5-6. Cette phase se poursuit depuis 1993. La dernière section de cette annexe présente d'ailleurs, à titre d'étude de cas, le suivi de la voûte 5-6 du barrage Daniel-Johnson à l'aide des CIUS. À ce jour, les commentaires suivants peuvent être émis en ce qui a trait à la performance des CIUS au barrage Daniel-Johnson.

- Les CIUS ont, jusqu'à maintenant, permis le suivi des déformations de diverses sections du barrage et sont toujours en fonction après trois années;
- Après une période de stabilisation des CIUS, on détecte les déformations générées par le mouvement des fissures supérieures et inférieures dans les plots Z et S;
- Dans le cas où des travaux de réfection (injection des fissures) seraient effectués, il serait possible de suivre le comportement des plots après injection;
- Les CIUS montrent bien les variations de déformations cycliques liées aux températures dans les plots Z et S.

A1.2 Barrage Beauharnois

Le barrage Beauharnois est situé à 40 km à l'est de Montréal à l'entrée du canal Beauharnois. Ce dernier avait été creusé en 1840 pour améliorer le transport fluvial sur le St-Laurent. Ce barrage comporte d'importants désordres internes dont l'origine provient de l'expansion du béton due au développement de réactions alcalis-granulats. Cette expansion crée des microfissures ainsi que

des fissures dans le béton affectant ainsi l'ouvrage. Rappelons brièvement que les réactions alcalis-granulats proviennent de l'interaction des ions Ca^{2+} , Na^+ , K^+ et OH^- de la phase liquide présente dans les pores du béton durci avec des phases siliceuses ou silicatées de certains types de granulats. En présence de cette solution interstitielle fortement basique, les constituants solides sont attaqués; la silice est solubilisée puis réagit avec des ions Na^+ , K^+ et Ca^{2+} pour former un gel calco-silico-alcalin. Simultanément ou postérieurement, l'absorption d'eau par ce gel implique une augmentation du volume de ce gel, ce qui génère des contraintes suffisamment élevées pour faire gonfler et fissurer le béton.

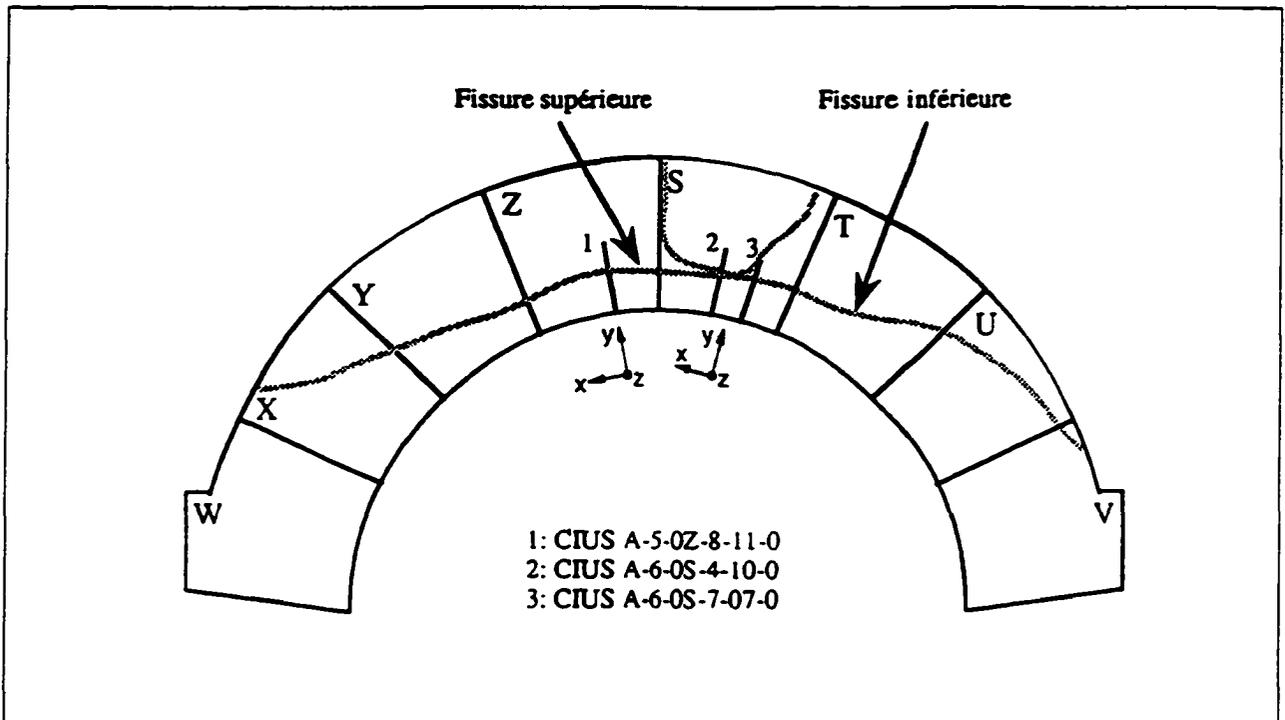


Figure A1 Plan de la voûte 5-6 du barrage Daniel-Johnson et position des CIUS

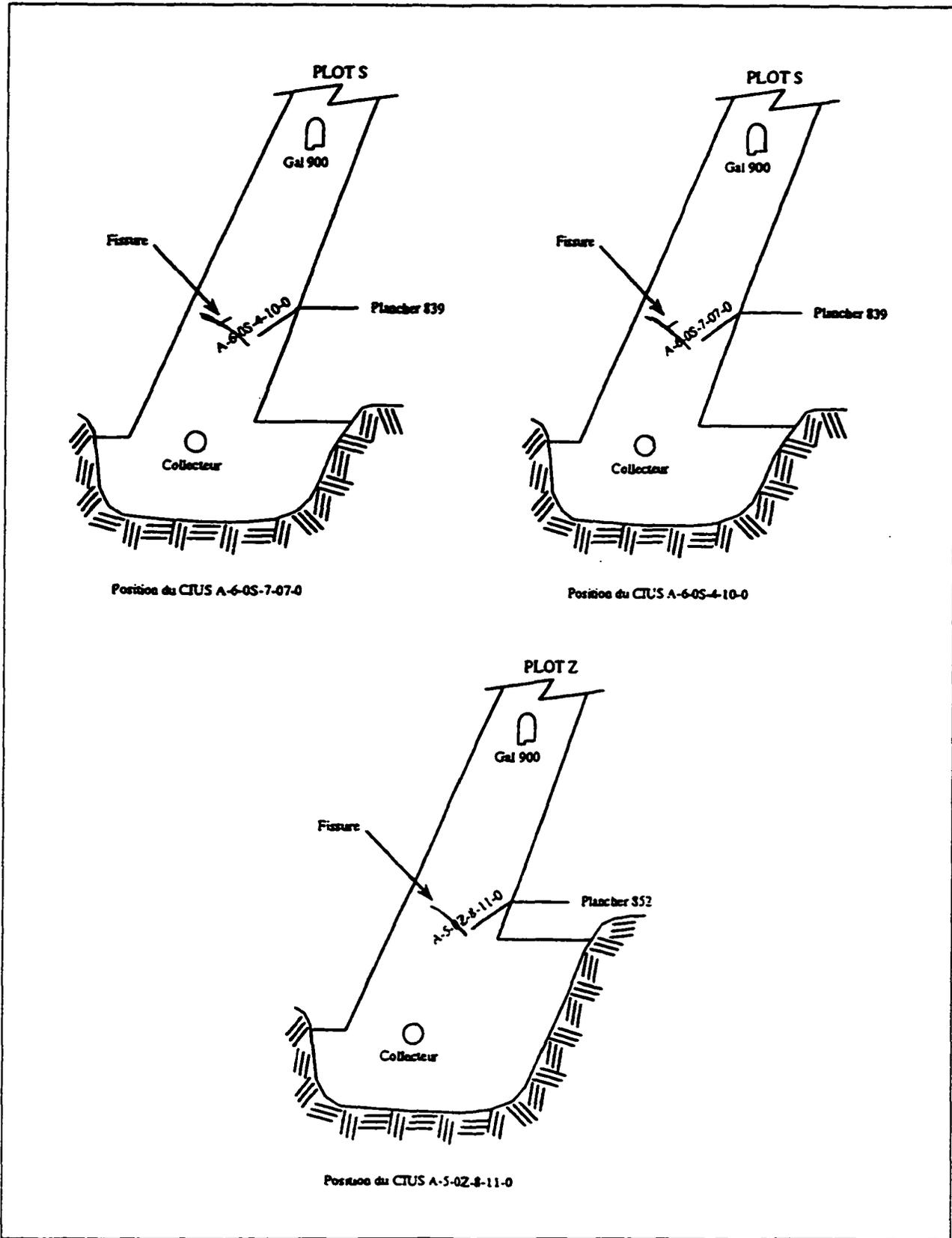


Figure A2 Vues en coupe de la voûte 5-6 du barrage Daniel-Johnson avec la position des CTUS.

C'est ainsi que, pour suivre les gonflements provenant de ces réactions alcalis-granulats, la société Hydro-Québec a mandaté le Laboratoire de mécanique des roches pour procéder à l'instrumentation du barrage. Cette activité s'est déroulée en deux étapes. En 1987, trois CIUS à deux dimensions ont été installés dans le barrage et en 1992, l'installation de sept CIUS à trois dimensions a été effectuée. Le tableau A2 indique la position des CIUS installés dans le barrage Beauharnois.

Tableau A2
Instrumentation du barrage Beauharnois avec les CIUS

CIUS	Position	Type	Année
B	Centrale 3, groupe 33-34	2D	1987
C	Centrale 1, groupe 11	2D	1987
T	Centrale 3, groupe 34	2D	1987
1	Jonction du barrage-poids rive droite et centrale 1	3D	1992
2	Jonction du barrage-poids rive droite et centrale 1	3D	1992
3	Jonction du barrage-poids rive droite et centrale 1	3D	1992
4	Centrale 2, groupe 26	3D	1992
5	Centrale 2, groupe 26	3D	1992
6	Jonction du barrage-poids rive gauche et centrale 3	3D	1992
7	Jonction du barrage-poids rive gauche et centrale 3	3D	1992

Lors d'essais effectués sur des carottes de béton récupérées à l'emplacement des CIUS, il a été déterminé que le module d'élasticité et le coefficient de Poisson du béton du barrage se comparent bien à ceux du béton des CIUS. Les variations de contrainte ainsi mesurées vont de 1987 à 1994. Aussi, de récents essais de validation d'un système d'acquisition de données (CAIUS) développé à l'Université de Sherbrooke, ont été effectués. La figure A3 montre une vue en plan du barrage avec la position des CIUS.

L'interprétation des courbes des CIUS installés en 1987, montre que la présence de réactions alcalis-granulats crée des compressions (confinements horizontaux et verticaux) dans le barrage, compressions qui sont anisotropes dans la centrale 1 et isotropes dans la centrale 3 [BALLIVY & coll., 1995].

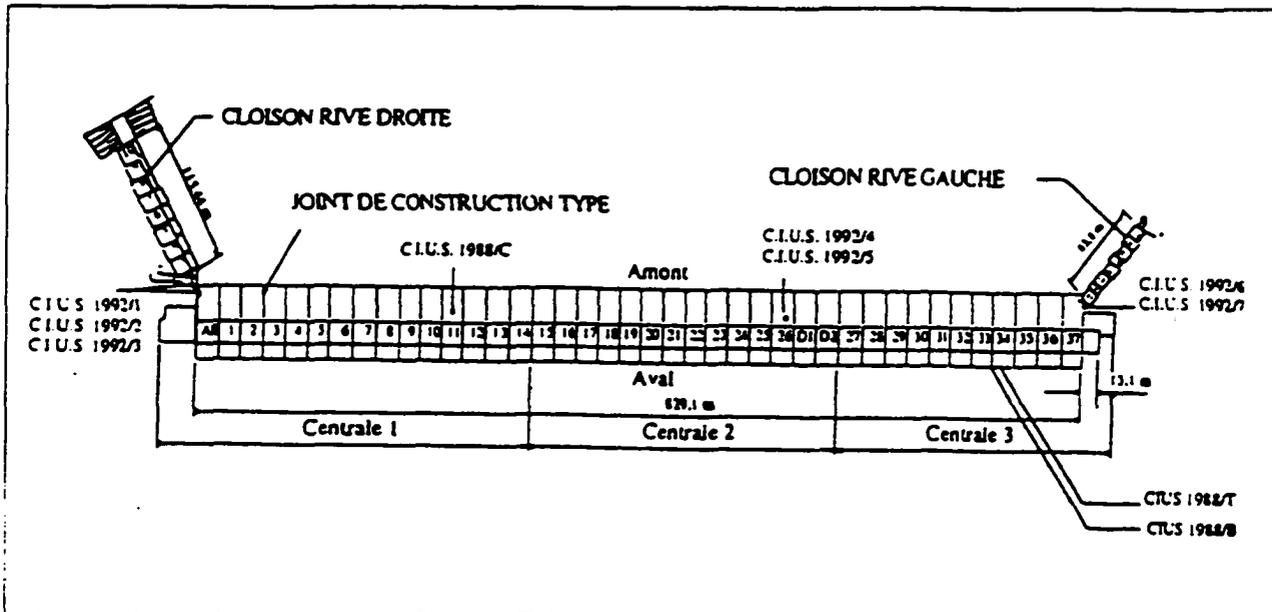


Figure A3 Vue en plan du barrage Beauharnois avec la position des CIUS

Les conclusions globales de l'instrumentation avec les CIUS installés en 1987 au barrage Beauharnois sont les suivantes:

- Cette expérience valide la longévité des CIUS qui ont fonctionné pendant sept ans sans problèmes majeurs. Ces CIUS continuent de mesurer les températures et les variations de déformation.
- Les gradients thermiques importants génèrent des pressions élevées près des prises d'eau. Il en résulte le développement de fissures d'origine thermique dans les diverses parties de la structure.
- En ce qui a trait aux réactions alcalis-granulats, le gel de silice est présent dans le béton de la centrale 3, exerçant une pression de 2 MPa. Dans la centrale 1, plus âgée que la 3, la pression de gel est variable selon l'orientation des fissures. Dans les fissures horizontales la pression est de 2 MPa tandis que, dans les fissures verticales, elle est de 4 MPa.

A1.3 Barrage Idukki

Le barrage Idukki en est un à voûte mince unique et asymétrique présentant une double courbure parabolique et sa hauteur est de 169 m. Ce barrage est situé dans la province du Kerala au sud de l'Inde et il a été construit par la société SNC entre 1969 et 1974.

Depuis la fin de la construction, un certain nombre d'instruments coulés dans le béton sont aujourd'hui défectueux ou, du moins, erratiques. Pour cela, la société SNC, pour le compte de l'Association canadienne de développement international (ACDI), a confié au Laboratoire de mécanique des roches le mandat de la fabrication et la calibration de huit CIUS. Ces cylindres, installés en 1992 dans le barrage, permettront de déterminer les variations de déformation ainsi que les variations de contrainte à long terme à divers points de mesure dans le barrage.

Sept des huit cylindres ont été placés en aval du barrage au niveau du contact roc-béton. L'autre cylindre est conservé à l'Université de Sherbrooke pour étudier les variations de son comportement mécanique et de ses coefficients de calibration en fonction du temps et des conditions environnementales. Pour ce projet, les huit CIUS sont à trois dimensions et pourvus de sept extensomètres à corde vibrante. Ils permettent ainsi, à partir d'un seul forage, d'obtenir le tenseur complet des déformations. Le septième extensomètre peut être utilisé en cas de défaillance d'un des extensomètres dans le plan perpendiculaire à l'axe du cylindre. La figure A4 montre la position des cylindres dans le barrage. Un article récent [CHOUNARD et coll., 1995] présente les résultats d'une analyse statistique des données de plusieurs instruments dont les CIUS. Le suivi des CIUS est assuré par SNC Lavalin, toutefois, les résultats sont confidentiels [FEKNOUS, 1996; communication personnelle].

A1.4 Barrage Saunders

Dans le cadre des travaux de réfection du barrage Saunders, Hydro-Ontario et Roctest ltée ont confié au Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée de l'Université de Sherbrooke le mandat de fabriquer et d'installer un total de neuf CIUS; ce mandat a été réalisé en deux phases. Le but de cette instrumentation est de déterminer les variations de déformation et de contrainte à court terme (lors de la coupure du barrage), à moyen terme et à long terme (comportement du barrage).

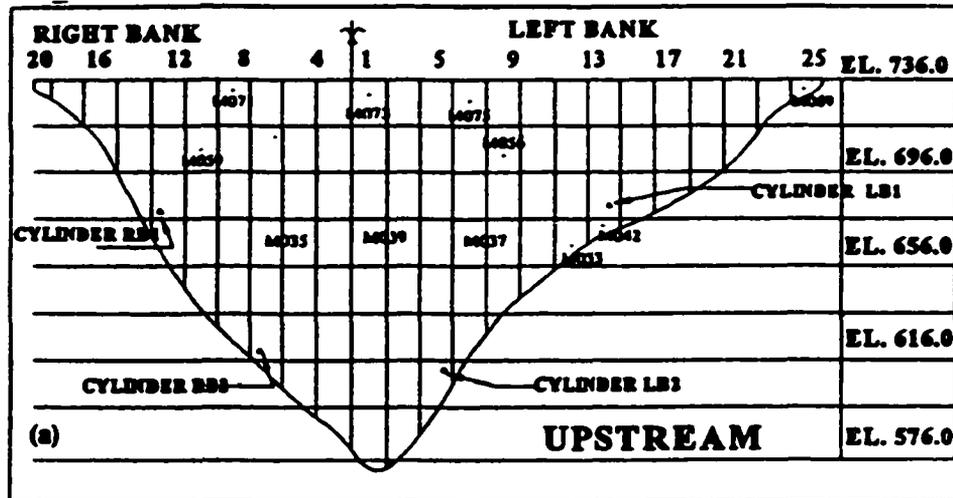


Figure A4 Position des CIUS au barrage Idukki

La phase I, en 1992, consistait en l'installation de trois cylindres dans la section S-4 du barrage. L'un des CIUS est installé dans le mur aval de la galerie, un autre au niveau 180 et le troisième dans le tunnel d'inspection. La phase II, qui a eu lieu en 1993, consistait à installer, au niveau 180, six CIUS dans les unités suivantes: 1, 3, 6, 11, 14 et 16. Le suivi est assuré directement par Hydro-Ontario et il semble que les déformations du barrage Saunders soient liées aux réactions alcalis-granulats [DANAY et coll. 1993; 1994]. Les figures A5 et A6 montrent la position des CIUS dans le barrage. On ne peut donner de conclusion générale quant à l'efficacité des CIUS puisque le Laboratoire n'était pas impliqué dans l'interprétation des résultats.

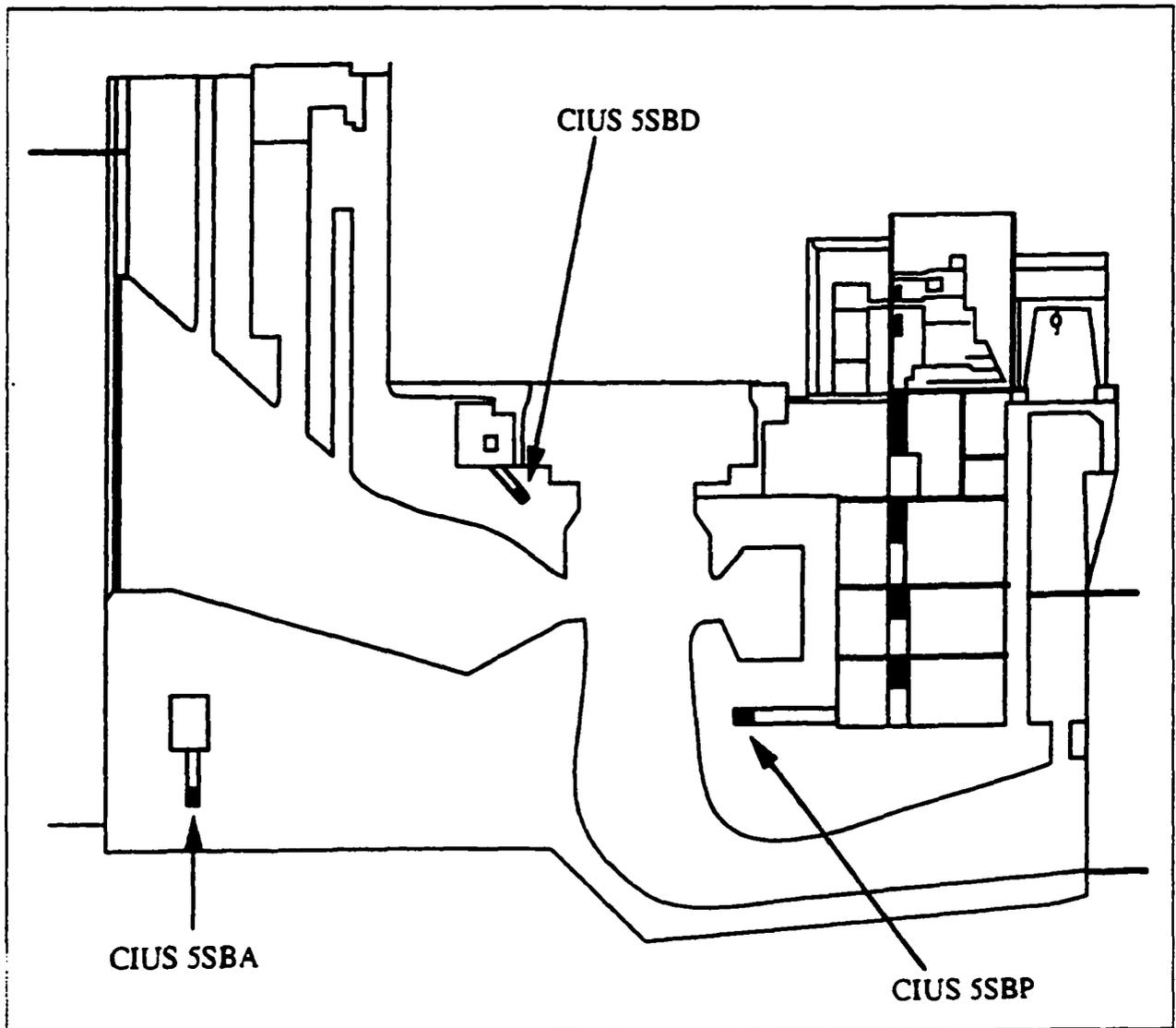


Figure A5 Vue en coupe de l'unité S-4 du barrage Saunders avec la position des CIUS (phase I)

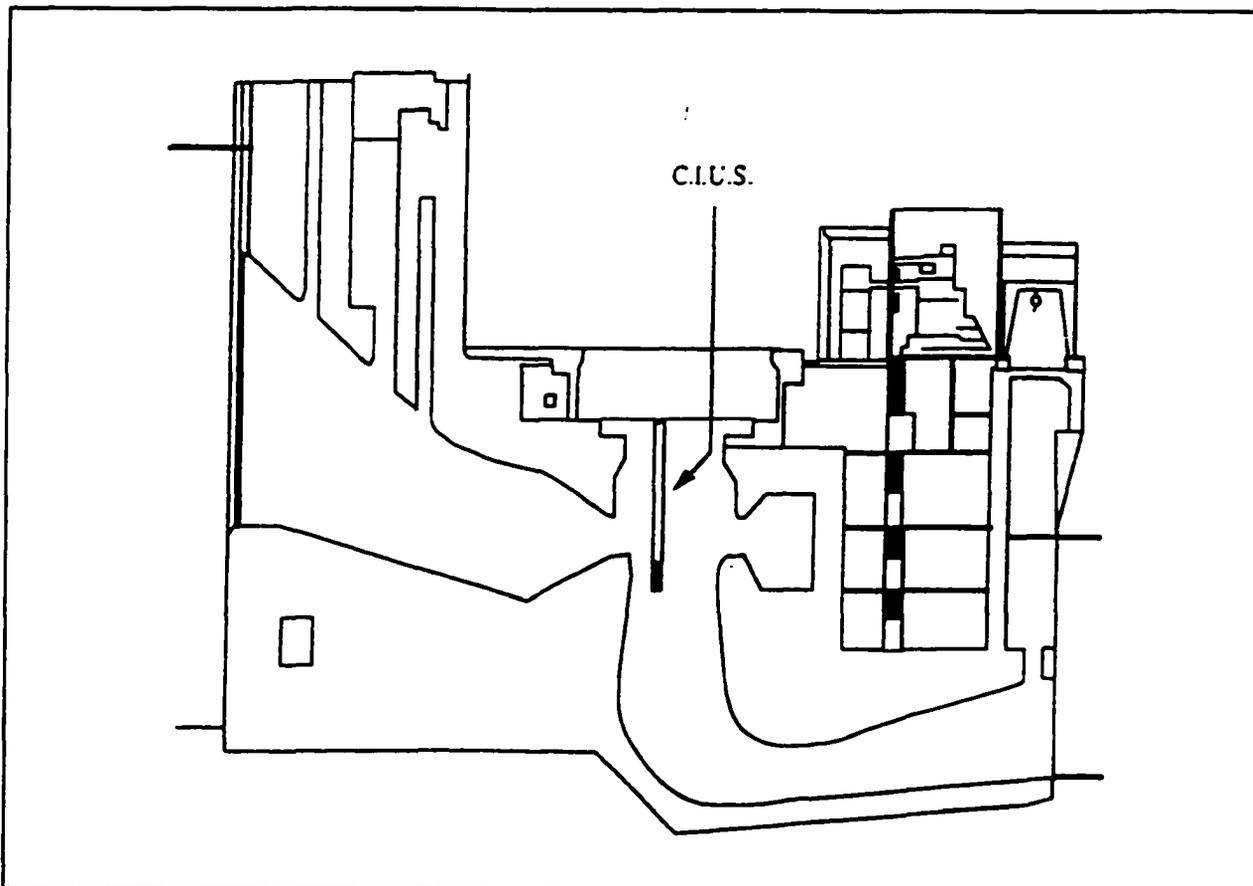


Figure A6 Vue en coupe de l'unité S-4 du barrage Saunders avec la position des CIUS (phase II)

A1.5 Barrage Témiscouata

Dans le cadre du projet « Potentiel résiduel dans les barrages dû à la réaction alcalis-granulats », Hydro-Québec a conclu un programme de recherche avec le Laboratoire de mécanique des roches. Ce programme portait sur l'installation, en 1994, de deux CIUS dans deux colonnes expérimentales au barrage Témiscouata et ensuite sur l'interprétation des lectures.

Le but principal de cette recherche est la validation des résultats obtenus par les CIUS, pour le cas particulier des réactions alcalis-granulats (RAG), en comparaison avec une modélisation numérique des déformations et des contraintes dans le béton. Les deux colonnes sont situées sur la rive droite, à proximité du barrage. De dimensions égales, 0,6 m de largeur, 1,5 m de longueur et 5 m de hauteur, la colonne A est composée de granulats réactifs alors que la colonne B est composée de granulats non réactifs.

Puisque que ce projet est relativement récent, les résultats et leur interprétation sont en cours et cela permettra prochainement de vérifier diverses hypothèses concernant la performance des CIUS dans ces colonnes. La figure A7 montre une vue en coupe des colonnes avec la position des CIUS.

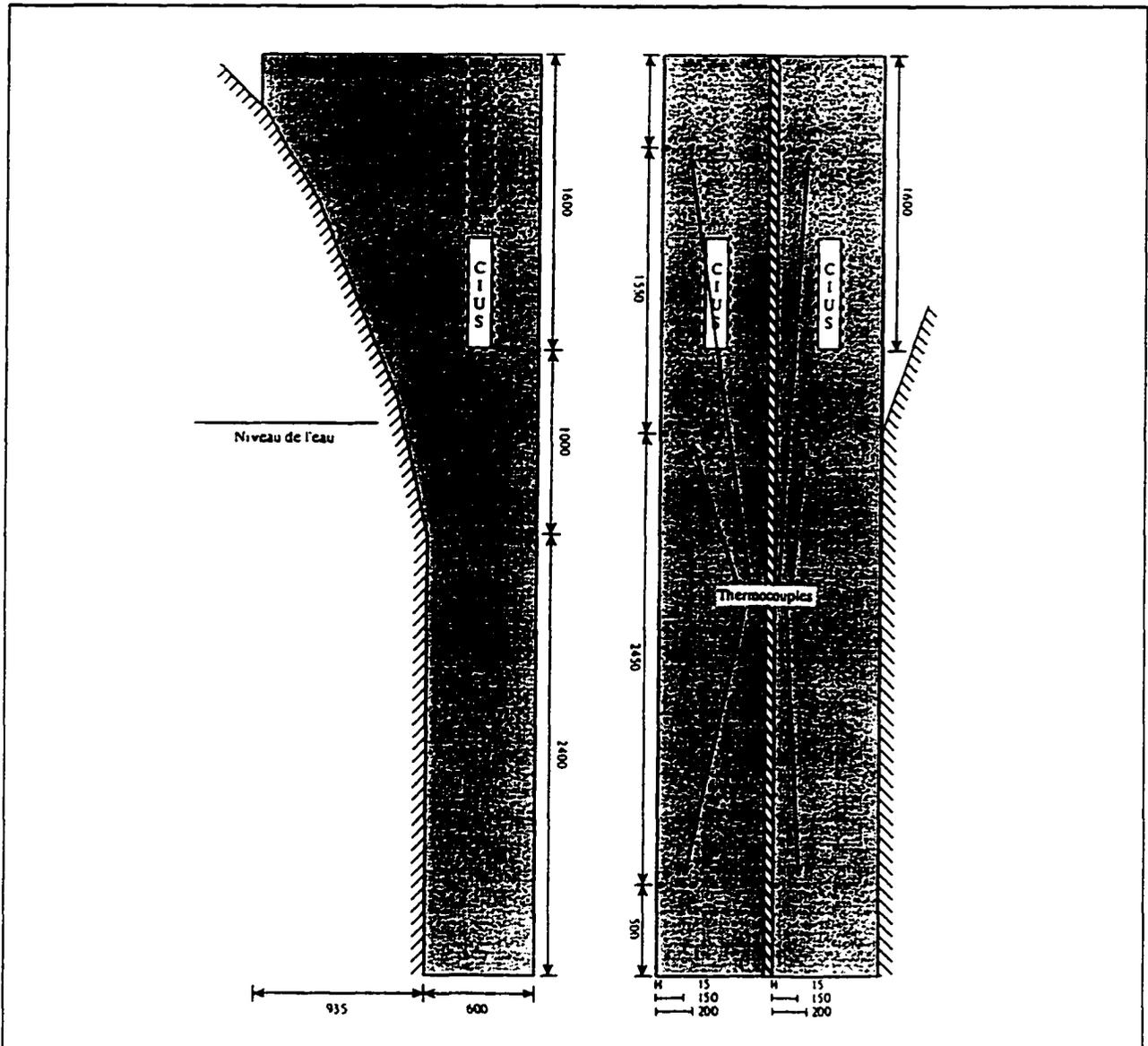


Figure A7 Vue en coupe des colonnes d'essais avec la position des CIUS

A1.6 Barrage La Tuque

Dans le cadre du projet de recherche « Potentiel résiduel d'expansion du béton dû à la réaction alcalis-granulats », Hydro-Québec, région Mauricie, a conclu un programme de recherche avec l'IREQ. Ce programme portait sur l'installation, en 1995, de trois CIUS au barrage La Tuque,

dans la municipalité de La Tuque, Québec, Canada. Ces cylindres ont été fabriqués, calibrés et installés par le personnel du Laboratoire de mécanique des roches. Le but de ce projet étant d'étudier les variations de déformation et de contrainte à la coupure du barrage sur le côté gauche, deux CIUS ont alors été installés près de cette coupure. L'autre CIUS doit être installé du côté droit du barrage. Puisqu'il s'agit d'un projet relativement récent, on ne peut émettre à ce moment de conclusion générale quant à la performance des CIUS. La figure A8 montre la position des CIUS sur la rive gauche et la rive droite.

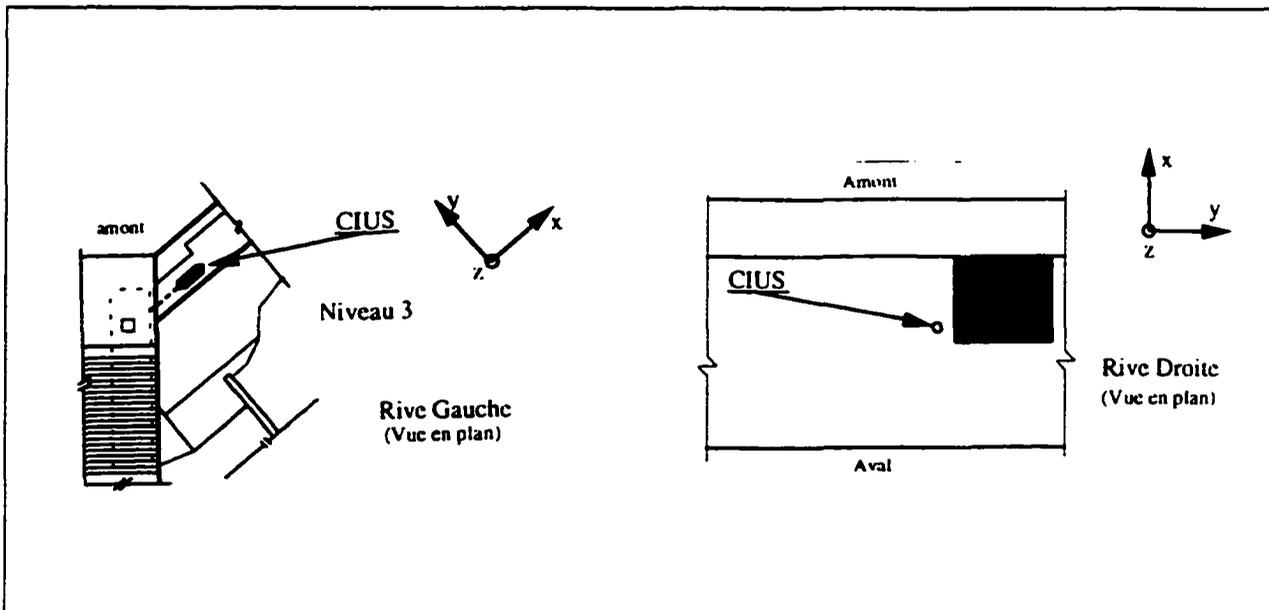


Figure A8 Position des CIUS au barrage La Tuque

A2 Application dans les milieux rocheux

Le cylindre instrumenté est actuellement utilisé pour le suivi des variations de contrainte et de déformation dans les massifs rocheux. Deux cas sont ici décrits.

A2.1 Mine Niobec

Le CIUS a été utilisé pour la première fois en 1989-1990 et, jusqu'à maintenant, sept CIUS ont été installés à divers niveaux d'un pilier de la mine Niobec. Cette dernière, située à St-Honoré

(Québec, Canada), produit 815 000 tonnes de niobium par an. Ce gisement appartient au complexe carbonaté de St-Honoré, complexe rattaché au Graben du Saguenay. L'exploitation se fait par la méthode des longs trous avec piliers horizontaux et transversaux en deux niveaux: 300-600 (90-180 m) et 700-1000 (210-300 m).

La méthode d'interprétation considère que l'ensemble milieu encaissant-CIUS forme un ensemble homogène. Ceci ne nécessite donc pas l'utilisation de coefficient de transfert du milieu encaissant au CIUS. Cette hypothèse est acceptable parce que les propriétés mécaniques du béton du CIUS sont sensiblement égales à celles du rocher.

Le but de cette instrumentation était d'étudier le transfert des charges lors du dynamitage du pilier T-202-12 en vue d'ajuster les modèles d'exploitation et d'obtenir des corrélations entre les variations mesurées et les observations qualitatives faites dans le massif rocheux. La figure A8b montre la position d'un CIUS au niveau 600. Du point de vue pratique, il s'agissait surtout d'identifier les risques d'effondrement des piliers et d'assurer, par un système d'alarme approprié, la sécurité des ouvriers; ce volet est d'ailleurs subventionné par l'IRSST (1991-1994 et 1996-1998). Ainsi, trois dynamitages ont été détectés par les cylindres dont un à moins de 15 mètres d'un des CIUS. Après un bon fonctionnement dans plusieurs barrages, l'utilisation du CIUS dans un pilier de mine a montré qu'il est apte à répondre aux objectifs fixés. Relié à un système d'acquisition de données, il peut fonctionner comme une alarme et donc devenir un élément essentiel pour assurer la sécurité des travaux en milieu souterrain. Dans le cas de la mine Niobec, le CIUS permet de vérifier, en plus des variations de contrainte et de déformation, la stabilité du pilier. En effet, un dynamitage d'importance, 93 749 tonnes, a eu lieu le 10 novembre 1994 à proximité d'un CIUS. Ce dernier a très bien résisté aux vibrations et il permet de voir nettement les variations de déformation. La figure A9 montre bien qu'après le dynamitage du 10 novembre 1994, les conditions de stabilité du massif sont modifiées. Un dynamitage de grande envergure, 202 000 tonnes, le 13 avril 1995 a emporté les CIUS les rendant ainsi inopérants. Mentionnons que si les CIUS avaient été reliés à un système d'alarme, l'instabilité créée par le dynamitage du 10 novembre aurait immédiatement été détectée. Actuellement, certaines recherches sont axées sur le développement d'un système d'alarme adapté au CIUS.

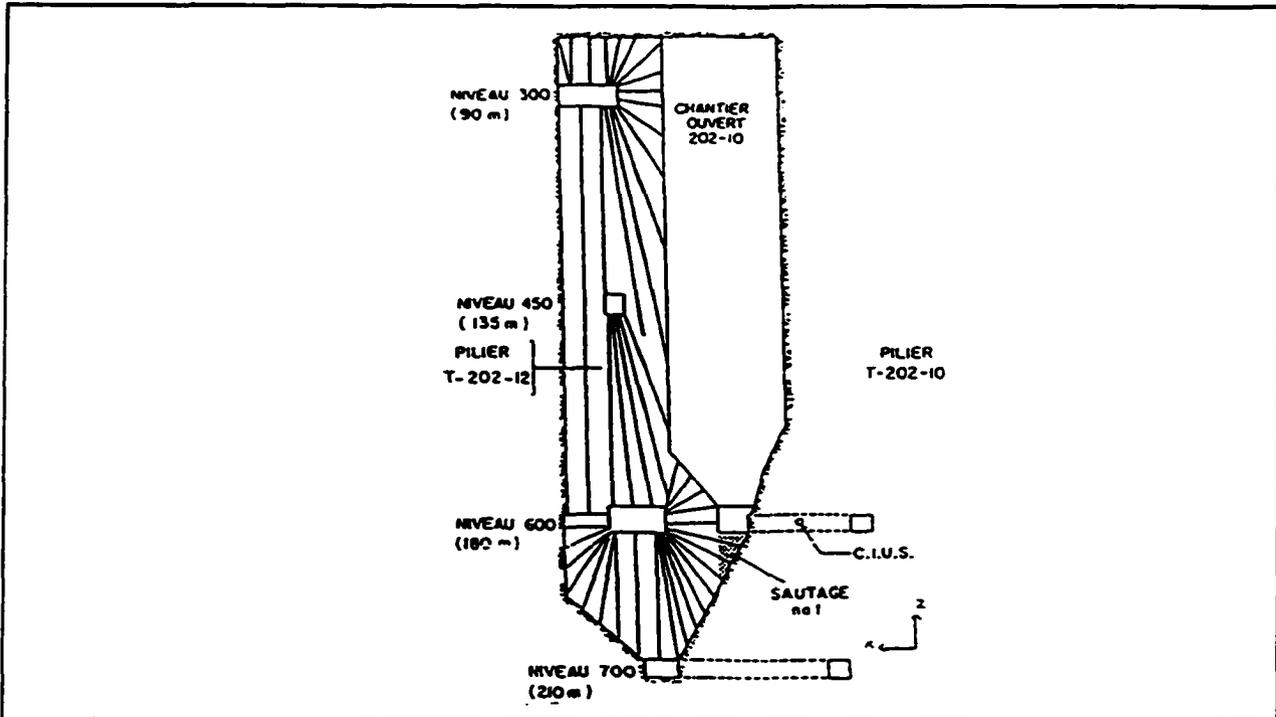


Figure A8b Position des CIUS au niveau 600 de la mine Niobec

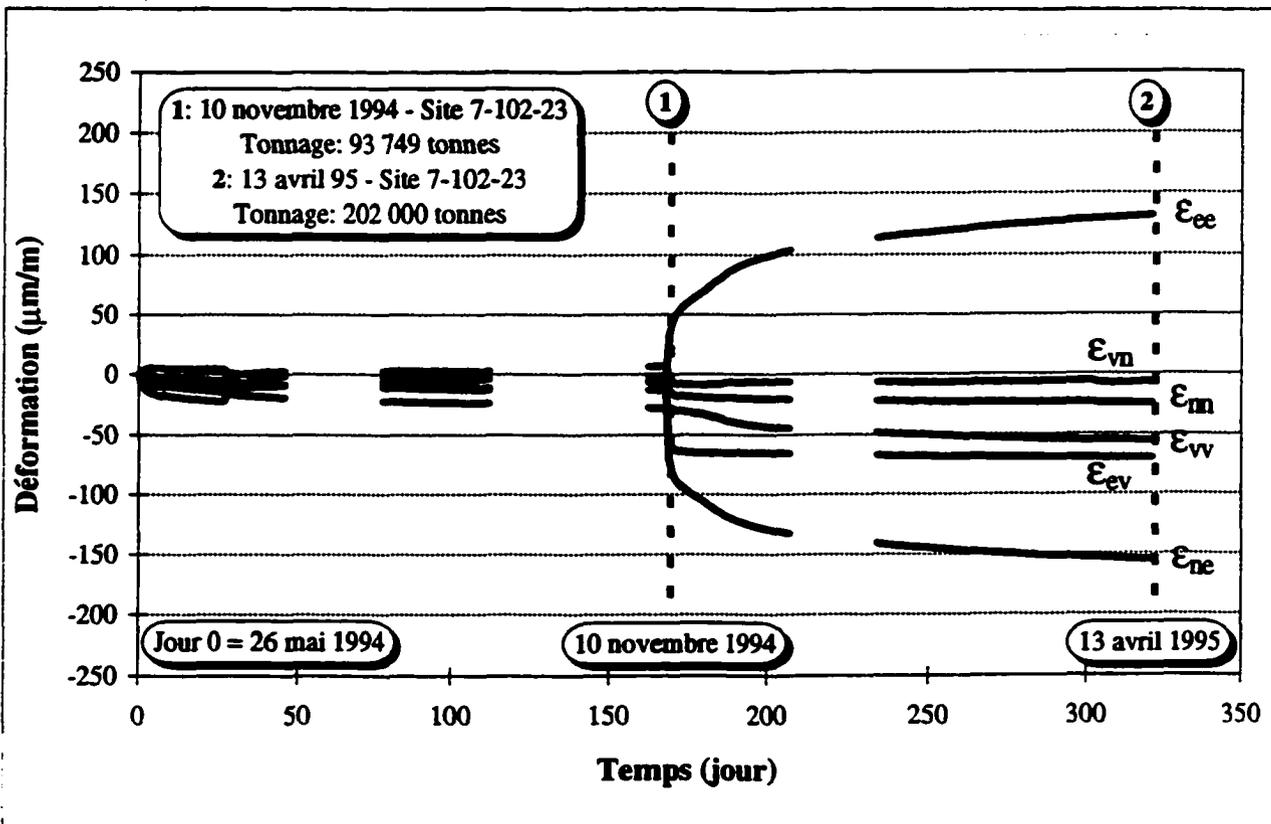


Figure A9 Variation des déformations au niveau 700 du pilier de la mine

A2.2 Énergie atomique du Canada limitée (ÉACL)

Dans le cadre d'un accord passé entre l'Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs (ANDRA) et l'Université de Sherbrooke, trois CIUS préparés par le Laboratoire de mécanique des roches ont été installés autour d'un tunnel situé au Laboratoire de recherche souterrain (*Underground Research Laboratory - URL*) d'Énergie atomique du Canada limitée (ÉACL). Le but de l'opération est d'étudier le processus de report des contraintes lors de l'excavation de la galerie RM415 en mesurant les variations de déformation induite dans les trois dimensions. La figure A10 montre la position des CIUS SM-13, SM-14 et SM-15.

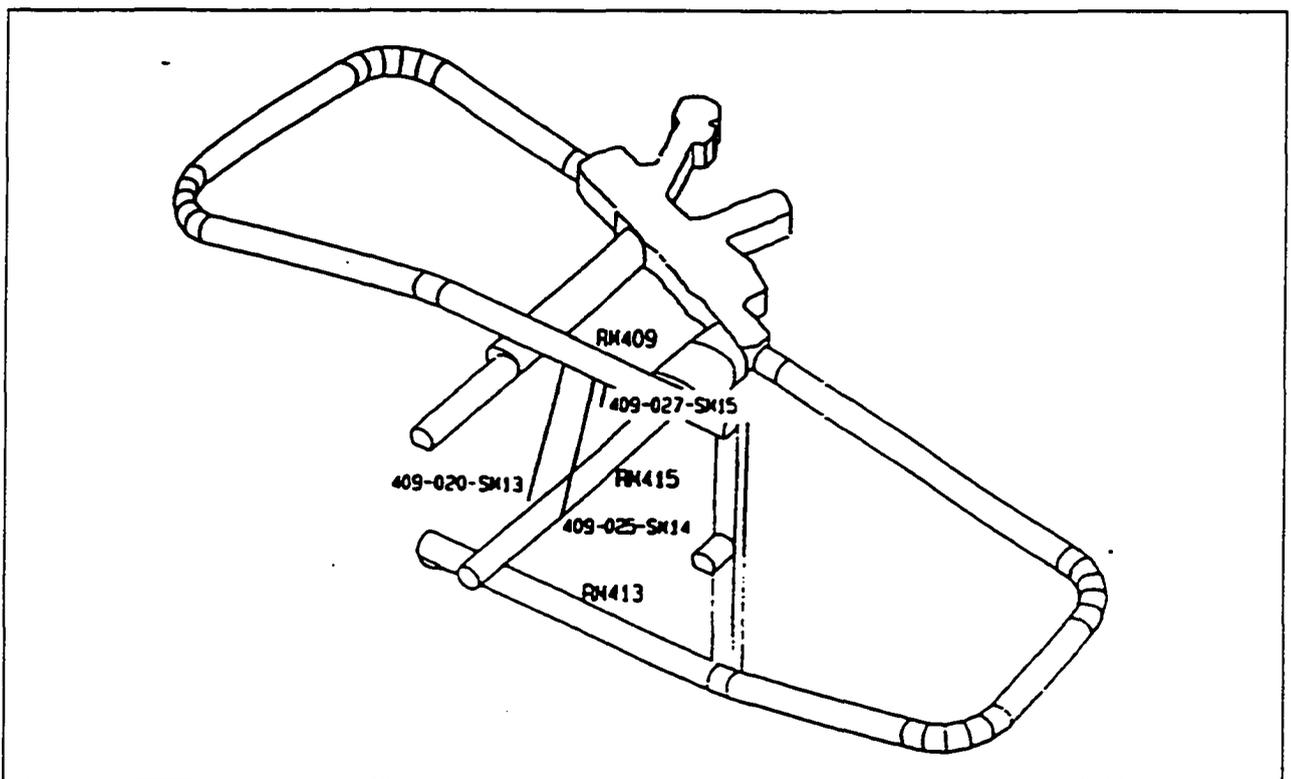


Figure A10 Position des CIUS autour de la galerie RM415

Les recherches au Laboratoire de recherche souterrain de ÉACL ont comme objectif, l'amélioration des connaissances du comportement d'un massif rocheux en réponse à l'excavation d'une galerie. Ces résultats doivent être utilisés pour confirmer la faisabilité d'un site de stockage de déchets radioactifs dans un pluton granitique du bouclier canadien. Ce laboratoire a été excavé jusqu'à une profondeur de 443 m dans le batholite du Lac du Bonnet (Manitoba, Canada). Ce batholite est par ailleurs représentatif des plutons granitiques du bouclier

canadien. Deux niveaux, 240 m et 420 m, ont été aménagés afin d'effectuer des expériences multidisciplinaires.

L'auscultation dont il est question concerne uniquement le niveau 420. Ce dernier se situe dans un granite massif non fracturé avec présence de contraintes in situ élevées. Ainsi, la contrainte tangentielle à la paroi d'une galerie peut atteindre la résistance en compression de la roche. Cette auscultation fait partie d'un projet nommé «*Mine-by Experiment*». Il s'agit d'étudier les réactions du massif rocheux lors de l'excavation de la chambre RM415. Pour ce faire, de nombreux instruments ont été installés à partir de galeries creusées préalablement. On y retrouve ainsi des extensomètres, des cellules de déformation, des thermistors, un système d'enregistrement des émissions acoustiques.

Le mandat du Laboratoire de mécanique des roches consistait à suivre les variations de déformation engendrées par le creusement de la galerie RM415 en fonction de l'avancement de celle-ci. Pour ce faire, trois forages ont été réalisés à partir de la galerie RM409 située juste au-dessus (Fig. A10). Ainsi, deux CIUS ont été placés au fond des forages. Exceptionnellement, ils ont un diamètre de 86 mm et sont situés approximativement à 4 m de l'axe de la galerie RM415. Le troisième CIUS, de diamètre habituel de 140 mm, est placé au niveau de la galerie RM409. Cette position implique que ce CIUS ne mesure pas ou très peu l'effet de l'avancement du tunnel.

À la suite de cette expérience, on peut conclure que les CIUS permettent de suivre l'évolution des déformations dans un massif rocheux perturbé par une excavation. Les variations de déformation mesurées par les CIUS se corrèlent bien avec l'avancement de la galerie RM415 et la réaction vis-à-vis des phénomènes mesurés est instantanée. On montre le bon fonctionnement de cet instrument, et surtout sa précision, qui est de l'ordre de la microdéformation. Le graphique de la figure A11 montre les variations de déformation lors du creusage de la galerie RM415. L'intersection de la galerie avec les cylindres se produit aux environs du jour 95; les CIUS détectent bien les variations de déformation lors du creusage. Après le creusage, il est possible de suivre les variations de déformation et on note un nouvel état de stabilité du massif rocheux. Une modélisation de l'état de contrainte dans le massif en fonction de l'avancement du tunnel est présenté par MARTIN [1993]. Cette modélisation montre bien que l'état de contrainte dans le

massif est modifié à la suite des travaux. La figure A12 montre le changement de l'état de contrainte à différents points (A sur la figure). Bien que les CIUS ne sont pas placés aux endroits correspondant à la position A, la redistribution des contraintes présente une forme qui s'apparente bien à celle de la figure A12.

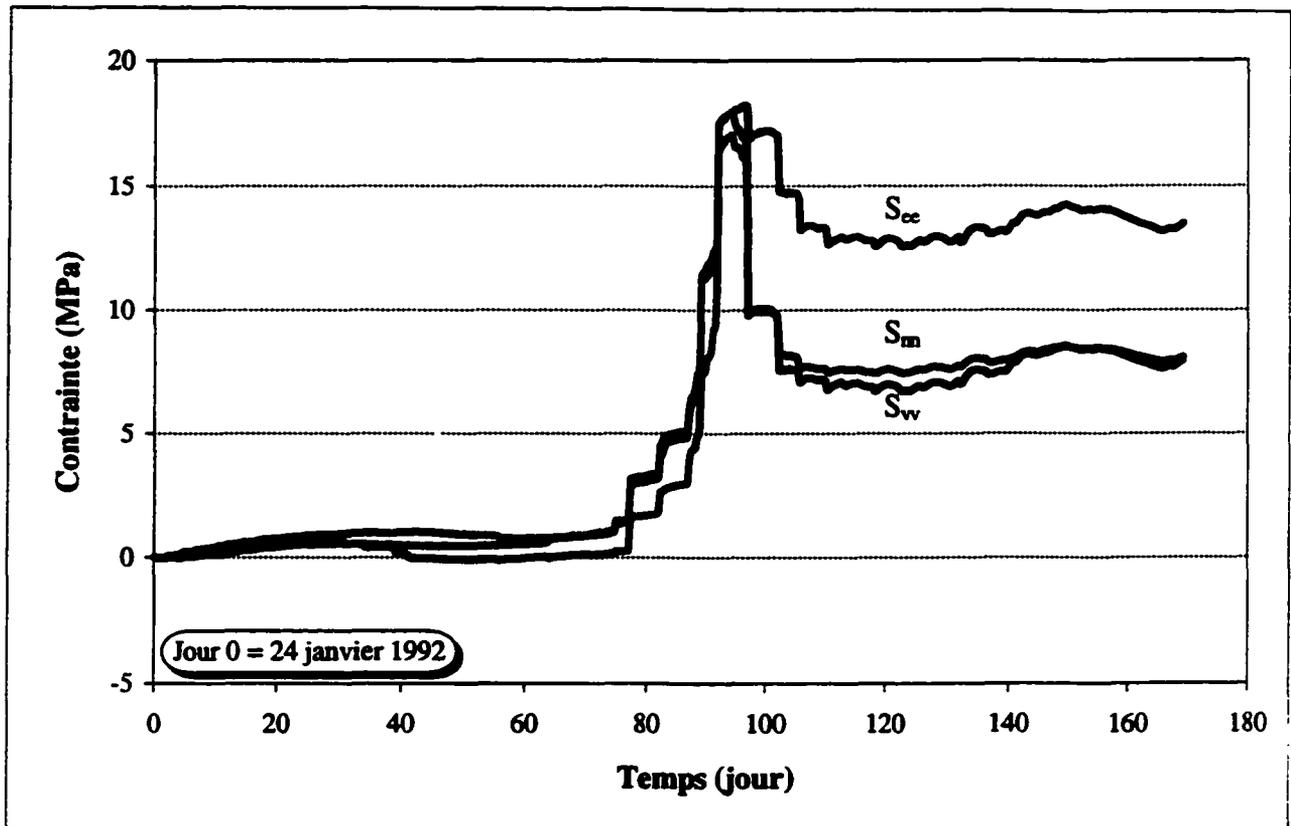


Figure A11 Variations de contraintes détectées par le CIUS SM-13 lors du creusage de la galerie RM415

A3 Application dans d'autres structures

L'utilisation du cylindre instrumenté n'est pas limitée aux barrages et aux massifs rocheux. Celui-ci peut être installé dans toute structure si l'espace le permet. On présente deux exemples d'instrumentation, cette fois moins courants, avec le CIUS.

A3.1 Fondation du biodôme de Montréal

Le vélodrome de Montréal, Québec, Canada, a été construit en 1974-1975 pour les activités cyclistes des Jeux olympiques de 1976. Depuis 1992, ce bâtiment est maintenant l'hôte du biodôme de Montréal. Cette large structure de béton a fait l'objet de plusieurs phases

d'instrumentation géotechnique et structurale, plus particulièrement pour le suivi des fondations ancrées au rocher. Le toit a la forme d'un bouclier et il repose sur quatre butées. Les butées, W, X et Y d'un côté et Z à l'opposé, transfèrent ainsi les charges au rocher.

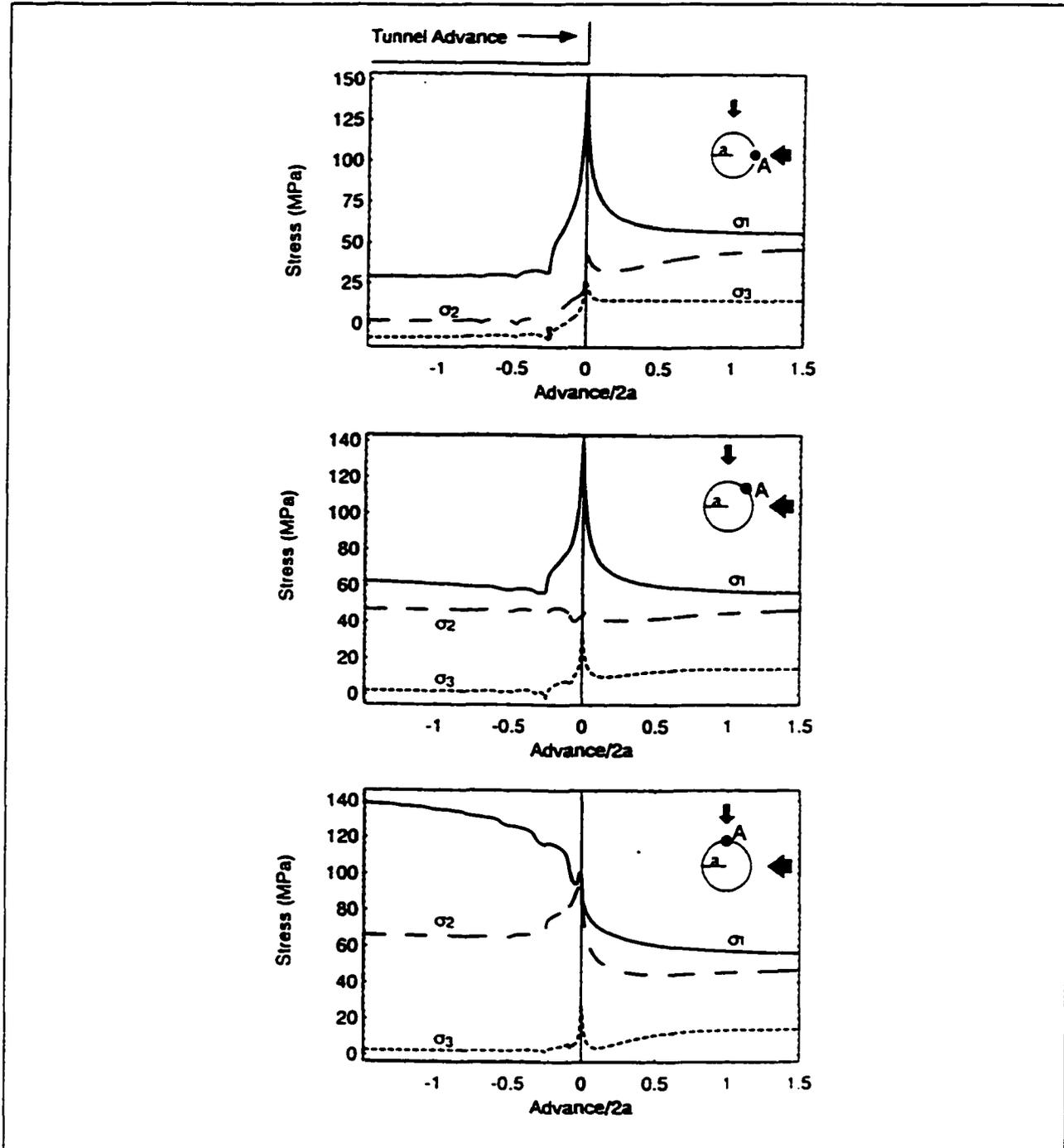


Figure A12 Résultats d'une modélisation de la redistribution des contraintes dans le massif rocheux perturbé par l'excavation de la galerie RM415 [d'après Martin, 1993]

Dans le cadre de l'auscultation du biodôme, la butée W a été instrumentée par deux CIUS (figure A13). Ces deux cylindres, accompagnés d'un cylindre témoin ainsi que d'un cylindre expérimental, sont installés dans le béton dans un plan perpendiculaire à la résultante des efforts transmis par les arches à la butée. Ils permettent le suivi des variations de déformation et de contrainte à long terme de la butée du biodôme. Les résultats montrent que les déformations peuvent provenir des variations de charges dues aux cycles thermiques extérieurs mais aussi à des variations de volume du béton. Comme cette butée est ancrée par des ancrages actifs, tout déplacement de la surface d'appui se traduit par des variations de tension qui peuvent être très importantes. Le CIUS permet donc d'effectuer le suivi des fondations de structures de génie civil comme celles du biodôme. Le suivi des CIUS est assuré par la direction du Biodôme.

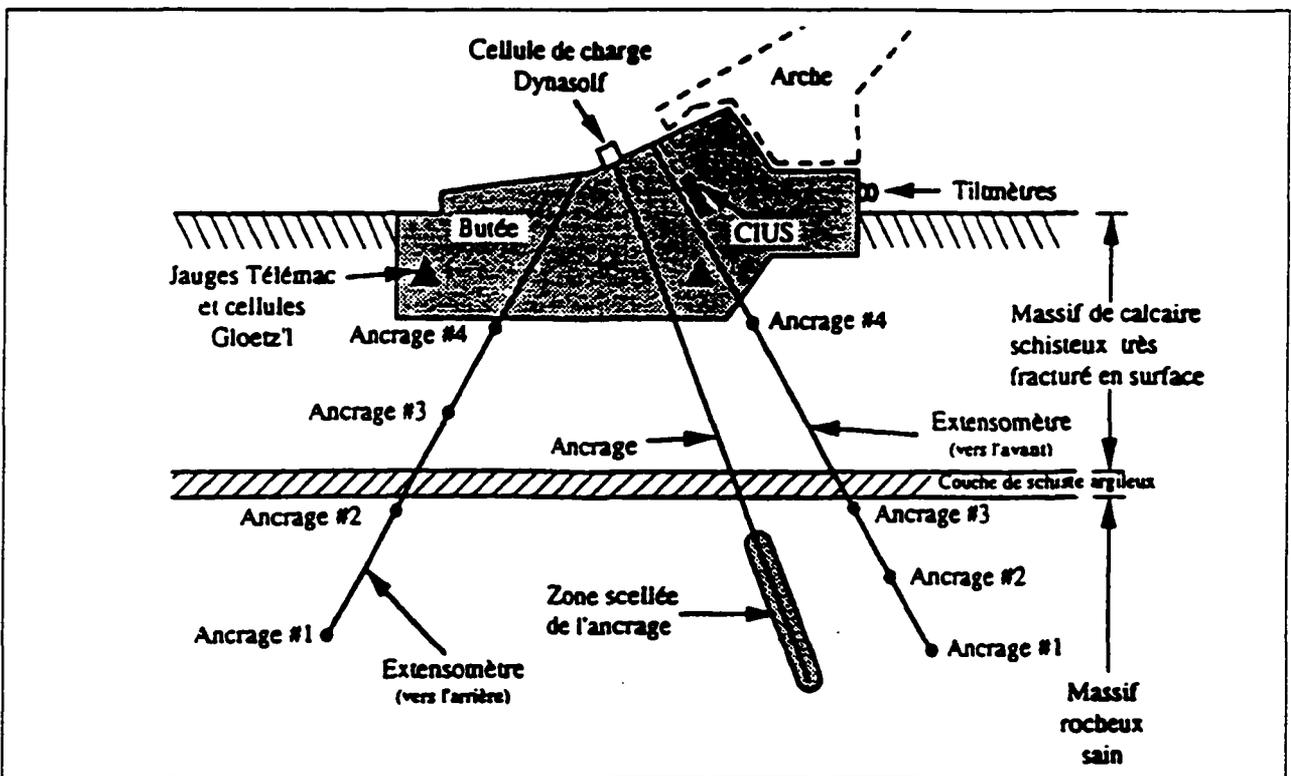


Figure A13 Vue en coupe de la butée W avec la position des CIUS

A3.2 Pont de Portneuf

En Amérique du Nord, le béton à haute performance (BHP) n'est que très peu utilisé en chantier; ceci provient, entre autres, d'une controverse sur la nécessité d'utiliser ou non de l'air entraîné. En effet, la procédure A de la norme ASTM C666 sur le comportement des bétons aux cycles gel-

dégel semble impliquer l'utilisation d'air entraîné pour les BHP ayant une résistance en compression simple comprise entre 50 et 100 MPa. Certains auteurs jugent cependant cette norme trop sévère pour reproduire les conditions réelles en chantier. Ainsi, le béton du pont de Portneuf a été conçu avec de l'air entraîné. Il a été construit durant l'automne de 1992 sur la rive nord du St-Laurent à Portneuf, Québec, Canada. Sa structure est constituée d'un cadre rigide d'une portée de 24,8 m. Le tablier a une section formée de cinq poutres préfabriquées partiellement précontraintes et d'une dalle coulée sur place. La précontrainte longitudinale du tablier est complétée à l'aide de câbles externes situés entre les poutres du pont. À chaque extrémité de la superstructure, il a été fait usage de précontrainte transversale afin d'assurer la diffusion des efforts.

En effet, le niveau de la chaussée de l'ancien pont en treillis d'acier devait être maintenu. En plus, la hauteur libre séparant le niveau d'eau et la partie inférieure du tablier limitait la profondeur totale du tablier à 750 mm. L'utilisation d'un BHP et le choix d'une précontrainte partiellement extérieure présentent l'avantage d'alléger considérablement la structure. La mise en postcontrainte du tablier s'est déroulée 18 jours après la coulée. Afin de comprendre les processus de mûrissement du béton à court terme ainsi que le comportement du pont à long terme, un programme d'auscultation a été mis en œuvre. Dans la dalle, 24 thermocouples et 24 extensomètres à corde vibrante ont été installés. De plus, un CIUS a été placé dans la partie supérieure d'une des béquilles du pont (figure A14). L'acquisition des données des instruments est réalisée à l'aide d'un système automatique installé sur le pont et relié par modem à l'Université de Sherbrooke. Cette instrumentation avait pour objectif la compréhension des phénomènes de prise du béton ainsi que du comportement de la structure en général.

L'instrumentation d'une des béquilles du pont de Portneuf avec le CIUS s'est déroulée sur une période de 430 jours et les conclusions générales suivantes concernant le comportement du pont sont tirées:

- Les données à long terme ont permis de montrer que les déformations du pont étaient essentiellement d'origine thermique;
- Les gradients thermiques ne sont pas uniformes et le gradient dans la direction horizontale perpendiculaire au pont est plus élevé;

- Les déformations résiduelles (excluant les déformations thermiques) présentent un maximum à $30\mu\text{m}/\text{m}$. Ces déformations résiduelles sont liées au retrait, au fluage et aux variations du degré d'humidité dans le béton du pont;
- Le coefficient de dilatation thermique (CDT) du béton a pu être calculé; il est de $9,6\ \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$. Ce coefficient se situe entre le CDT du béton mesuré en laboratoire ($8,5\ \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$) et celui de l'acier d'armature ($11,5\ \mu\text{m}/\text{m}/^\circ\text{C}$).

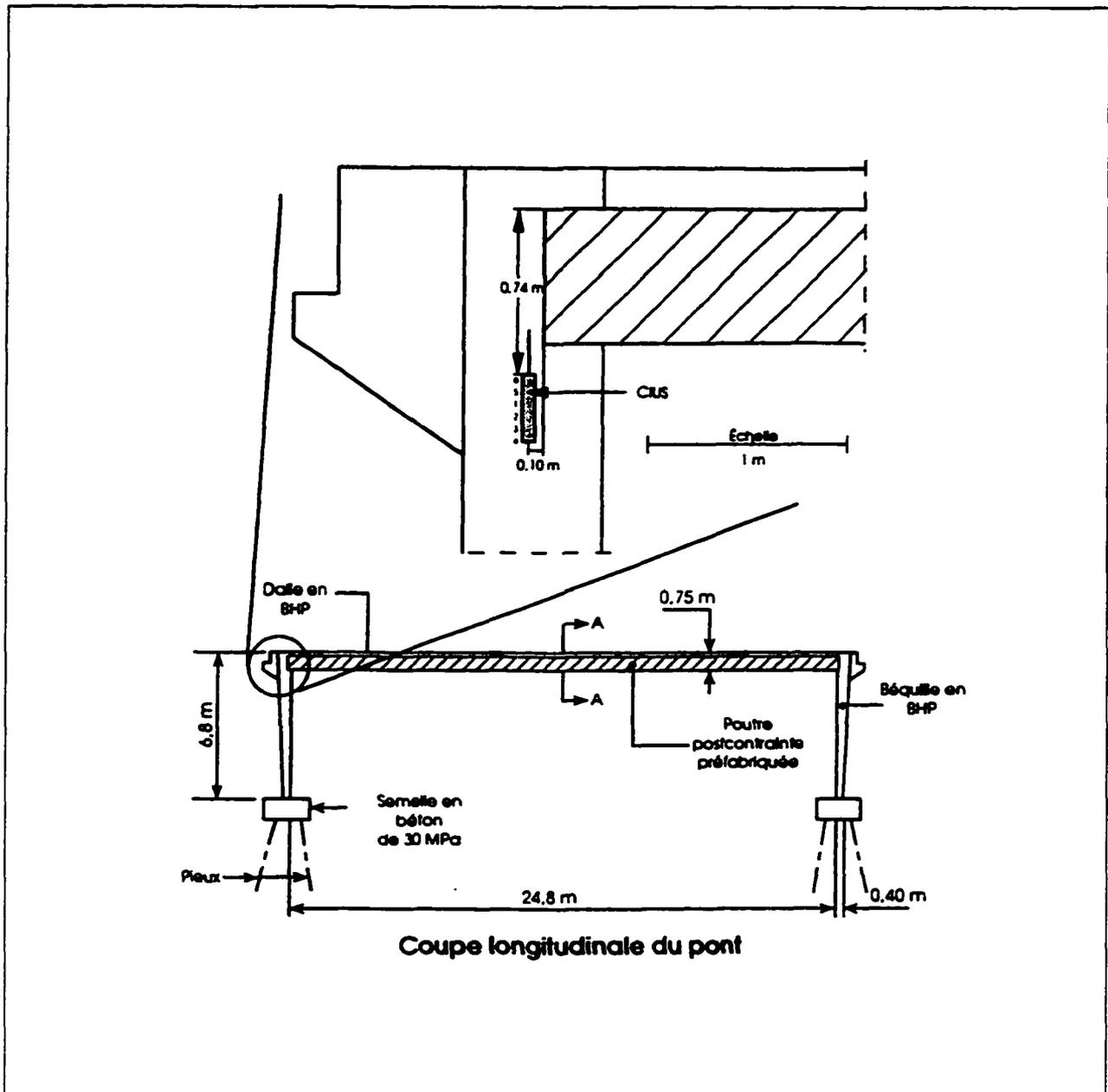


Figure A14 Vue en coupe d'une béquille du pont de Portneuf avec la position du CIUS [d'après & coll 1996]

A4 Étude de cas: instrumentation du barrage Daniel-Johnson avec les CIUS

Cette section présente, à titre d'étude de cas, les résultats de l'instrumentation de la voûte 5-6 du barrage Daniel-Johnson par les cylindres instrumentés de l'Université de Sherbrooke (CIUS). Les cylindres suivis sont ceux identifiés CIUS A-6-0S-7-07-0, CIUS A-6-0S-4-10-0, CIUS A-5-0Z-8-11-0 et on donne, au tableau A3, la date correspondant au jour 0, c'est-à-dire le jour de leur installation. Les résultats couvrent une période d'environ trois années et mentionnons que l'auteur fut impliqué dans ce projet de suivi au cours des années 1996 et 1997 par le biais d'une collaboration avec Hydro-Québec.

Tableau A3
Date d'installation des CIUS dans la voûte 5-6 du barrage Daniel-Johnson

Nomenclature	Date d'installation (jour 0)
CIUS A-5-0Z-8-11-0	9 décembre 1993
CIUS A-6-0S-4-10-0	9 décembre 1993
CIUS A-6-0S-7-07-0	30 septembre 1994

A4.1 Rappel des objectifs de l'instrumentation

L'instrumentation par les CIUS de la voûte 5-6 du barrage Daniel-Johnson a débuté en 1993 et le contexte de ce projet d'instrumentation a été décrit auparavant à la section A1.1. Rappelons simplement que les objectifs sont de:

- mesurer la variation des contraintes et des déformations;
- détecter le mouvement amont-aval du barrage;
- déterminer la présence d'anomalies liées à l'ouverture et à la fermeture de la fissure plongeante.

A4.2 Résultats de l'instrumentation avec les CIUS

Les résultats pour les CIUS mentionnés auparavant sont présentés aux figures suivantes et, afin d'en simplifier la consultation, une liste de ces figures est donnée au tableau A4. Aussi, la figure

A27 montrant un schéma du CIUS, de leur position et de la voûte avec le repère XYZ est placée en encart pour faciliter la consultation des nombreux graphiques.

Tableau A4			
Liste des graphiques montrant les résultats de l'instrumentation de la voûte 5-6 du barrage Daniel-Johnson avec les CIUS			
CIUS	Position	Graphique	Figure
A-5-0Z-8-11-0	Plot Z	Température réelle du cylindre	A15
		Déformation du cylindre	A16
		Variations de déformation	A17
		Variations de contrainte	A18
A-6-0S-4-10-0	Plot S	Température réelle du cylindre	A19
		Déformation du cylindre	A20
		Variations de déformation	A21
		Variations de contrainte	A22
A-6-0S-7-07-0	Plot S	Température réelle du cylindre	A23
		Déformation du cylindre	A24
		Variations de déformation	A25
		Variations de contrainte	A26

Pour ces graphiques, les contraintes négatives correspondent à des compressions et les déformations négatives à des raccourcissements. De plus, le repère d'axe OXYZ est défini comme suit, X: parallèle à la corde de l'arc horizontal formé par la voûte, Y: parallèle à la direction horizontale amont-aval et Z: parallèle à la verticale.

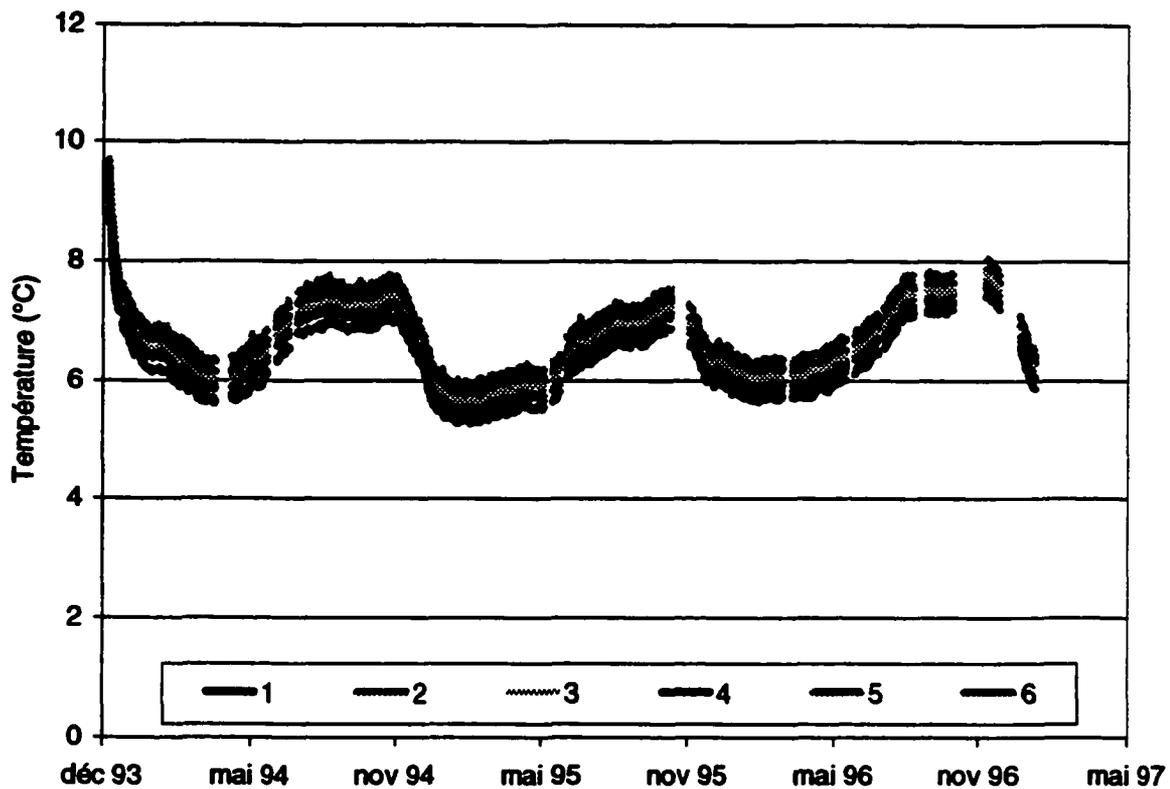


Figure A15 Température réelle du CIUS A-5-0Z-8-11-0 installé dans le plot Z

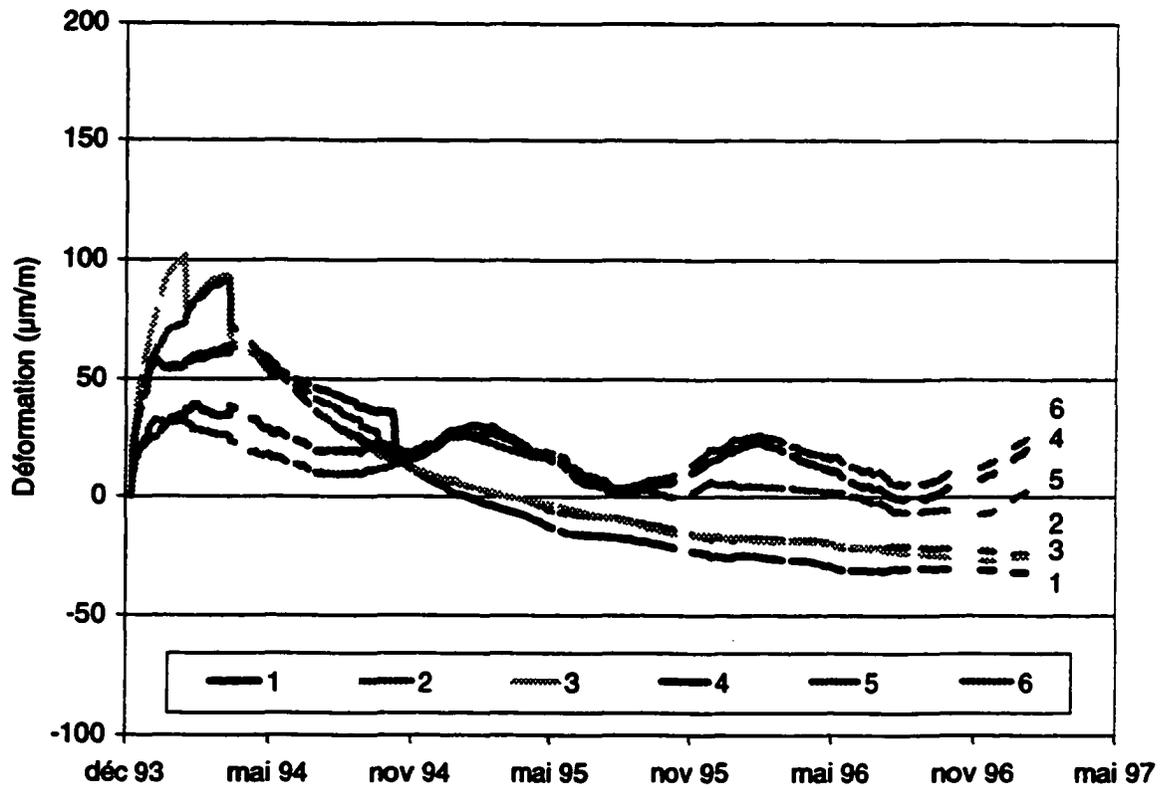


Figure A16 Déformation du CIUS A-5-0Z-8-11-0 installé dans le plot Z

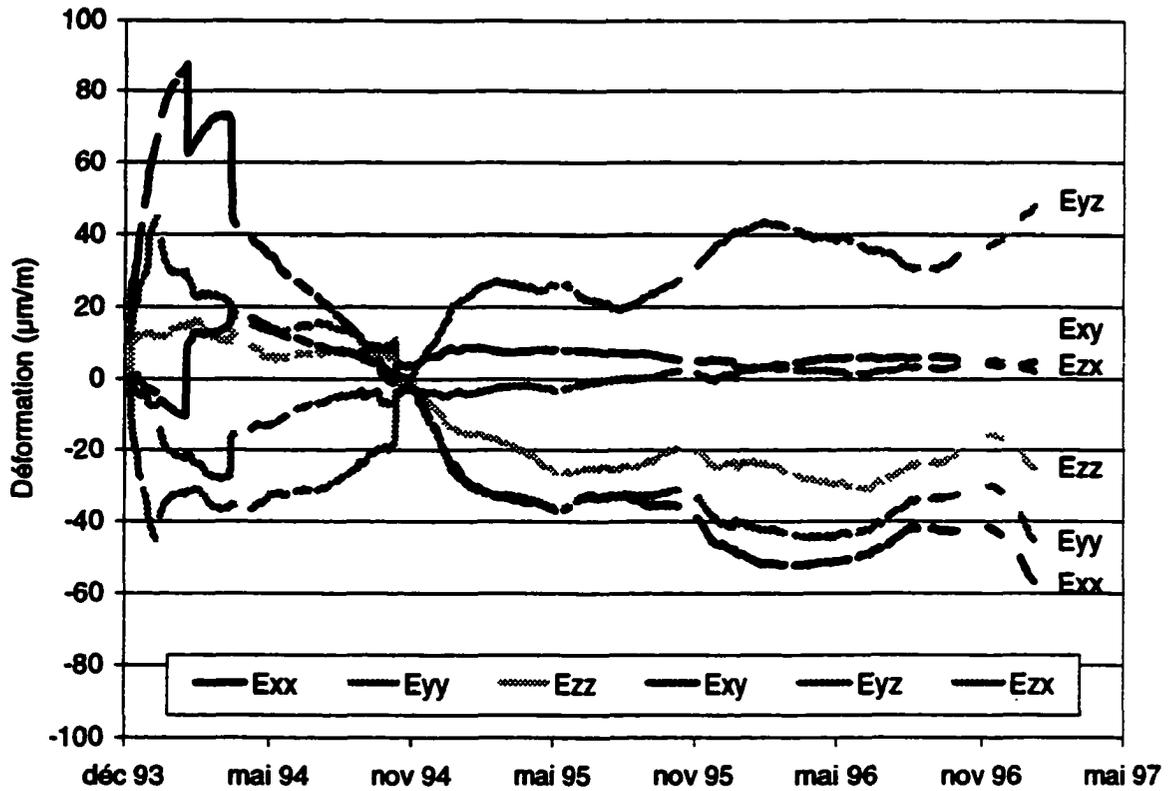


Figure A17 Variations de déformation mesurées dans le plot Z par le CIUS A-5-0Z-8-11-0

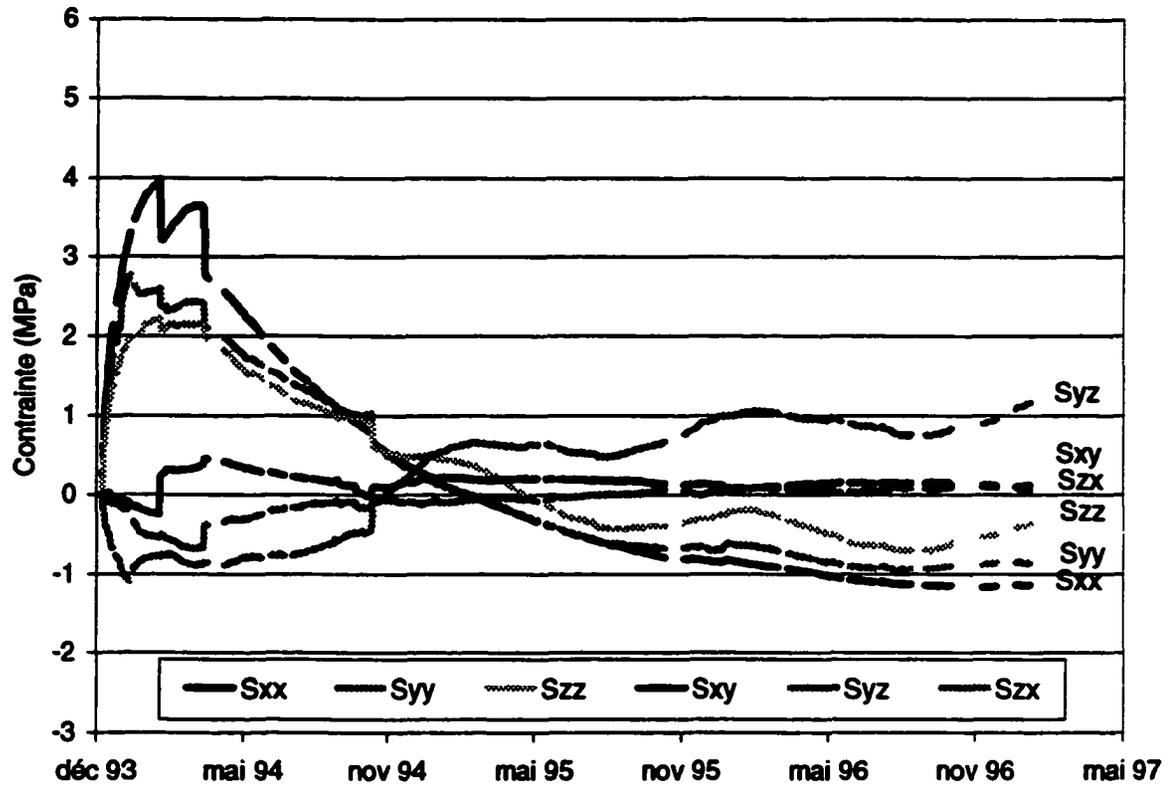


Figure A18 Variations de contrainte mesurées dans le plot Z par le CIUS A-5-0Z-8-11-0

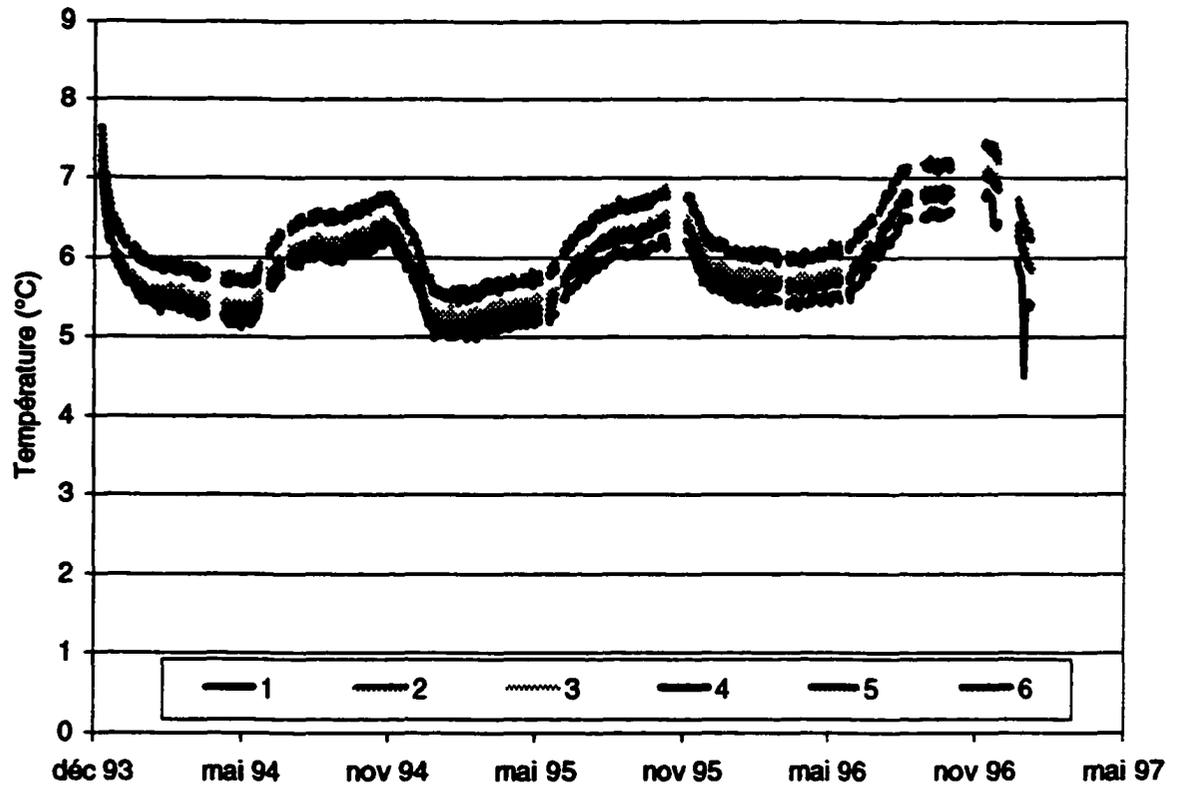


Figure A19 Température réelle du CTUS A-6-0S-4-10-0 installé dans le plot S

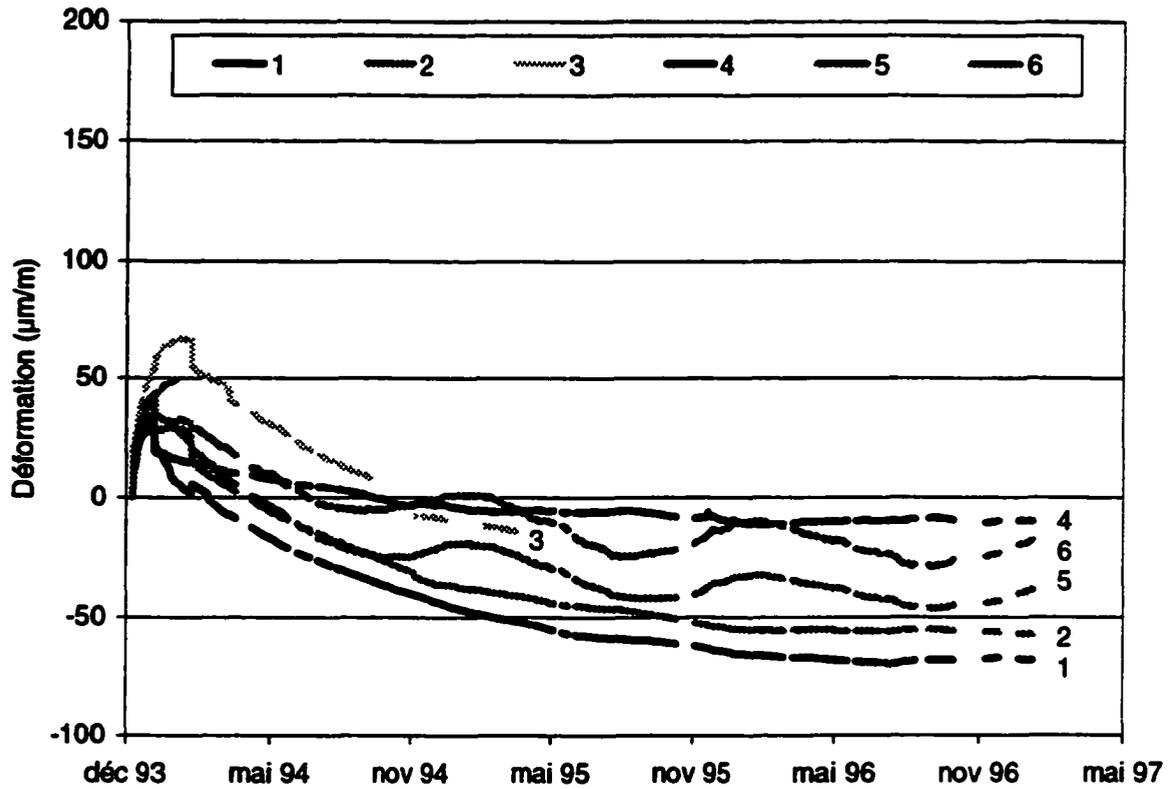


Figure A20 Déformation du CIUS A-6-0S-4-10-0 installé dans le plot S

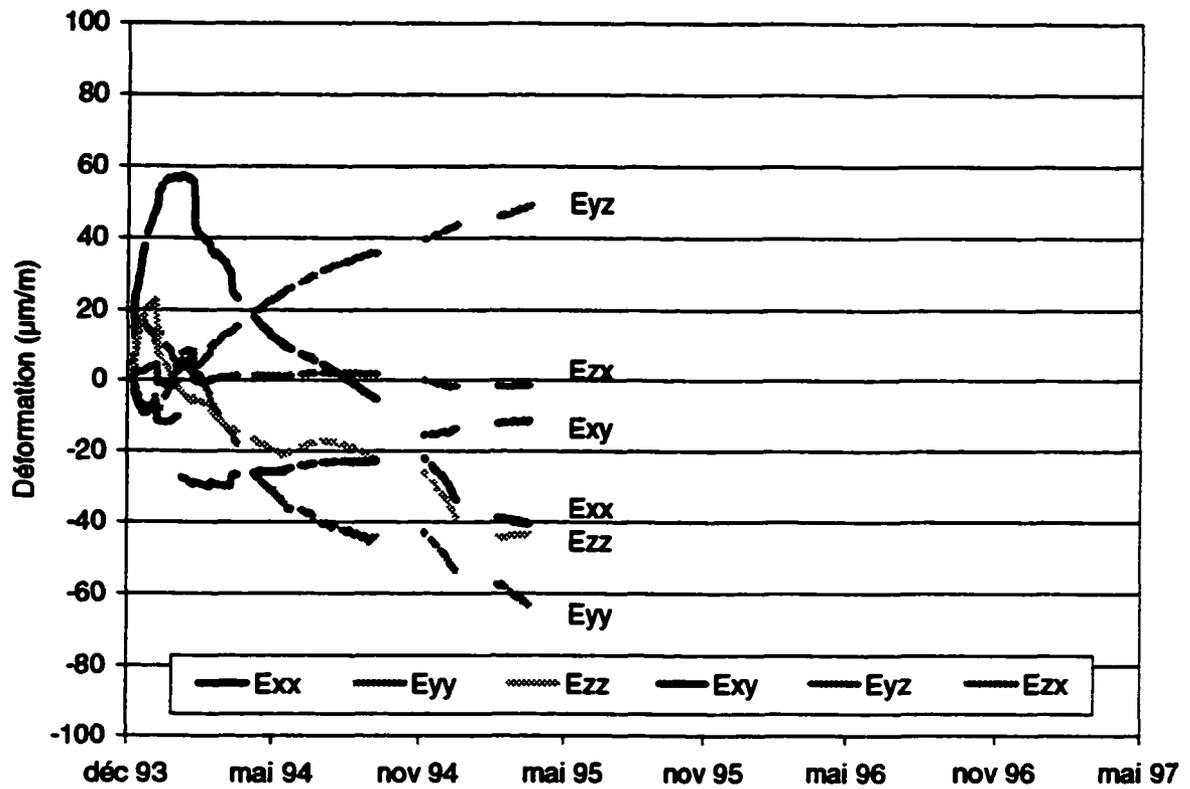


Figure A21 Variations de déformation mesurées dans le plot S par le CIUS A-6-0S-4-10-0

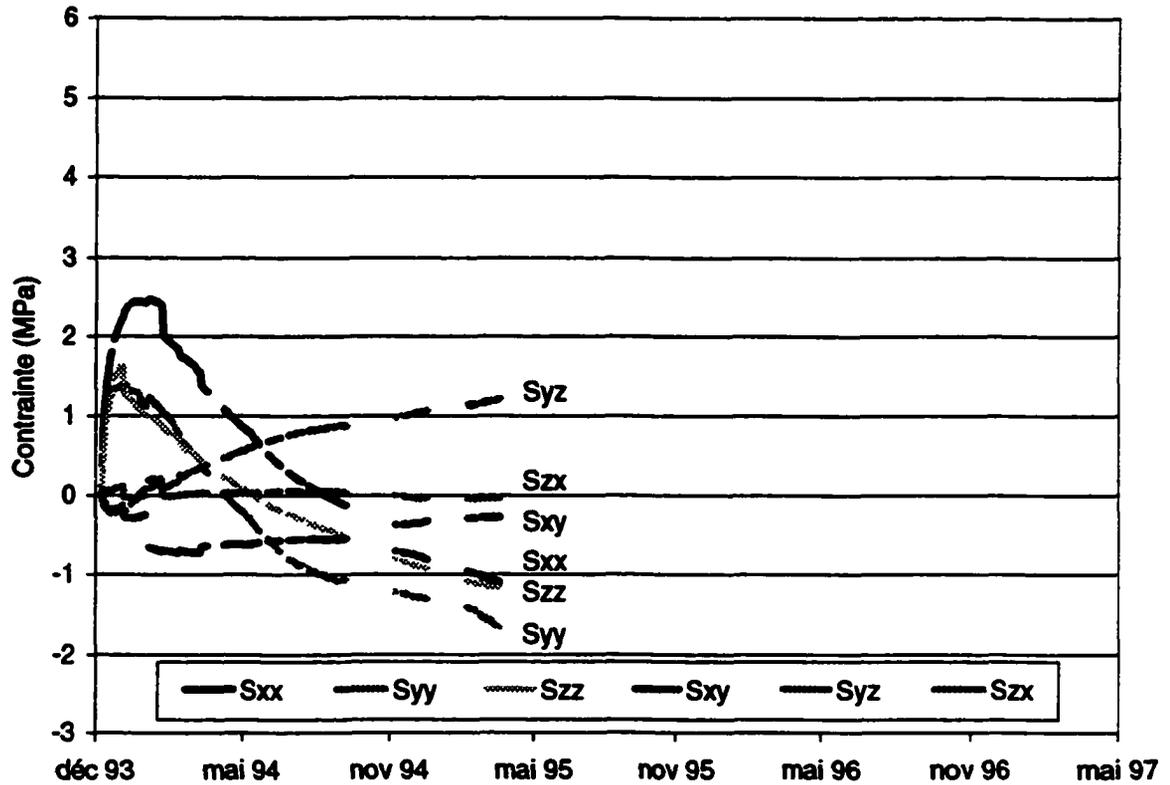


Figure A22 Variations de contrainte mesurées dans le plot S par le CIUS A-6-0S-4-10-0

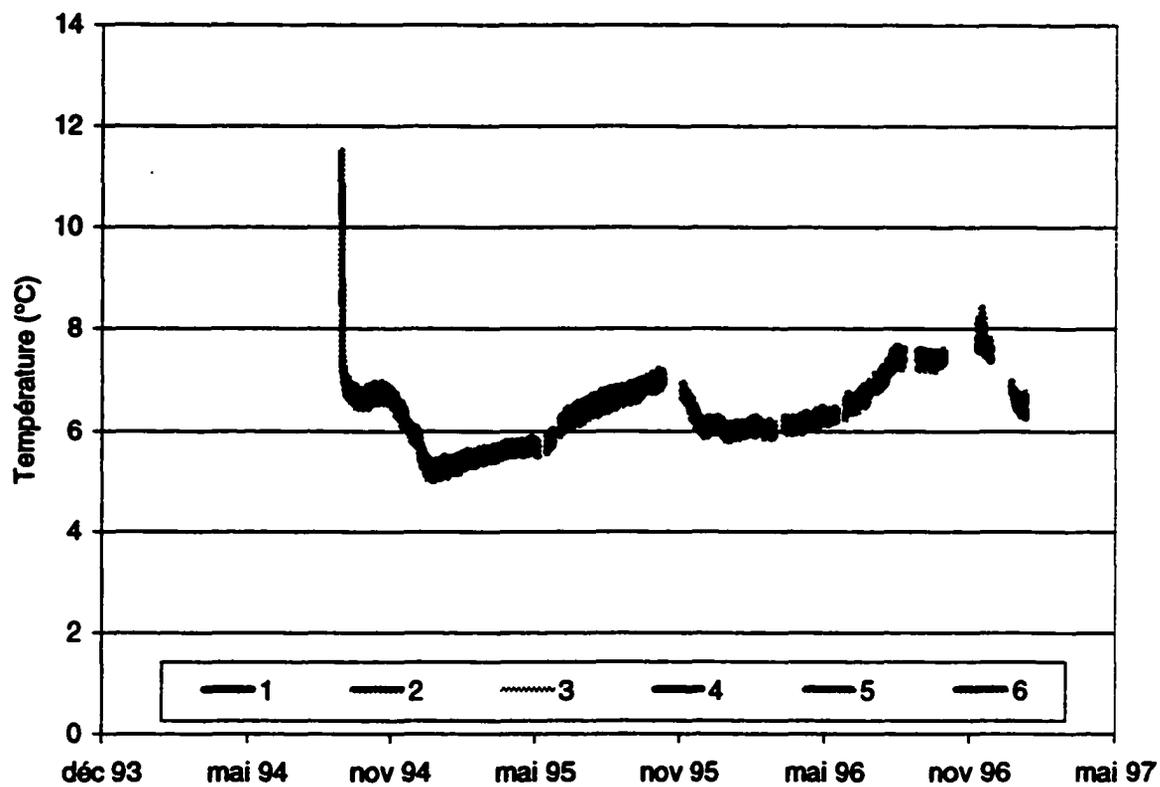


Figure A23 Température réelle du CIUS A-6-0S-7-07-0 installé dans le plot S

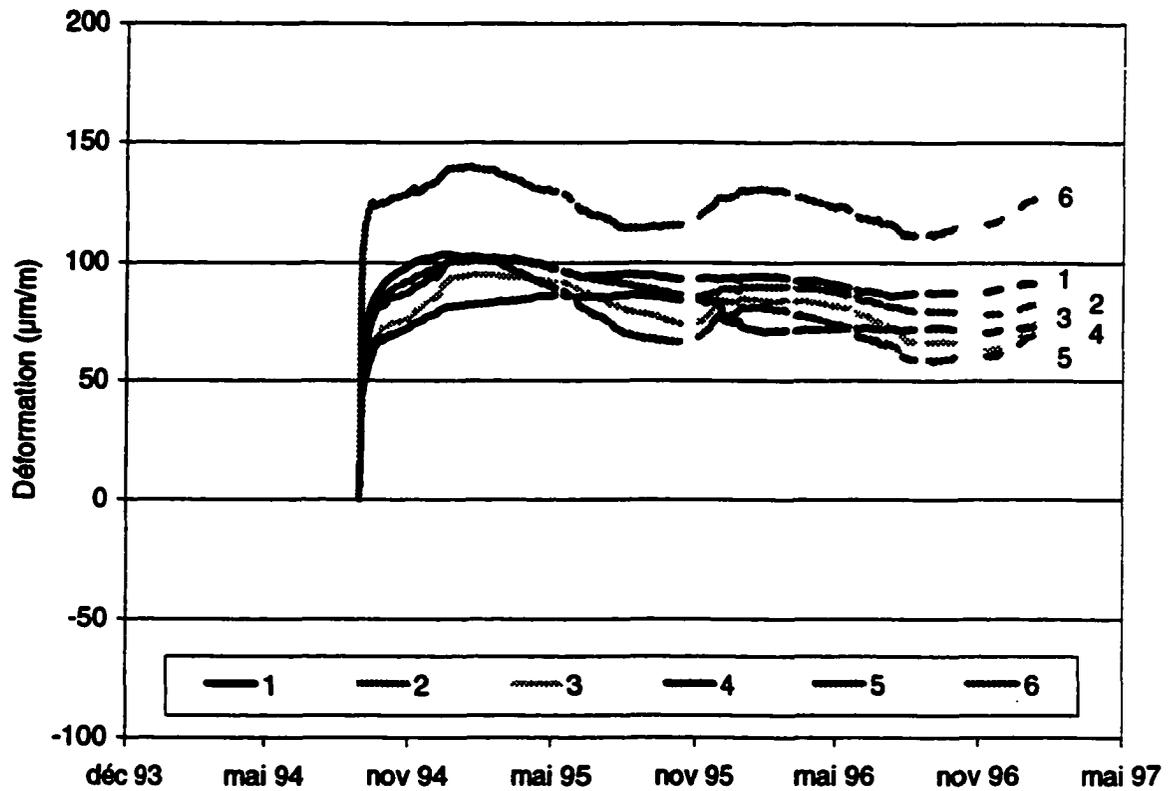


Figure A24 Déformation du CIUS A-6-0S-7-07-0 installé dans le plot S

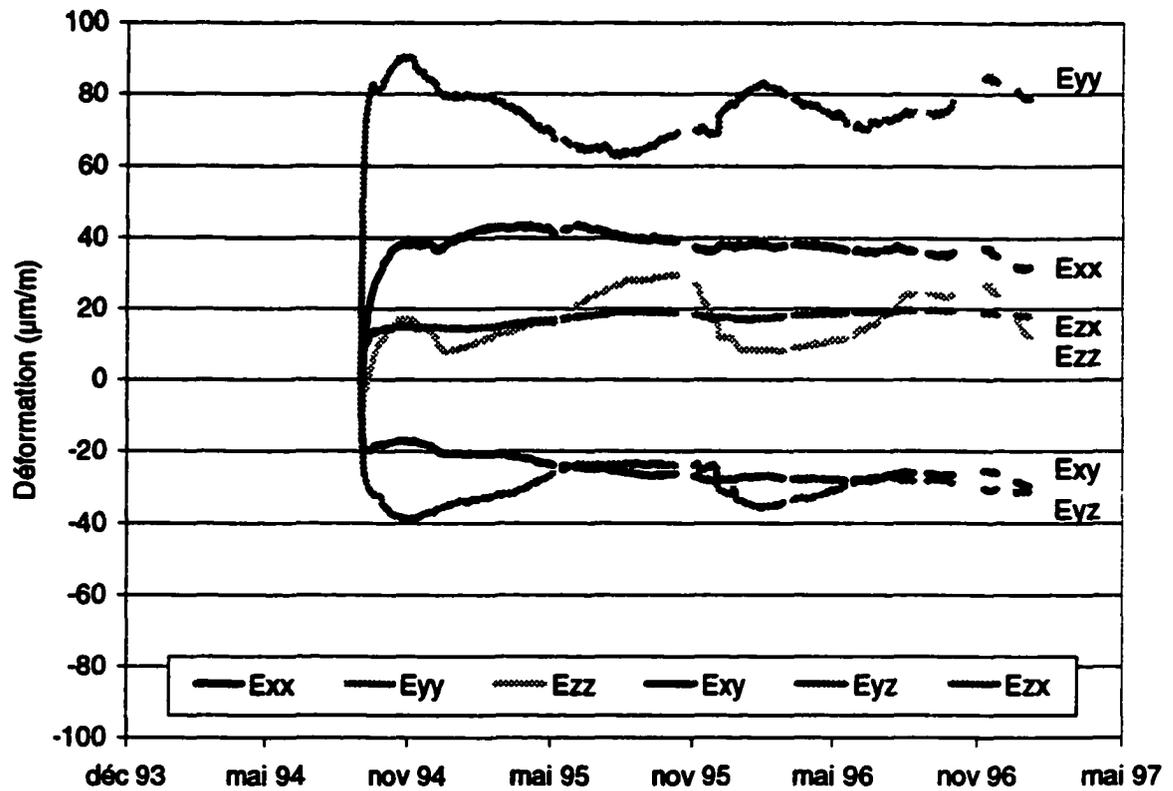


Figure A25 Variations de déformation mesurées dans le plot S par le CIUS A-6-0S-7-07-0

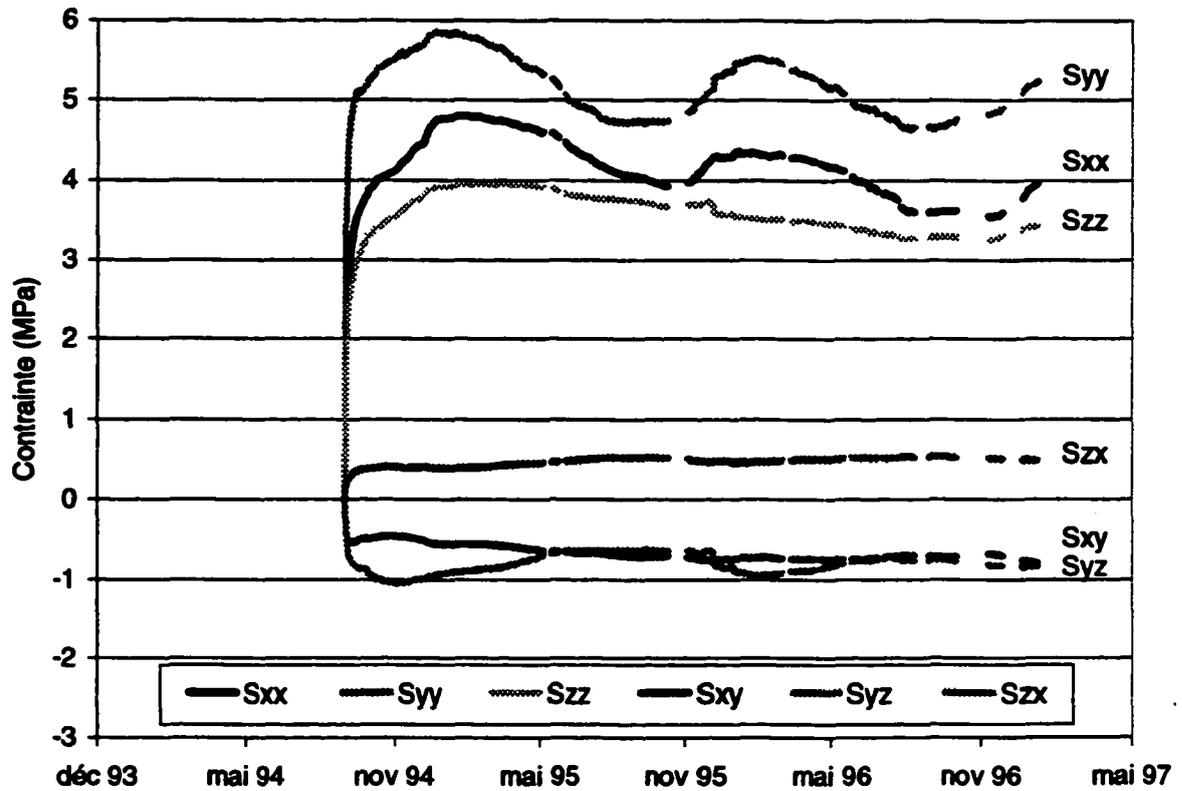
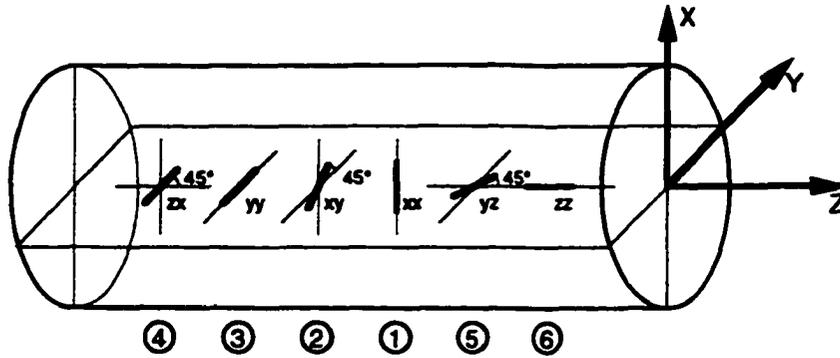
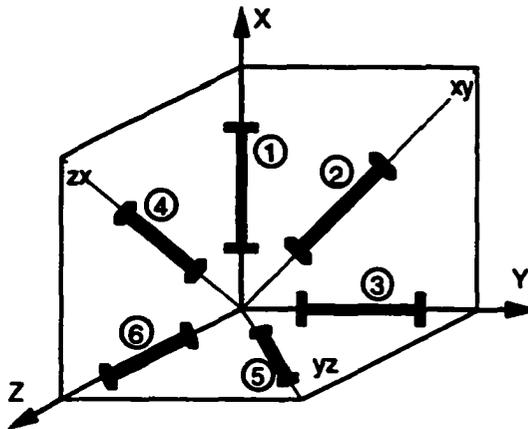


Figure A26 Variations de contrainte mesurées dans le plot S par le CIUS A-6-0S-7-07-0

Position des extensomètres dans le CIUS



Repère OXYZ



Position des CIUS dans la voûte 5-6

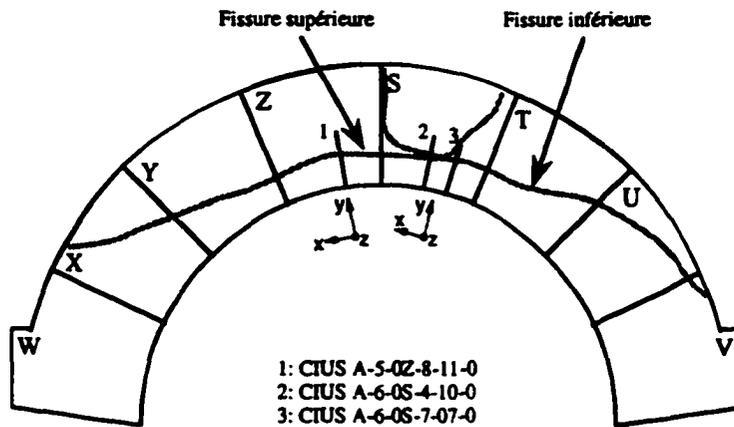


Figure A27 Schéma du CIUS et de la voûte 5-6 avec les repères OXYZ

A4.3 Analyse des températures

Les résultats pour tous les cylindres montrent une variation de la température du barrage de 2°C entre l'été et l'hiver. Pour les CIUS dont le suivi porte sur environ deux années, on remarque bien la variation cyclique de la température (Fig. A15 et A19).

A4.4 Analyse des déformations et des contraintes principales

A4.4.1 Contraintes et déformations dans le plot Z

Le CIUS A-5-OZ-8-11-0 est installé dans le plot Z. La variation de déformation pour la première année, 0 à 300 jours environ, est relativement élevée. Cependant, après l'installation du CIUS, une période de stabilisation est nécessaire et divers facteurs sont alors à considérer. Si l'environnement dans lequel est installé le cylindre est humide, ceci peut, entre autres, affecter la vitesse de mûrissement du coulis de ciment assurant le lien entre le CIUS et la structure, ou encore le degré d'humidité du cylindre. Le milieu peut aussi être perturbé par le forage. Divers facteurs de cette nature permettent d'expliquer la période de stabilisation d'environ 350 jours.

À partir de 350 jours, les mesures effectuées par le CIUS sont relativement stables. Dans la direction X, on observe les variations de déformations et de contraintes les plus élevées, ce qui est normal puisque les efforts sont transmis aux appuis dans cette direction. Les variations de contrainte et de déformation en Y, correspondant à la direction amont-aval, sont moins élevées qu'en X, et sont probablement reliées à la poussée de l'eau. Quant à la direction Z, on observe très peu de variations de contrainte et de déformation. On note donc une bonne cohérence entre les résultats obtenus dans les directions des contraintes principales.

Quant aux variations de contrainte dans le plan horizontal XY et dans les plans verticaux XZ et YZ, on devrait observer des variations nulles ou très faibles des contraintes et déformations. Il en est ainsi pour les directions XY et XZ toutefois pas dans la direction YZ. Cette dernière direction est à peu près perpendiculaire à la direction de la fissure supérieure relevée à la base de la voûte. On note aussi une certaine corrélation entre les variations de contrainte et de déformation et les cycles de température. Les variations de contrainte et de déformation dans la direction YZ sont

probablement liées à de faibles mouvements de la fissure supérieure. Un autre aspect intéressant est l'évolution des variations de déformation dans la direction YZ. En effet, on note que la variation de déformation maximale entre 350 et 600 jours (2^e année) est d'environ 25 $\mu\epsilon$ tandis qu'entre 600 et 2000 jours (3^e année), elle se situe autour de 42 $\mu\epsilon$. Bien que les variations de déformation et de contrainte soient relativement faibles dans cette direction 42 $\mu\epsilon$ et 1 MPa respectivement, il faudrait s'intéresser à l'évolution de la fissure dans le barrage. Le suivi du CIUS en 1997 permettra de confirmer cette évolution des déformations liées à la fissure, actuellement Hydro-Québec travaille à l'installation d'un modem afin de rendre possible le relevé à distance des données.

A4.4.2 Contraintes et déformations dans le plot S

Le CIUS A-6-0S-4-10-0 et le CIUS A-6-0S-7-07-0 servent au suivi du plot S. Pour le premier, les données sur 500 jours sont disponibles tandis que pour le second, le suivi est réalisé sur environ 750 jours. L'installation du CIUS A-6-0S-7-07-0 correspond approximativement au jour 300 du CIUS A-6-0S-4-10-0. Pour le CIUS A-6-0S-4-10-0, le calcul des variations de contrainte et de déformation ne peut être fait au-delà de 500 jours puisqu'une jauge extensométrique est hors d'usage. Cependant, on peut voir à l'aide du graphique des déformations de chaque jauge du CIUS que ces dernières tendent vers un niveau de stabilité. Notons que les lectures des deux CIUS du plot S sont stables.

Les résultats obtenus avec le CIUS A-6-0S-7-07-0 permettront d'analyser le comportement du plot S. Dans ce plot, les variations de contrainte et de déformation dans la direction YY sont plus élevées que dans la direction XX, autour de 80 $\mu\epsilon$ et 40 $\mu\epsilon$ respectivement. Dans la direction ZZ, les variations sont plutôt faibles. On note aussi des variations de contrainte et de déformation dans les directions YZ et XY. Une combinaison des mouvements des fissures supérieures et inférieures pourrait expliquer la déformation dans ces deux directions. Dans le plot S, on rencontre la fissure supérieure et inférieure; ce plot doit donc être soumis à des déformations dans diverses directions.

A4.5 Conclusion sur le suivi avec les CIUS et recommandations

Les résultats obtenus à l'aide des CIUS montrent que les déformations dans le plot Z sont sensibles mais que les variations de contrainte correspondantes sont plutôt faibles, de l'ordre de 1 MPa, ce qui est plausible dans ce type de structure. Quant au plot S, les variations de contrainte ainsi que de déformation sont élevées, surtout dans la direction amont-aval du barrage. De façon générale, on remarque que la variation de contrainte et la variation de déformation pour les plots Z et S sont stables après la première année d'instrumentation et, cela dit, on devrait porter une attention particulière au suivi des contraintes dans le plot S. Aussi, la tendance croissante des déformations en paliers dans la direction YZ du plot Z est particulièrement intéressante. Le CIUS est situé juste au-dessus de la fissure plongeante et le plan YZ est perpendiculaire au plan de la fissure. Cette tendance des déformations est peut-être liée au mouvement de la fissure et il serait maintenant important de travailler à diverses corrélations avec d'autres appareils comme le doorstopper et des mesures de débit de fuite de la fissure.

Enfin, puisqu'il semble que les variations de contrainte et de déformation sont relativement stables, on devrait poursuivre le suivi avec les CIUS afin de vérifier le comportement de la voûte à plus long terme et accorder une attention soutenue au comportement de la fissure plongeante.

A5 Synthèse des applications

Cette rétrospective montre que le CIUS est efficace pour le suivi des déformations liées à des phénomènes divers: déformations de la structure, déformations dues aux réactions alcalis-granulats, déformations des massifs rocheux. Le CIUS est aussi capable d'opérer sans problème dans divers environnements, soit dans les ouvrages en béton et les ouvrages en rocher. Mentionnons que très peu de détails ont été donnés, dans cette rétrospective, sur CAIUS, la carte d'acquisition intelligente de l'Université de Sherbrooke ainsi que sur LAIUS, le logiciel d'analyse et d'interprétation de l'Université de Sherbrooke, on parlera de ces systèmes au chapitre 7 du présent ouvrage.

Dans les barrages, les diverses applications ont démontré que le CIUS est très résistant et peut fonctionner durant de nombreuses années. Il est possible, avec cette cellule, de mesurer les variations de contrainte et de déformation à long terme dans une structure. Maintenant, l'utilisation d'un système d'acquisition de données rend facile le suivi sur de longues périodes de temps. De plus, la sensibilité des CIUS permet de mesurer les faibles déformations liées aux réactions alcalis-granulats par exemple. Dans les massifs rocheux, le CIUS fut efficace pour détecter les déformations d'un massif perturbé par une excavation souterraine ou un dynamitage.

A6 Bibliographie sur le CIUS

La mise au point du Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS) est le fruit de plus de dix années de recherche et de développement. La liste qui suit regroupe les rapports techniques, thèses et mémoires ainsi que les articles scientifiques traitant du CIUS. Cette compilation témoigne aussi de la participation de nombreux étudiants et chercheurs ainsi que de la collaboration étroite avec l'industrie.

A6.1 Rapports techniques

- BALLIVY, G. et BENMOKRANE, B (1986) *Research and development of a technique of installing strain gauges in an operating concrete dam in India*, Rapport préparé pour SNC, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-86-1.
- BALLIVY, G., AITCIN, P.C. et UNEMBU, D. (1988) *Mesures des déformations dans le béton du barrage Beauharnois*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-88-10-01.
- BALLIVY, G., AITCIN, P.C. et UNEMBU, D. (1988) *Mesures des déformations et calcul des contraintes dans le béton du barrage Beauharnois - Rapport final*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-88-12-01.
- BALLIVY, G., SALEH, K. et UNEMBU, D. (1989) *Barrage Daniel-Johnson - Instrumentation additionnelle par témoins sonores - Rapport préliminaire*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-89-04-01.

- BALLIVY, G. (1989) *Barrage Daniel-Johnson - Instrumentation additionnelle par témoins sonores - Interprétation des résultats*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-89-05-01.
- BALLIVY, G., SALEH, K. et BOIS, A.P. (1989) *Instrumentation d'un pilier de la mine Niobec par le cylindre instrumenté*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-89-10-04.
- BALLIVY, G., SALEH, K. et BOIS, A.P. (1989) *Instrumentation d'un pilier de la mine Niobec par le cylindre instrumenté*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-89-11-02.
- BALLIVY, G. (1989) *Instrumentation des piliers de mines par le cylindre instrumenté - Offre de recherche auprès du CRM*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-89-11-03.
- BALLIVY, G. (1989) *Barrage Daniel-Johnson - Instrumentation additionnelle par témoins sonores - Interprétation des résultats (vol. 2)*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-89-12-01.
- BALLIVY, G. et UNEMBU, D. (1990) *Analyse des lectures sur les cylindres instrumentés installés au barrage Beauharnois*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-90-02-01.
- BALLIVY, G., SALEH, K. et UNEMBU, D. (1990) *Analyse des lectures sur les cylindres instrumentés installés au barrage Beauharnois*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-90-06-01,
- BALLIVY, G. et SALEH, K. (1990) *Barrage Daniel-Johnson - Instrumentation additionnelle par témoins sonores - Interprétation des résultats (vol. 3)*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-90-06-02.
- BALLIVY, G. et SALEH, K. (1990) *Barrage Daniel-Johnson - Instrumentation additionnelle par les CIUS: interprétation des résultats (vol. 3)*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-90-06-02.
- BALLIVY, G., SALEH, K. et A.P. BOIS (1991) *Barrage Daniel-Johnson - Instrumentation additionnelle par les CIUS: interprétation des résultats (vol. 4)*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-91-01-01.
- SALEH, K. et BRADLEY, P. (1991) *Instrumentation additionnelle du barrage Idduki par les CIUS*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-91-08-01.

- BALLIVY, G., SALEH, K. et BOIS, A.P. (1992) *Le cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-92-05-09.
- BOIS, A.P. (1992) *Analyse du transfert de contrainte dans une inclusion scellée au milieu encaissant par un coulis de ciment*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-92-06-02.
- SALEH, K. et BOIS, A.P. (1992) *Instrumentation de parois rocheuses à l'aide du cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke - Expérimentations faites à EACL (Manitoba)*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-92-09-01.
- BOIS, A.P. (1992) *Instrumentation du barrage Beauharnois à l'aide du cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke - Rapport préliminaire*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-92-11-01.
- BOIS, A.P. (1992) *Instrumentation du pont de Portneuf à l'aide de thermocouple, d'extensomètres à corde vibrante et d'un CIUS - Rapport d'installation*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-92-11-02.
- SALEH, K., BOIS, A.P. et GAUTHIER, M. (1992) *Instrumentation de la mine Niobec à l'aide du Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS) - Rapport d'installation*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-92-11-03.
- SALEH, K. et BOIS, A.P. (1992) *Instrumentation du Biodôme à l'aide du Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS) - Rapport d'installation*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-92-11-04.
- BOIS, A.P. et SALEH, K. (1992) *Instrumentation du barrage Saunders à l'aide du Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS) - Rapport d'installation*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-92-11-05.
- BALLIVY, G., BOIS, A.P. et SALEH, K. (1993) *Instrumentation of Saunders Dam with the Instrumented Cylinder of Université de Sherbrooke*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-93-01-01.
- BOIS, A.P. et BALLIVY, G. (1993) *Instrumentation de la mine Niobec à l'aide du CIUS - Interprétation des lectures*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-93-07-01.
- BOIS, A.P. et BALLIVY, G. (1993) *Instrumentation de la mine Niobec à l'aide du CIUS - Installation d'un système d'acquisition de données et premiers résultats sur la programmation d'une alarme*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-93-07-02.

- BOIS, A.P. et SALEH, K. (1993) *Suivi des variations de contrainte en trois dimensions à l'aide d'une cellule cylindrique pleine*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-93-07-03.
- BALLIVY, G., BOIS, A.P. et SALEH, K. (1993) *Instrumentation of Saunders Dam with the Université de Sherbrooke's Instrumented Cylinders (CIUS) - Phase II, volume 1-4*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-93-11-04.
- BOIS, A.P. (1994) *Instrumentation de la mine Niobec à l'aide du CIUS - Interprétation, des lectures jusqu'au 18 novembre 1993*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-94-01-02.
- BOIS, A.P. (1994) *Instrumentation du barrage Beauharnois à l'aide du cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke - Interprétation jusqu'à décembre 1993*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-94-02-01.
- BOIS, A.P. (1994) *Modélisation expérimentale du cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke à l'aide d'un bâti de chargement - Simulation sur le CIUS axial - vol. I et II*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-94-05-01.
- BOIS, A.P. (1994) *Instrumentation du barrage Daniel-Johnson par les CIUS - Phase II - Rapport d'installation*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-94-05-02.
- BOIS, A.P. et BUI, S. (1994) *LAIUS - Logiciel d'analyse et d'interprétation de l'Université de Sherbrooke*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-94-06-02.
- BOIS, A.P. et BALLIVY, G. (1994) *Instrumentation du barrage Beauharnois par les cylindres instrumentés de l'Université de Sherbrooke - Rapport d'interprétation des dix CIUS jusqu'à juin 1994*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-94-08-01.
- BALLIVY, G. (1994) *Instrumentation de la mine Niobec à l'aide du CIUS - Programmation des alarmes*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-94-11-02.
- BALLIVY, G. (1994) *Instrumentation de la mine Niobec à l'aide du CIUS - Rapport final*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-94-11-03.
- GHORBAL, A. (1994) *Lecture des CIUS et interprétation des données - Manuel d'utilisation*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-94-12-02c.
- GHORBAL, A. et CHARBONNEAU, D. (1995) *Rapport d'installation et d'interprétation des résultats - Barrage Daniel-Johnson*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-95-06-02.

- GHORBAL, A. et CHARBONNEAU, D. (1995) *Instrumentation des colonnes du barrage Témiscouata par les CIUS*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-95-06-04.
- ALIDRA, L. (1995) *Logiciel d'analyse et d'interprétation de l'Université de Sherbrooke*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-95-07-01.
- ALIDRA, L. (1995) *Logiciel d'analyse et d'interprétation de l'Université de Sherbrooke - Guide du programmeur*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-94-07-03.
- QUIRION M. et BALLIVY, G. (1996) *Instrumentation du barrage Daniel-Johnson par les CIUS - Résultats pour l'année 1995*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-96-02-01.
- GHORBAL, A. et BALLIVY, G. (1996) *Instrumentation du barrage La Tuque à l'aide du CIUS - Rapport d'installation*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-96-11-02.
- QUIRION M. et BALLIVY, G. (1997) *Instrumentation du barrage Daniel-Johnson par les CIUS - Résultats de l'instrumentation pour l'année 1996 et développement de prototype de détecteurs d'anomalies - Rapport d'étape*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-97-04-01.
- QUIRION M. et BALLIVY, G. (1998) *Stabilité des piliers de mines à l'aide du CIUS - Phase II: implantation et mise au point d'une alarme*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, Canada, rapport no. GR-98-09-01.

A6.2 Thèses et mémoires

- UNEMBU, D. (1989) *Instrumentation de barrages en béton en service par la technique d'inclusion instrumentée et injectée*, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 102 p.
- GHORBAL, A. (1992) *Développement d'un système d'acquisition de données pour l'auscultation des infrastructures (roche ou béton)*, Mémoire de maîtrise, Département de génie électrique, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 79 p.
- HAJIABDOLMAJID, V.R. (1996) *Télésurveillance des excavations souterraines par des mesures de déformation (CIUS)*, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 177 p.
- BOIS, A.P. (1995) *Auscultation des ouvrages en rocher ou en béton à l'aide du cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS)*, Thèse de doctorat, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 382 p.

A6.3 Articles scientifiques

- POULIN, R.M., CUPITT, P. et LATHEEF, A. (1985) *Instrument reliability monitoring the data from the Idduki arch dam*, 15^{ième} Congrès des grands barrages, Commission internationale des grands barrages, Lausanne, p. 109-124 et discussion p.145-148.
- BALLIVY, G., BENMOKRANE, B., SALEH, K. et UNEMBU, D. (1989) *Instrumentation d'ouvrages souterrains à l'aide d'inclusions de béton instrumentés*, Congrès international sur les progrès et innovations dans le domaine des travaux souterrains, K.Y. Lo ed., University of Toronto Press, vol. 1, p. 21-30.
- BALLIVY, G., BENMOKRANE, B., POULIN, R. et SALEH, K. (1990) *Une nouvelle technique d'inclusion pour la mesure à long terme des déformations dans des barrages en béton*, Revue canadienne de génie civil, vol. 17, no. 6, p. 919-930.
- BALLIVY, G., SALEH, K., BOIS, A.P., BENMOKRANE, B., MARTIN, A. et CHEVALIER, L. (1990) *Surveillance d'un pilier de la mine Niobec à l'aide du Cylindre instrumenté*, 43^{ième} Conférence canadienne de géotechnique - Prédiction et performance en géotechnique, Département de génie civil et Département de géologie, Université Laval, Québec, p. 447-454.
- BALLIVY, G., SALEH, K., BOIS, A.P. et CHEVALIER, L. (1991) *Mesure de variations de contrainte dans un pilier de mine*, 7th International Congress on Rock Mechanics, W. Wittke, p. 427-430.
- BALLIVY, G., BENMOKRANE, B. et CHAALLAL, O. (1991) *Déformations générées dans les bétons sous l'influence des conditions climatiques*, Revue canadienne de génie civil, vol. 18, no. 6, p. 1088-1092.
- BALLIVY, G., SALEH, K., BOIS, A.P. et CHEVALIER, L. (1991) *Monitoring of a mine pillar by the CIUS at Niobec mine*, Proceedings of the 3rd International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, A.A. Balkema, Rotterdam, p. 13-21.
- BALLIVY, G., MARTIN, A., SALEH, K. et LARIVIERE, R. (1991) *Détection d'anomalies dans les barrages voûtes à l'aide des mesures extensométriques*, 17^{ième} Congrès des grands barrages, Commission internationale des grands barrages, Vienne, vol. Q.65-R.31, p. 569-590.
- BOIS, A.P., LIZOTTE, M., MICHEL, J.C., BALLIVY, G. et SALEH, K. (1993) *Modélisation et conception d'un bâti de chargement à l'aide de la méthode des éléments finis*, First Canadian Symposium on Numerical Modelling applications in Mining and Geomechanics, McGill University, Montréal, Québec, p. 308-317.
- BALLIVY, G., BOIS, A.P. et SALEH, K. (1993) *Auscultation des barrages en béton par la technique des Cylindres instrumentés de l'Université de Sherbrooke*, Comptes rendus du 3^{ième} Colloque sur la réfection des infrastructures de béton - Auscultation et instrumentation des ouvrages en service, CRIB-Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, p. 203-221.
- SIMARD, R., FEKNOUS, N., POULIN, R., BALLIVY, G. et SALEH, K. (1993) *Réinstrumentation du barrage Idduki, Inde*, Comptes rendus du 3^{ième} Colloque sur la réfection des infrastructures de béton - Auscultation et instrumentation des ouvrages en service, CRIB-Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, p. 225-239.
- BALLIVY, G., MELOUKI, M., SIMARD, C. et TARDIF, J. (1993) *Apport de l'instrumentation dans l'analyse du comportement structural du vélodrome de Montréal*, Comptes rendus du 3^{ième} Colloque sur la réfection des infrastructures de béton - Auscultation et instrumentation des ouvrages en service, CRIB-Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, p. 243-291.
- BOIS, A.P., BALLIVY, G. et SALEH, K. (1994) *Monitoring stress changes in three dimensions using a solid cylindrical cell*, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 31, no. 6, p. 707-718.

- BALLIVY, G., BOIS, A.P., SALEH, K. et RIVEST, M. (1995) *Monitoring the stresses induced by AAR in the Beauharnois concrete gravity dam*, Second International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Hydroelectric Plants and Dams, United State Committee on Large Dams, Chattanooga, Tennessee, p. 343-357.
- CHOUINARD, L.E., BENNETT, D.W. et FEKNOUS, N. (1995) *Statistical analysis of monitoring data for concrete arch dams*, Journal of Performance of constructed Facilities, vol. 9, no. 4, p. 286-301.
- BALLIVY, G., SALEH, K., BOIS, A.P., GHORBAL, A., et HAJIABDOLMAJID, V. (1995) *Mesure des déformations et variations de contraintes des piliers des mines dans des conditions statique et dynamique*, 97th Annual General Meeting of CIM Rock Mechanics and Strata Control Session, May 14-18, 1995. P. 267-276.
- BALLIVY, G., BOIS, A.P., HAJIABDOLMAJID, V. et SALEH, K. (1995) *Auscultation de la mine Niobec: une méthode de conception cohérente*, 8th International Congress on Rock Mechanics, T. Fujii, vol. 2, p. 521-526.
- BOIS, A.P., LACHEMI, M. et BALLIVY, G. (1996) *Auscultation d'une culée du pont de Portneuf à l'aide d'une inclusion de béton instrumentée (CIUS)*, Revue canadienne de génie civil, vol. 23, no. 5, p. 1129-1136.

ANNEXE B

Développement d'un système d'alarme

Cet annexe présente les résultats de recherche et de développement d'un système d'alarme compatible avec les capteurs à corde vibrante et, par le fait même, avec le CIUS. Ce système utilise le Cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke (CIUS) ainsi que la Carte d'acquisition intelligente de l'Université de Sherbrooke (CAIUS). La présente recherche a essentiellement porté sur la conception du dispositif d'alarme et à l'élaboration d'un programme informatique de détection des niveaux de déformation captés par le CIUS. Ce dernier est branché à CAIUS qui enregistre le signal des capteurs à corde vibrante et le programme CAIUS-Alarme interroge la carte et compare le niveau de déformation lu à un seuil spécifié par l'utilisateur. Si le seuil spécifié est dépassé, alors un message d'alarme s'affiche. Les niveaux d'alarme sont spécifiés pour trois extensomètres soit ceux des directions xx , yy et zz du CIUS qui correspondent aux directions principales des déformations anticipées.

Des essais de validation en laboratoire ont été effectués afin de vérifier le fonctionnement du système. Pour les essais, un CIUS a été monté dans une cellule biaxiale de grand diamètre permettant de mettre en pression le cylindre et ainsi détecter les variations de déformation avec le logiciel CAIUS-Alarme. Les résultats montrent que ce dispositif est opérationnel et que sa mise en application peut être faite à condition de disposer des ressources logistiques requises. Par ailleurs, moyennant certaines modifications dans la programmation de CAIUS,

ce système pourrait être compatible avec le prototype de cellule de déformation à corde vibrante présenté au chapitre 6.

B1 Contexte du développement du système d'alarme

Initialement, ce système a été développé dans le cadre d'une collaboration avec l'IRSSST (Institut de recherche en santé et sécurité des travailleurs) et la mine Niobec de Chicoutimi. L'une des causes d'accident dans le milieu minier est l'effondrement de galeries. Il est maintenant établi que le suivi en continu des variations de déformation dans une mine est primordial. À partir d'un tel suivi, on peut déduire l'effet des différents travaux, en particulier l'effet des dynamitages sur la stabilité des galeries existantes. L'étude de la stabilité d'un ouvrage nécessite la connaissance du comportement du matériau dans lequel il prend place et des contraintes existantes dans le massif après l'excavation. Le terme contrainte doit être pris dans son sens le plus général, à savoir, mécanique, hydraulique, thermique, etc.

L'évolution de la stabilité des excavations rocheuses est généralement suivie à partir de mesures de déformation (convergence, expansion, ouverture de fissures). Actuellement, il existe diverses méthodes d'auscultation développées pour les ouvrages miniers et de génie civil ainsi que pour la surveillance de risques naturels. Certaines cavités naturelles ainsi que celles résultant de travaux d'excavation peuvent être considérées comme suspectes du point de vue de leur stabilité. La mise en place d'une surveillance s'impose afin de s'assurer de leur stabilité et de s'affranchir de tout risque d'effondrement. La surveillance des excavations peut donc être faite à partir de mesures de déformation. Toutefois, les variations de ces mesures sont souvent délicates à traduire en termes d'alarme. Les principes de base se fondent sur l'existence d'une évolution anormale des déformations à la suite de la perturbation d'un milieu (excavation dans un massif rocheux par exemple).

En raison des variations de contrainte engendrées par l'exploitation du gisement, la stabilité des galeries minières doit faire l'objet d'un contrôle continu par les exploitants. Il est donc nécessaire de développer une méthode d'auscultation fiable ainsi qu'une méthode efficace d'analyse des données. Cette dernière permet de faire le lien entre les variations de

déformation et le déclenchement de l'alarme. Actuellement, le suivi des variations de déformation dans les piliers de mines peut être réalisé avec le CIUS. Par ailleurs, le branchement d'un système d'alarme au CIUS permet à ce dernier de devenir un instrument de prévention et cet aspect constitue l'objectif principal de cette phase du projet. Avec un peu de recul, on remarque que ce système peut être utile pour le suivi de diverses structures, notamment les grands barrages.

B2 Méthodologie

La méthodologie de développement du système d'alarme est présentée à l'aide de l'organigramme de la figure B1. Certaines activités de conception du système sont concomitantes soit les étapes de conception du montage d'essais et celles de programmation du système. Les sections suivantes présentent les détails des diverses étapes de conception et le programme réalisé. Aussi, la rédaction du dossier sécurité a été effectuée tout au long du projet.

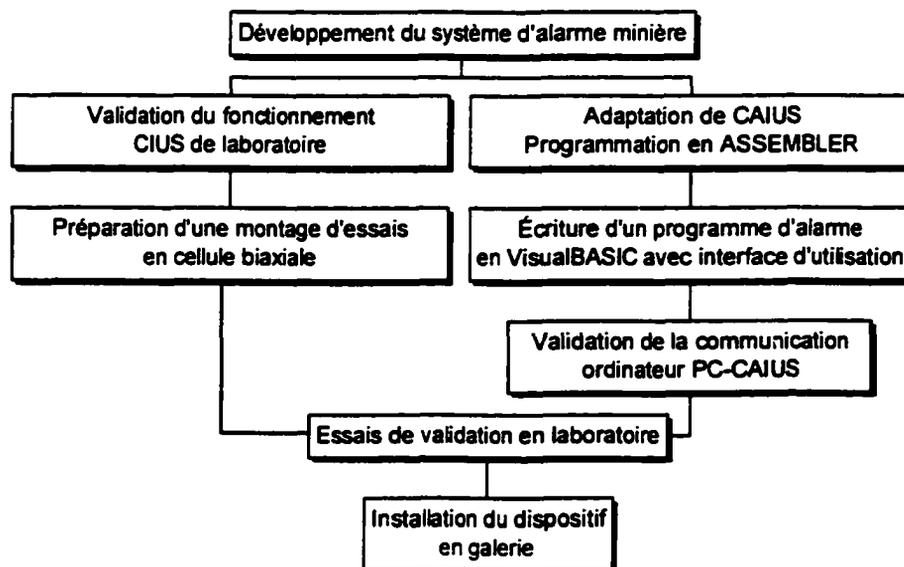


Figure B1 Méthodologie de développement du système d'alarme

B3 Système d'alarme

Le système d'alarme intègre les éléments suivants: le cylindre instrumenté CIUS, la carte d'acquisition intelligente CAIUS et un programme d'alarme écrit en VisualBasic. À remarquer que CAIUS doit être branchée à un ordinateur PC. Il s'agit là des composantes physiques du système mais il demeure incomplet sans une analyse de sécurité. En effet, l'analyse de sécurité se matérialise par le dossier de sécurité qui contient les informations sur le système lui-même mais, en plus, il fait état de son intégration dans le processus de sécurité de la mine. Le système complet est présenté de façon schématique à la figure B.1.

Indépendamment des sites, plusieurs algorithmes de programmation sont envisageables [HADJIABDOLMAJID, 1996]. La méthode du seuil, du gradient et des événements précurseurs constituent des méthodes performantes mais qui restent souvent complexes à programmer et, en plus, font intervenir des concepts statistiques qui ne sont pas toujours bien maîtrisés par les utilisateurs. À la suite de l'analyse des algorithmes de ces méthodes, nous avons choisi, pour programmer l'alarme, la méthode du seuil établie sur trois capteurs à corde vibrante soit ceux en position xx, yy, et zz. Cette méthode est simple d'utilisation et permettra aux utilisateurs de fonctionner efficacement avec le programme d'alarme. De plus, l'un des objectifs poursuivis est de permettre à l'utilisateur de pouvoir effectuer le suivi du CIUS sans être obligé de descendre dans la mine pour récupérer les données des systèmes d'acquisition et de les acheminer à notre Laboratoire pour fins de traitement. Ceci occasionne des délais dans l'obtention des résultats et ne permet pas non plus d'obtenir et de visualiser les résultats en temps réel.

B3.1 Description des composantes

Les sections suivantes donnent une description des diverses composantes du système d'alarme. CAIUS est la carte d'acquisition intelligente de l'Université de Sherbrooke. Cette carte a été développée spécialement pour être combinée au CIUS. CAIUS a aussi été récemment adaptée, dans le cadre de ce projet, pour être compatible avec le programme d'alarme développé.

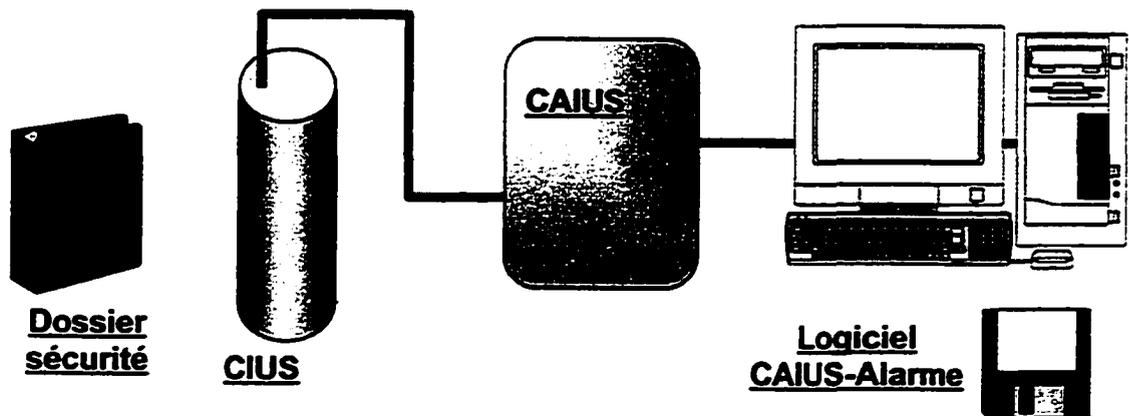


Figure B2 Schéma de tous les composants du système d'alarme

Pour configurer la communication entre CAIUS et l'ordinateur de surveillance, une programmation en langage ASSEMBLER est nécessaire. Ce programme indique à CAIUS d'interroger les capteurs à corde vibrante, de traiter le signal et de le communiquer sous forme numérique à un ordinateur. Mentionnons que CAIUS est composée de trois blocs spécifiques: module d'acquisition, module de traitement et module de communication. La figure B.3 montre la carte d'acquisition tandis que la figure B7 présente la boîte d'acquisition avec CAIUS montée pour une installation en milieu minier. La description complète de CAIUS incluant des tests d'évaluation et de validation est donnée par Ghorbal [1992]. Dans le cadre de ce projet, le développement du programme d'alarme et la validation de ce dernier constituent les thèmes où les efforts ont été concentrés car il n'existait pas, pour cette carte, de programme de pilotage facile d'utilisation.

B4 Résultats

Les sections suivantes présentent les résultats des développements issus de ce projet de recherche. Le logiciel CAIUS-Alarme, les étapes de validation et les résultats des essais sont présentés.

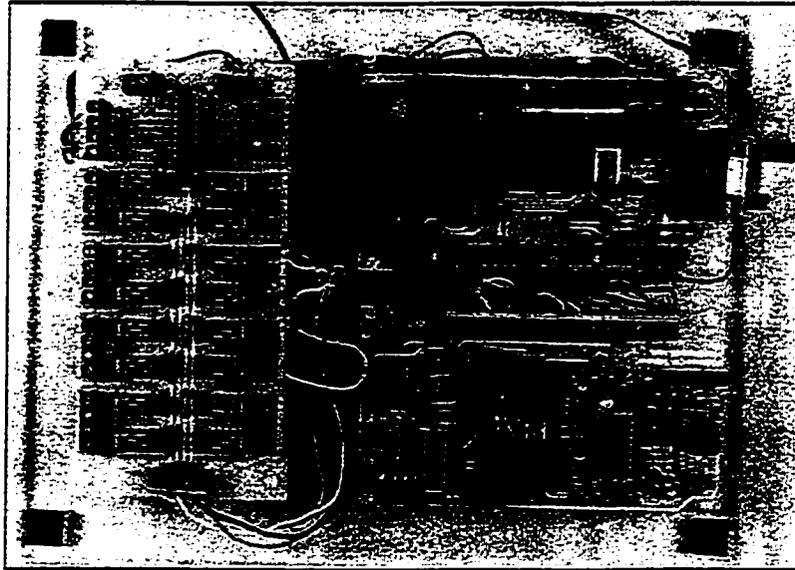


Figure B3 Carte d'acquisition intelligente de l'Université de Sherbrooke

B4.1 Programme CAIUS-Alarme

Le programme d'alarme, réalisé en VisualBASIC, est constitué de plusieurs boîtes de dialogue permettant la configuration des liens CAIUS-CIUS et CAIUS-PC. De la programmation résulte le logiciel CAIUS-Alarme (version 1.1.0). Seul le principe général du programme est présenté ici et toutes les fonctions de ce dernier sont détaillées dans un rapport technique [QUIRION, 1998].

Le programme permet de suivre et de visualiser en temps réel les déformations du CIUS car le taux d'acquisition est de une lecture par seconde. Aussi, si les déformations dépassent le seuil fixé ou si un fonctionnement anormal d'un capteur est détecté, alors un écran d'alarme avec un avertissement est affiché instantanément et l'utilisateur peut prendre les actions nécessaires.

L'algorithme de programmation est basé sur la méthode du seuil. En effet, pour trois des capteurs du CIUS, l'utilisateur spécifie une valeur limite qui ne doit pas être dépassée. Le programme fait donc le suivi dans le temps de tous les capteurs du CIUS et affiche les valeurs

numériques ainsi qu'un suivi graphique à l'écran. L'utilisateur est donc en mesure de voir l'évolution des déformations et il est déjà en mesure de poser un diagnostic sur les données enregistrées. Aussi, si pour les capteurs xx, yy, et zz, les déformations mesurées dépassent le seuil prévu, alors un message d'alarme apparaît à l'écran. Toutefois, afin d'éviter les fausses alarmes qui peuvent se manifester par l'instabilité d'un des capteurs au moment de la lecture, le programme doit lire successivement au moins trois valeurs qui dépassent le seuil fixé.

Finalement, les données peuvent être mises en graphique avec un logiciel comme Excel, puisqu'elles sont enregistrées automatiquement dans un fichier. Ces graphiques seront utiles pour la production d'éventuels rapports de suivi ou encore, en cas de panne du système, les données enregistrées avant la panne sont sur disque dur et donc accessibles.

B4.2 Dossier sécurité

La rédaction de ce qu'on appelle le dossier de sécurité est réalisée en concomitance au développement du système d'alarme. Le dossier de sécurité doit contenir tout ce qui est nécessaire pour définir et démontrer le niveau de sécurité présenté par le système étudié dans son environnement d'utilisation. Par ailleurs, mentionnons que le dossier sécurité peut faire référence à d'autres documents tels des normes, des ouvrages de base du domaine ou des rapports de conception et d'essais. La figure B4 présente la table des matières du dossier qui a pu être constitué jusqu'à maintenant.

Il ressort de l'analyse de sécurité, que le système développé est classé dispositif de catégorie 2 selon la nomenclature décrite dans le projet de norme prEN 954-1:1995. En effet, le dispositif de sécurité satisfait la catégorie 1 puisque l'on peut dire que les composantes utilisées, soit les capteurs à corde vibrante du CIUS, le RAMified Watchdog Timekeeper de CAIUS et l'ordinateur PC, sont des composantes éprouvées qui sont largement utilisées dans diverses applications et leur taux de défaillance est relativement faible.

DOSSIER SÉCURITÉ
<u>Table des matières</u>
1. Analyse des dangers et des risques rattachés à la mine Niobec
2. Spécifications générales de sécurité à la mine Niobec
3. Spécifications de sécurité assumées par le système d'alarme minière
4. Conception et réalisation du système d'alarme minière
5. Validation complète de la sécurité du système d'alarme minière intégré à la mine
5.1 Validation de la sécurité du système d'alarme minière proprement dite
5.2 Validation de la sécurité de l'ensemble
6. Références bibliographiques

Figure B4 Table des matières d'un dossier de sécurité

La catégorie 2 est atteinte par le simple fait que le fonctionnement adéquat du système est validé dès le départ par l'utilisateur avant le déclenchement d'une situation dangereuse (dynamitage). En effet, au lancement du programme d'alarme, l'utilisateur est en mesure de valider le bon fonctionnement du système et si un défaut est détecté en cours d'acquisition, par exemple un mauvais fonctionnement d'une corde vibrante, un avertissement est affiché à l'écran.

B4.3 Validation en laboratoire

La validation en laboratoire a été réalisée avec toutes les composantes: CIUS, CAIUS et ordinateur PC avec le logiciel CAIUS-alarme. Des essais de compression uniaxiale et d'autres en cellule biaxiale ont permis de vérifier que le CIUS était bien fonctionnel. La figure B5 montre la mise en charge uniaxiale tandis que les figures B6a et B6b montrent les résultats de ces essais. Aussi, démontrent-ils le bon fonctionnement du CIUS et du montage utilisé pour les essais de validation de l'alarme. Un essai en cellule biaxiale permet d'appliquer un confinement sur les parois du CIUS. Étant donné le contrôle plus précis de l'essai, on est alors en mesure de mieux connaître la sensibilité du système.

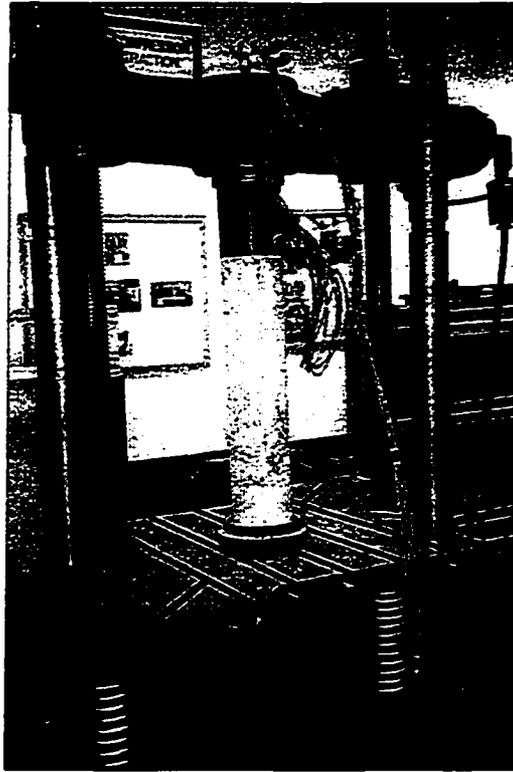
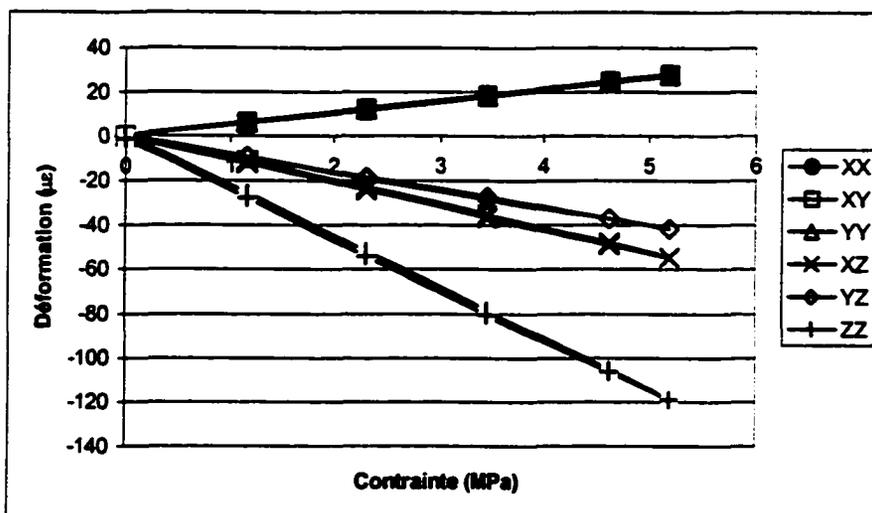


Figure B5 Essai de compression uniaxiale sur le CIUS

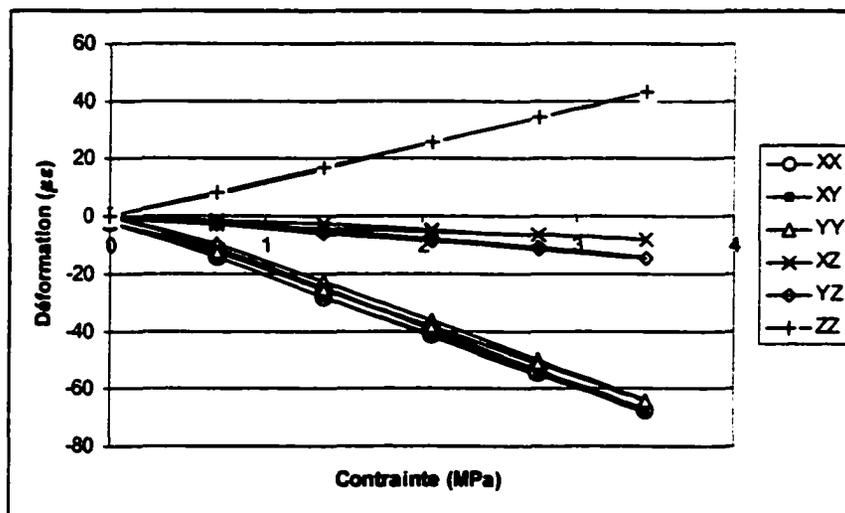
La figure B7 montre le cylindre monté dans une cellule biaxiale de grand diamètre ainsi que CAIUS fixée dans un boîtier hermétique prêt pour une installation en milieu minier. Pour les essais de validation, CAIUS est branchée via un port série à un ordinateur PC. La figure B8 montre le schéma du montage expérimental.

Lors de la programmation, plusieurs tests ponctuels avec des capteurs à corde vibrante branchés sur CAIUS ont été effectués et on ne fait pas état ici de ces nombreux tests préliminaires. On s'attache plus particulièrement aux divers essais de validation en chargement biaxial du CIUS. Lorsque l'on procède à la mise en pression du CIUS, on est en mesure de détecter immédiatement l'effet de ce chargement à l'écran de l'ordinateur. La figure 10 montre un exemple d'acquisition des données avec le programme CAIUS-Alarme. D'autres vérifications sur le déclenchement des alarmes ont été effectuées. Différents essais de

validation ont été effectués., notamment un essai sur une période d'environ 3,5 jours afin de vérifier la limite de fonctionnement du système sur la période prévue de 4 jours à la mine.



a)



b)

Figure B6 a) Résultats des essais de chargement uniaxial du CTUS b) Résultats de l'essai de chargement biaxial

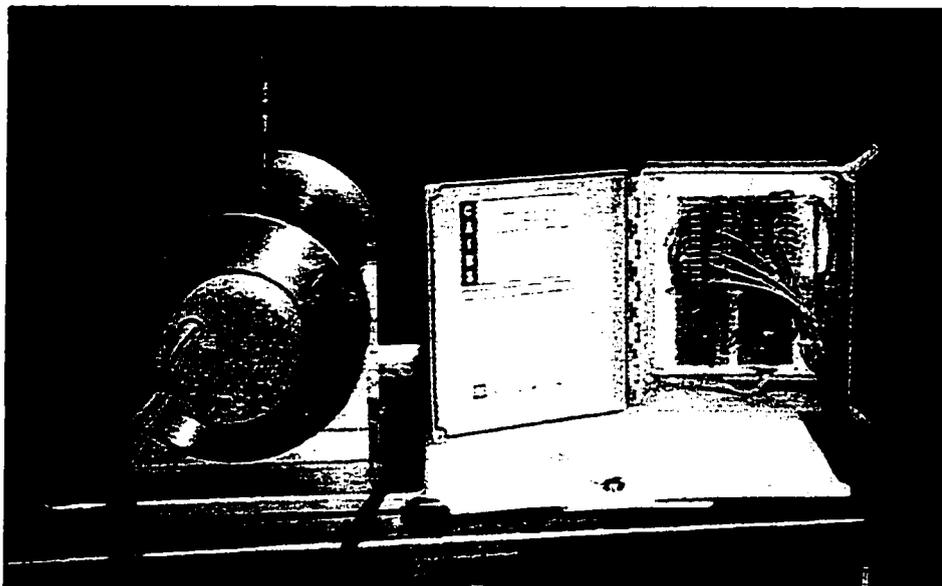


Figure B7 Le CIUS en cellule biaxiale et CAIUS dans son boîtier hermétique

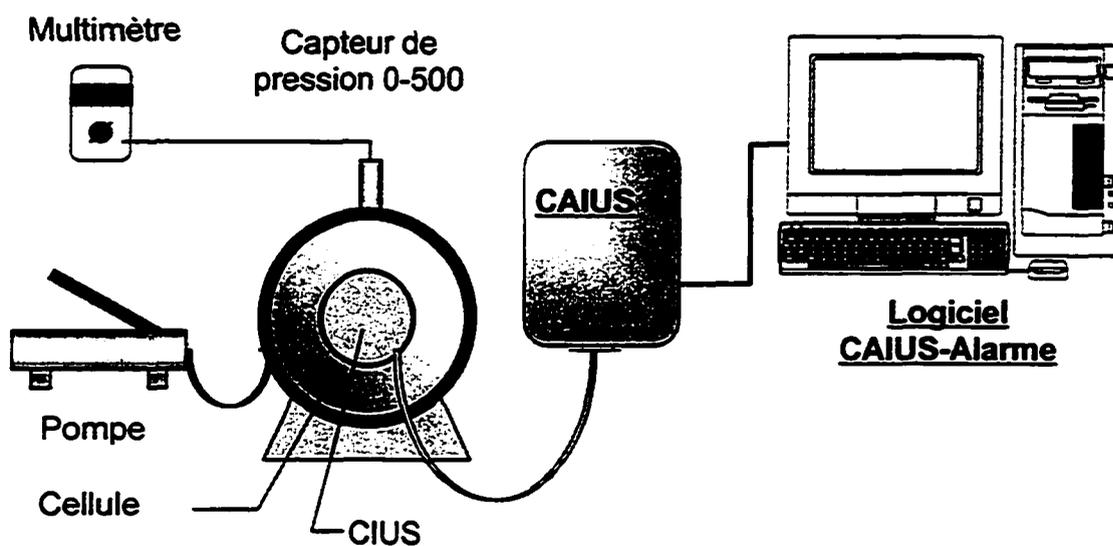


Figure B8 Montage d'essai pour la validation en laboratoire

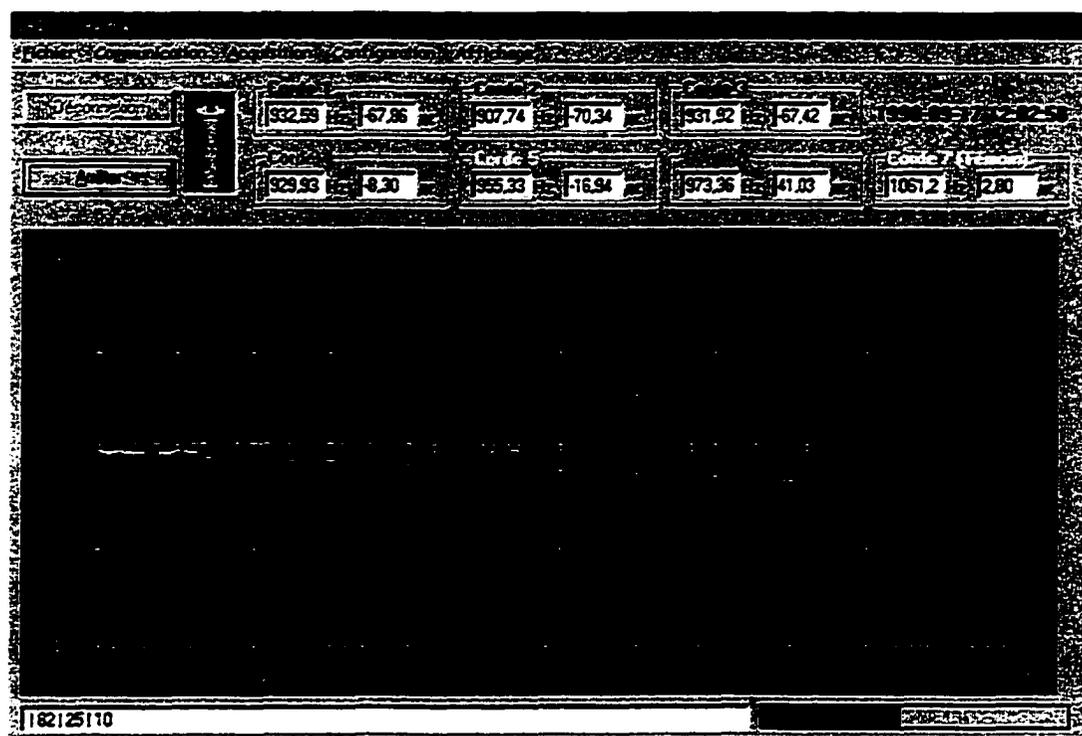


Figure B9 Exemple de l'évolution des déformations détectées avec CAIUS-Alarme

B5 Synthèse

Le système d'alarme développé permet de suivre les déformations des capteurs xx, yy, zz d'un cylindre instrumenté de type CIUS. La période de suivi est actuellement de 4 jours mais les données peuvent être emmagasinées et le système initialisé à nouveau. Aussi, il s'agit d'un système simple qui ne fait pas intervenir de nombreux coefficients correcteurs et de matrices de transfert. Les résultats des essais démontrent le bon fonctionnement du système d'alarme; d'ailleurs ce dernier s'est avéré très efficace dans la détection des seuils d'alarme et surtout, à ne pas déclencher de fausses alarmes. En effet, bien que les capteurs à corde vibrante soient très stables et robustes, il arrive quelquefois qu'ils retournent un signal erroné pouvant être causé par divers facteurs comme le temps d'excitation, la bobine de lecture, etc. Ce phénomène peut être observé assez souvent mais étant donné que l'on fait la lecture de beaucoup de données sur une longue période, ces phénomènes aléatoires n'affectent pas le suivi global. Cependant, dans la perspective de système d'alarme, ces données erronées ne

doivent pas être la source d'un déclenchement d'une alarme et le système a bien répondu à nos attentes sur ce point précis.

La sensibilité du système à détecter les déformations est excellente, soit de l'ordre de $1 \mu\epsilon$, ce qui est amplement suffisant pour l'application prévue et quant à la stabilité, le système fonctionne sans problème sur plusieurs jours d'acquisition. La méthode de détection préconisée est celle du seuil qui est simple de programmation et aussi d'interprétation. Quant à l'évolution des déformations dans le temps, l'utilisateur est en mesure de l'évaluer directement à l'écran de l'ordinateur où est présenté un suivi en temps réel.

B6 Références

- BOIS, A.P. (1993) *Modélisation et conception d'un bâti de chargement à l'aide de la méthode des éléments finis*, First Canadian Symposium on Numerical Modelling Applications in Mining and Geomechanics, Montréal, Québec, p. 373-382.
- BORDES, J.L. & DEBREUILLE, P.J. (1985) *Some facts about long-term reliability of vibrating wire instruments*, National Research Council, Transportation Research Board Symposium on Reliability of Geotechnical Instrumentation, Washington, 16 p.
- BRADY, B.H.G. & BROWN, E.T. (1993) *Rock Mechanics for Underground Mining*, 2nd ed., Chapman & Hall, 571 p.
- COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION, (1995) *Sécurité des machines - Parties des systèmes de commande relatives à la sécurité - Partie 1 : principes généraux de conception*, Projet de norme prEN 954-1.
- GHORBAL, A. (1992) *Développement d'un système d'acquisition de données pour l'auscultation des infrastructures (roche ou béton)*, Mémoire de maîtrise, Département de génie électrique, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, 79 p.
- HADJIABDOLMAJID, V., (1996) *Télésurveillance des excavations souterraines par des mesures de déformation (CIUS)*, Mémoire de maîtrise, Département de génie civil, Faculté des sciences appliquées, Université de Sherbrooke, 177 p.
- QUIRION, M. (1998) *Stabilité des piliers de mines à l'aide du cylindre instrumenté de l'Université de Sherbrooke - Phase II: Implantation et mise au point d'une alarme*, Laboratoire de mécanique des roches et de géologie appliquée, Rapport GR-98-09-01, préparé pour l'IRSST, 17 p. et annexes.