HAL
open science

Comportements de Capteurs à Fibres Optiques, noyés ou fixés en surface d'ouvrages en béton

James Dupont

To cite this version:

James Dupont. Comportements de Capteurs à Fibres Optiques, noyés ou fixés en surface d'ouvrages en béton. Matériaux. Ecole des Ponts ParisTech, 2002. Français. NNT : . tel-00001971

HAL Id: tel-00001971

https://pastel.hal.science/tel-00001971

Submitted on 16 Nov 2002

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

THESE DE DOCTORAT

pour obtenir le titre de

DOCTEUR DE L'ECOLE NATIONALE DES PONTS ET CHAUSSEES

SPECIALITE : **Structures et Matériaux**

Comportements de Capteurs à Fibres Optiques, noyés ou fixés en surface d'ouvrages en béton

THESE SOUTENUE PAR :

James DUPONT

le 27 mars 2002 à l'ENPC

DEVANT LE JURY COMPOSE DE :

M. Alain BONNET (DRAST – Paris) ..... Directeur de Thèse
M. Marc HIMBERT (CNAM/INM – Paris) ..... Rapporteur
M. Jean-Michel TORRENTI (IPSN – Fontenay-aux-Roses) ..... Rapporteur
M. Ban CHAU (EDF/SEPTEN – Villeurbanne) ..... Examinateur
M. Jean-Marie CAUSSIGNAC (LCPC – Paris) ..... Examinateur

La théorie sans la pratique, n'est qu'hypothèse non confirmée.

La pratique sans la théorie n'est qu'approximation.

La théorie prépare, par le contenu mathématique que nous lui donnons, à mettre « la pratique » en application. A condition bien entendu, que la théorie garde toute son impartialité dans ses résultats. Et ce, sans tenir compte de nos propres appréciations.

La pratique dans sa préparation et dans sa mise en application doit, tout en se référant aux résultats de la théorie, tenir compte pour son exécution des principes qui la régissent.

Lorsqu'il y a osmose entre la théorie et la pratique, la réalisation terminée, doit pouvoir servir de référence pour les travaux futurs.

Jos. DUPONT
(Ingénieur Géologue et Philosophe)

Titre

Comportements de Capteurs à Fibres Optiques,
noyés ou fixés en surface d'ouvrages en béton

Résumé

L'usage des capteurs à fibres optiques devient pratique courante en Génie Civil, et ce typiquement pour les mesures de déformations à cœur ou en surface des matériaux de structures.

Les performances métrologiques atteintes d'une telle instrumentation en conditions réelles d'emploi, et en particulier dans le béton, dépendent de l'effet de *filtrage* créé à la fois par la structure du capteur, les interfaces entre l'environnement et l'élément sensible, la présence d'hétérogénéités, et l'effet d'inclusion au sein du matériau d'emploi.

Certaines informations sont accessibles (ex. : grandeurs géométriques). D'autres au contraire, sont déterminées à partir d'hypothèses et de validations expérimentales (ex. : comportements d'un assemblage de matériaux aux propriétés physico-mécaniques différentes).

Pour mieux comprendre les phénomènes mis en jeu, et faciliter ainsi à l'utilisateur l'interprétation des informations délivrées par les fibres optiques, des simulations numériques par éléments finis ont été réalisées.

Plusieurs modèles ont été testés, en examinant notamment l'influence de la rigidité, des conditions d'ancrage et de la géométrie des capteurs.

Parallèlement, des comparaisons ont été effectuées avec des expérimentations réalisées en laboratoire.

Des recommandations ont pu ainsi être tirées de ces études, pour l'amélioration de la conception, et de la mise en place sur ouvrages, de tels capteurs.

Mots clés

Génie Civil – Ouvrages en béton – Surveillance – Capteurs à fibre optique – Mesurage de déformation – Conditionnement d'un capteur – Facteurs d'influence – Fonction de filtrage – Effet d'inclusion.

Title

Optical Fibre Sensors behaviours, embedded or fixed on concrete surface structure

Abstract

The use of optical fibre sensors is being usual in Civil Engineering, and especially for strain measurements in the core or on surface of the structure materials.

The metrological performances reached by such instrumentation in real conditions, particularly in concrete, depend on the *filtering* effect created simultaneously by the sensor structure, the interfaces between the environment and the active part of the measuring element, the presence of heterogeneities, and the inclusion effect within the medium.

Some data are accessible (e.g.: geometrical quantities). In opposite, others data were determined from hypothesis and experimental validations (e.g.: behaviours of an assembling, made up of materials with different physical and mechanical properties).

Numerical finite elements modelling were realised in order to understand better the phenomena involved and then, to help the user to analyse the data measured by optical fibres.

Several models were tested, specially focussing on the influence of rigidity, of the fastening conditions and the sensors geometry.

At the same time, comparisons were made with experiments realised in laboratory.

Thus recommendations could be drawn out from these studies, to improve such sensors design and their setting on structures.

Key words

Civil Engineering – Concrete structures – Monitoring – Optical fibre sensors – Strain measurement – Conditioning of the sensor body – Influence factors – Filtering function – Inclusion effect.

Remerciements

Cette Thèse de Doctorat résulte d'un partenariat entre :

- Electricité De France (EDF), soucieuse d'accroître son potentiel de connaissance dans le domaine du suivi de structures de Génie Civil par fibres optiques ;
- Laboratoire Central des Ponts et Chaussées de Paris (LCPC-Paris), ayant les mêmes préoccupations que EDF, et qui est le *Laboratoire Titulaire* assurant les modalités d'accueil, d'encadrement et de soutien scientifique jusqu'à la fin de la Thèse ;
- Interaction Université Economie (IUE), qui est l'*Association Titulaire* assurant la gestion administrative pendant toute la durée du contrat d'étude EDF-LCPC-IUE (du 30/10/1997 référencé P12/6A2959/EP849 avec l'avenant du 22/11/2000 référencé P18L64-L44/BO1166/1/EP1035).

Je tiens à remercier ces organismes de m'avoir fait confiance en m'offrant la possibilité de mener à bien et à terme cette Thèse de Doctorat.

J'exprime toute ma gratitude à l'ensemble des personnes ayant collaboré de près ou de loin aux différents travaux réalisés durant cette Thèse et sans lesquelles je n'aurai pu honorer mes engagements.

Table des matières

Listes des figures et des tableaux 17

Glossaire 25

Introduction 33

Chapitre 1

Instrumentation à base de fibres optiques pour les ouvrages de Génie Civil 39

1.1 Fibres optiques appliquées à la métrologie 41
1.1.1 De la transmission à la mesure 41
1.1.2 Définitions et types des fibres optiques 42
1.1.3 Procédés de fabrication des fibres optiques 44
1.1.4 Fibres optiques pour capteurs 45
1.1.5 Définitions des capteurs à fibres optiques 46
1.1.6 Principes de mesure 48
1.1.7 Chaîne de mesure et modes d'interrogation des capteurs à fibre optique 49
1.1.8 Types de mesure 50
1.2 Capteurs à fibre optique appliqués au Génie Civil 52
1.2.1 Surveillance et auscultation des ouvrages de Génie Civil 52
1.2.2 Avantages et inconvénients des capteurs à fibre optique 54
1.2.3 Exemples d'application 56
1.2.3.1 Capteurs à fibre optique TOR (Tout Ou Rien) 56
1.2.3.2 Capteurs à fibre optique à microcourbures 56
1.2.3.3 Capteurs à fibre optique interférométriques 58
1.2.3.4 Capteurs à fibre optique polarimétriques 60
1.2.3.5 Capteurs à fibre optique à réseau de Bragg 61
1.3 Cadre et objectifs de l'étude 63

Chapitre 2

Analyse générale des facteurs influençant le mesurage de déformation du béton 67

2.1 Mesurage de l'état de résistance mécanique du béton 69
2.1.1 Principe de l'extensométrie 69
2.1.2 Milieu de mesure considéré 71
2.1.2.1 Type de béton 71
2.1.2.2 Structures en béton 71
2.1.2.3 Comportement et chargement 72
2.1.3 Capteurs à fibre optique considérés 73
2.1.3.1 Hypothèses de l'extensométrie 73
2.1.3.2 Type et structure des capteurs 74
2.1.3.3 Type de mesure 76
2.2 Identification des facteurs d'influence prépondérants 77
2.2.1 Agents d'environnement et grandeurs (ou facteurs) d'influence 77
2.2.2 Actions mécaniques 78
2.2.2.1 Influence des caractéristiques mécaniques et des dimensions des différents constituants des capteurs à fibre optique 78
2.2.2.2 Influence des liaisons internes entre les différents constituants des capteurs à fibre optique 79
2.2.2.3 Synthèse 81

2.2.3 Actions hydriques et thermiques 81
2.2.3.1 Influence de l'hygrométrie sur les capteurs à fibre optique 81
2.2.3.2 Influence de la température sur les capteurs à fibre optique 81
2.2.3.3 Synthèse 84
2.2.4 Autres sources de perturbations 84
2.2.4.1 Influence de la structure des capteurs à fibre optique 84
2.2.4.2 Influence des dimensions du capteur pris dans son ensemble 86
1) L_{bm} en fonction du milieu de mesure 86
2) L_{bm} en fonction de la mesure souhaitée 86
2.2.4.3 Influence des méthodes d'intégration des capteurs à fibre optique au milieu de mesure 88
1) Cas des capteurs en volume 88
2) Cas des capteurs en surface 89
2.2.4.4 Synthèse 90
2.3 Synthèse des hypothèses et présentation générale de l'analyse des facteurs d'influence considérés 90

Chapitre 3

Simulation de capteurs à fibre optique de déformation dans leur milieu de mesure 93

3.1 Code de calcul CESAR-LCPC 95
3.2 Caractéristiques des calculs 96
3.3 Matériaux considérés 97
3.4 Niveau 1 : Etude de la partie sensible des capteurs à fibre optique 98
3.4.1 Caractéristiques des modèles et des cas d'étude 98
3.4.2 Analyse des résultats 101
3.4.2.1 Influence des dimensions de la gaine mécanique 101
3.4.2.2 Influence des caractéristiques mécaniques de la gaine mécanique 104
3.4.2.3 Influence de la base de mesure de la fibre optique 107
3.4.2.4 Liaison entre les deux niveaux d'étude 109
3.4.2.5 Conclusion 110
3.5 Niveau 2 : Etude de l'inclusion en volume 110
3.5.1 Caractéristiques des modèles et des cas d'étude 110
3.5.2 Analyse des résultats 113
3.5.2.1 Influence des dimensions de l'inclusion 113
3.5.2.2 Influence des caractéristiques mécaniques 117
3.5.2.3 Influence des liaisons *éprouvette / inclusion* 120
3.5.2.4 Conclusion 122
3.6 Niveau 2 : Etude de l'inclusion en surface 123
3.6.1 Caractéristiques des modèles et des cas d'étude 123
3.6.2 Analyse des résultats 125
3.6.2.1 Influence des dimensions de l'inclusion 125
3.6.2.2 Influence des caractéristiques mécaniques de l'inclusion 130
3.6.2.3 Conclusion 135
3.7 Conclusion 136

Chapitre 4

Expérimentations en laboratoire sur des capteurs à fibre optique de déformation 137

4.1 Description des expérimentations 139

4.1.1 Systèmes de mesure ... 139
4.1.1.1 Instrumentation à fibre optique ... 139
4.1.1.2 Instrumentation classique ... 141
4.1.2 Eprouvettes en béton ... 146
4.1.2.1 Choix du béton ... 146
4.1.2.2 Types d'éprouvette et de moules ... 147
4.1.2.3 Mode opératoire pour la confection des éprouvettes en béton ... 148
4.1.3 Principe des essais ... 150
4.1.3.1 Essais à court terme ... 150
1) Essais de détermination des caractéristiques mécaniques des bétons ... 150
2) Essais de chargement/déchargement par paliers de charge ... 152
4.1.3.2 Essais à long terme ... 154
4.1.4 Bilan expérimental ... 155
4.1.5 Incertitudes de mesure ... 157
4.2 Analyse des principaux facteurs d'influence expérimentaux ... 158
4.2.1 Comportement propre des capteurs à fibre optique et des éprouvettes ... 158
4.2.1.1 Cas des capteurs à fibre optique ... 158
4.2.1.2 Cas des éprouvettes en béton ... 160
4.2.2 Intégration des capteurs à fibre optique au corps d'épreuve en béton ... 164
4.2.2.1 Cas en volume ... 164
4.2.2.2 Cas en surface ... 168
4.2.3 Comportements de l'ensemble *capteur à fibre optique / éprouvette* ... 170
4.2.3.1 Cas en volume ... 170
1) Essais de détermination du module d'élasticité longitudinale ... 170
2) Essais de chargement/déchargement par paliers de charge ... 172
3) Essais de fluage ... 175
4) Confrontation théorie / expérience ... 176
4.2.3.2 Cas en surface ... 179
1) Essais de chargement/déchargement par paliers de charge ... 179
2) Confrontation théorie / expérience ... 181
4.3 Conclusion ... 184

Chapitre 5
Enseignements et perspectives ... 185

5.1 Recommandations pour les capteurs à fibre optique ... 187
5.1.1 Revêtement primaire ... 187
5.1.2 Liaison *fibre optique / gaine mécanique* ... 187
5.1.3 Gaine mécanique ... 188
5.1.3.1 Dimensions ... 188
1) Cavité interne ... 188
2) Diamètre extérieur ... 189
3) Longueur ... 189
5.1.3.2 Caractéristiques mécaniques ... 189
5.1.3.3 Conditionnement de la fibre optique ... 190
5.2 Recommandations pour l'intégration au milieu de mesure ... 190
5.2.1 Méthodes d'intégration des capteurs à fibre optique au béton ... 190
5.2.2 Ancrages ... 191
5.2.2.1 Cas en volume ... 191
5.2.2.2 Cas en surface ... 191
5.2.3 Câbles à fibre optique ... 192

5.3 Recommandations pour l'exploitation des résultats 192
5.3.1 Correspondance entre comportements en volume et en surface du béton .. 192
5.3.2 Mise en place des matériaux en présence 192
5.3.3 Estimation des perturbations dues aux variations thermiques et au fluage .. 192

Conclusion 195

Références bibliographiques 201

Annexe
Illustrations du Chapitre 4 213

Listes des figures et des tableaux

Chapitre 1

Figure 1.1 Structure d'une fibre optique 43
Figure 1.2 Différents types de fibres optiques 44
Figure 1.3 Tour de fibrage 45
Figure 1.4 Structure d'un capteur à fibre optique 47
Figure 1.5 Modes d'interrogation d'un capteur à fibre optique 50
Figure 1.6 Exemples de certains types de mesure par capteurs à fibre optique 51
Figure 1.7 Capteur à fibre optique TOR pour la détection de fissures dans le béton 56
Figure 1.8 Capteurs à fibre optique avec un conditionnement en microcourbures de type structure « peignes » 57
Figure 1.9 Capteur à fibre optique avec un conditionnement en microcourbures de type enroulement en « hélice » 58
Figure 1.10 « Jauge Fabry-Pérot » 59
Figure 1.11 Capteur à fibre optique interférométrique en basse cohérence 60
Figure 1.12 Capteur à fibre optique polarimétrique 61
Figure 1.13 Principe des réseaux de Bragg 62

Chapitre 2

Figure 2.1 Exemples de comportements des solides 70
Figure 2.2 Composition du béton 72
Figure 2.3 Influence des granulats sur les variations longitudinales des déformations pour un capteur à fibre optique noyé dans du béton 74
Figure 2.4 Schémas des capteurs à fibre optique considérés 75
Figure 2.5 Déformations différentielles d'origine mécanique entre capteur et béton 79
Figure 2.6 Dilatation libre et dilatation gênée de poutres en béton 82
Figure 2.7 Exemple de dilatations différentielles entre la fibre optique et le béton 83
Figure 2.8 Structures des capteurs à fibre optique en volume et en surface considérés 84
Figure 2.9 Bases de mesure des capteurs à fibre optique en volume de type haltère 85
Figure 2.10 Influence de la longueur de la base de mesure des capteurs à fibre optique considérés, suivant la distribution des déformations le long de cette base 87

Chapitre 3

Figure 3.1 Modèle de partie sensible avec fibre optique au centre de la gaine mécanique 98
Figure 3.2 Maillages du modèle de partie sensible avec fibre optique au centre de la gaine mécanique 99
Figure 3.3 Modèle et maillage associé de partie sensible avec fibre optique en périphérie de la gaine mécanique 100
Figure 3.4 Partie sensible : variation des caractéristiques mécaniques de la gaine mécanique 105
Figure 3.5 Partie sensible : zones d'isovaleurs des déplacements u_{zz} (en μm) pour des E_{gaine} particuliers pour les deux modèles en chargement en pression imposée 106
Figure 3.6 Partie sensible : déformation de la fibre optique le long de coupes longitudinales 108
Figure 3.7 Modèle de l'inclusion en volume 111
Figure 3.8 Maillages de l'inclusion en volume 113

Figure 3.9 Inclusion en volume : zones d'isovaleurs des déplacements u_{zz} (en µm) pour un diamètre des ancrages de 30 mm et un chargement en déplacements imposés 115
Figure 3.10 Inclusion en volume : variation des caractéristiques mécaniques de l'inclusion 118
Figure 3.11 Inclusion en volume : représentation de l'ensemble des cas d'étude 122
Figure 3.12 Modèle de l'inclusion en surface 123
Figure 3.13 Maillages de l'inclusion en surface 125
Figure 3.14 Inclusion en surface : zones d'isovaleurs des déplacements u_{zz} (en µm) pour différentes géométries des ancrages et pour un chargement en déplacements imposés 127
Figure 3.15 Inclusion en surface : zones d'isovaleurs des déplacements u_{zz} (en µm) de différentes profondeurs de scellement et pour un chargement en pression imposée 129
Figure 3.16 Inclusion en surface : variation des caractéristiques mécaniques du barreau avec des ancrages en acier inoxydable 131
Figure 3.17 Inclusion en surface : zones d'isovaleurs des déplacements u_{zz} (en µm) de deux types d'ancrages (ancr1 et ancr4, avec $E_{barreau}$ = 141 et 3 GPa), pour u_{imp} 132
Figure 3.18 Inclusion en surface : zones d'isovaleurs des déplacements u_{zz} (en µm) avec des ancrages ancr4 particuliers ($E_{ancrages}$ = 3, 43 et 200 GPa), pour u_{imp} 134
Figure 3.19 Inclusion en surface : représentation de l'ensemble des cas d'étude 135

Chapitre 4

Figure 4.1 Schémas des coupes longitudinales des capteurs à fibre optique testés 140
Figure 4.2 Jauges à fil et à trame pelliculaire 142
Figure 4.3 Schéma des capteurs à inductances variables utilisés 144
Figure 4.4 Eprouvette en béton 16/32 « modifiée » pour les essais en surface 147
Figure 4.5 Conservation en auto dessiccation des éprouvettes pour les essais en volume 150
Figure 4.6 Instrumentation des 16/32 modifiées pour la détermination de E 151
Figure 4.7 Essais par paliers de charge sur éprouvette en béton pour le cas en volume 152
Figure 4.8 Essais par paliers de charge sur éprouvette en béton pour le cas en surface 153
Figure 4.9 Essais par paliers de charge sur les CFO n°3 153
Figure 4.10 Essais par paliers de charge sur plaque en acier pour le cas en surface 154
Figure 4.11 Bâti de fluage 155
Figure 4.12 Corps d'épreuve instrumentés et essais correspondants 156
Figure 4.13 Cycles de chargement/déchargement de traction directe d'un CFO n°3 159
Figure 4.14 Détermination de R_c du béton pour le cas en volume 161
Figure 4.15 Détermination de E du béton pour le cas en volume 162
Figure 4.16 Détermination de ν du béton pour le cas en volume 162
Figure 4.17 Détermination de E pour une 16/32 modifiée en béton pour le cas en surface 164
Figure 4.18 Fixation dans les moules des éprouvettes 16/32 des capteurs à noyer 165
Figure 4.19 Fixation dans les moules des éprouvettes 16/100 des capteurs à noyer 165
Figure 4.20 Test sur les fixations dans les moules des éprouvettes 16/100 166
Figure 4.21 Coulage et mise en place du béton pour les éprouvettes 16/32 167

Figure 4.22 Coulage du béton pour les éprouvettes 16/100 167
Figure 4.23 Essais sur la plaque en acier pour tester la fixation des ancrages..... 169
Figure 4.24 Essais sur l'éprouvette en béton pour tester la fixation des ancrages 170
Figure 4.25 Détermination de $E_{\text{béton avec capteur noyé}}$ 171
Figure 4.26 Essais en volume de chargement/déchargement par paliers de charge : éprouvette 16/32 avec CFO n°1 172
Figure 4.27 Essais en volume de chargement/déchargement par paliers de charge : éprouvette 16/32 avec CFO n°2 173
Figure 4.28 Essais en volume de chargement/déchargement par paliers de charge : éprouvette 16/100 avec CFO n°1 et CCV 173
Figure 4.29 Essais en volume de chargement/déchargement par paliers de charge : éprouvette 16/100 avec CFO n°2 et CCV 174
Figure 4.30 Essais en volume de fluage : montée en charge d'un bâti avec une éprouvette 16/100, avec CFO n°2 et CCV noyés en son sein 175
Figure 4.31 Cas en volume : confrontation *essais / calculs* 177
Figure 4.32 Essais en surface de chargement/déchargement par paliers de charge : éprouvette 16/32 côté CFO n°3a..... 180
Figure 4.33 Essais en surface de chargement/déchargement par paliers de charge : éprouvette 16/32 côté CFO n°3b..... 180
Figure 4.34 Cas en surface : confrontation *essais / calculs*..... 182

Annexe

Figure A.1 Schémas des chaînes de mesure 215
Figure A.2 Presses du LCPC-Paris et du LRPC-Strasbourg 216
Figure A.3 Essais en volume au LCPC-Paris..... 217
Figure A.4 Essais en surface au LRPC-Strasbourg 218

Chapitre 1

Tableau 1.1 Exemples de fibres optiques courantes 46

Chapitre 3

Tableau 3.1 Quelques propriétés mécaniques des matériaux considérés 97
Tableau 3.2 Partie sensible : variation du diamètre extérieur de la gaine mécanique du modèle avec la fibre optique au centre de la gaine mécanique 102
Tableau 3.3 Partie sensible : comparaison du comportement des différents constituants..... 103
Tableau 3.4 Partie sensible : variation de l'épaisseur de colle..... 103
Tableau 3.5 Partie sensible : variation de (E ; ν) de la gaine mécanique 104
Tableau 3.6 Partie sensible : variation du coefficient de Poisson de la gaine mécanique du modèle avec la fibre optique en son centre pour E_{gaine} = 43 GPa..... 107
Tableau 3.7 Partie sensible : estimation de l'écart entre $E_{partie\ sensible}$ et $E_{gaine\ mécanique}$ pour un chargement en pression imposée..... 109
Tableau 3.8 Caractéristiques mécaniques de différents bétons pour l'inclusion en volume..... 112
Tableau 3.9 Inclusion en volume : variation du diamètre des ancrages 114
Tableau 3.10 Inclusion en volume : écarts maximums entre les déformations de surface et les déformations de référence pour différents diamètres des ancrages..... 115
Tableau 3.11 Inclusion en volume : variation du diamètre du barreau..... 116
Tableau 3.12 Inclusion en volume : variation de la longueur du barreau 117
Tableau 3.13 Inclusion en volume : variation des caractéristiques mécaniques de l'inclusion..... 118
Tableau 3.14 Inclusion en volume : variation du coefficient de Poisson de l'inclusion pour $E_{inclusion}$ = 43 GPa..... 119
Tableau 3.15 Inclusion en volume : variation des caractéristiques mécaniques du béton pour $E_{inclusion}$ = 43 et 200 GPa..... 120
Tableau 3.16 Inclusion en volume : différents types de liaison entre inclusion et béton..... 121
Tableau 3.17 Dimensions des différentes géométries d'ancrages de l'inclusion en surface 124
Tableau 3.18 Inclusion en surface : variation de la géométrie des ancrages 126
Tableau 3.19 Inclusion en surface : variation de la hauteur des ancrages..... 128
Tableau 3.20 Inclusion en surface : variation de la longueur du barreau..... 130
Tableau 3.21 Inclusion en surface : variation des caractéristiques mécaniques du barreau 131
Tableau 3.22 Inclusion en surface : variation des caractéristiques mécaniques des ancrages pour $H_{ancrages}$ = 25 mm 133
Tableau 3.23 Inclusion en surface : variation des caractéristiques mécaniques des ancrages pour $H_{ancrages}$ = 70,75 mm..... 134

Chapitre 4

Tableau 4.1 Principales caractéristiques métrologiques des capteurs à fibre optique testés 141
Tableau 4.2 Principales caractéristiques métrologiques des jauges de déformation utilisées..... 142
Tableau 4.3 Composition des bétons..... 147

Tableau 4.4 Résultats des essais de traction directe des CFO n°3 160
Tableau 4.5 Propriétés mécaniques des bétons utilisés..... 160
Tableau 4.6 Caractéristiques mécaniques du béton pour le cas en volume 163
Tableau 4.7 Module d'élasticité longitudinale des éprouvettes en béton B0 avec un ou deux capteurs noyés en leur sein 170
Tableau 4.8 Mesures ponctuelles des essais de fluage..... 176
Tableau 4.9 Variation due au fluage des déformations des capteurs des éprouvettes 16/32 avec les CFO n°1 et n°2 noyés en leur sein, uniquement pour les montées en charge 178
Tableau 4.10 Effets de la friction entre plateaux de presse et tête d'éprouvette pour les essais en volume 178
Tableau 4.11 Cas en volume : confrontation des déformations *essais / calculs* avec prise en compte dans les résultats des calculs du fluage et de la friction 179
Tableau 4.12 Variation due au fluage des déformations des capteurs des éprouvettes 16/32 avec les CFO n°3 noyés en leur sein, uniquement pour les montées en charge..... 182
Tableau 4.13 Effets de la friction pour les essais en surface..... 183
Tableau 4.14 Cas en surface : confrontation des déformations *essais / calculs* avec prise en compte dans les résultats des calculs du fluage et de la friction 183

Glossaire

Symboles et notations

ϕ ..... diamètre

L ..... longueur

S ..... surface

e ..... épaisseur

H ..... hauteur

n ..... indice de réfraction

Δ ..... variation (ex. : $\Delta L = L_{finale} - L_{initiale}$)

λ ..... longueur d'onde (ex. : λ_{Bragg} : longueur d'onde de Bragg, notée aussi λ_B)

F ..... force

α ..... coefficient de dilatation thermique linéaire

ρ ..... masse volumique

σ ..... tenseur des contraintes de composantes σ_{ij}

ε ..... tenseur des déformations de composantes ε_{ij}

u ..... tenseur des déplacements de composantes u_{ij}

i, j ..... indices désignant les coordonnées x, y ou z

E ..... module d'élasticité longitudinale (nommé aussi module d'Young)

ν ..... coefficient de Poisson

Pour un cylindre plein, de section S, dont le matériau est *continu*, *homogène* et *isotrope*, soumis à une *sollicitation uniaxiale* induisant un comportement *élastique linéaire* dudit cylindre, les coefficients E et ν sont [NF X 10-001, 1958] :

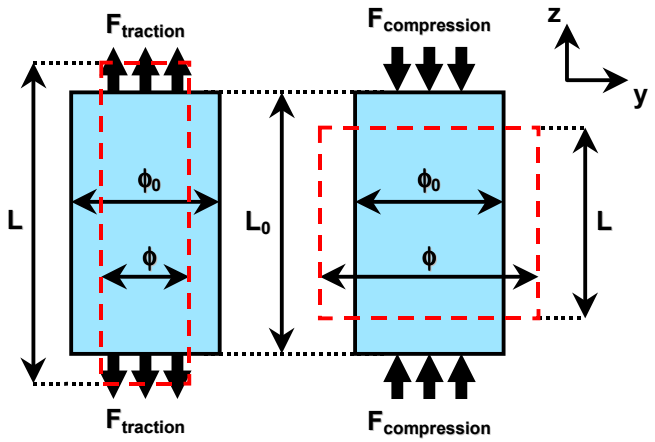
$$E = \frac{\sigma_{zz}}{\varepsilon_{zz}} \qquad \nu = -\frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{zz}}$$

avec :

$$\sigma_{zz} = \frac{F_{sollicitation}}{S}$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{\phi - \phi_0}{\phi_0}$$



R_c ..... résistance à la rupture en compression

σ_e ..... limite élastique en contrainte

σ_{imp} ..... pression surfacique imposée, qui consiste en l'application d'une pression uniforme sur une surface donnée du maillage du modèle étudié

u_{imp} ..... déplacement surfacique imposé, qui consiste à imposer un déplacement à tous les nœuds du maillage de la même surface que celle sur laquelle σ_{imp} est appliquée

$\Delta\varepsilon/\varepsilon$ ..... *coefficient de perturbations*

$$\Delta\varepsilon/\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\text{mesurée}}}{\varepsilon_{\text{référence}}} - 1$$

- $\varepsilon_{\text{mesurée}}$: déformation délivrée par le transducteur du capteur (la fibre optique)
- $\varepsilon_{\text{référence}}$: déformation de l'échantillon de référence

d/D ..... dimensions des granulats : d = dimension minimale ; D = dimension maximale (unités en mm) [NF P 18-304, 1973]

ϕ/H ..... élancement des éprouvettes (unités en cm)

BR_c ..... béton avec une résistance à la rupture en compression R_c

Abréviations et acronymes

2D ..... bidimensionnel

3D ..... tridimensionnel

BHP ..... béton à haute performance

bm ..... base de mesure

BO ..... béton ordinaire (à ne pas confondre avec le béton B0 utilisé pour les essais en volume)

BPR ..... béton de poudres réactives

CCV ..... capteur(s) à corde vibrante

CFO n°N ..... capteur à fibre optique numéro N (N = 1 à 3)

CIV ..... capteur(s) à inductances variables

ext ..... extérieur

int ..... intérieur

JN ..... jauge de déformation numéro N (N = 1 à 3)

LCPC ..... Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (centre de Paris : LCPC-Paris)

LRPC ..... Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (centre de Strasbourg : LRPC-Strasbourg)

LVDT ..... *Linear Variable Differential Transformer*

OTDR ..... *Optical Time Domain Reflectometry*

TOR ..... Tout Ou Rien

Terminologie issue de documents

Capteur à fibres optiques [NF C 93-800, 1991]

Dispositif comprenant une ou plusieurs fibres, permettant de recueillir des informations représentatives de grandeurs mesurées sans autre apport d'énergie que celui des phénomènes observés et/ou des ondes lumineuses circulant dans la ou les fibre(s).

Chaîne de mesure [NF X 07-001, 1994]

Suite d'éléments d'un appareil de mesure ou d'un système de mesure qui constitue le chemin du signal de mesure depuis l'entrée jusqu'à la sortie.

Corps d'épreuve d'un capteur [MOREAU et al., 1982]

Le corps d'épreuve d'un capteur est l'élément mécanique opérant une première transformation de la grandeur physique à mesurer.

Déformations infiniment petites [NF X 10-011, 1958]

Une déformation infiniment petite transforme une sphère de rayon infiniment petit entourant un point matériel, en un ellipsoïde infiniment petit.

Ecart-type expérimental [NF X 07-001, 1994]

Pour une série de n *mesurages du même mesurande, grandeur* s *caractérisant la dispersion des résultats, donnée par la formule :*

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{x} \right)^2 \right)}$$

x_i *étant le résultats du* $i^{ème}$ *mesurage et* $\bar{x}$ *la moyenne arithmétique des* n *résultats considérés.*

Elément (Documentation CESAR-LCPC)

Sous-domaine simple, dont les sommets sont les nœuds, et sur lequel sera bâtie une fonction d'interpolation permettant d'approximer la solution.

Grandeur (mesurable) [NF X 07-001, 1994]

Attribut d'un phénomène, d'un corps, ou d'une substance, qui est susceptible d'être distingué qualitativement et déterminé quantitativement.

Grandeur d'influence [NF X 07-001, 1994]

Grandeur qui n'est pas le mesurande mais qui a un effet sur le résultat du mesurage.

Granulat [NF P 18-101, 1983]

Ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 *et* $80\ mm$ *destinés notamment à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation, de base et de roulement des chaussées, et de voies ferrées.*

Groupe (Documentation CESAR-LCPC)

Ensemble constitué par les éléments d'une même famille, ayant les mêmes caractéristiques physiques.

Incertitude de mesure [NF X 07-001, 1994]

Paramètre, associé au résultats d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande.

Joint de colle (ou d'adhésif) [NF T 76-001, 1981]

Le joint de colle correspond à l'espace que remplit l'adhésif dans un assemblage ou un produit collé. Selon l'épaisseur du joint de colle et les conditions d'emploi, on distingue des joints minces, demi-épais, épais.

Maillage (Documentation CESAR-LCPC)

Objet géométrique (ex. : segment de droite) manipulé dans le pré-processeur pour relier deux points définis lors de l'opération de saisie des contours du modèle.

Mesurage [NF X 07-001, 1994]
Ensemble d'opérations ayant pour but de déterminer une valeur d'une grandeur.

Mesurande [NF X 07-001, 1994]
Grandeur particulière soumise à mesurage.

Nœud (Documentation CESAR-LCPC)
Position particulière au sein ou sur le contour de l'objet à modéliser, connue par ses coordonnées et qui sert à définir l'aspect géométrique des éléments finis constituant le maillage (pour certains éléments quadratiques, on peut distinguer les points sommets (de l'élément) et les points milieux (du côté)).

Ouverture numérique [COZANNET et al., 1981]
Pour une fibre optique à saut d'indice, l'ouverture numérique détermine l'angle maximum d'injection dans la fibre de rayons guidés sans pertes, et est souvent notée ON (ou *NA* pour *Numerical Aperture*).

Transducteur optique [NF C 93-800, 1991]
Dispositif qui reçoit de l'information sous forme d'une grandeur physique et la transforme en information sous forme d'une grandeur optique, selon une loi définie.

Terminologie propre à l'étude

Ancrages
Le terme générique d'***ancrages*** désigne dans la présente étude l'ensemble des dispositifs mécaniques permettant une liaison optimale entre le béton et la gaine mécanique.

Base de mesure
Les capteurs à fibre optique de type extensométriques considérés intègrent les déformations du béton sur une longueur finie, dite ***base de mesure***, et notée L_{bm}.

Capteur(s) à fibre optique
Les capteurs à fibre optique étudiés ne possèdent qu'une seule fibre, et sont de deux types : ***noyés au sein*** ou ***fixés en surface du béton*** d'ouvrages de Génie Civil. Il est question également de manière plus générale du ***cas*** ou de l'***essai***, ou tout autre terme, ***en volume*** ou ***en surface***.

Capteurs ponctuels à fibre optique
Ce type de capteur ne réalise qu'un seul point de mesure.

Caractéristiques mécaniques
Dans le cadre des hypothèses de l'extensométrie, le ***module d'élasticité longitudinale*** et le ***coefficient de Poisson*** sont nommés ***caractéristiques mécaniques*** du matériau considéré.

Conditionnement
L'ensemble des éléments constitutifs d'un capteur à fibre optique, en dehors de la fibre optique elle-même, est nommé le ***conditionnement de la fibre optique***, ou tout simplement ***conditionnement***.

Ecart-type
Il s'agit de l'***écart-type expérimental*** définit dans la norme [NF X 07-001, 1994].

Fibre optique

La fibre optique considérée est une fibre ***cylindrique standard*** de télécommunications, avec un cœur et une gaine optique en ***silice***, et un revêtement primaire en ***polyimide***. Les propriétés mécaniques des matériaux de la fibre optique sont invariantes pour l'ensemble de l'étude, ainsi que leurs dimensions :

- Diamètre extérieur de l'ensemble *cœur + gaine optique* : 125 µm ;
- Diamètre extérieur du revêtement primaire : 150 µm (épaisseur de 12,5 µm).

Inclusion

L'élément ayant pour géométrie celle de l'enveloppe extérieure de l'ensemble du capteur et composé par un seul matériau est nommé ***inclusion***. Les propriétés mécaniques de ce matériau étant représentatives de celles de l'assemblage des matériaux constituants le capteur. Il est également question d'***inclusion en volume*** et d'***inclusion en surface***.

Multicapteurs à fibre optique

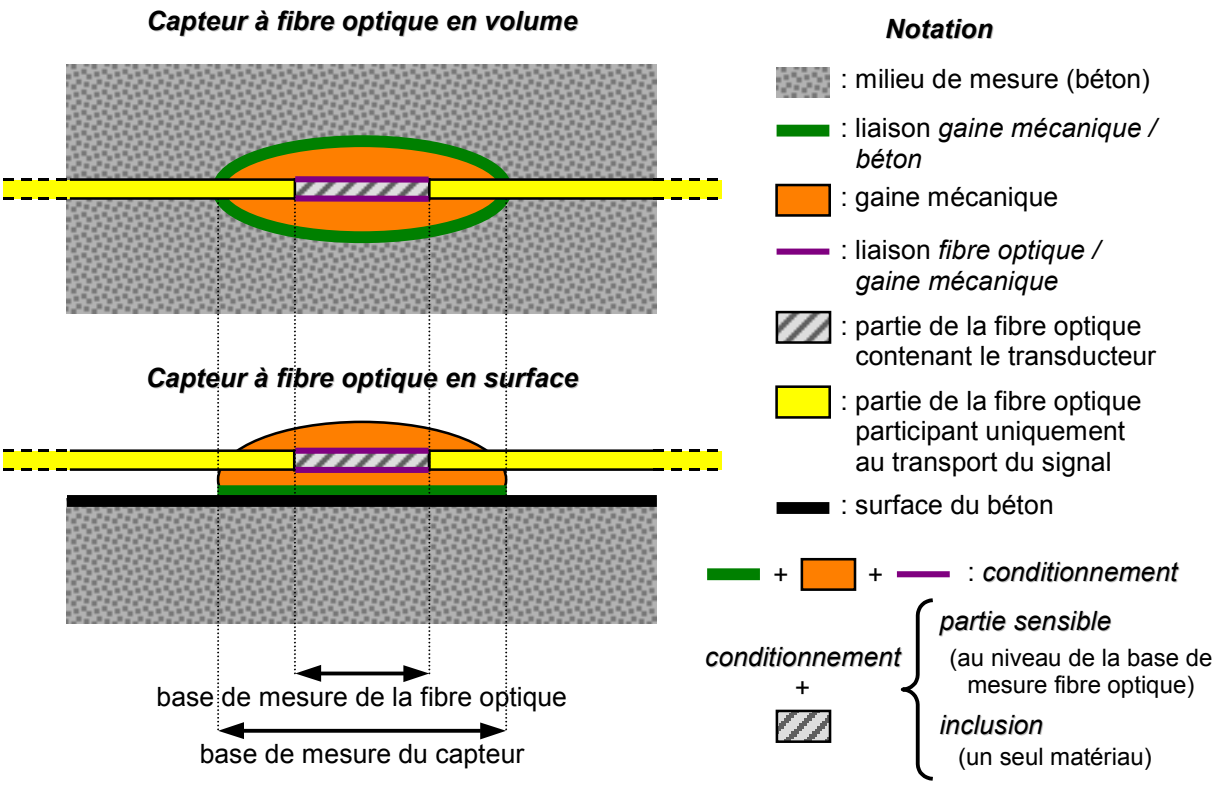
Ce type de capteur réalise plusieurs points de mesure sur une même fibre optique (mesures distribuées ou quasi-réparties, et, mesures réparties ou intégrées) ou sur plusieurs fibres optiques.

Partie sensible

L'ensemble constitué par, la partie de la fibre optique qui participe au mesurage (sur toute la longueur de sa base de mesure), la colle de liaison et la gaine mécanique, est nommé ***partie sensible*** du capteur.

Transducteur optique

Le ***transducteur optique*** des capteurs à fibre optique considérés est assimilé au corps de la fibre optique lui-même, qu'il fasse partie intégrante du cœur (capteur intrinsèque) ou bien qu'il soit par exemple issu de l'association de deux fibres optiques (capteur extrinsèque).



Introduction

La notion de *structure contrôlée* est une évolution naturelle de la nécessité de mieux maîtriser et caractériser chaque phase importante des processus de construction, d'exploitation et de maintenance. La demande du client se diversifiant et les exigences devenant de plus en plus pointues, à la notion d'objet vient s'ajouter celle de service, de niveau de service et de fonctionnalité, dans une démarche *qualité* de plus en plus présente. Selon le niveau de service des outils utilisés et des modes d'exploitation choisis par rapport à l'usage envisagé, il est possible de rendre une structure *sensible* ou de lui affecter une certaine *contrôlabilité* plus ou moins évoluée, qui est parfois nommée *intelligence* (*smart structure*). En effet, équipée d'un réseau automatisé de capteurs fiables, la structure peut livrer à son exploitant, directement, en temps réel et en permanence, ses capacités et modes de fonctionnement, ses diagnostics d'anomalie et des informations reflétant son état de santé. Toutes ces connaissances cumulées permettront l'optimisation de la maintenance et l'affinement des architectures futures. Les outils métrologiques deviennent alors des maillons d'une chaîne plus ou moins complexe, qualifiée de système.

Cette évolution des besoins est concomitante aux avancées technologiques issues de domaines comme l'informatique, l'électronique, ou l'optique. Les progrès techniques ont rendu possible l'élaboration de nouveaux outils s'adaptant aux nouvelles exigences et complétant avantageusement le champ de la métrologie traditionnelle, utilisée comme référence dans le contrôle des structures.

Dans le cadre des ouvrages de Génie Civil en béton, la surveillance est une disposition nécessaire pour assurer leur gestion et leur sécurité. Pour cette raison, l'instrumentation doit faire partie intégrante du projet global, et ce dès le stade des études. La surveillance apporte une connaissance permanente ou quasi-permanente, permettant de définir l'état des ouvrages en fonction des conditions de réalisation à la construction et d'utilisation après leur mise en exploitation. Cette surveillance est notamment motivée par :

- l'accroissement du niveau de sécurité des ouvrages à la construction et en service ;
- la conservation du patrimoine existant ;
- l'amélioration de la qualité des constructions ;
- l'évaluation de l'état et du comportement des ouvrages en temps réel et à long terme (plusieurs décennies) ;
- l'optimisation des coûts de réalisation et d'entretien.

Ces motivations ne concernent pas exclusivement les ouvrages exceptionnels récents (ex. : Pont de Normandie, Stade de France). Elles s'appliquent également à l'ensemble des ouvrages de Génie Civil neufs ou existants : grandes centrales d'énergie (ex. : centrales nucléaires, barrages hydroélectriques), ouvrages d'art (ex. : ponts, viaducs, routes), ouvrages enterrés (ex. : galeries, tunnels), ouvrages maritimes et fluviaux, monuments historiques, grands édifices, structures de bâtiments industriels,…

Globalement, les méthodes d'auscultation et les moyens de mesure *classiques* répondent pour la plupart aux besoins de surveillance dans bon nombre de cas (ex. : endoscopie, gammagraphie, extensométrie). Certains capteurs bénéficient notamment d'un retour d'expérience important (ex. : jauges de déformation, extensomètres à corde vibrante). Cependant, les méthodes actuelles de surveillance nécessitent l'intervention d'équipes spécifiques et l'utilisation de moyens lourds (ex. : passerelles pour les ponts), impliquant des dispositions financières importantes. De plus, les moyens de mesure classiques couvrent mal certains besoins (ex. : mesures de précontrainte et de déformation) et s'avèrent être limités face à l'évolution actuelle de certains besoins en matière de surveillance d'ouvrages de Génie Civil en béton.

C'est pourquoi des efforts sont continuellement réalisés dans l'étude et le développement de nouveaux outils de mesure afin de proposer une alternative à l'instrumentation plus classique.

Parmi les nouveaux outils, les capteurs à fibre optique offrent des potentialités pour l'instrumentation au sein et en surface de structures de Génie Civil. Ce type de métrologie a bénéficié des avancées technologiques des télécommunications notamment pour la connectique, et des fonctionnalités puissantes telles que la mise en réseaux des capteurs, le multiplexage des signaux, le traitement et l'exploitation des données en temps réel. En dehors des spécificités telles que leurs petites dimensions, le mesurage de nombreuses grandeurs physiques (ex : température, pression, déformation) ou leur insensibilité aux perturbations électromagnétiques, il est possible de disposer de un ou plusieurs éléments sensibles sur un même capteur : *capteur ponctuel* (un seul point de mesure) ou *multicapteurs* (plusieurs points de mesure sur de grandes longueurs). Ces capteurs permettent ainsi de renseigner l'utilisateur sur le fonctionnement structurel local mais aussi global de l'ouvrage instrumenté.

Comme toute nouvelle technologie, des difficultés s'opposent actuellement à leur développement et à une mise en concurrence directe avec les *capteurs classiques* couramment utilisés. Une des principales difficultés, liée au capteur proprement dit, réside au niveau de la pertinence et de la validation des données *brutes* en terme de propriétés d'usage et de grandeurs physiques exploitables. Pour connaître la réponse du capteur en fonction de la grandeur recherchée, il est indispensable d'appréhender son comportement dans le milieu de mesure. Or la maîtrise de ce comportement n'est pas immédiate car elle nécessite une connaissance approfondie du comportement des matériaux en présence et des phénomènes qui régissent les différentes interfaces entre le milieu d'emploi et l'élément sensible de détection. En effet, l'information délivrée par ces capteurs, influencée par le couplage entre le milieu environnant, le corps d'épreuve du capteur et la fibre optique comprenant l'élément sensible du système de mesure, n'est qu'une représentation de la grandeur développée dans le milieu de mesure en l'absence du capteur. Les propriétés respectives des différents matériaux du capteur créent une inclusion avec des propriétés physiques et mécaniques différentes à celle du milieu environnant dont il faut tenir compte. Des phénomènes naturels ou industriels (ex. : température) peuvent eux aussi contribuer à perturber la mesure réalisée. Dans ces conditions, la maîtrise de cette multitude de fonctions de *filtrage* est indispensable pour permettre de remonter à la grandeur recherchée. Or si les principes de mesure ont fait, et font encore l'objet de nombreux travaux, les études sur les capteurs à fibre optique dans leur milieu de mesure sont rares, notamment dans le domaine de la surveillance d'ouvrages en béton de Génie Civil.

L'objectif de la présente étude est d'évaluer pour divers types d'ouvrages en béton de Génie Civil (ouvrages d'art et ouvrages de production d'électricité) et dans le contexte précédemment exposé, les possibles applications d'une instrumentation à base de fibres optiques, noyée au sein ou fixée en surface de la structure. Cette étude résulte d'un partenariat entre EDF (Electricité De France) et LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussées) qui ont sur ce sujet des préoccupations communes. Plus précisément, l'objectif de cette Thèse est d'étudier le comportement de capteurs à fibre optique dans leur milieu de mesure afin d'identifier les facteurs prépondérants dans la perturbation du mesurage et de quantifier leur influence. Les résultats obtenus permettent alors d'établir un *guide* ou un *cahier de recommandations* destiné aux concepteurs et aux utilisateurs de capteurs à fibre optique, relatant les points sensibles détectés dans la conception existante et précisant les précautions d'emploi d'un capteur industriel avant son introduction au sein d'une structure. Ce n'est que de cette manière que cette nouvelle technologie deviendra un outil clé pour satisfaire rapidement les besoins actuels en matière de *structures contrôlées* en béton dans le Génie Civil.

La suite du mémoire est structurée suivant cinq différents chapitres. Le premier chapitre présente l'outil *capteur à fibre optique* à travers les caractéristiques qui lui sont propres et des exemples d'applications dans le domaine de la surveillance d'ouvrages de Génie Civil. Il précise les notions de base employées dans le reste du mémoire et rend compte de l'étendue des travaux qui sont consacrés à ce type de capteurs. En s'appuyant sur cette présentation, le cadre et les objectifs de la présente étude sont davantage définis en fin de chapitre. Le deuxième chapitre consiste en une analyse générale de la problématique de l'étude essentiellement à travers la littérature. Cette analyse a pour principal objectif d'identifier les facteurs prépondérants influençant le mesurage des capteurs à fibre optique considérés. Toutes les hypothèses d'étude sont définies au travers de ce deuxième chapitre, amenant finalement à caractériser la méthodologie générale d'analyse de certains de ces facteurs d'influence utilisée dans les chapitres suivants. L'analyse des facteurs d'influence identifiés dans le deuxième chapitre est réalisée à l'aide de la théorie et de l'expérimental, respectivement dans le troisième et dans le quatrième chapitre. L'étude théorique du troisième chapitre est réalisée à l'aide de modélisations numériques par éléments finis pour diverses configurations de capteurs à fibre optique, les moyens expérimentaux de la Thèse n'ayant permis de prendre en compte que certaines de ces configurations. Le quatrième chapitre vient en complément du troisième par l'analyse de facteurs propres à l'expérimental. Il est également destiné à valider les résultats du troisième chapitre par la confrontation de certains de ces résultats aux résultats expérimentaux. Le dernier chapitre est quant à lui consacré aux recommandations générales destinées aux concepteurs et utilisateurs, principalement issues des analyses et résultats des trois précédents chapitres.

Chapitre 1

Instrumentation à base de fibres optiques pour les ouvrages de Génie Civil

De nouveaux outils métrologiques ont fait leur apparition, grâce notamment aux nombreux développements technologiques dans différents domaines : électronique, informatique, optique,… C'est notamment le cas pour les fibres optiques qui depuis une quinzaine d'années commencent à trouver des débouchés d'application dans la surveillance de structures de Génie Civil. De par leur spécificité et leur potentialité, un grand nombre de recherches, tant au niveau national qu'international, ont été engagées pour étudier les transferts technologiques possibles au Génie Civil. La fibre optique elle-même et les principes de mesure associés, ont fait l'objet de nombreuses études. Néanmoins, très rares sont les publications ayant pour objet le comportement propre des capteurs, qu'ils soient seuls ou intégrés au matériau à ausculter, et les informations restent faibles sur l'influence des capteurs sur la mesure réalisée.

Les première et deuxième parties de ce premier chapitre présentent la fibre optique utilisée comme capteur, principalement dans le Génie Civil. Différents exemples d'application en laboratoire et principalement sur ouvrages réels, viennent illustrer l'ensemble des notions précédemment décrites sur les fibres optiques. Ces parties permettent de présenter le contexte de l'étude et de définir des notions de base pour les lecteurs non spécialistes, qui sont utilisées tout au long du mémoire. Cette présentation permet ainsi d'avoir un aperçu de ce qui est actuellement fait dans le domaine considéré. La présente étude n'étant pas axée sur un type de capteur particulier, il est important de pouvoir illustrer les possibilités d'application de cette technologie au Génie Civil. De plus l'étude s'intéresse au comportement essentiellement mécanique de ces capteurs. Le lecteur est invité à consulter les références auxquelles il est renvoyé dans ce chapitre concernant les nombreux travaux consacrés depuis de nombreuses années aux techniques optiques. La troisième partie de ce chapitre présente la problématique de l'étude ainsi que ses objectifs à travers les autres chapitres.

1.1 Fibres optiques appliquées à la métrologie

1.1.1 De la transmission à la mesure

Les signaux optiques ont très tôt été utilisés pour transmettre de l'information, dont voici quelques exemples concrets d'applications pour illustration : signaux de fumée le jour et feux allumés la nuit chez les romains au début de notre ère, techniques reprises par la suite chez les amérindiens ; télégraphe optique (*télégraphie aérienne*) créé par Claude CHAPPE en 1793. Le terme *optique* disparut dans le domaine des transmissions avec l'apparition du télégraphe électrique inventé par Samuel MORSE en 1832, qui le supplantera vers 1855. Depuis la fin du 19ème siècle et surtout depuis la première guerre mondiale, le développement des techniques et systèmes de transmission a fait d'une part appel aux câbles métalliques et d'autre part à la radio. Pour que l'optique reprenne sa place dans le domaine des transmissions, il a fallu attendre le développement de sources et de détecteurs qui permettaient d'envisager des systèmes optiques performants. L'avènement du laser en 1960 a permis de fournir le premier de ces éléments. Cependant il est rapidement apparu que la transmission en espace libre était difficilement applicable dans le domaine de l'optique, de par les pertes incontrôlables occasionnées par le milieu de propagation (ex. : nuages, pluie). C'est pourquoi, à l'opposé de ce qui se passe en radio, l'énergie lumineuse a due être canalisée dans des guides d'onde. En parallèle des nombreux travaux sur les sources lumineuses ainsi que sur les détecteurs (*composants d'extrémités*), des recherches ont été entreprises dans le but de proposer des guides diélectriques ayant de grandes performances de transmission optique sur des distances suffisamment longues.

C'est dans les années soixante qu'est lancée l'idée de transporter des signaux optiques sur de grandes distances par l'intermédiaire d'une fibre optique. Dès lors, les performances des fibres optiques, notamment dans la diminution de l'affaiblissement du signal lumineux (*atténuation*), ont sans cesse été améliorées, afin de rendre compétitive la technique optique. Dans un guide optique, l'atténuation est proportionnelle à la longueur (la puissance reçue diminue exponentiellement avec la distance) et est quasiment constante sur une grande plage de fréquences. Cela offre l'avantage de disposer de bandes passantes importantes, et permet notamment d'envisager la transmission de débit numérique très important. Partie dans les années soixante de $1000\ \mathrm{dB.km^{-1}}$, l'atténuation est descendue à $20\ \mathrm{dB.km^{-1}}$ dans les années soixante dix, puis à moins de $1\ \mathrm{dB.km^{-1}}$ aujourd'hui. Les performances en atténuation ont augmenté en améliorant la qualité des fibres optiques (ex. : maîtrise des procédés de fabrication), mais aussi en les protégeant des influences externes. De nombreuses études ont permis d'évaluer les différents paramètres dont dépendent les modifications des caractéristiques de propagation de l'onde lumineuse dans une fibre optique, afin d'en minimiser l'influence en protégeant la fibre. Il en est ressorti que la transmission par fibre optique était sensible à l'action de diverses grandeurs physiques.

La maîtrise de ces phénomènes et le concept de capteur sont la conséquence de cette volonté d'insensibiliser la fibre optique face aux actions externes. C'est de cette manière que la fibre optique est passée naturellement du domaine de la télécommunication au domaine de la métrologie. De nombreux secteurs ont été réceptifs à cet avènement tels que le militaire, l'aéronautique, le spatial, le médical, l'automatique, et plus récemment, le Génie Civil.

1.1.2 Définitions et types des fibres optiques

Cette partie permet d'introduire quelques notions sur les fibres optiques et sur la propagation de l'onde lumineuse dans ce type de guide optique. Ces notions sont développées dans de nombreux ouvrages comme notamment [COZANNET et al., 1981] ou [JOINDOT et al., 1996].

Un guide optique est un système diélectrique uniforme le long d'un axe, qui sert à guider l'onde lumineuse le long de cet axe. Trois grandes familles de guides optiques se distinguent : les guides planaires, les guides diffusés et les fibres optiques. La fibre optique classique, la plus couramment rencontrée, cylindrique à symétrie de révolution, est constituée de différents éléments selon le schéma suivant (cf. Figure 1.1) : un ***cœur*** et une ***gaine optique***, avec généralement l'adjonction d'un ***revêtement primaire***. Ces différents éléments ont des rôles bien définis :

- Le *cœur* : C'est un milieu diélectrique où est confiné la plus grande part de l'onde lumineuse véhiculée dans la fibre optique.
- La *gaine optique* : C'est un milieu qui entoure le cœur, où une partie non négligeable de l'onde lumineuse peut se propager. Il est donc nécessaire que le matériau constituant cette gaine présente des propriétés optiques comparables à celles du cœur (ex. : pureté, transparence,…). Le confinement de l'onde lumineuse dans le cœur de la fibre optique impose, pour éviter de trop grandes pertes, que l'indice de réfraction de ce dernier soit supérieur à celui de la gaine optique : $n_{\text{cœur}} > n_{\text{gaine optique}}$.
- Le *revêtement primaire* : Il est constitué d'une ou de plusieurs couches concentriques de matériaux, destinées à fournir à la fibre optique une protection et une meilleure résistance mécanique. Il est par conséquent indispensable de déposer ce revêtement lors de la fabrication de la fibre (cf. 1.1.3), afin que celle-ci puisse conserver ses excellentes propriétés mécaniques.

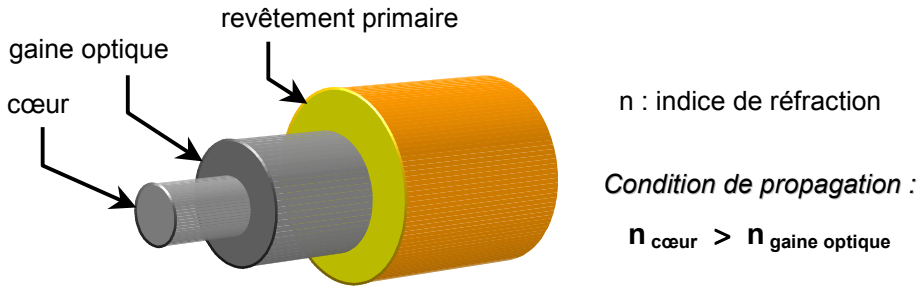


Figure 1.1 Structure d'une fibre optique

La nomenclature des fibres optiques présente souvent ces dernières suivant le diamètre de ces différents éléments. Une notation particulière est adoptée (diamètres en µm) :

$\phi_{cœur}/\phi_{gaine\ optique}/\phi_{revêtement\ primaire}$

Suivant les dimensions et plus précisément le diamètre de chacun de ces éléments on distingue deux principaux types de fibre optique (cf. Figure 1.2) :

- ***Multimode*** : Les fibres optiques multimodes ont un cœur de diamètre de l'ordre de quelques dizaines de µm (voire quelques centaines de µm) à quelques millimètres. L'onde lumineuse a plusieurs modes de propagation possibles. Ces derniers ont des vitesses de phase et des parcours différents, d'où distorsion de phase pour le signal transmis.
- ***Monomode*** : Les fibres optiques monomodes ont un cœur de diamètre de l'ordre de quelques µm. L'onde lumineuse n'a qu'un seul mode de propagation possible, ayant une seule vitesse de phase, et, un parcours unique et bien défini. Il n'y a donc pas de distorsion de phase et le signal est transmis sans déformation.

Les profils d'indice de réfraction d'une fibre optique sont variés [JOINDOT et JOINDOT, 1999]. Ils peuvent être regroupés de la manière suivante (cf. Figure 1.2) :

* Une fibre optique est dite ***à saut d'indice***, si l'indice du cœur est constant en tout point du guide. La propagation de l'onde lumineuse s'effectue de manière rectiligne.
* Une fibre optique est dite ***à gradient d'indice***, si l'indice du cœur présente une variation radiale. En fait l'indice du cœur diminue progressivement du centre jusqu'à la périphérie. Il en résulte que les parcours caractéristiques des divers modes de propagation de l'onde lumineuse sont incurvés, de telle sorte que :
  - Pour les modes dont le parcours est le plus long, la vitesse de phase augmente au fur et à mesure qu'ils pénètrent dans des zones dont l'indice diminue.
  - Pour les modes dont le parcours est le plus court, les vitesses de phase sont plus faibles puisqu'ils se situent dans des zones où l'indice reste relativement élevé.

  Ainsi, en déterminant convenablement une loi de variation de l'indice, il est possible d'obtenir des temps de parcours qui sont à peu près les mêmes pour les divers modes, ce qui permet de limiter la distorsion de phase.

L'indice de la gaine optique reste constant sur toute la longueur des fibres optiques à saut et à gradient d'indice.

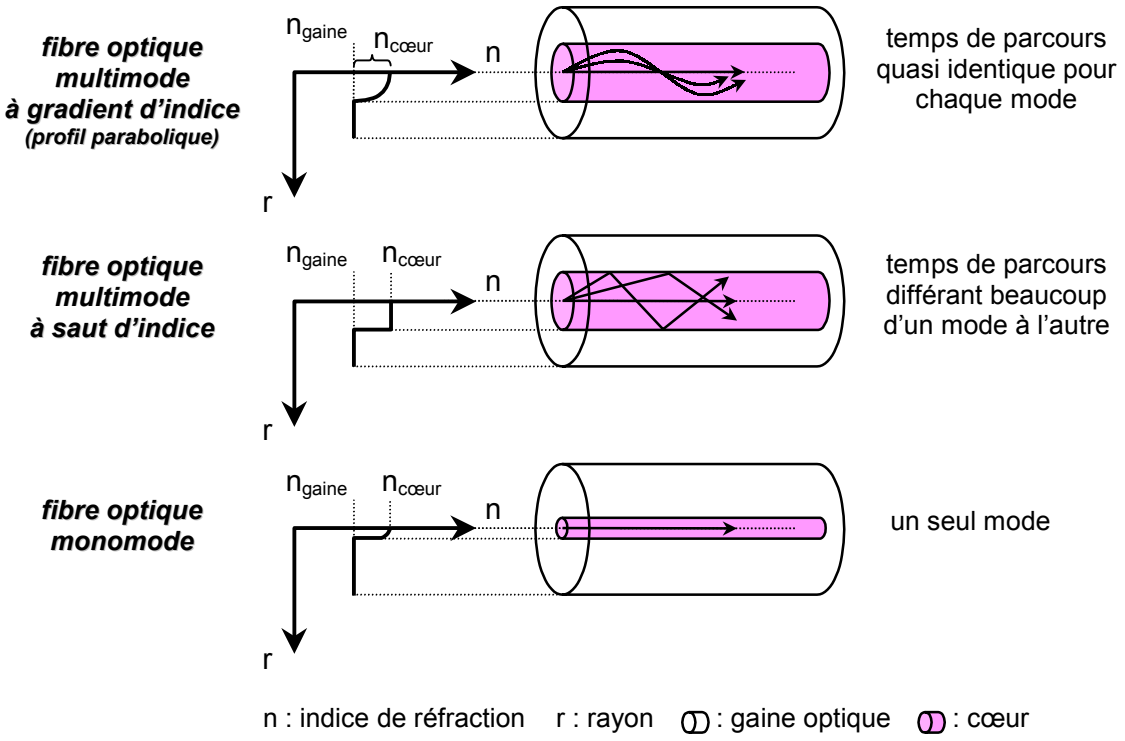


Figure 1.2 Différents types de fibres optiques

Les fibres optiques multimodes à saut d'indice sont les premières à avoir été utilisées. Elles trouvent encore des applications dans les communications à courte distance où la largeur de bande nécessaire est faible. Ces fibres à grand diamètre permettent le transport de fortes puissances lumineuses (jusqu'à 3 Watts et plus) et présentent plus de facilités de connexion. Les fibres multimodes ont une bande passante limitée par la dispersion intermodale, causée par les différences de temps de propagation des rayons lumineux guidés. Les fibres à gradient d'indice et les fibres monomodes, apparues plus tardivement, permettent des communications à haut débit et grande distance [LEFRANC et MATHIEU, 2000].

1.1.3 Procédés de fabrication des fibres optiques

On distingue deux principaux types de procédés :

- Le premier consiste à partir de l'état fondu du matériau. Le principe des techniques verrières les plus classiques est de fondre les matières premières de départ, à les affiner en tirant sur le matériau en fusion (ex. : méthode du double creuset).
- Le deuxième consiste à partir de préformes. Ce sont des ébauches préfigurant à une homothétie près la géométrie de la fibre optique, et qui sont par la suite étirées (*fibrées*). Différentes méthodes de *fabrication de la préforme* existent, dont les principales rencontrées dans la littérature sont les suivantes :
  - Méthode de séparation de phases ;
  - Méthodes utilisant l'oxydation ou l'hydrolyse en phase vapeur (ex. : le procédé dit *en phase vapeur* MCVD (*Modified Chemical Vapor Deposition*) qui est l'un des plus employés).

Le ***fibrage*** est l'opération qui consiste à passer de la préforme obtenue par l'une des techniques précédemment décrites, à une fibre optique. Une machine à *fibrer* comprend en général (cf. Figure 1.3) : un système servant à maintenir, à positionner et à guider la préforme ; un four (ex. : chalumeau, four à effet Joule) à la température comprise entre 1900 °C et 2100 °C, ramollissant la préforme, la matière devenant pâteuse et commençant à couler, formant un fil ; un tambour de réception permettant d'enrouler la fibre au fur et à mesure de sa fabrication. En pratique, la résistance mécanique dépend du soin qui est apporté au nettoyage de la préforme avant fibrage et de la rapidité à laquelle est protégée la fibre par le revêtement primaire. Il est donc nécessaire de prévoir un système d'enduction en ligne qui protège la fibre presque à la sortie du four de fibrage, avant qu'elle ne subisse un quelconque contact mécanique. Le mode d'application du produit utilisé sur la fibre, dépend souvent de sa nature et de l'épaisseur de revêtement primaire désiré. Celui-ci est habituellement compris entre quelques micromètres et quelques dizaines de micromètres.

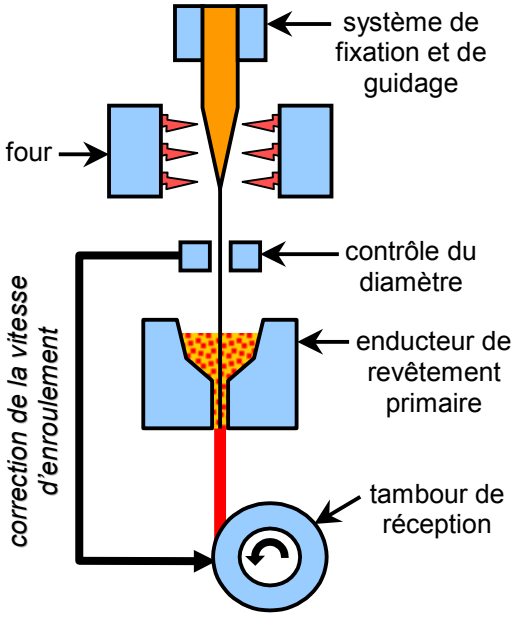


Figure 1.3 Tour de fibrage

Des ouvrages tels que [COZANNET et al., 1981] et [FERDINAND, 1992] décrivent plus en détail ces techniques de fabrication des fibres optiques.

1.1.4 Fibres optiques pour capteurs

La plupart des fibres optiques d'usage courant sont constituées d'un cœur et d'une gaine optique en *silice*. En revanche, le revêtement primaire est souvent un matériau synthétique (ex. : polyimide, acrylate, silicone). Le tableau suivant présente quelques exemples rencontrés dans la littérature de fibres optiques couramment utilisées (cf. Tableau 1.1).

Les fibres utilisées dans les capteurs sont pour certaines directement issues des fibres pour télécommunications. Ce sont encore les plus courantes, les moins chères (production de masse) et celles présentant de bonnes performances (standardisation, optimisation). Ce type de choix qui est effectué principalement par nécessité, impose le plus souvent des compromis de configuration et conduit parfois à un fonctionnement loin de l'optimum. Cependant depuis

quelques années, un certain nombre de laboratoires privés ou publics, font de réels efforts pour mettre au point des fibres plus *exotiques* pour lesquelles les marchés potentiels sont bien moins identifiés [FERDINAND, 1992] :

- les fibres de types télécommunications modifiées (ex. : fibres torsadées sur elles-mêmes sur toute leur longueur) ;
- les fibres optiques à maintien de polarisation (ex. : à cœur elliptique, à fossé d'indice, à gaine elliptique, *Bowtie*) ;
- d'autres fibres optiques spéciales capteurs fortement sensibles à un paramètre donné (ex. : fibres optiques à deux cœurs).

Tableau 1.1 Exemples de fibres optiques courantes

Type de fibre optique	Matériaux du revêtement primaire	Diamètres (µm)	Applications
Monomode (à longueurs d'ondes spécifiques)	acrylate	8,3/125/245	capteurs, interférométrie
Monomode (pour environnement sévère)	polyimide	9,3/125/155	transmissions en milieux spécifiques (ex. : humidité, haute température)
Multimode à saut d'indice	polyimide + tefzel (épaisseurs : 10 µm + 57,5 µm)	200/240/375	laser de puissance, spectroscopie proche, diode laser, capteurs
Multimode à gradient d'indice (pour environnement sévère)	polyimide	50/125/155	liaisons aéronautiques et sous-marines, applications militaires

1.1.5 Définitions des capteurs à fibres optiques

Selon la norme NF C 93-800 (1991), un ***capteur à fibres optiques*** est un *dispositif comprenant une ou plusieurs fibres, permettant de recueillir des informations représentatives de grandeurs*[1] *mesurées sans autre apport d'énergie que celui des phénomènes observés et/ou des ondes lumineuses circulant dans la ou les fibre(s).* Les deux caractères de ces capteurs, toujours définis dans la norme précitée, sont les suivants :

- *Un capteur à fibres optiques est dit* ***intrinsèque*** *lorsque l'élément sensible est constitué par une ou plusieurs fibre(s) optique(s) dont une ou plusieurs caractéristiques de transmission, de réflexion, ou d'émission de la lumière sont fonction de la grandeur à mesurer.*
- *Un capteur à fibres optiques est dit* ***extrinsèque*** *lorsque les caractéristiques de la lumière sont modifiées par la grandeur à mesurer à l'extérieur de la ou des fibre(s) optique(s).*

[1] *Grandeur (mesurable)* : *Attribut d'un phénomène, d'un corps, ou d'une substance, qui est susceptible d'être distingué qualitativement et déterminé quantitativement.* [NF X 07-001, 1994]

Il est écrit dans cette norme : *capteur à fibres optiques*. Le singulier est cependant souvent employé, plus proche de l'anglais (ex. : *Fiber-Optic Sensor*, *Fibre Optic Sensor*, *Optical Fiber Sensor*), même si le capteur comporte plusieurs fibres optiques. Le terme de *fibre* au singulier peut aussi parfois représenter un câble qui englobe plusieurs fibres optiques. Cette terminologie fait l'objet de discussions dans le cadre d'une normalisation internationale. Les capteurs considérés dans la présente étude ne possédant qu'une seule fibre optique, le singulier est adopté dans la suite du mémoire : ***capteur(s) à fibre optique***.

Dans le cadre des capteurs à fibre optique, la fibre optique est rarement utilisée seule. Un revêtement secondaire lui est adjoint : la ***gaine mécanique***. Celle-ci, de nature variable (dimensions, géométrie, matériaux), est souvent liée au revêtement primaire par collage (cf. Figure 1.4 a)). Ce revêtement supplémentaire a pour fonctions d'apporter une protection complémentaire de celle donnée par le revêtement primaire et de servir de corps d'épreuve[1] au capteur, en contact direct avec le mesurande[2]. Il est généralement admis que tout capteur est constitué d'un corps d'épreuve (s'il existe) et de l'élément sensible de traduction, le *transducteur* [MOREAU et al., 1982]. Pour les capteurs à fibre optique il s'agit d'un ***transducteur optique*** (cf. Figure 1.4 b)) qui est défini selon la norme NF C 93-800 (1991) comme étant *un dispositif qui reçoit de l'information sous forme d'une grandeur physique et la transforme en information sous forme d'une grandeur optique, selon une loi définie*. Dans la présente étude le transducteur optique des capteurs à fibre optique considérés est assimilé au corps de la fibre optique lui-même, qu'il fasse partie intégrante du cœur (capteur intrinsèque) ou bien qu'il soit par exemple issu de l'association de deux fibres optiques (capteur extrinsèque).

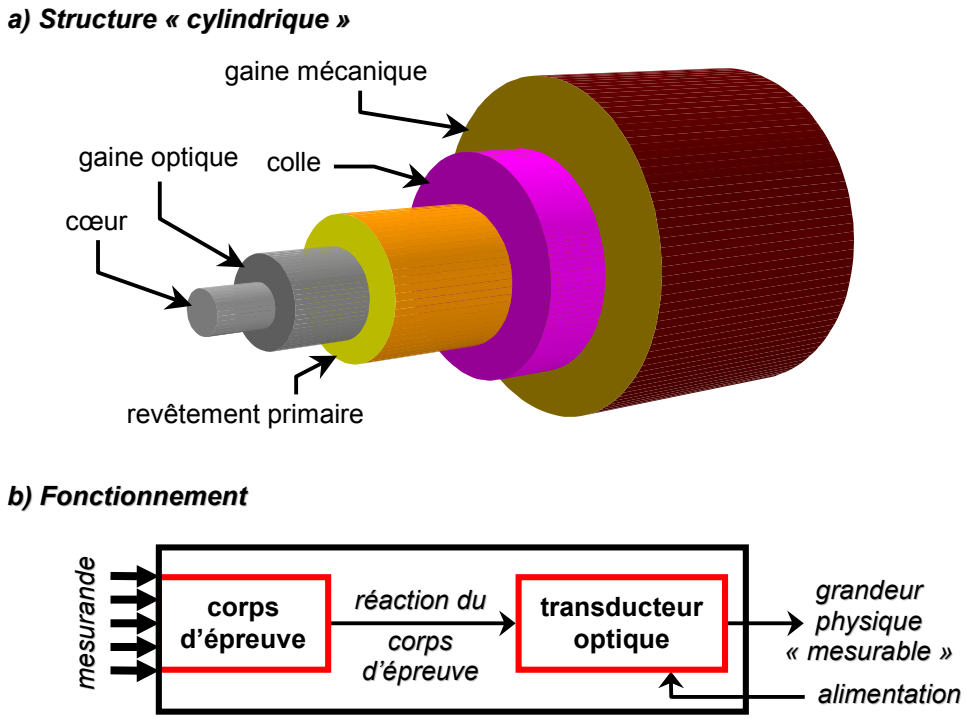


Figure 1.4 Structure d'un capteur à fibre optique

[1] D'après [MOREAU et al., 1982], le corps d'épreuve d'un capteur est l'élément mécanique opérant une première transformation de la grandeur physique.
[2] *Mesurande* : *Grandeur particulière soumise à mesurage*. [NF X 07-001, 1994]

1.1.6 Principes de mesure

La propagation de l'onde lumineuse dans la fibre optique peut être modifiée par différentes sources de perturbations. On distingue communément les modifications suivantes :

L'atténuation du signal lumineux

La fibre optique atténue la lumière guidée. Les causes en sont nombreuses :

- Les causes fondamentales qui sont inhérentes aux matériaux entrant dans la composition du guide (causes d'atténuation irréductibles) :
  - ∗ Les absorptions intrinsèques que sont l'absorption ultraviolette, due aux transitions électroniques de l'oxygène (quasiment négligeable dans le domaine du visible), et l'absorption infrarouge, due aux modes de vibration des divers motifs structuraux (ex. : Si-O, P-O, Ge-O).
  - ∗ Les diffusions intrinsèques que sont la diffusion de Rayleigh[1], produite par les non-uniformités à l'échelle microscopique de la densité de la matière et donc de l'indice de réfraction des verres constituants de la fibre optique, ainsi que d'autres diffusions inhérentes et intrinsèques au matériau (ex. : effet Brillouin).
- Les causes secondaires qui sont produites par des imperfections de la technologie de fabrication (causes d'atténuation par nature réductibles) :
  - ∗ Les absorptions dues aux impuretés chimiques difficiles à éliminer telles que les ions métalliques de transitions (ex. : Ti, Ni, Cr, Cu, Fe), dont l'influence devient prépondérante en terme d'atténuation mais qui est maintenant bien maîtrisée grâce aux procédés de fabrication modernes, ou les ions hydroxyles OH^- constituant à l'heure actuelle la principale source d'atténuation réductible.
  - ∗ Les diffusions dues aux imperfections du guide dont notamment :
    - – Les ***microcourbures***, qui sont dues à des imperfections microscopiques de la géométrie du guide (ex. : défauts de symétrie, fluctuations du rayon de cœur ou de l'interface *cœur / gaine optique*,…). Ces inévitables irrégularités de conditionnement mal connues, font plus ou moins serpenter la fibre autour de la ligne idéale que l'on entend lui faire suivre.
    - – Les courbures macroscopiques, provoquées par des contraintes externes. Cet effet ne devient important que pour un rayon de courbure inférieur à quelques centimètres. Les pertes par courbures sont pratiquement un phénomène à seuil : le passage d'un régime de pertes négligeables à un régime de pertes prohibitives est réalisé en 1 ou 2 cm de part et d'autre d'un certain seuil, qui est assez arbitraire.
    - – Les défauts de l'interface *cœur / gaine optique*, des raccordements ou des connexions, ou les pertes de couplage à la source,…

L'élargissement des impulsions lumineuses

On distingue deux sortes de dispersion du signal :

- La dispersion intermodale des fibres multimodes, qui est due à la différence entre les longueurs des chemins optiques des rayons compris dans l'ouverture numérique.
- La dispersion intramodale, qui est principalement due aux matériaux de la fibre optique, provoquée par la dépendance spectrale des indices de réfraction.

[1] Dans les fibres optiques récentes, cet effet représente environ 90 % de l'atténuation totale dans les fenêtres de transmission, par contre elles sont si pures et presque parfaites qu'elles présentent des atténuations proches du minimum théorique défini par cet effet [FERDINAND, 1992].

La dispersion modale de polarisation

L'ellipticité (une fibre optique réelle n'est jamais parfaitement circulaire), ainsi que des contraintes extérieures, entraînent une ***biréfringence*** dont les axes changent de manière aléatoire le long de la fibre. Il en résulte un couplage entre les deux modes de base, qui donne lieu à un phénomène d'écho. La valeur moyenne de ce retard (aléatoire) caractérise la dispersion modale de polarisation (*PMD* : *Polarization Mode Dispersion*).

Les capteurs à fibre optique exploitent ces perturbations de la propagation de l'onde lumineuse dans la fibre optique. Ce sont les perturbations ayant pour origine la ou les grandeurs physiques que doit mesurer le capteur, en dehors des perturbations liées à la fibre optique elle-même (matériau), qui sont corrigibles (car connues) et dont les effets sont sans cesse diminués. Différentes classifications des capteurs à fibre optique sont rencontrées dans la littérature, suivant les types de capteurs, les mécanismes physiques, les grandeurs mesurées,… Une d'entre elles consiste à regrouper en cinq catégories les principes de mesure par fibre optique suivant la manière dont l'onde lumineuse est modulée [HARMER, 1983] :

- modulation d'***intensité*** (ou d'***amplitude***) : atténuation ou amplification de l'onde lumineuse ;
- modulation de ***phase*** (ex. : capteurs interférométriques) : déphasage entre deux ondes ayant parcouru des chemins différents (un de mesure, et un de référence) ;
- modulation de ***polarisation*** : déphasage de deux ondes polarisées s'étant propagées suivant le même chemin ;
- modulation de ***longueur d'onde*** : variation de positions spectrales ou de largeurs spectrales ;
- modulation de ***temps*** : variation temporelle d'intensité, de phase, de polarisation ou de spectre.

Dans tous les cas, la seule grandeur accessible directement est la puissance de la lumière détectée [ARDITTY et al., 1982]. La première fonction de traitement du signal consiste donc, pour beaucoup de capteurs à fibre optique, à mettre en œuvre les artifices qui transformeront en variation d'intensité optique, les modifications des autres paramètres.

1.1.7 Chaîne de mesure et modes d'interrogation des capteurs à fibre optique

Les capteurs à fibre optique, comme tout capteur [MOREAU et al., 1982], sont des éléments d'une chaîne de mesure[1]. Celle-ci a pour rôle de donner accès au mesurande sous une forme exploitable, alors qu'il ne se prête pas en général à une mesure directe, facilement compréhensible et utilisable. D'après [FERRETI, 1996] la chaîne de mesure d'un capteur à fibre optique comporte d'une manière générale, en dehors du capteur lui-même, les maillons suivants :

- Un ***émetteur de lumière***, qui est un dispositif électronique convertissant un signal électrique en signal optique. Il est constitué d'une ou plusieurs sources monochromatiques, cohérentes ou non, continues ou impulsionnelles (ex. : diodes électroluminescentes, diodes lasers, diodes super-luminescentes).
- Un ***guide d'onde optique***, qui est la fibre optique elle-même (monomode ou multimode). Elle peut être soit standard, ou soit spécialement réalisée pour effectuer une mesure dans un contexte particulier.

[1] *Chaîne de mesure* : *Suite d'éléments d'un appareil de mesure ou d'un système de mesure qui constitue le chemin du signal de mesure depuis l'entrée jusqu'à la sortie*. [NF X 07-001, 1994]

- Un ou des ***composants optiques complémentaires***, tels que, des coupleurs, des polariseurs, des connecteurs,…
- Un ***multiplexeur***, qui assure le multiplexage des signaux pouvant être réalisé suivant différentes procédures (cf. 1.1.8).
- Un ***récepteur de lumière***, qui est un dispositif électronique convertissant un signal optique en un signal électrique. Les détecteurs employés sont variables suivant la détection souhaitée (ex. : photodiodes simples (PD) ou à avalanche (PDA), barrettes de photodiodes, photomultiplicateurs).
- Une ***chaîne de traitement du signal***, dont la complexité va souvent de pair avec celle du montage optique.
- Un ***circuit d'alimentation en énergie***, qui est le plus souvent classique.

Les capteurs à fibre optique au sein d'une chaîne de mesure peuvent être interrogés selon deux principaux modes d'interrogation [KERSEY, 1997] :

Par transmission (cf. Figure 1.5 a))
Le signal lumineux injecté à l'entrée de la fibre optique traverse le capteur et est récupéré par un détecteur en sortie de fibre. L'inconvénient de ce type de mode d'interrogation c'est que les deux extrémités de la fibre optique doivent être accessibles.

Par réflexion ou rétrodiffusion (cf. Figure 1.5 b))
Le signal lumineux injecté à l'entrée de la fibre optique traverse le capteur qui réfléchit ou rétrodiffuse le signal qui est récupéré à la même entrée de la fibre optique.

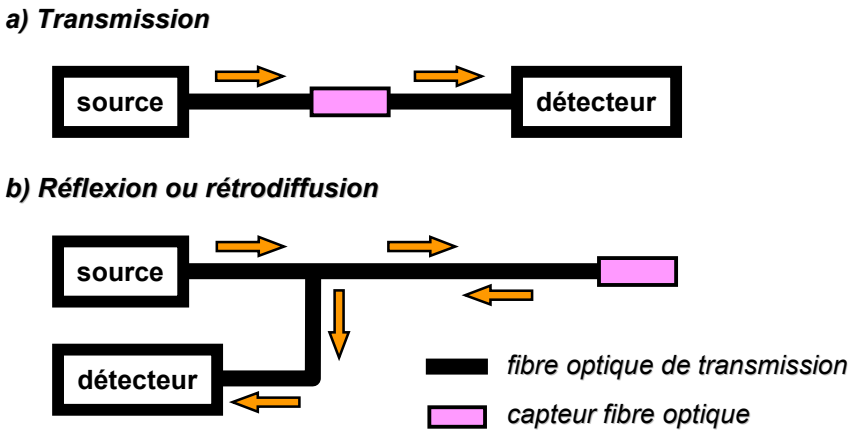


Figure 1.5 Modes d'interrogation d'un capteur à fibre optique

1.1.8 Types de mesure

Les capteurs à fibre optique offrent la possibilité de réaliser différents types de mesure dont les principaux sont regroupés selon deux types de capteur, qui sont nommés dans la présente étude de la manière suivante (cf. Figure 1.6) :

« Capteurs ponctuels à fibre optique »

Ce type de capteur ne réalise qu'un seul point de mesure. Cette mesure peut être ponctuelle ou intégrée le long de la fibre optique.

« Multicapteurs à fibre optique »

Ce type de capteur réalise plusieurs points de mesure :

- *sur une même fibre optique*, avec distinction entre les mesures :
  - ∗ *distribuées* (ou *quasi-réparties*) : plusieurs capteurs à fibre optique disposés en ligne, la fibre optique étant ponctuellement sensible à différents types de grandeurs physiques ;
  - ∗ *réparties* (ou *intégrées*) : un capteur à fibre optique unique, la fibre optique étant continûment sensible à un seul type de grandeur physique ;
- *sur plusieurs fibres optiques* : association de plusieurs capteurs à fibre optique réalisant des mesures, ponctuelles ou intégrées (association de capteurs ponctuels à fibre optique), ou distribuées (association de multicapteurs à fibre optique), ou, une combinaison de ces différentes mesures (association de capteurs ponctuels et de multicapteurs).

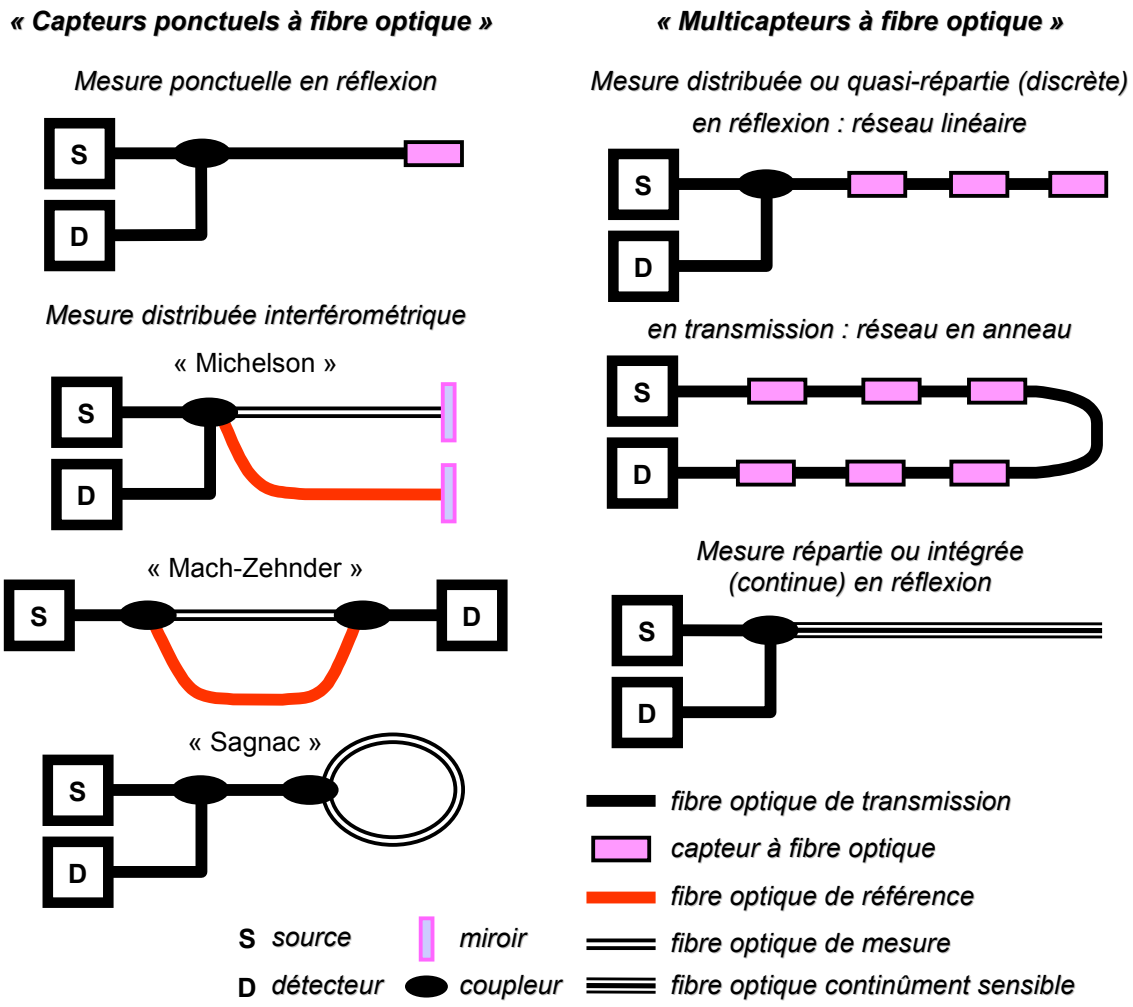


Figure 1.6 Exemples de certains types de mesure par capteurs à fibre optique

Le terme *multicapteurs* induit la notion de réseaux [LEQUIME, 1997] (ex. : linéaire, en échelle, arborescent, en étoile), auxquels sont associées différentes procédures de multiplexage permettant d'interroger l'ensemble des capteurs, et de récupérer les informations pro-

venant de chacun d'entre eux. Parmi toutes les procédures de ***multiplexage*** les suivantes se distinguent [KERSEY, 1995] :

- Le *multiplexage temporel* (*TDM* : *Time Division Multiplexing*), qui consiste à injecter une impulsion lumineuse de faible durée et à détecter les impulsions renvoyées par les différents capteurs à fibre optique, qui se trouvent retardées par rapport à l'instant d'émission. La *réflectométrie optique dans le domaine temporel* (*OTDR* : *Optical Time Domain Reflectometry*) et la *réflectométrie optique de polarisation dans le domaine temporel* (*POTDR* : *Polarization Optical Time Domain Reflectometry*) sont des techniques fréquemment employées.
- Le *multiplexage spatial*, qui consiste à interroger séquentiellement chaque capteur à fibre optique par une commutation pouvant être soit mécanique (ex. : élément opto-mécanique de balayage effectuant le partage du signal lumineux de la source et du détecteur entre tous les capteurs à fibre optique), soit électronique (ex. : différentes sources, une pour chaque capteur à fibre optique, interrogeant successivement les différents capteurs, le détecteur étant commun).
- Le *multiplexage fréquentiel* (*FDM* : *Frequency Division Multiplexing*), qui consiste à assigner une bande de fréquence spécifique à chaque capteur, à l'intérieur de laquelle le signal délivré par le transducteur est modulé en amplitude, en phase ou en fréquence. Une technique fréquemment employée est la *réflectométrie optique dans le domaine fréquentiel* (*OFDR* : *Optical Frequency Domain Reflectometry*) et notamment le principe de *modulation de fréquence en ondes continues* (*FMCW* : *Frequency Modulated Continuous Waves*).
- Le *multiplexage en longueur d'onde* (*WDM* : *Wavelength Division Multiplexing*), qui consiste à faire cheminer en parallèle dans la fibre optique plusieurs bandes spectrales associées chacune à un capteur particulier.
- Le *multiplexage de cohérence ou interférométrie par corrélation* (*PMDI* : *Path Matched Differential Interferometry*), qui consiste à interroger à l'aide d'une source à large spectre tous types de capteurs induisant une différence de chemin optique (ex. : capteurs interférométriques ou polarimétriques).

1.2 Capteurs à fibre optique appliqués au Génie Civil

1.2.1 Surveillance et auscultation des ouvrages de Génie Civil

Les définitions et exemples qui suivent dans cette partie sont issues de [PRAT et al., 1995] et [GODART, 1998].

Un ouvrage de Génie Civil est principalement inscrit dans un site. Il est constitué d'un ensemble de parties (structures, matières et leurs interactions) sur lesquelles agissent des actions évoluant dans le temps. Le Génie Civil met généralement en œuvre des ouvrages volumineux et pesants : plus de 20000 tonnes déplacées pour un simple viaduc poussé. Ces ouvrages, constitués de pièces rigides et souvent massives, supportent des charges statiques, dynamiques et aléatoires (ex. : au moins 100000 véhicules par jour pour un pont autoroutier en zone urbaine), et transmettent des efforts importants, exprimés en centaines de tonnes, aux fondations et aux sols. L'expérience montre que les performances d'une construction décroissent exponentiellement en fonction du temps, plus ou moins rapidement suivant le type des matériaux employés, la réponse de l'ouvrage aux diverses actions et la qualité des contrôles et

des inspections. Ainsi une diminution de 14 % de la capacité portante de ponts (tous matériaux confondus) est mesurée après 40 ans à cause du seul passage des véhicules les plus agressifs, mais cette diminution atteint 30 % en 7 ans pour un ouvrage non entretenu. Ces chiffres donnent la mesure des moyens financiers et humains mobilisés pour leur conception, leur construction et leur entretien.

L'***état de service*** d'un ouvrage de Génie Civil est l'état permettant à cet ouvrage de remplir les fonctions qui lui sont assignées pour son exploitation, tout en intégrant un niveau acceptable de sécurité et de confort pour les exploitants, les usagers et les tiers, dans des conditions d'utilisation conformes à celles auxquelles il était destiné. La ***surveillance*** de ce type d'ouvrage, qui s'applique dès la phase de construction et pendant toute sa durée de vie, doit donner à tout moment une juste idée de son état de service pour vérifier notamment :

- soit que cet état est *normal* (ou *quasi-normal*) : les opérations d'entretien se poursuivent normalement ;
- soit que cet état est *anormal* (*douteux* ou *défectueux*) ou risque de le devenir : des précautions doivent alors être prises pour assurer la sécurité des usagers ainsi que des tiers, et des opérations doivent être menées permettant de remettre l'ouvrage en état de service.

L'***auscultation*** est un ensemble d'examens et de mesures spécifiques faisant le plus souvent appel à des techniques élaborées, destinés à approfondir la connaissance de l'état d'un ouvrage. Effectuée le plus couramment lorsque l'état de l'ouvrage est défectueux ou douteux, elle peut aussi être réalisée dans le cas d'un ouvrage qui est dans un état normal ou quasi-normal (ex. : ouvrage exceptionnel ou innovant, modification structurelle de l'ouvrage envisagée). Il n'existe pas de méthode générale d'auscultation applicable à tous les ouvrages de Génie Civil, ni même à une famille donnée d'entre eux. De plus, les méthodes d'auscultation à utiliser diffèrent suivant la nature des désordres constatés. Les investigations peuvent être de deux natures :

Appréciation de l'état ou des propriétés des matériaux en place (matériaux constitutifs de l'ouvrage et/ou des terrains avoisinants)

Les moyens d'auscultation permettant d'apprécier l'état des matériaux comprennent :

- *Les études et analyses sur prélèvements d'échantillons sur un ouvrage :*
  Le prélèvement a l'inconvénient d'être partiellement destructif et les renseignements obtenus ne peuvent être représentatifs de l'ensemble de l'ouvrage. Le plus souvent ces échantillons sont utilisés comme référence d'étalonnage ou comme élément de comparaison, afin de compléter les informations tirées des essais non destructifs effectués sur l'ouvrage.
- *Les techniques d'examen des matériaux en place :*
  Il peut s'agir d'examens visuels ou de méthodes plus raffinées et plus puissantes (ex. : gammagraphie, radiographie, auscultation électromagnétique, thermographie infrarouge).

Analyse du mode de fonctionnement réel de la structure ou d'un de ses éléments, à vide et/ou sous chargements

Les moyens d'auscultation permettant d'apprécier le fonctionnement de la structure sont variés, et il est souvent nécessaire de les associer dans une même auscultation. On distingue notamment :

- les mesures d'ordre topométrique ou d'ordre géométrique (ex. : évolution du nivellement, mesure de déformation générale ou de déplacement sous chargement) ;

- les mesures directes de forces (ex. : réactions d'appuis, forces de précontraintes, tensions de fils ou de torons de précontrainte) ;
- les mesures locales de fonctionnement, dont notamment les mesures de :
  - *déplacement*, par des fissuromètres, des comparateurs mécaniques ou des capteurs électriques ;
  - *température*, par des sondes platines ou des thermocouples ;
  - *rotation*, par des nivelles, des pendules ou des inclinomètres ;
  - *déformation*, par des jauges extensométriques, des extensomètres mécaniques ou des extensomètres à corde vibrante.

De nouveaux capteurs sont régulièrement étudiés et conçus, avec un souci permanent de proposer une autre alternative aux moyens traditionnels pour les mesures locales de fonctionnement de l'ouvrage. C'est le cas des capteurs à fibre optique qui sont employés depuis une dizaine d'années comme moyens d'auscultation pour les ouvrages de Génie Civil [HOLST et al., 1992] [UDD, 1992] [HUSTON et FUHR, 1995].

1.2.2 Avantages et inconvénients des capteurs à fibre optique

Les capteurs à fibre optique offrent des potentialités métrologiques intéressantes pour l'instrumentation des ouvrages de Génie Civil. Il y a les avantages décisifs, liés aux spécificités des fibres optiques, et les avantages spécifiques, liés aux spécificités de certains capteurs ainsi que des potentialités de mise en réseau. Quelques uns de ces avantages, détaillés dans de nombreux documents et notamment dans [FERRETI, 1996], sont présentés ci-après :

Spécificités des fibres optiques

- Les dimensions de la fibre optique induisent notamment des avantages tels que la possibilité de déport de l'instrumentation (grande dimension axiale et très faible atténuation linéique), le faible encombrement (très faible dimension transversale), la légèreté ou la grande souplesse (rayon de courbure minimal de quelques centimètres).
- La résistance à la traction d'une fibre optique est en général plus élevée que celle d'un fil électrique.
- Le caractère isolant des fibres ainsi que l'extrême petitesse du champ électromagnétique de l'onde lumineuse les parcourant confèrent aux capteurs un caractère non perturbateur pour le milieu à ausculter.
- L'absence de risques d'étincelles électriques ou de courts-circuits[1] offre une sécurité non négligeable d'utilisation (ex. : mines de charbon, industries chimiques).
- La nature même de la constitution des fibres leur confère la possibilité d'être utilisée dans des milieux fortement hostiles, où tout autre technologie fonctionne difficilement voire pas du tout (ex. : hautes températures, très forte pression, fortes perturbations électromagnétiques le long des lignes à haute tension par exemple).
- La matière première est en abondance dans la nature[2], ce qui est important du point de vue perspective des prix de la matière première.

[1] L'inertie vis-à-vis des produits explosifs et chimiques comporte certaines limites. En effet des travaux menés en Australie et en Angleterre ont montré qu'il suffisait d'une énergie optique minimum de 300 mW pour un mélange de méthane et de 140 mW pour l'hydrogène, pour les *enflammer* [BESNIER, 1992]. Une telle énergie peut être générée au sein d'un système avec multiplexage de fibres optiques.
[2] La surface de la planète est constituée d'environ 16 % de silice.

Spécificités des capteurs à fibres optiques

- Certains capteurs à fibre optique sont passifs.
- Les capteurs à fibre optique ont une bonne adaptation à toute mesure à distance[1].
- Leur sensibilité peut être extrême et est seulement limitée par le bruit photonique dans le détecteur et une grande dynamique atteignant typiquement 80 dB.
- Le regroupement d'un grand nombre de capteurs en réseau permet :
  - ∗ d'augmenter notablement le nombre de points de mesure et donc de rendre l'information statistiquement plus crédible ;
  - ∗ de rentabiliser les équipements par la mise en commun d'un unique système d'interrogation ;
  - ∗ d'optimiser les câbles en masse et volume (il en résulte un gain au niveau des études, des plans, des infrastructures, de la maintenance,…) ;
  - ∗ d'améliorer la gestion du parc des appareils ou machines instrumentées (centralisation des informations).

Les capteurs à fibre optique présentent bien entendu des inconvénients. Les plus fréquemment mentionnés sont :

- ♦ La connectique des fibres optiques reste lente et délicate[2] comparée au cas du cuivre qui se connecte et se déconnecte facilement.
- ♦ Le faible diamètre des fibres optiques ne met pas en évidence les défauts éventuels (ex. : épissure, défaut lié à un cisaillement).
- ♦ Cette technologie manque de retour d'expériences.
- ♦ Une multitude de principes de mesure et de systèmes pour la mise en réseau existe sur le marché.
- ♦ Le prix du point de mesure est plus élevé que celui d'un capteur traditionnel, sans pour autant être plus performant dans certaines applications usuelles.

Ces trois derniers points sont principalement liés au problème de la diffusion dans le milieu industriel de l'optique face à l'électrique. Cette technologie est récente et n'a pas bénéficié des investissements réalisés par l'industrie des communications. Cependant, de plus en plus de capteurs à fibre optique existent sur le marché et l'intérêt porté à ce type d'instrumentation va croissant, comme le montre une étude récente [OLE, september 2000].

Un inconvénient d'importance est que la propagation de l'onde lumineuse dans une fibre optique peut être modifiée par plusieurs grandeurs physiques à la fois. Les éléments constitutifs d'un capteur à fibre optique, en dehors de la fibre optique, doivent alors être adaptés (géométrie, dimensions, matériaux) en fonction de la grandeur physique, que l'on souhaite relier aux variations du paramètre de l'onde lumineuse caractéristique du principe de mesure utilisé. L'ensemble de ces éléments est nommé ***conditionnement de la fibre optique*** ou simplement ***conditionnement*** dans la suite du mémoire. Des exemples de capteurs à fibre optique appliqués à des ouvrages de Génie Civil avec des conditionnements particuliers, illustrant les différents principes de mesure précédemment décrits, sont présentés dans ce qui suit.

[1] La grande dimension axiale de la fibre optique, la très faible atténuation linéique et le débit d'informations élevé permettent des mesures déportées indispensables, notamment pour le contrôle des processus industriels mettant en œuvre des matières toxiques ou dangereuses (possibilité de télétransmission).

[2] Les connexions sont particulièrement difficiles à réaliser. Elles doivent par exemple être étanches car la fibre optique est sensible aux poussières, à la pression et à l'humidité. Actuellement, il est parfois plus intéressant dans certains cas, de changer la fibre plutôt que de la rallonger en introduisant une connexion supplémentaire.

1.2.3 Exemples d'application

1.2.3.1 Capteurs à fibre optique TOR (Tout Ou Rien)

Le principe de ces capteurs à fibre optique est basé comme leur nom l'indique sur la propagation ou la non propagation du signal transmis. Ils sont à l'état *haut* ou *bas* et fournissent donc une information binaire, ou *tout ou rien*. Cette technique simple a été utilisée en réseau dans des applications industrielles [JEUNHOMME et DESFORGES, 1987] [FERDINAND, 1992].

Ces capteurs à fibre optique TOR ont été mis en œuvre pour la surveillance de l'état de fissuration d'ouvrages d'art en béton, en s'appuyant sur une propriété importante des fibres optiques en silice : aucune variation notable du signal transmis n'est enregistrée jusqu'à la rupture de la fibre. Le signal transmis dans une fibre optique intégrée au sein du béton [ROSSI et LE MAOU, 1986], subit une forte diminution pour atteindre une valeur quasi nulle lorsque la fissure entraîne la rupture de la fibre (cf. Figure 1.7). Ce type de capteurs ne fournit aucune information sur l'importance de la fissure ni sur son évolution dans le temps. Il est possible tout au plus, à l'aide d'une technique OTDR, de localiser le lieu de rupture. En effet, en disposant tout un réseau de fibres optiques noyées dans la structure, il est alors possible de visualiser l'évolution des fissures suivant les ruptures successives des fibres du réseau. Ce principe a été repris, toujours pour détecter, localiser et suivre l'évolution des fissures, mais cette fois en surface de structures en béton [GUILLARD et MOREAU, 1995]. Les capteurs sont des fibres optiques dénudées (cœur et gaine optique seulement), collées au fond d'une rainure réalisée sur la surface de la structure, à même le béton. La mesure ainsi effectuée dépend fortement de la qualité de la liaison par collage. C'est pourquoi toute une étude a consisté à tester en laboratoire, sur de petites et de grandes éprouvettes en béton, différents types de colles afin d'optimiser cette liaison [GUILLARD et MOREAU, 1995].

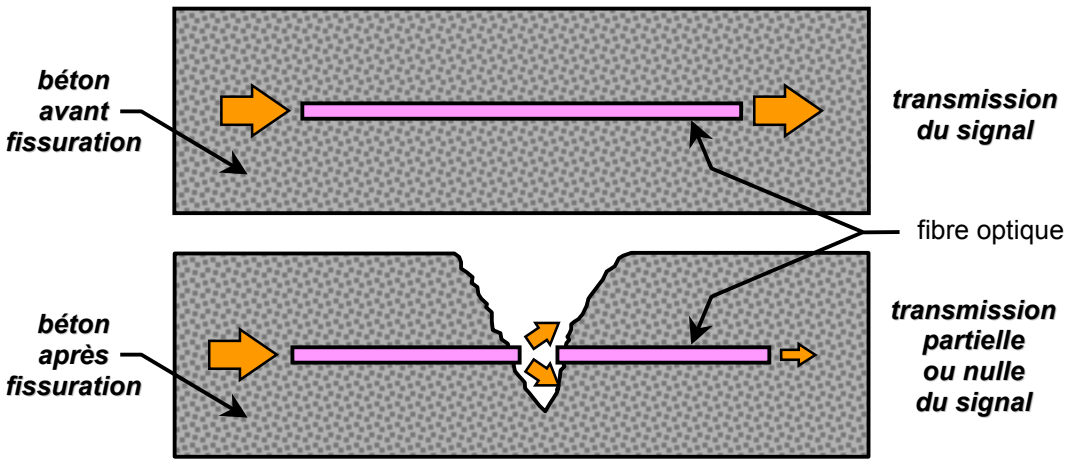


Figure 1.7 Capteur à fibre optique TOR pour la détection de fissures dans le béton

1.2.3.2 Capteurs à fibre optique à microcourbures

Le principe de ces capteurs repose sur la modulation de l'intensité lumineuse transmise dans une fibre (en générale multimode), en mettant à profit le phénomène de pertes par mi-

crocourbures. La fibre optique avec son revêtement primaire (souvent en polyimide) conditionnée en microcourbures, voit sa sensibilité modifiée en fonction des variations extérieures de pression, de contrainte ou d'élongation. Lorsqu'une fibre optique est courbée périodiquement, cette sensibilité varie suivant la périodicité spatiale des déformations et le nombre des microcourbures.

Les conditionnements en microcourbures sont nombreux et variés [CLARK et SMITH, 1995]. Les plus couramment rencontrés sont présentés dans ce qui suit.

Structure « peignes »

La fibre optique est disposée entre deux *peignes* décalés d'une demi-période l'un par rapport à l'autre, dont le pas correspond approximativement à la période spatiale des modes de propagation. Différents types de *structure peignes* existent dont notamment les structures dites *simples*, *périodiques* ou *points* [DONLAGIC et ZAVRSNIK, 1997].

Les capteurs de ce type sont traditionnellement utilisés pour mesurer des pressions. La sollicitation subit par le capteur, dont la direction est perpendiculaire à l'axe moyen de la fibre optique, induit des microcourbures au voisinage des points de contact modulant l'amplitude du signal (cf. Figure 1.8 a)). Cette technique a été appliquée à l'instrumentation de câbles de précontraintes d'un pont routier à Leverkusen en Allemagne [WOLFF et MIESSELER, 1992]. Des travaux ont été réalisés afin de pouvoir utiliser ce type de capteur en réseau [DONLAGIC et CULSHAW, 1998]. Une nouvelle approche de cette technique permet de réaliser un capteur capable de détecter des déformations [ANDERSON et BROSIG, 1995]. La sollicitation subie par le capteur, dont la direction est parallèle à l'axe moyen de la fibre optique, induit une variation de la fréquence spatiale des microcourbures (cf. Figure 1.8 b)).

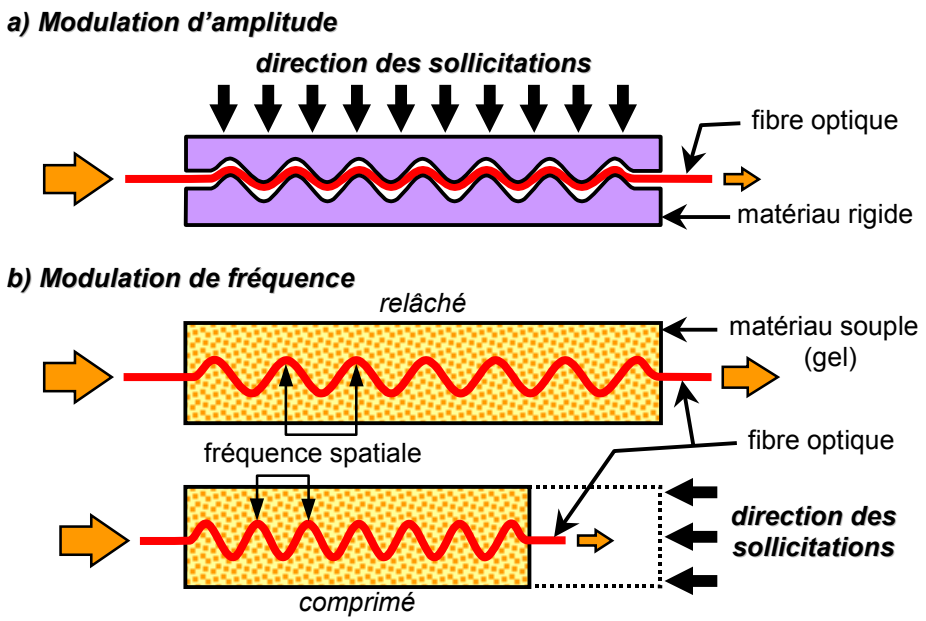


Figure 1.8 Capteurs à fibre optique avec un conditionnement en microcourbures de type structure « peignes »

Fibres optiques « torsadées »

Deux fibres optiques sont torsadées entre elles, afin d'engendrer sur celles-ci des microcourbures dont l'amplitude est corrélée à l'allongement des dites fibres [ABE et al., 1989].

Ce type de capteur a notamment été utilisé pour mesurer des déformations dans des plaques de matériaux composites [HUIWEN et al., 1996]. Aucune application directe sur des ouvrages de Génie Civil n'a été recensée.

Enroulement en « hélice »

Un fil métallique ou polymère [DAKIN, 1992] est spiralé autour du revêtement primaire d'une fibre optique (cf. Figure 1.9), l'ensemble pouvant être placé dans une gaine mécanique ajustée (ex. : tube acier). Lors de l'allongement (sollicitation axiale) de l'ensemble, le fil induit des microcourbures à la fibre optique.

Les potentialités d'application de ce type de dispositif à la surveillance d'ouvrages de Génie Civil ont été identifiées depuis quelques années [BRUINSMA et al., 1984]. Il a notamment été utilisé pour l'instrumentation d'appareil d'appui en élastomère fretté d'ouvrages d'art : la plaque métallique, sur laquelle repose l'appareil d'appui, est équipée de plusieurs fibres optiques conditionnées en microcourbures par *hélice* métallique pour des mesures de pression. Cette instrumentation, placée par exemple sous la culée d'un pont à quatre travées [BALTAZART et al., 2000], permet la mesure instantanée d'atténuation lumineuse donnant accès à des informations de charge en statique et dynamique. Des fibres optiques avec le même type de conditionnement ont été utilisées dans des applications pour la surveillance du trafic, au sein de la structure d'une autoroute dans le Nord de la Finlande [SUOPAJÄRVI et al., 1998].

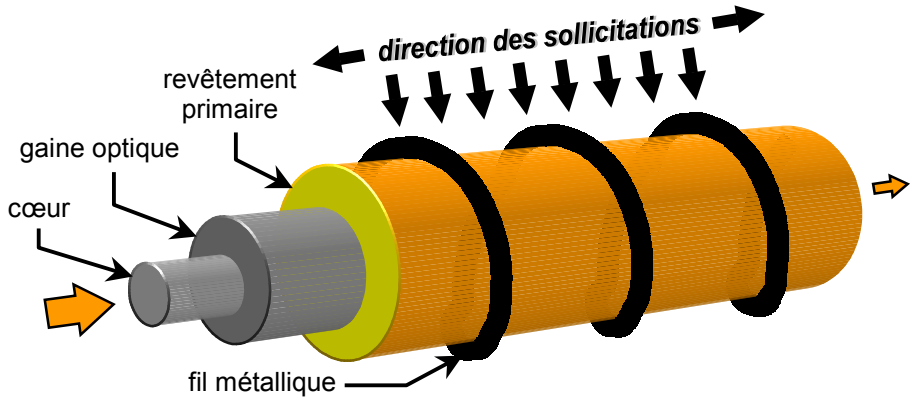


Figure 1.9 Capteur à fibre optique avec un conditionnement en microcourbures de type enroulement en « hélice »

1.2.3.3 Capteurs à fibre optique interférométriques

Le principe de mesure des capteurs à fibre optique interférométriques est basé sur la modulation de phase de l'onde lumineuse par l'action d'une grandeur physique. Les capteurs à fibre optique sont intégrés à des montages interférométriques dont les plus courants sont par exemple ceux nommés *Michelson* ou *Mach-Zehnder* (cf. Figure 1.6). Ces montages permettent de comparer la phase d'une onde lumineuse propagée par une fibre optique sur laquelle s'exerce la grandeur physique, dite *fibre optique de mesure*, avec la phase d'une onde lumineuse propagée par une autre fibre optique, dite *fibre optique de référence*.

De nombreux capteurs à fibre optique interférométriques ont été l'objet d'études diverses [KERSEY, 1997]. Deux montages interférométriques à fibres optiques, utilisés dans diverses applications de surveillance d'ouvrages de Génie Civil, sont détaillés ci-après.

De type Fabry-Pérot

Le principe de ce type de capteur est analogue au principe de l'interféromètre Fabry-Pérot [CHAIMOWICZ, 1992]. Deux fibres optiques, à l'extrémité desquelles une couche semi-réfléchissante a été déposée, sont soudées par fusion à l'intérieur d'un micro-capillaire constitué de silice fondue, le tout formant ce qui est appelé *jauge Fabry-Pérot* [BELLEVILLE et DUPLAIN, 1993] (cf. Figure 1.10). L'espace entre les deux miroirs forme la *cavité Fabry-Pérot* et la distance entre les deux points de soudure est la longueur de jauge (L_{jauge}). Le poste de lecture convertit le signal lumineux réfléchi par les deux miroirs semi-réfléchissants en longueur de cavité ($L_{cavité}$) absolue grâce à un principe breveté de corrélation optique. La déformation axiale du micro-capillaire est convertie en variation de longueur de cavité, et est obtenue par :

$$(\varepsilon_{zz})_{micro-capllaire} = \frac{\Delta L_{cavité}}{L_{jauge}}$$

Un conditionnement, lié directement au micro-capillaire, est adjoint à la jauge Fabry-Pérot, l'ensemble formant un capteur à fibre optique de déformation.

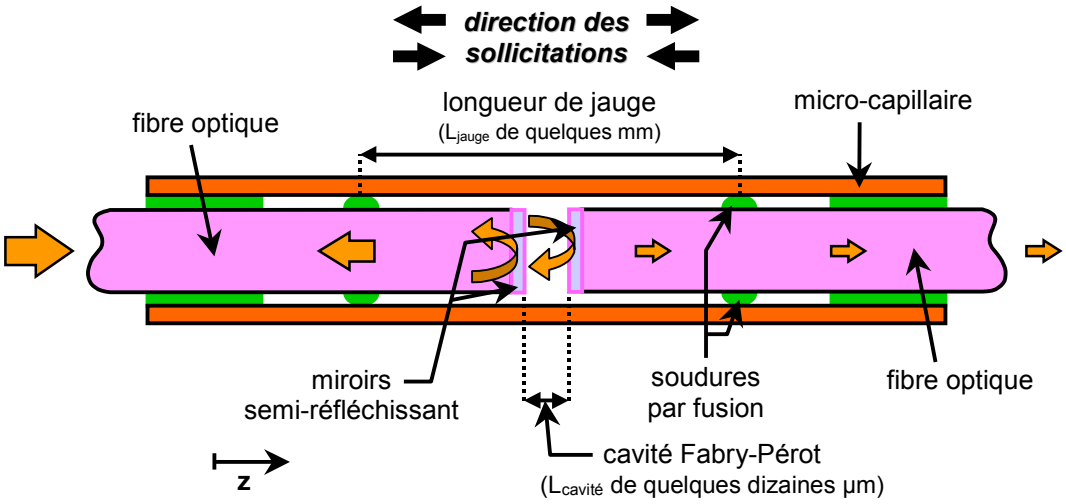


Figure 1.10 « Jauge Fabry-Pérot »

De nombreux capteurs à fibre optique interférométriques de type Fabry-Pérot ont été développés pour les mesures de déformation [MORIN et al., 1996] [CHEN et al., 1997], mais également de pression, de déplacement [DUPLAIN et al., 1997] et de température. Les possibilités d'utilisation de ce type de capteurs dans des centrales électriques ont notamment été étudiées [NARENDRAN et WEISS, 1996]. Des applications sur site ont été réalisées pour certains ouvrages de Génie Civil, comme par exemple, des ponts [LEE et al., 1999] [CHOQUET et al., 1999] ou un stationnement à étages et une passerelle [QUIRION et BALLIVY, 2000].

En basse cohérence

Un système de mesure par fibres optiques pour la surveillance d'ouvrages de Génie Civil, utilisant le principe de l'interférométrie en basse cohérence, a été mis au point [INAUDI et VURPILLOT, 1995]. L'émission infrarouge d'une diode électroluminescente est injectée dans une fibre monomode puis envoyée, à l'aide d'un coupleur, dans deux fibres installées dans la structure à observer (cf. Figure 1.11). La première, dite *fibre de mesure*, est liée mécaniquement à la structure et en subit les déformations. La deuxième, appelée *fibre de référence*, est placée parallèlement à la fibre de mesure mais n'est pas solidarisée à la structure. Un miroir à

l'extrémité de chaque fibre renvoie la lumière vers le coupleur qui recombine les deux faisceaux et les dirige vers l'analyseur. Celui-ci se compose également de deux fibres dont la différence de longueur est contrôlée avec précision à l'aide d'un miroir mobile. En déplaçant ce dernier, une modulation du signal est obtenue et détectée sur une photodiode lorsque la différence de longueur entre les fibres de l'analyseur compense celle des fibres installées dans la structure. Chaque fois qu'une mesure est réalisée, une nouvelle position de compensation est obtenue, traduisant la déformation de la structure par rapport aux points de mesure acquis auparavant.

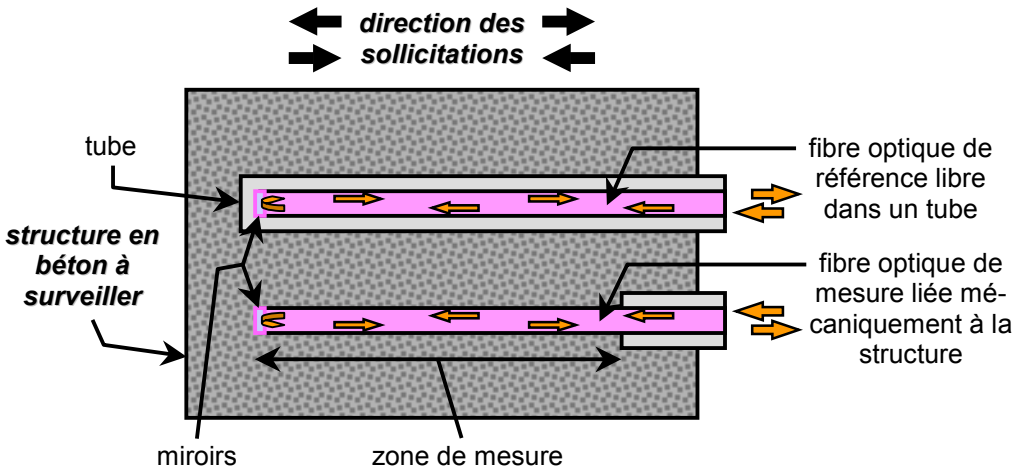


Figure 1.11 Capteur à fibre optique interférométrique en basse cohérence

Les capteurs sont constitués de fibres optiques standards de communication (avec revêtement primaire en polyimide) qui sont fixées par collage à des ancrages métalliques [INAUDI et al., 1996]. Les deux fibres optiques d'un même capteur (fibres de mesure et de référence) sont protégées du milieu extérieur par un revêtement en polyimide solidaire des ancrages, servant aussi de corps d'épreuve du capteur et n'étant pas en contact avec les fibres optiques. Ces capteurs sont utilisés pour la mesure de déformation au sein ou en surface de structure de différents matériaux (ex. : béton, métal, bois, mixtes). Un grand nombre d'ouvrages ont été instrumentés par ce type de capteurs [INAUDI, 1997], dont notamment certains ponts et barrages en Suisse comme par exemple le pont de Moesa [INAUDI et al., 1997], le pont de Versoix [VURPILLOT et al., 1997], le pont de Lutrive [PERREGAUX et al., 1998] ou le barrage d'Emosson [KRONENBERG et al., 1997].

1.2.3.4 Capteurs à fibre optique polarimétriques

Le principe de ces capteurs repose sur la biréfringence induite dans une fibre optique par l'action d'une grandeur physique. Cette biréfringence a pour effet de modifier la polarisation d'une onde lumineuse initialement polarisée. La mesure est basée sur la comparaison entre les directions de polarisation d'entrée et de sortie. Les fibres optiques employées sont essentiellement des fibres monomodes.

Un capteur de ce type a été développé afin d'être noyé dans la chaussée tout en permettant le pesage en marche de véhicules [CAUSSIGNAC et ROUGIER, 1998]. Une fibre optique est insérée entre deux rubans sertis sur les bords, afin de la sensibiliser suivant une charge uniaxiale normale à son axe (mesure de pression) (cf. Figure 1.12). D'autres capteurs, basés sur la détection du profil des biréfringences au sein de fibres optiques pour la mesure de pression

ou de déformation dans des structures en béton, ont été étudiés théoriquement et expérimentalement en laboratoires. Différents conditionnements de la fibre optique de ce type de capteurs sont rencontrés dont notamment les suivants :

- fibre optique avec un revêtement primaire en acrylate, noyée au sein d'éprouvettes en béton [CALERO et al., 1994] ;
- fibre optique avec un revêtement primaire en nylon collée en surface d'une barre d'acier, l'ensemble étant noyé au sein d'une pile de pont en béton armé ou collé en surface intérieure d'un voussoir de tunnel en béton selon le périmètre [NARUSE, 1999] ;
- fibre optique avec un revêtement primaire en résine et en téflon avec une gaine mécanique en composite, le tout noyé au sein d'une dalle en béton [NARUSE, 1999].

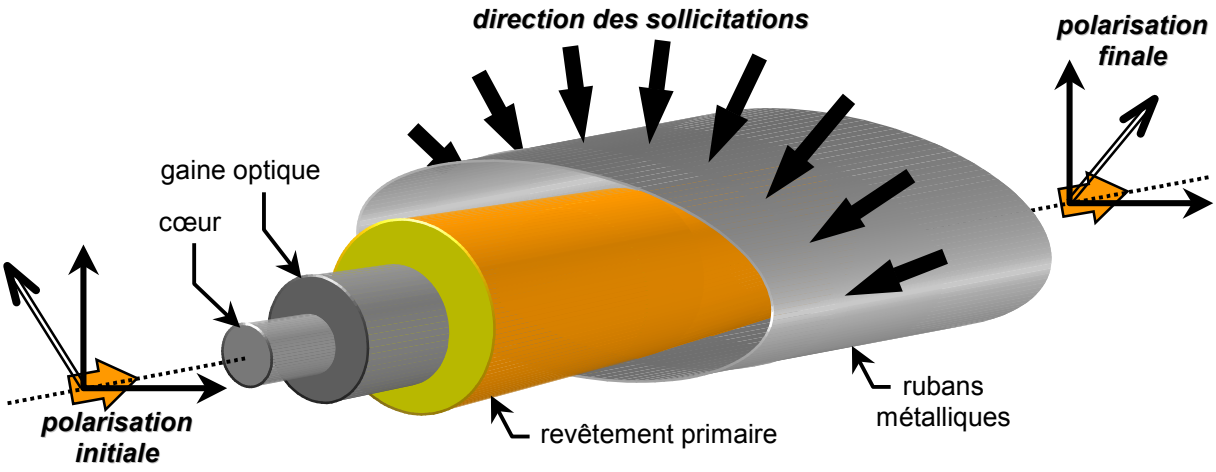


Figure 1.12 Capteur à fibre optique polarimétrique

1.2.3.5 Capteurs à fibre optique à réseau de Bragg

Le réseau de Bragg est une modification périodique de l'indice de réfraction du cœur de la fibre optique. L'inscription des réseaux de Bragg peut être réalisée de façon contrôlée suivant différents procédés de fabrication [FERDINAND, 1999]. Les concepteurs de réseaux de Bragg peuvent réaliser différents profils longitudinaux de modulation d'indice, comme par exemple des profils uniformes ou de forme gaussienne à indice moyen uniforme [NIAY et al., 1998]. Le réseau ainsi créé est un réflecteur de grande sélectivité :

- Lorsqu'il reçoit une onde incidente, seule la composante spectrale λ_{Bragg} est réfléchie.
- Lorsqu'il est illuminé avec un spectre large, seule une bande très étroite du spectre incident est réfléchie (cf. Figure 1.13).

Le réseau de Bragg inscrit est rémanent, et se caractérise par la relation simple suivante :

$$\lambda_{Bragg} = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda$$

avec :

- λ_{Bragg} : longueur d'onde de Bragg
- $n_{eff} = n_{eff}(\lambda)$: indice de réfraction dans le cœur de la fibre optique, effectif à la longueur d'onde de Bragg pour le mode s'y propageant
- Λ : période spatiale de la modulation d'indice

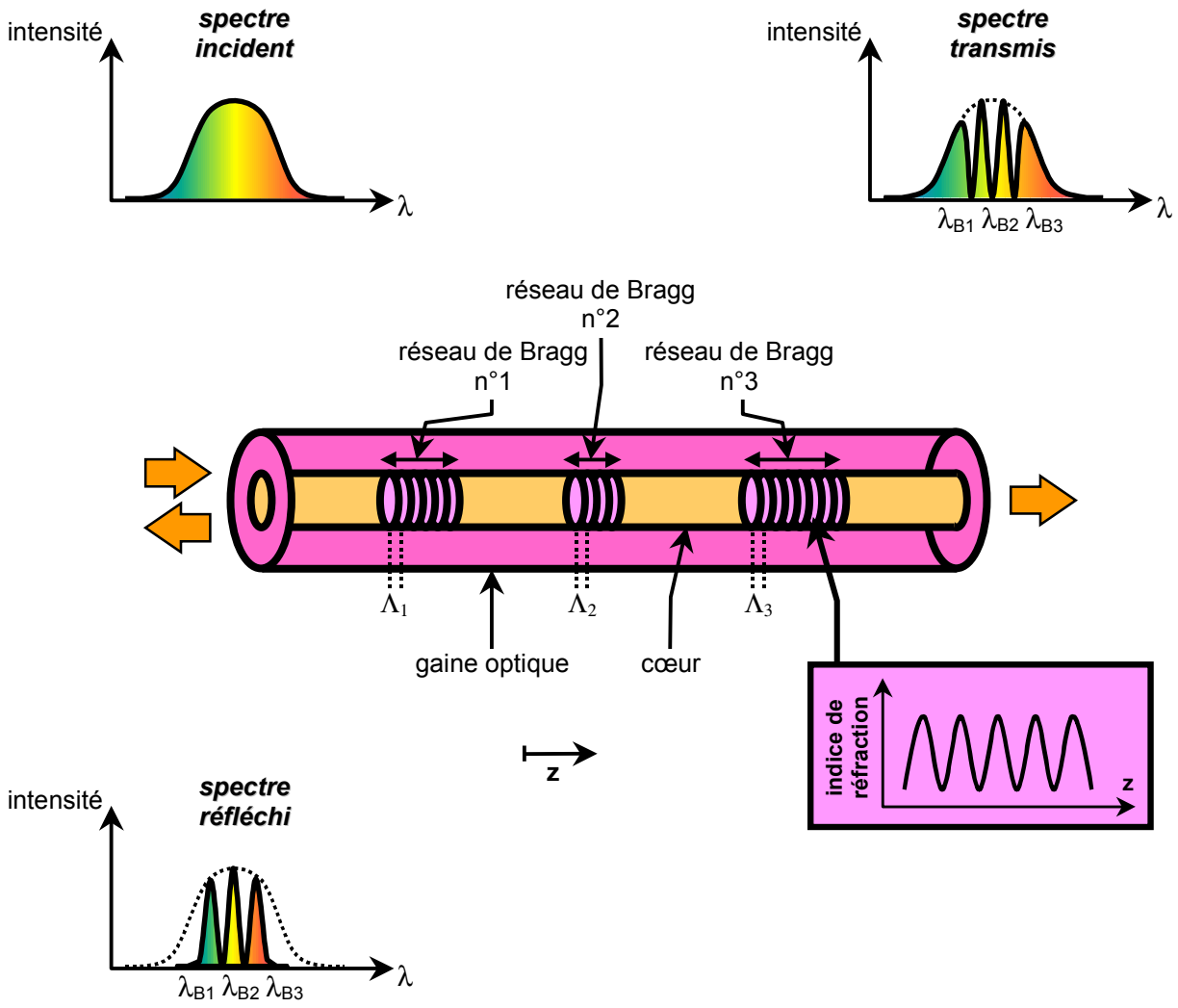


Figure 1.13 Principe des réseaux de Bragg

Dans les capteurs à fibre optique à réseau de Bragg, la sélectivité en longueur d'onde est mise à profit pour mesurer une grandeur physique modifiant la longueur d'onde de Bragg par action sur l'indice effectif de réfraction et/ou la périodicité des fluctuations d'indice. Ces deux paramètres dépendent de la température, de l'allongement (ou du raccourcissement) et de la pression subies par la fibre optique. Selon la grandeur physique à mesurer, un conditionnement adéquat est apporté à la fibre optique. Les capteurs à fibre optique à réseau de Bragg peuvent être interrogés en transmission ou en réflexion. Cette dernière sera en général préférée car les signaux sont plus facilement identifiables (un pic par réseau de Bragg).

Le réseau de Bragg étant accordé à une longueur d'onde particulière, l'inscription d'une série de réseaux (1,…,N) sur une même fibre optique présentant des accords en longueurs d'onde différents (λ_{B1},…,λ_{BN}) est possible (cf. Figure 1.13). Cela permet alors d'effectuer une série de mesures en plusieurs points du guide optique qui peuvent être multiplexés et démultiplexés aisément de par leur signature spécifique [KERSEY, 1995] suivant des procédures de multiplexage particulières (cf. 1.1.8).

Une étude récente [OLE, July 2000] présente l'intérêt croissant porté aux réseaux de Bragg dans le monde, que ce soit pour leur utilisation en télécommunication [PUREUR et BRILLAUD, 2000] (ex. : filtre, miroir), mais aussi dans la métrologie. Cependant, l'application de ce type d'instrumentation à la surveillance d'ouvrages de Génie Civil est très récente, même si depuis plusieurs années il est fait état des possibilités des réseaux de Bragg dans ce domaine précis comme par exemple dans [FERDINAND, 1993] ou [DUNPHY et al., 1995].

Quelques exemples d'application à des ouvrages de Génie Civil de ce type de capteur pour la mesure de déformation sont présentés ci-après suivant le type d'ouvrage instrumenté.

Ouvrages souterrains

Dans le cadre du projet européen BRITE-EURAM STABILOS (*STABILity control with Optical fiber Sensing technology*), un procédé à base de capteurs à fibre optique à réseau de Bragg, dédié à la surveillance de la stabilité des mines souterraines, a été mis au point [FERDINAND et al., 1994].

Ouvrages de production d'électricité

Un multicapteur distribué à réseau de Bragg, destiné à être noyé au sein du béton d'un barrage à Luzzone en Suisse, a été mis au point et testé en laboratoire [NELLEN et al., 1997]. Un certain nombre de travaux ont été menés à travers le monde ces dernières années afin d'étudier l'impact potentiel de l'utilisation de ce type de capteur dans des centrales nucléaires, notamment en Europe [FERDINAND et al., 1998], mais aussi en Amérique du Nord [MILLER et al., 1999].

Ouvrages d'art

Les ponts sont les ouvrages de Génie Civil pour lesquels les applications sur site sont les plus nombreuses à travers le monde. Par exemple, le pont à haubans à Winterthur en Suisse [NELLEN et al., 1997], ou le pont Las Cruces au Nouveau Mexique aux USA [DAVIS et KERSEY, 1997], sont instrumentés de multicapteurs distribués à réseau de Bragg.

Un programme de collaboration entre chercheurs et nombreux partenaires (12 Universités et une multitude d'organismes et de Sociétés) unique en son genre, portant sur les innovations en structures avec systèmes de détection intégrés, a débuté en 1995 au Canada : *ISIS Canada* (*Intelligent Sensing for Innovative Structures*). Les activités de recherches sont regroupées selon différents thèmes principaux dont un porte sur les capteurs à fibre optique de manière générale et principalement les capteurs à réseau de Bragg, qui ont une large place dans ces études[1]. Différents ponts ont été instrumentés par des capteurs à fibre optique à réseau de Bragg dans le cadre de ce programme dont notamment le pont de la Confédération de l'île du Prince Edward, le pont Taylor à Headingley à Manitoba, le pont de la rue Leslie à Toronto en Ontario [MAASKANT et al., 1997] et le pont de Beddington à Calgary en Alberta [MEASURES et al., 1994].

[1] Une technique brevetée a été mise au point pour recouvrer un câble de fibres optiques qui est enchâssé dans des pièces en matériaux composites fabriquées par pultrusion continue. Cette technique garantit que le procédé automatisé de fabrication n'est pas perturbé et que tout peut se faire facilement et à coût abordable (exemples de pièces en composite bénéficiant de ce brevet : barres d'armature en composite, câbles de précontrainte, antennes, boulons d'ancrage, poutres et poteaux). Une autre technique, permettant d'enrober de matériaux composites des capteurs à fibre optique, a été brevetée. Cela permet d'obtenir une pièce en forme de barre comportant un capteur à fibre optique à cœur et que l'on peut intégrer à son tour dans des structures, en métal, en matériaux composites ou en béton. Les deux technologies ont été mises au point au cours de projets de recherche d'ISIS Canada qui ont été menés au Centre des matériaux intelligents du Département de Génie Mécanique de l'Université de Dalhousie.

1.3 Cadre et objectifs de l'étude

Généralement, les ouvrages de Génie Civil sont construits pour supporter ou transmettre des charges. Le terme de charge désigne couramment tout ce qui est susceptible d'agir sur une construction (ex. : charge de poids propre, charge de trafic, descente de charges). Les forces, et/ou couples qui résultent de l'application d'une charge ou d'une déformation imposée, sont désignés par le terme de ***sollicitations*** ou ***actions***, et peuvent être classées de la manière suivante [PRAT et al., 1997] :

- *actions permanentes* ou *quasi-permanentes* dues par exemple à la pesanteur, au retrait, au fluage, ou à la précontrainte ;
- *actions variables* dues par exemple au trafic routier, au vent, à la neige ou aux variations climatiques de température et d'humidité ;
- *actions accidentelles* regroupant un certain nombre d'actions dites *actions provoquées*, dues par exemple à des chocs ou à des explosions, ou actions naturelles, dues par exemple aux séismes, aux mouvements des eaux ou à des réactions chimiques.

Parmi les fonctions que se doit de remplir un ouvrage de Génie Civil, la résistance mécanique de l'ensemble des matériaux le constituant vis-à-vis des différents types d'actions qu'ils doivent subir, est l'une des principales. Cette résistance mécanique est représentée par l'état des contraintes développé au sein des matériaux de l'ouvrage, qui doit respecter l'état des contraintes admissibles pris comme hypothèse dès la conception de l'ouvrage et fixé par les règlements [PRAT et al., 1997].

Dans la pratique, le suivi de l'évolution de l'état de contraintes d'un matériau est couramment réalisé à l'aide de techniques extensométriques par le suivi de l'évolution de l'état des déformations qui lui est associé. Dans la démarche générale, les déformations mesurées par des capteurs de type extensométriques sont raccordées à celles régnant dans le milieu de mesure puis aux contraintes associées, une hypothèse non négligeable étant alors émise : les propriétés mécaniques du milieu de mesure au sein de l'ouvrage sont identiques à celles de ce milieu mais sans inclusion.

Cette démarche suppose que les capteurs extensométriques ne modifient pas le comportement dudit milieu. En considérant les dimensions de l'ouvrage par rapport à celles des capteurs, ceux-ci n'influencent pas le comportement global de cet ouvrage. Toutefois, les capteurs perturbent localement les champs de contraintes et de déformations du milieu de mesure. De plus, pour des capteurs à fibre optique où l'élément de mesurage est la fibre optique dont les dimensions transverses sont très faibles comparées à celles du milieu de mesure (quelques centaines de µm), les facteurs influençant la mesure ne paraissent pas a priori négligeables. La principale source d'influence du mesurage de déformation de ce type de capteur provient du conditionnement même de la fibre optique.

Des études sur les perturbations du champ de contraintes au sein d'un milieu de mesure en béton occasionnées par l'inclusion d'extensomètres à corde vibrante, ont déjà été réalisées, d'un point de vue expérimental [LEVALLOIS et al., 1994] et théorique [MAHUT et TIVERON, 1998] (essentiellement numérique). Ces études sont néanmoins peu nombreuses. Pour ce qui concerne les capteurs à fibre optique, aucune étude n'a été recensée dans l'ensemble des documents compulsés (cf. Références bibliographiques).

La présente étude porte sur la connaissance de l'influence de l'interface *béton / fibre optique* dans le mesurage de la déformation réalisé par capteurs à fibre optique noyés ou fixés en surface d'ouvrages de Génie Civil en béton. Le chapitre suivant est consacré à une analyse

générale de ce problème, définissant le périmètre et les hypothèses de l'étude, et identifiant les principaux facteurs d'influence qui sont prépondérants dans la mesure de déformation du béton par capteurs à fibre optique.

Chapitre 2

Analyse générale des facteurs influençant le mesurage de déformation du béton

L'évaluation de l'état de résistance mécanique du béton d'ouvrages de Génie Civil est en pratique réalisée par la détermination de l'état de contraintes du matériau par des capteurs dits *extensométriques*. Ces capteurs permettent le mesurage de déformation qui sont reliées, suivant certaines hypothèses, aux contraintes qui leur sont associées. Soumis à différents *phénomènes d'environnement*, ce mesurage est influencé par le comportement du milieu de mesure mais également par le comportement induit par le capteur lui-même. Le fournisseur du capteur donne des caractéristiques contractuelles, il s'engage rarement sur la relation naturelle entre ce capteur et le milieu de mesure, qu'il n'est pas censé maîtriser. Les capteurs à fibre optique considérés dans la présente étude sont sensibles à certains facteurs d'influence qu'il convient d'identifier afin de pouvoir déterminer la part réelle due au capteur et celle due au béton dans le mesurage de déformation.

Complétant le cadre de l'étude exposé précédemment (cf. 1.3), le présent chapitre propose une première analyse du problème, amenant à préciser davantage le périmètre de l'étude et les hypothèses de travail. Une première partie est consacrée à l'extensométrie du béton en particularisant au milieu de mesure et aux capteurs à fibre optique considérés dans la présente étude. Une deuxième partie présente une analyse générale des facteurs d'influence prépondérants dans le mesurage de déformation du béton d'ouvrages de Génie Civil considérés. Le type de milieu de mesure et les capteurs étudiés sont alors précisés plus en détails. En accord avec les moyens disponibles et le cadre de l'étude, ces facteurs d'influence font l'objet des études théorique et expérimentale qui sont présentées respectivement dans les chapitres 3 et 4. L'analyse de ces facteurs, adoptée et présentée dans ces deux chapitres, est exposée dans la troisième partie qui récapitule les différentes hypothèses énoncées dans l'ensemble du présent chapitre.

2.1 Mesurage de l'état de résistance mécanique du béton

2.1.1 Principe de l'extensométrie

D'après [LE GOËR et AVRIL,1992], l'extensométrie est l'ensemble des techniques permettant la mesure des contraintes d'un corps. En tout point matériel d'un milieu continu, les *contraintes* procèdent des efforts internes de cohésion de la matière, résultant de la superposition des *contraintes propres*[1] et des *contraintes de charge*[2]. Les cas où ces contraintes sont mesurables autrement que par l'intermédiaire des *déformations*[3] qui leur sont associées ne sont pas courants. La règle générale de l'extensométrie est de mesurer les déformations et de remonter aux contraintes par des relations fondamentales de comportement qui sont nommées *lois de comportement*. Ces relations liant le *tenseur des contraintes* σ au *tenseur des déformations* ε signifient que le milieu, avec sa cohésion propre ou sa capacité de déformation propre, s'oppose d'une certaine manière aux diverses actions auxquelles il est soumis. La complexité du comportement des matériaux a amené les spécialistes à distinguer quelques grandes classes de comportement telles que l'élasticité, la viscosité, la plasticité et leurs combinaisons (cf. Figure 2.1).

[1] *Contraintes propres* : *Contraintes existant dans un corps non sollicité dues à des inégalités d'allongement ou d'accourcissement d'origine mécanique, thermique ou chimique, dont on distingue les contraintes propres initiales, existant au moment où le corps est pris en considération, et les contraintes propres résiduelles, qui subsistent après traitement mécanique, thermique ou chimique*. [NF X 10-001, 1958]

[2] *Contraintes de charge* : *Contraintes dues à l'action de forces et de couples extérieurs*. [NF X 10-001, 1958]

[3] La notion de déformation est purement géométrique, elle exprime la modification, ou changement de forme du milieu soumis à différents types d'actions [FLEURY et MATHIEU, 1959].

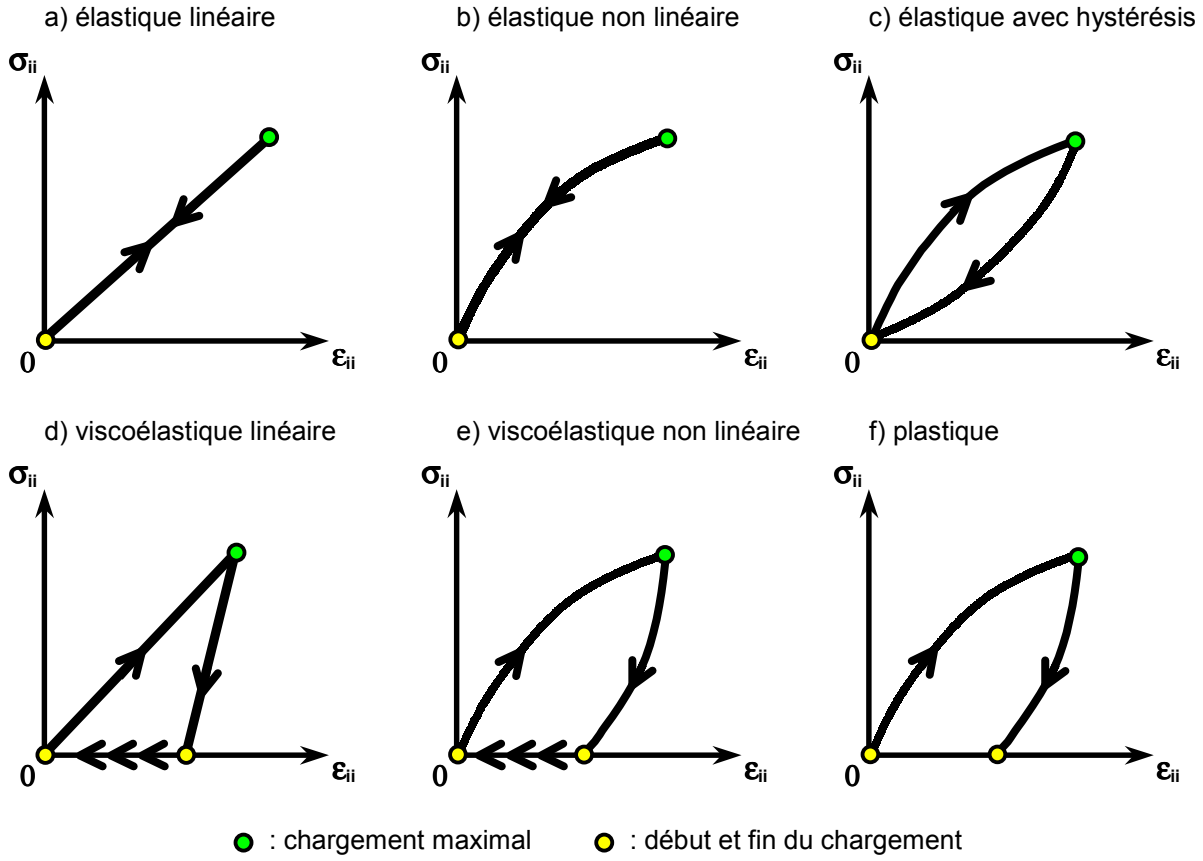


Figure 2.1 Exemples de comportements des solides

Les relations fondamentales de la théorie de l'élasticité sont à la base de l'extensométrie et plus particulièrement les relations de Hooke [TIMOSHENKO et GOODIER, 1970] qui définissent le tenseur des contraintes à partir du tenseur des déformations par :

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \cdot \left[\frac{\nu}{1-\nu} \cdot \delta_{ij} \cdot \mathrm{tr}(\varepsilon) + \varepsilon_{ij} \right]$$

avec :

- σ_{ij} et ε_{ij} : composantes du tenseur des contraintes et du tenseur des déformations
- E : module d'élasticité longitudinale (nommé aussi module d'Young)
- ν : coefficient de Poisson
- δ_{ij} : symbole de Krönecker
- $\mathrm{tr}(\varepsilon)$: trace du tenseur des déformations

Ces relations biunivoques entre contraintes et déformations sont applicables à tout milieu, ***continu***, ***homogène*** et ***isotrope***, de comportement ***élastique linéaire*** en considérant les ***déformations infiniment petites***[1]. L'utilisation d'un capteur de type extensométrique implique donc que le milieu de mesure, mais également les différents matériaux constituant le capteur, vérifient les conditions précédentes.

[1] En mécanique des solides, l'*hypothèse des déformations infiniment petites* implique qu'un solide est supposé s'écarter peu de sa configuration de référence : *Une déformation infiniment petite transforme une sphère de rayon infiniment petit entourant un point matériel, en un ellipsoïde infiniment petit*. [NF X 10-011, 1958]

2.1.2 Milieu de mesure considéré

La présente étude se voulant globale et axée autour de l'instrumentation par capteurs à fibre optique de certains types d'ouvrages en béton de Génie Civil (cf. 1.3), il est important de particulariser plus en détails le milieu de mesure considéré.

2.1.2.1 Type de béton

Les capteurs à fibre optique de type extensométrique considérés, sont destinés au mesurage de déformation du béton, dont sont majoritairement constitués les ouvrages ciblés. Le terme *béton* des ouvrages peut désigner en réalité, du béton non armé, du béton armé, du béton précontraint ou d'autres types de bétons (ex. : béton de fibres métalliques, béton de poudres réactives *BPR* [RICHARD et CHEYREZY, 1995]). Pour les ouvrages considérés il s'agit principalement de béton armé et de béton précontraint. Ces différents bétons sont particulièrement complexes et évolutifs. Ils subissent de profondes transformations physico-chimiques et structurales dans les instants qui suivent leur préparation (ex. : réactions d'hydratation des constituants du béton conduisant aux processus de *prise* et de *durcissement*) et ces transformations se poursuivent tout au long de leur vie, avec toutefois une cinétique décroissante au cours du temps (il est alors question de *vieillissement* ou de *maturation* des matériaux) [BAROGHEL-BOUNY, 1994].

Le béton choisi est un béton classique, utilisé couramment dans certains des ouvrages considérés (ex. : ponts). C'est un ***béton*** dit ***ordinaire*** *BO*, avec une résistance en compression R_c qui est de l'ordre de 40 MPa à 28 jours. La présente étude, essentiellement mécanique et s'inscrivant dans le cadre de l'extensométrie, peut néanmoins s'appliquer à d'autres bétons ayant des résistances mécaniques plus ou moins grandes (ex. : 80 MPa pour un béton à hautes performances). Le comportement du béton au jeune âge étant complexe [LAPLANTE, 1993], et le principal besoin de l'instrumentation à fibre optique considérée étant dans le long terme, le béton étudié est un ***béton mature*** (âge du béton supérieur à 28 jours). Le mesurage des déformations du béton pendant les premières heures de sa vie n'implique pas les mêmes difficultés que pour un béton durci [BOULAY et PATIES, 1993].

2.1.2.2 Structures en béton

En toute rigueur, les matériaux réels sont toujours discontinus, hétérogènes et anisotrope, à une ou plusieurs échelles d'observation comprises entre celle de l'observation macroscopique et celle des atomes (ex. : matériaux granulaires, poreux ou polycristallins). Du fait de leur rôle, les lois de comportement doivent refléter et subir les conséquences de ces discontinuités et de ces hétérogénéités. Ceci est en totale opposition avec la notion même de continuité du milieu sur laquelle se trouvent fondées, non seulement la définition de ces lois, mais également les notions de contraintes et de déformations [BOUCHER, 1987]. L'hypothèse d'équivalence faite entre un matériau et un milieu continu est donc d'une utilité irremplaçable dans l'étude des problèmes courants, principalement par l'économie des moyens intellectuels qu'elle permet de réaliser. A l'échelle macroscopique, les matériaux usuels sont suffisamment continus, homogènes et isotropes. Des réserves sont cependant parfois nécessaires pour certains matériaux que ce soit pour l'homogénéité (ex. : composites comme les plastiques) ou que ce soit pour l'isotropie (ex. : métaux en feuilles laminées présentant une texture cristallographique). C'est le cas du béton du fait de sa composition [NF P 18-325, 1991] (cf. Figure 2.2) et des différents types de béton existants. Si un certain degré d'homogénéité ainsi que d'isotropie peut être attribué aux liants hydrauliques, il est plus difficile de l'affirmer pour les

granulats[1], disposés au sein du béton de façon aléatoire avec une répartition plus ou moins orientée par les méthodologies de mise en œuvre. En ce qui concerne le béton armé, les armatures rendent le matériau plus hétérogène et anisotrope. Pour le béton précontraint, la force de précontrainte est assimilée à des forces extérieures au béton, mais la précontrainte impose une disposition d'armatures encore plus particulière au sein du béton armé.

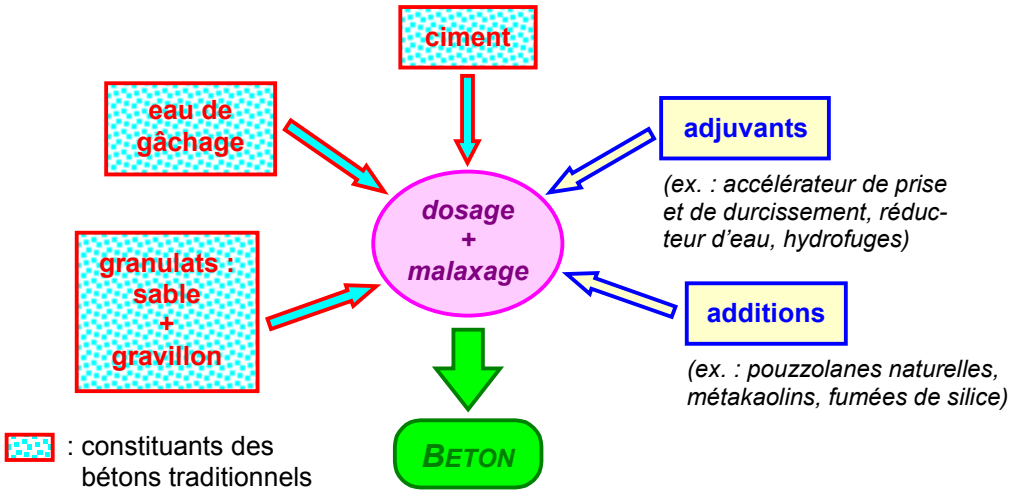


Figure 2.2 Composition du béton

Les structures en béton étudiées sont des ***éprouvettes cylindriques normalisées*** [NF P 18-400, 1981]. Ces structures simples permettent un contrôle plus facile des actions qui leur sont appliquées et sont plus aisées de mise en œuvre au contraire des ouvrages réels massifs. De plus, les contraintes expérimentales de la présente étude ont imposé l'utilisation de telles structures. D'après la norme NF P 18-400 (1981) ces éprouvettes cylindriques ont ***au moins*** une hauteur égale à deux fois leur diamètre, elles sont dites ***d'élancement deux***. Cela permet d'obtenir un état de compression simple (si l'éprouvette est sollicitée en compression suivant son axe) au centre de l'éprouvette, non entaché par les effets de bords dus essentiellement aux contacts aux appuis. A l'échelle des éprouvettes normalisées prises en compte dans la présente étude, le béton peut être considéré comme ***continu***, ***homogène*** et ***isotrope***. Afin de respecter ces hypothèses, le béton des éprouvettes ***ne comporte ni d'armatures ni de précontrainte***. Il convient de ne pas oublier qu'il s'agit d'un milieu équivalent au milieu réel, et qu'en conséquence les grandeurs mécaniques définies sur ce milieu équivalent, n'ont pour le milieu matériel qu'un sens statistique.

2.1.2.3 Comportement et chargement

Lors du durcissement du béton, une opposition à la contraction entraîne automatiquement une fissuration, qui dépend du compromis (suivant la nature du ciment) entre la vitesse du retrait et la vitesse d'accroissement de la résistance à la traction [PRAT et al., 1995]. Alors qu'une structure en béton armé fonctionne normalement à l'état fissuré, la fissuration des structures, ou éléments de structure, en béton précontraint est normalement considérée comme suspecte [BASTET et RIMBŒUF, 1986]. La fissuration du béton est un des facteurs induisant les

[1] *Granulat : Ensemble de grains minéraux de dimensions comprises entre 0 et 80 mm destinés notamment à la confection des mortiers, des bétons, des couches de fondation, de base et de roulement des chaussées, et de voies ferrées.* [NF P 18-101, 1983]

non-linéarités du comportement des bétons. Cependant, sous des sollicitations courantes de courte durée (ex. : charges de service), le béton durci est généralement considéré comme un matériau élastique linéaire [ACKER et al., 1986]. C'est le cas par exemple pour des chargements en compression ne dépassant pas 50 à 60 % de la résistance à la rupture en compression [ADAM et al., 1984]. En traction le comportement est plus linéaire, mais la rupture apparaît plus tôt qu'en compression, les résistances en traction des bétons étant 10 à 15 fois plus faibles que celles en compression.

Afin de rester dans le cadre d'une étude globale considérant plusieurs types de béton, et de respecter l'hypothèse de milieu continu, le béton des éprouvettes est supposé dans un ***état non fissuré*** et ayant un ***comportement élastique linéaire***. Par conséquence, l'étude reste dans les limites élastiques[1] du béton (σ_e : limite élastique en contraintes). Les ***éprouvettes*** sont uniquement ***sollicitées en compression*** suivant leur axe, avec des valeurs maximums de 60 % de la résistance à la rupture en compression. Les dispositifs de traction courants [NF P 18-409, 1969] étant sources de mises en œuvre complexes et n'étant pas forcément compatibles avec les moyens d'essais utilisés, le chargement en traction des éprouvettes n'a pas été envisagé. De plus des chargements en compression permettent d'avoir une plus grande plage de déformations en élasticité linéaire. Seuls les ***chargements en statique*** sont pris en compte, les problèmes de mécanique dynamique des ouvrages de Génie Civil considérés ne sont pas étudiés. Le béton étant supposé non fissuré et de comportement élastique linéaire, l'hypothèse des ***déformations infiniment petites*** peut alors être faite.

2.1.3 Capteurs à fibre optique considérés

2.1.3.1 Hypothèses de l'extensométrie

Les capteurs à fibre optique considérés sont des capteurs de type extensométrique. Ils sont donc conçus dans le respect des hypothèses liées à l'extensométrie (cf. 2.1.1).

A l'échelle macroscopique, les différents matériaux constituant les capteurs peuvent être considérés ***continus***, ***homogènes*** et ***isotropes***. Cependant la mesure est portée par la fibre optique de taille micrométrique. A l'échelle des granulats du béton, les variations des déformations le long de la fibre optique sont importantes (cf. Figure 2.3). Ces variations sont principalement dues au poinçonnement des granulats sur le conditionnement de la fibre optique. C'est pourquoi ce conditionnement est en général composé de matériaux se déformant peu sous l'effet du poinçonnement de ces granulats (ex. : acier). Les dimensions des capteurs doivent également respecter certaines limites (cf. 2.2.4.2), afin que les hypothèses de continuité, d'homogénéité et d'isotropie puissent être valables pour les matériaux des capteurs.

Une des principales caractéristiques métrologiques que doit posséder un capteur quel qu'il soit, et donc plus particulièrement un extensomètre, est la *répétabilité* des résultats de mesurage [NF X 07-001, 1994]. Celle-ci implique que les différents matériaux en présence au sein du capteur aient un ***comportement réversible***. Par ailleurs, dans l'extensométrie, la ***linéarité*** des capteurs est recherchée : le concepteur du capteur définit un domaine de mesures pour que le tenseur des déformations soit alors proportionnel au tenseur des contraintes au cours du mesurage. Il en résulte une plus grande simplicité dans le traitement du signal permettant

[1] L'étendue du domaine des déformations élastiques est très différente d'un matériau à un autre : pour de l'invar, la limite d'élasticité est atteinte pour des déformations de l'ordre de 0,2 % tandis que, pour du caoutchouc courant, elle est atteinte pour des déformations de l'ordre de 400 %.

d'accéder à la valeur de la variation du mesurande. L'intérêt de la linéarité est tel que lorsque le capteur n'est pas linéaire, il est inclut dans la chaîne de mesure des dispositifs de correction, dits de *linéarisation*, dont le rôle est de rendre le signal proportionnel aux variations du mesurande [ASCH et al., 1987]. Tout ceci implique de rester dans le ***domaine élastique*** de l'ensemble des matériaux des capteurs à fibre optique considérés, en supposant qu'ils aient un ***comportement linéaire***.

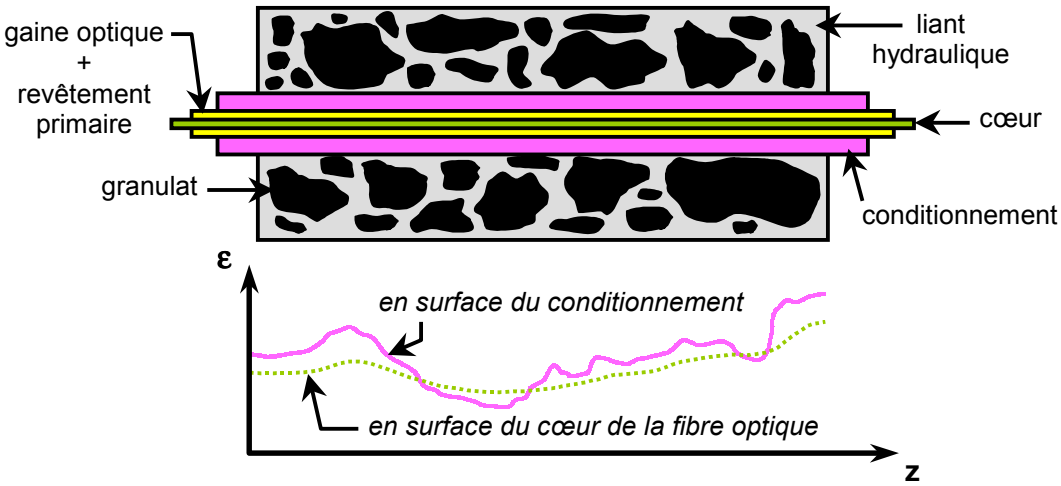


Figure 2.3 Influence des granulats sur les variations longitudinales des déformations pour un capteur à fibre optique noyé dans du béton

Les capteurs à fibre optique peuvent offrir une étendue de mesure très large, permettant de détecter l'apparition d'une fissuration. En effet, en fonction de leur conception, certains capteurs ont une étendue de mesure allant jusqu'à 10000 $\mu m.m^{-1}$, le béton pouvant rester théoriquement dans un état de non fissuration pour une déformation ne dépassant pas environ 1000 $\mu m.m^{-1}$. Cependant, l'interprétation de telles mesures reste une science à développer. Afin de rester dans l'état non fissuré du béton, les capteurs à fibre optique considérés ne sont pas sollicités au-delà de la limite élastique dudit béton. L'hypothèse des ***déformations infiniment petites*** pour l'ensemble des matériaux constituant ces capteurs peut alors être faite.

2.1.3.2 Type et structure des capteurs

Deux types d'ouvrages sont considérés dans la présente étude : les ouvrages existants et les ouvrages neufs ou plus précisément, en cours de construction. Les premiers étant les plus nombreux, de moins en moins d'ouvrages de Génie Civil sont construits de nos jours (ex. : enceintes de confinement), la tendance actuelle étant à la maintenance des divers ouvrages existants. En théorie il est pertinent de positionner le capteur de déformation à l'endroit exact dans le volume de l'ouvrage où l'exploitant désire connaître l'état de déformation. Ceci reste réalisable pour les ouvrages neufs au sein desquels il est possible pendant la construction d'y inclure des capteurs. Cependant, pour la plupart des ouvrages déjà construits, pour lesquels l'installation de capteurs dans le volume n'est pas possible (ex. : problèmes de mise en œuvre) ou correct (ex. : problème d'effacement de la contrainte par forage), l'exploitant a recours à des capteurs fixés en paroi externe. Le but final reste néanmoins le même : connaître l'état de la résistance mécanique du matériau, donc les états de déformation et de contrainte, dans le volume de l'ouvrage. C'est pourquoi deux types de ***capteurs à fibre optique*** sont considérés

dans la présente étude : ***noyés au sein*** et ***fixés en surface du béton*** d'ouvrages (cf. Figure 2.4). Dans la suite du mémoire, les premiers sont nommés ***capteur en volume*** et les seconds ***capteur en surface***. Il est aussi question de manière plus général du ***cas*** ou de l'***essai***, ou tout autre terme, ***en volume*** ou ***en surface***.

Les capteurs à fibre optique considérés sont constitués de différents éléments comme cela a été défini au chapitre précédent (cf. 1.1.5). La fibre optique est une fibre ***cylindrique standard*** de télécommunications, avec un cœur et une gaine optique en ***silice***, et un revêtement primaire en ***polyimide***. Les propriétés mécaniques des matériaux de la fibre optique sont invariantes pour l'ensemble de l'étude, ainsi que leurs dimensions :

- Diamètre extérieur de l'ensemble *cœur + gaine optique* : 125 µm ;
- Diamètre extérieur du revêtement primaire : 150 µm (épaisseur de 12,5 µm).

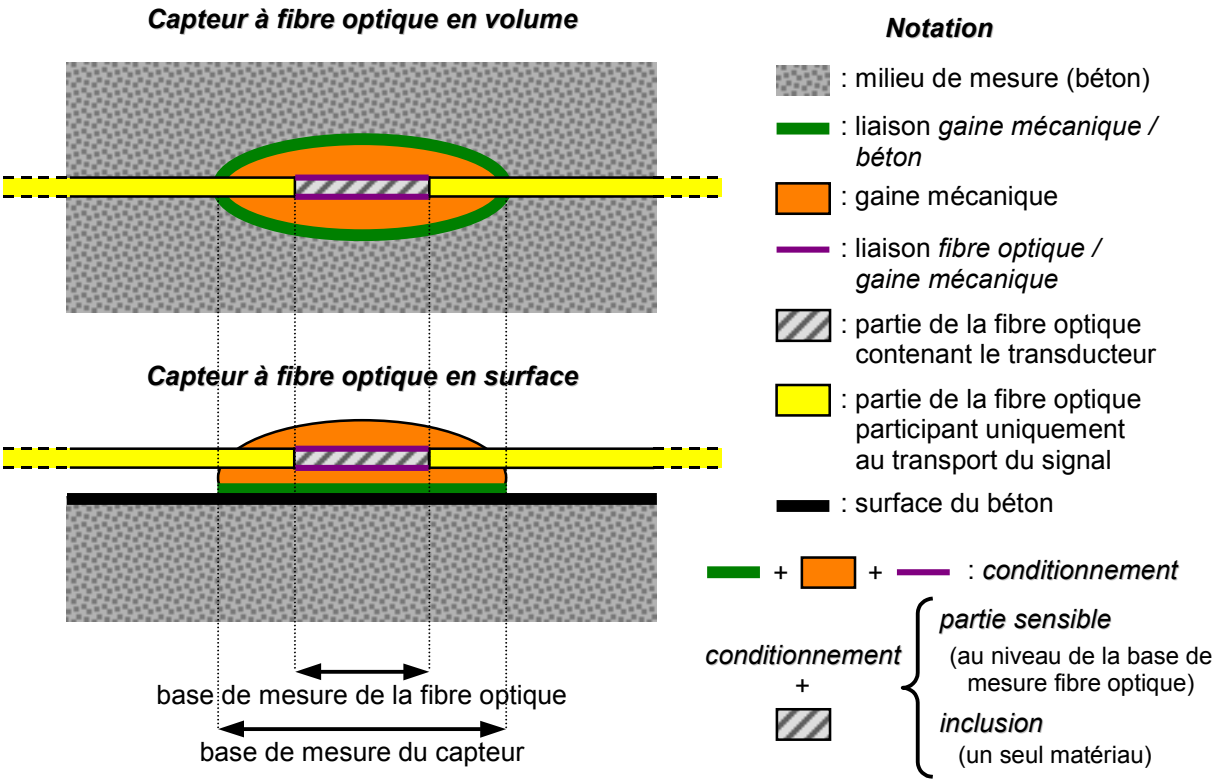


Figure 2.4 Schémas des capteurs à fibre optique considérés

La fibre optique est constituée d'une longueur finie qui participe au mesurage et qui contient le transducteur optique, le reste ne participant qu'au transport du signal. Il est supposé dans la présente étude que la ***mesure de déformation reflète*** réellement la ***déformation du corps de la fibre optique***. Pour le transducteur proprement dit, et aussi pour les systèmes d'interrogation et d'acquisition associés, le retour d'expériences aujourd'hui est conséquent grâce aux divers travaux d'équipes spécialisées sur ce sujet depuis plusieurs années. Pour la liaison entre la fibre optique et la gaine mécanique, en dehors du collage, d'autres techniques d'assemblage existent, comme la fusion ou le pincement, et sont parfois combinées (ex. : fusion et collage [QUIRION, 1999]). Seul le ***collage*** est considéré dans la présente étude (cf. 2.2.2.2). La gaine mécanique, composée d'***un seul matériau***, a une ***géométrie cylindrique*** pour l'ensemble de l'étude avec cependant quelques variantes (cf. 3.1.2). Des pièces mécaniques sont adjointes à

cette gaine mécanique ou en font parties (changement de géométrie du corps), afin de l'ancrer le plus solidairement possible au milieu de mesure, pour l'optimisation du mesurage. Le terme générique d'***ancrages*** désigne dans la présente étude l'ensemble des dispositifs mécaniques permettant une liaison optimale entre le béton et la gaine mécanique.

A l'échelle de la mesure considérée, l'information qui est délivrée par le capteur peut être considérée comme ponctuelle, mais en toute rigueur elle ne l'est pas. Un capteur, quelle que soit la petitesse de ses dimensions, occupe un volume ou recouvre une surface. C'est dans cet élément volumique ou surfacique que le capteur opère une moyenne, incapable qu'il est de discriminer toutes les valeurs de comportement du phénomène dans cet espace. Les capteurs à fibre optique de type extensométriques considérés intègrent les déformations du béton sur une longueur finie, dite ***base de mesure***, et notée dans la présente étude L_{bm}. La base de mesure du capteur peut-être différente de la base de mesure du transducteur optique, qui est en générale plus petite que la première. En première approximation, afin de faciliter les analyses qui sont présentées dans la suite du mémoire, l'hypothèse d'égalité entre les longueurs de ces bases de mesure est faite :

$$L_{bm}\,(capteur) = L_{bm}\,(fibre\ optique) = L_{bm}$$

Par souci de simplification, l'ensemble constitué par, la partie de la fibre optique qui participe au mesurage (sur toute la longueur de sa base de mesure), la colle de liaison et la gaine mécanique, est nommé dans la suite du mémoire ***partie sensible*** du capteur. De même, l'élément ayant pour géométrie celle de l'enveloppe extérieure de l'ensemble du capteur et composé par un seul matériau est nommé ***inclusion***, les propriétés mécaniques de ce matériau étant représentatives de celles de l'assemblage des matériaux constituants le capteur. Il sera question également d'***inclusion en volume*** et d'***inclusion en surface***.

2.1.3.3 Type de mesure

Les capteurs de type extensométrique réalisent des mesures de déformation dans une direction donnée, celle de la base de mesure du capteur. Or, il a été vu (cf. 2.1.1) que le but assigné à l'extensométrie est de déterminer l'état de contraintes tridimensionnel dans son intégralité en chacun des points étudiés d'une structure. Cela implique la détermination des contraintes principales[1] en ces points, à la fois en direction et en grandeur. En pratique, ce résultat est obtenu à partir de mesures de déformation réalisées suivant trois bases de mesure distinctes, dans trois directions distinctes, centrées sur le point considéré.

Les capteurs à fibre optique offrent des potentialités intéressantes pour la mesure de l'état de déformation tridimensionnel, du fait entre autres, de la petitesse de la fibre optique mais aussi, de pouvoir facilement réaliser des multicapteurs (cf. 1.1.8), notamment sur une même fibre [MAGNE et al., 1997]. Des travaux ont été menés sur les multicapteurs à fibre optique, visant par exemple l'instrumentation de matériaux composites [FERDINAND et al., 1999], ou bien l'instrumentation de matériaux plus classiques (ex. : acier, aluminium) [FROGGAT et MOORE, 1998]. L'application des multicapteurs à l'instrumentation d'ouvrages de Génie Civil en béton est très récente. Peu d'essais en laboratoire ont été réalisés mais par contre, plusieurs campagnes expérimentales sur site, essentiellement des ponts et souvent sur

[1] Pour un tenseur des contraintes connu en un point matériel d'un milieu continu, il est toujours possible de trouver un nouveau repère dans lequel les contraintes de cisaillement sont nulles. Ce repère est appelé *repère des axes principaux*, ou *directions principales*, et les contraintes exprimées dans ce repère *les contraintes principales*. Cette définition s'applique aussi au tenseur des déformations en ce point. On parle alors de *déformations principales*. Pour un milieu continu, homogène et isotrope, les directions principales des contraintes et celles des déformations coïncident [NF X 10-011, 1958].

des prototypes, ont été entreprises depuis ces cinq dernières années (cf. 1.2.3). Pour ce qui est des multicapteurs avec une fibre optique continûment sensible (mesures réparties) aux déformations au sein ou en surface d'ouvrages de Génie Civil, le retour d'expériences est encore faible et les publications sur les résultats expérimentaux sont peu nombreuses. La présente étude se limite donc à des ***capteurs ponctuels à fibre optique industrialisés***, se restreignant au cadre d'un ***mesurage unidirectionnel*** suivant l'axe de la base de mesure du capteur.

2.2 Identification des facteurs d'influence prépondérants

2.2.1 Agents d'environnement et grandeurs (ou facteurs) d'influence

Le béton des ouvrages de Génie Civil est sensible à l'environnement qui l'entoure. Des phénomènes naturels ou provoqués par l'être humain peuvent modifier son état mécanique. En effet, comme tous les solides poreux, le matériau béton se déforme dès qu'il est soumis aux types d'actions suivantes [PRAT et al., 1997] :

- *Actions mécaniques :*
  Ce sont des forces extérieures, ponctuelles ou réparties, appliquées en surface ou en volume (ex. : poids propre), ou des déplacements imposés par les conditions aux limites (ex. : tassements d'appui, dilatations et retraits des piles de ponts).
- *Actions hydriques :*
  Elles peuvent être dues :
  - à des variations de l'humidité extérieure, qu'elles soient d'origine naturelle (ex. : climat), ou d'origine industrielle (ex. : décoffrage, traitement thermique) ;
  - à des apports d'eau (ex. : pluie, cure) ;
  - à des variations de l'hygrométrie interne (ex. : phénomène d'autodessiccation dû à l'hydratation du ciment).
- *Actions thermiques :*
  Elles sont dues :
  - aux variations de température de surface, qu'elles soient d'origine naturelle (ex. : climat), ou d'origine industrielle (ex. : étuvage utilisé pour accélérer le durcissement du matériau) ;
  - à la chaleur produite dans la masse du béton par l'hydratation du ciment.

Le capteur, soumis à ces mêmes *phénomènes d'environnement* à des degrés variables, apporte sa part de perturbations sur le mesurage. D'après [MOREAU et al., 1982], les phénomènes physico-chimiques caractérisant l'environnement dans lequel un échantillon est testé, telle qu'une éprouvette en béton, sont nommés *agents d'environnement*, alors que ceux qui caractérisent l'environnement dans lequel le capteur effectue sa mesure sont des *grandeurs d'influence*[1]. Pour ces derniers, il est employé dans la suite du mémoire la dénomination plus générale de ***facteurs d'influence***. Il convient alors de bien distinguer le comportement propre du béton soumis à ces phénomènes, et le comportement induit par ces mêmes phénomènes sur le capteur :

- Le comportement propre du béton est une conséquence de toutes les actions physico-chimiques s'exerçant sur lui, quelque soit la nature de ces actions. L'état de résis-

[1] *Grandeur d'influence* : *Grandeur qui n'est pas le mesurande mais qui a un effet sur le résultat du mesurage*. [NF X 07-001, 1994]

tance mécanique du béton qui en résulte est l'état réel recherché à travers les mesures extensométriques.

* Par contre, ces diverses actions s'exerçant sur le capteur contribuent à perturber la connaissance de l'état réel du béton. La part de comportement induite par la présence du capteur est à maîtriser, voir à inhiber.

En dehors des actions mécaniques, hydriques et thermiques, d'autres sources de perturbations existent comme notamment la longueur de la base de mesure du capteur ou les types de fixations et d'ancrages au milieu de mesure. Dans ce contexte, les principaux facteurs d'influence sur le mesurage sont identifiés dans la suite de ce chapitre, principalement à partir de la littérature, et analysés plus en détails pour certains d'entre eux dans les chapitres suivants.

Les perturbations engendrées sur le mesurage d'actions plus particulières, dites *accidentelles* (cf. 1.3), tels que les rayonnements nucléaires, ne sont pas étudiées. Les effets de ces actions sont néanmoins très néfastes, pouvant entraîner dans certains cas la perte d'une partie des propriétés mécaniques des matériaux du capteur (ex. : rayonnement gamma). Leur prise en considération dépasse le cadre de la présente étude et implique la mise en œuvre de moyens, notamment expérimentaux, spécifiques et lourds ne correspondant pas aux contraintes imposées de la Thèse. Des travaux sont en cours pour essayer de comprendre le comportement *défectueux* de capteurs à fibre optique soumis à des rayonnements nucléaires [MILLER et al., 1999].

2.2.2 Actions mécaniques

Les déformations du béton durci sous chargement mécanique sont généralement classées en deux catégories, suivant la durée d'application du chargement : les *déformations instantanées* (chargement de courte durée) et les *déformations différées* (chargement de longue durée). Le comportement instantané sous chargement en compression a été présenté précédemment (cf. 2.1.2). Le comportement différé est appelé *fluage*, et plus précisément *fluage propre*, qui est dû aux actions mécaniques seules, sans prise en compte notamment des actions hydriques (*fluage de dessiccation*) [LE ROY, 1996]. Le béton soumis à un chargement en compression appliqué sur un intervalle de temps suffisamment long au-delà de 24 heures, présente un comportement viscoélastique vieillissant très marqué, se traduisant par une augmentation de la déformation du béton avec le temps.

2.2.2.1 Influence des caractéristiques mécaniques et des dimensions des différents constituants des capteurs à fibre optique

De même que pour le béton, tous les matériaux constitutifs d'un capteur à fibre optique tel que défini précédemment (cf. 2.1.3), sont sensibles aux chargements induisant des déformations instantanées et différées. L'idéal est que tous ces matériaux se déforment de la même manière que le béton. Cela induit des propriétés mécaniques de ces matériaux identiques à celles du béton, ce qui n'est généralement pas le cas. Dans le cadre des hypothèses de l'extensométrie, la correspondance entre contraintes et déformations ne fait intervenir que deux coefficients [NF X 10-011, 1958]. Dans les relations de Hooke présentées auparavant (cf. 2.1.1), ces deux coefficients sont le ***module d'élasticité longitudinale E*** et le ***coefficient de Poisson ν***. Du fait des hypothèses faites sur le milieu de mesure et sur les éléments constituant les capteurs considérés, pour des actions purement mécaniques, ces deux coefficients

permettent de définir chacun des matériaux en présence. Ces coefficients sont nommés par la suite ***caractéristiques mécaniques*** du matériau considéré.

Soumis à un chargement mécanique, chaque matériau au sein du capteur à fibre optique, avec ses caractéristiques mécaniques propres, se déforme plus ou moins que le matériau auquel il est mécaniquement lié. De plus, chaque matériau peut entraîner ou bloquer les autres en fonction de ses caractéristiques mécaniques. Ces *déformations différentielles* peuvent avoir pour effets de modifier la mesure des déformations réelles du béton sans la présence du capteur et soumis au même chargement (cf. Figure 2.5). De même que les caractéristiques mécaniques, les dimensions des éléments constituant les capteurs sont des facteurs d'influence prépondérants dans le mesurage des déformations. En effet, dans le cadre des hypothèses formulées, les déformations d'un corps sont notamment directement reliées aux dimensions de ce corps qui sont perpendiculaires à la direction de sollicitations (ex. : section de la gaine mécanique cylindrique) [TIMOSHENKO et GOODIER, 1970].

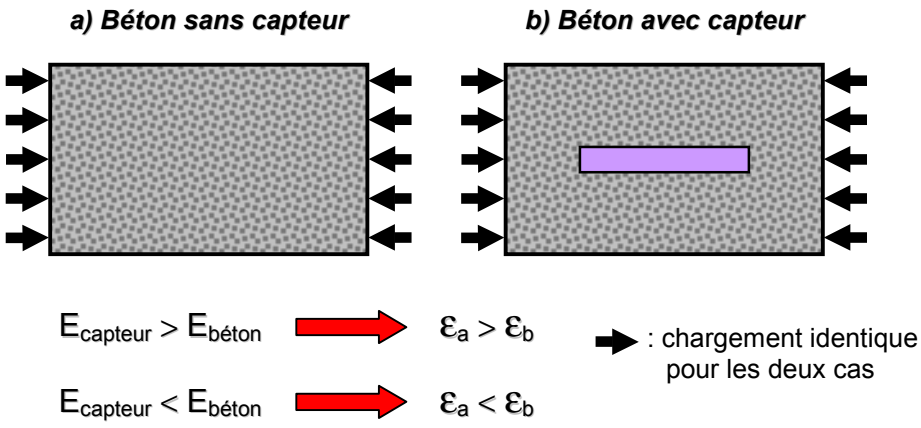


Figure 2.5 Déformations différentielles d'origine mécanique entre capteur et béton

2.2.2.2 Influence des liaisons internes entre les différents constituants des capteurs à fibre optique

Le point délicat d'un assemblage tel que celui des capteurs à fibre optique considérés, est le type de liaison entre chacun des matériaux en présence. Deux principaux niveaux de liaisons peuvent être considérés :

- liaisons internes à la fibre optique ;
- liaison *fibre optique / gaine mécanique*.

Pour les fibres optiques, les procédés actuels de fabrication (cf. 1.1.3) leur confèrent d'excellentes qualités de liaison aux différentes interfaces. La résistance mécanique des fibres optiques a largement été étudiée que ce soit pour des applications pour les télécommunications [JOINDOT et al., 1996] ou pour des applications métrologiques comme par exemple des capteurs de déformation, afin de tester leur fiabilité ainsi que leur durabilité [SENNHAUSER et al., 1997]. La résistance à la traction des fibres optiques peut aller jusqu'à 5 GPa [FERRETTI, 1996]. Les liaisons ne sont pas alors source de perturbations et c'est pourquoi l'hypothèse d'***adhérence parfaite entre***, le ***cœur*** et la ***gaine optique***, et, la ***gaine optique*** et le ***revêtement primaire***, peut être faite.

La liaison *fibre optique / gaine mécanique* pour les capteurs à fibre optique considérés est réalisée par collage comme cela a été précédemment indiqué (cf. 2.1.3). Il existe divers types de colle qui peuvent être classées de la manière suivante [COUVRAT, 1990] :

- Adhésifs ne durcissant pas par réaction chimique tels que les émulsions et solutions, les *colles contact* (ex. : colle *néoprène*), ou les adhésifs thermofusibles.
- Adhésifs durcissant par réaction chimique tels que les époxydes, les adhésifs polyuréthanes (ex. : adhésifs à base d'élastoméres de polyuréthane, mastics polyuréthane monocomposants ou bicomposants), les adhésifs à base acrylique (ex. : cyanoacrylates, anaérobies, acryliques modifiés), ou les adhésifs thermostables (ex. : silicones).

L'assemblage par collage présente des avantages indéniables. En effet, il s'agit d'une méthode universelle à faible coût, n'altérant pas les propriétés des substrats contrairement à certaines techniques d'assemblage (ex : rivetage, boulonnage, soudage), ayant une bonne tenue à la fatigue, permettant l'assemblage des matériaux composites et diminuant les risques de corrosion. Ce type d'assemblage présente de nombreux autres avantages dont certains sont présentés dans [JEANDRAU, 1992] ou dans [SIMON, 1994]. Des inconvénients existent néanmoins dans l'utilisation du collage dans les capteurs à fibre optique, notamment au niveau des procédures de collage (ex. : préparation des surfaces, mise en œuvre, temps de prise). De par le faible diamètre des fibres optiques (en général inférieur à 500 µm), les traitements physiques ou chimiques des surfaces à coller sont difficiles, et l'épaisseur du joint de colle[1] devient très délicat à régler.

Des études théoriques ont conduit à des modèles de comportement d'interface plus ou moins complexes couplant par exemple adhérence et frottement [RAOUS et al., 1997]. Dans le cadre de l'étude, la ***liaison fibre optique / gaine mécanique*** est considérée comme ***parfaitement adhérente***, ***sans frottement***, les techniques de conception des capteurs testés étant supposées fiables et maîtrisées.

La colle est un matériau avec ses propres caractéristiques mécaniques et dimensions comme les autres matériaux en présence dans les capteurs. Dans la présente étude la colle considérée est une ***résine époxyde***, qui fait partie des adhésifs structuraux[2] les plus couramment utilisés, notamment dans les capteurs à fibre optique testés expérimentalement (cf. 4.1.1.1). Ses caractéristiques mécaniques sont fixes.

Les capteurs à fibre optique considérés présente un joint dit ***joint de colle par manchonnage*** [COUVRAT, 1990] (cf. Figure 1.4 a)), sollicité essentiellement en ***cisaillement*** ou en arrachement en référence à l'axe de la mesure extensométrique. Lorsqu'il est complètement durci, un joint de colle en résine époxyde possède des résistances élevées en cisaillement, en traction ainsi qu'en compression [BARDONNET, 1992]. La tenue mécanique du joint est notamment reliée aux modules d'élasticité de la colle [CARON, 1986] et à son épaisseur. Celle-ci est typiquement de l'ordre de 50 à 300 µm pour les résines époxydes [BARDONNET, 1992]. D'après [COUVRAT, 1990], l'épaisseur optimale d'un joint d'un adhésif est de 100 à 200 µm : au-dessus, l'assemblage a des caractéristiques plus faibles, et en dessous, la continuité risque de ne pas être assurée pour certains adhésifs. En général la longueur de recouvrement du joint de colle dans le type de capteurs à fibre optique considérés, est de l'ordre de quelques millimètres, ne faisant pas toute la longueur de la base de mesure du capteur. Tout comme le bé-

[1] *Joint de colle* (ou *d'adhésif*) : *Le joint de colle correspond à l'espace que remplit l'adhésif dans un assemblage ou un produit collé. Selon l'épaisseur du joint de colle et les conditions d'emploi, on distingue des joints minces, demi-épais, épais.* [NF T 76-001, 1981]

[2] *Adhésif structural* : *Adhésif participant à l'intégrité d'une structure et pouvant être sollicité à un taux élevé de sa charge maximale pendant une longue période sans défaillance.* [NF T 76-001, 1981]

ton, soumis à un chargement constant, le joint de colle peut fluer dans le temps [BARDONNET, 1992], il est alors question d'*écoulement visqueux du joint de colle en service* [NF T 76-001, 1981], comportement qu'il convient bien sûr de maîtriser dans le mesurage de déformation.

2.2.2.3 Synthèse

Les facteurs d'influence retenus qui font l'objet des analyses des chapitres suivants sont, les ***caractéristiques mécaniques*** et les ***dimensions*** des ***matériaux constituant les capteurs***, ainsi que le ***comportement à long terme*** (plusieurs mois) des capteurs dans leur milieu de mesure sous chargement mécanique imposé constant dans le temps. Les contraintes expérimentales de l'étude ne permettaient pas de tester sur le long terme les ***capteurs seuls***, ils sont uniquement ***testés à court terme***. De par les hypothèses réalisées et les moyens expérimentaux, l'étude sur l'influence de la liaison par collage sur le mesurage de déformation est limitée. Le marché de la colle étant vaste, une analyse complète amène nécessairement à des expérimentations sur différentes colles hors de portée de l'étude.

2.2.3 Actions hydriques et thermiques

Les effets mécaniques d'origine hydrique ou thermique sont souvent considérables et peuvent être, dans certains ouvrages, largement dominants par rapport aux actions de nature strictement mécanique (ex. : barrages ou massifs de fondation pour les effets thermiques, enceintes de confinement et chaussées en béton pour les effets hydriques et thermiques), tout particulièrement au jeune âge mais aussi tout au long de la vie des ouvrages en béton. En effet, l'hydratation du ciment est un processus très lent, qui n'est jamais totalement épuisé dans les bétons courants, se poursuivant après la prise. Ces effets créent un déséquilibre avec le milieu, qui génère des flux, respectivement de chaleur ou d'eau, et par conséquent des gradients, respectivement de température ou de potentiel hydrique, se traduisant par une évolution continue des propriétés physiques et mécaniques du béton. Les déformations observées ne sont donc jamais uniformes et ne sont pas une simple fonction de la seule variation locale d'hygrométrie ou de température, mais font toujours intervenir un *comportement de structure*.

2.2.3.1 Influence de l'hygrométrie sur les capteurs à fibre optique

Les actions de l'humidité, de l'immersion ou des ambiances corrosives, sont particulièrement pernicieuses à long terme pour les matériaux constituant les capteurs à fibre optique, comme pour notamment la silice de la fibre optique ou l'adhésif utilisé pour lier la fibre optique à la gaine mécanique. Malgré la grande passivité chimique de la silice, le contact avec de l'eau ou l'humidité la fragilise. Le revêtement primaire de la fibre optique est notamment appliqué pour pallier à ce type d'agression. L'humidité est un facteur très dégradant en collage car elle agit par capillarité au niveau des interfaces ayant pour effet de diminuer l'adhésion. Lorsque l'atmosphère est très humide, il convient de protéger les bords extérieurs du joint par un produit étanche. Le capteur à fibre optique peut-être rendu insensible aux actions hydriques, en choisissant en conséquence les matériaux du capteur ou/et en leur apportant une protection adéquate, ce qui est en général couramment fait.

2.2.3.2 Influence de la température sur les capteurs à fibre optique

La température est sans nul doute le facteur d'influence d'origine naturelle, ou d'origine industrielle, le plus gênant pour l'extensométrie, présent en toute circonstance. En effet, les

ouvrages de Génie Civil sont soumis tout au long de l'année à des variations de température pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de degrés Celsius. Ces variations participent activement à l'évolution dans le temps des propriétés physico-chimiques des différents constituants du capteur. Ces derniers, soumis à une répartition de température non uniforme ou à une variation de température d'ensemble, se déforment.

En effet, en tout point d'un corps élastique linéaire, homogène et isotrope, passant d'une température uniforme T_0 à une température uniforme T_1, et soumis à aucune force extérieure, les déformations dans toutes les directions de ce corps vérifient la loi linéaire de dilatation thermique suivante :

$$\varepsilon = \alpha \cdot (T_1 - T_0) \quad \text{avec : } \alpha \text{ : coefficient de dilatation thermique linéaire du corps}$$

Sans considération de l'effet thermique, l'incertitude de mesure d'un capteur à fibre optique de déformation est souvent annoncée par son constructeur autour de $\Delta\varepsilon_{mesurées} = 10\,\mu m.m^{-1}$. En considérant par exemple un coefficient de dilatation thermique linéaire global du capteur de $10.10^{-6}\,°C^{-1}$, une variation de température de 1 °C, dans le cas d'une dilatation libre, fait doubler cette incertitude, d'où, la ***nécessité d'une correction thermique***.

Les dilatations peuvent en plus être gênées. En effet, dans la plupart des cas le béton ne se déforme pas librement car l'ouvrage n'est pas isostatique. Par exemple, deux poutres en béton, l'une libre et l'autre encastrée entre deux murs empêchant toute dilatation (cf. Figure 2.6), chauffées uniformément ne se comportent pas de la même manière. La première se dilate librement, sans création de contraintes. La deuxième ne pouvant pas s'allonger, des contraintes apparaissent au sein du matériau, induisant une compression de la poutre. Dans ce cas les variations de température induisent donc à la fois des variations de déformations mais aussi des contraintes internes. C'est aussi ce qui se qui se produit au niveau des constituants du capteur avec en plus, pour chaque matériau en présence des coefficients de dilatation propre, pouvant être différents. Ces différences peuvent être la source de perturbations supplémentaires dans le mesurage de déformation.

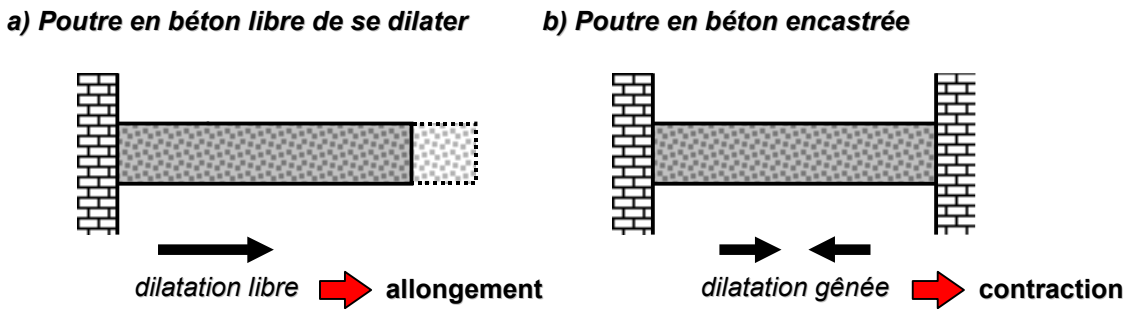


Figure 2.6 Dilatation libre et dilatation gênée de poutres en béton

Soit un capteur à fibre optique noyé dans une poutre en BO de section rectangulaire, soumise à une variation de température uniforme dans le volume de T_0 à T_1 (T_1 étant supérieure à T_0), et libre de se dilater dans une direction donnée. Le capteur est composé de la fibre optique, supposée entièrement en silice, et de son conditionnement à géométrie cylindrique essentiellement en invar, choisi ici pour son très faible coefficient de dilatation thermique linéaire (cf. Figure 2.7). Toutes les liaisons, *fibre optique / conditionnement* et *conditionnement / béton*, sont supposées pour simplification comme parfaitement adhérentes, sans glis-

sement ni frottement. Les coefficients de dilatation thermique linéaire des différents matériaux en présence, sont les suivants [LIDE, 1993] :

$$\alpha_{béton} = 12.10^{-6}\,°C^{-1} \qquad \alpha_{invar} = 0{,}9.10^{-6}\,°C^{-1} \qquad \alpha_{silice} = 7{,}2.10^{-6}\,°C^{-1}$$

Le couplage entre ces matériaux crée des tensions non négligeables. Isolé, le béton se dilate librement, passant de, L_0 à T_0, à, L_1 à T_1. Cependant dans l'exemple, l'invar freine la dilation du béton, puisqu'il ne se dilate pas (négligeable[1] par rapport aux autres matériaux) et que le module d'élasticité longitudinale de l'invar est plus élevé que celui du béton ($E_{invar} > E_{béton}$). Le béton passe en fait de L_0 à L_2. De même pour la fibre optique qui passe en dilatation libre de L_0 à L_3. Comme pour le béton, le conditionnement freine cette dilatation ($E_{invar} > E_{silice}$). Cependant, les liaisons entre matériaux étant considérées comme parfaitement adhérentes et $\alpha_{béton} > \alpha_{silice}$, le conditionnement est entraîné par le béton, et, entraîne lui-même la fibre optique. La fibre optique passe en fait de L_0 à L_4 qui peut être, suivant les caractéristiques mécaniques et les dimensions des matériaux, supérieure ou inférieure à L_3 (inférieure sur la figure).

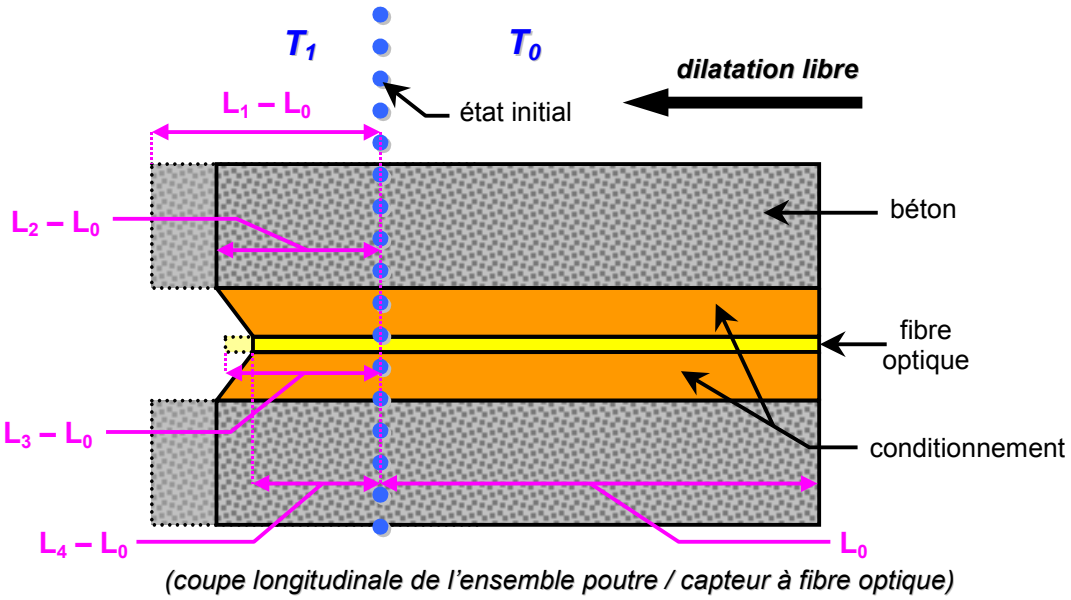


Figure 2.7 Exemple de dilatations différentielles entre la fibre optique et le béton

La déformation mesurée, résultant de l'allongement de la fibre optique rapportée à sa base de mesure, est différente de la déformation de la poutre en béton :

$$(L_2 - L_0)_{\text{allongement béton}} > (L_4 - L_0)_{\text{allongement fibre optique}} \Rightarrow \varepsilon_{\text{béton}} > \varepsilon_{\text{fibre optique}}$$

Cet exemple simple met en évidence trois types de dilatation thermique des matériaux constituant le capteur sources de perturbations dans le mesurage de déformation, nommées pour la présente étude, ***dilatation propre***, ***dilatation gênée*** et ***dilatation entraînée***. En réalité c'est encore plus complexe puisque le conditionnement de la fibre optique est composé de différents matériaux, ayant en général des coefficients de dilatation linéaire tous différents les uns des autres y compris de celui du béton (ex : $45.10^{-6}\,°C^{-1}$ pour une liaison entre la fibre optique et la gaine mécanique en résine époxyde, $17{,}3.10^{-6}\,°C^{-1}$ pour une gaine mécanique en

[1] Pour 1 °C de variation thermique, la dilatation libre provoque pour chaque matériau isolé les déformations suivantes :

$$\varepsilon_{béton} = 12\,\mu m.m^{-1} \qquad \varepsilon_{invar} = 0{,}9\,\mu m.m^{-1} \qquad \varepsilon_{silice} = 7{,}2\,\mu m.m^{-1}$$

acier inoxydable). De nombreuses solutions techniques ont été étudiées et développées ces dernières années, afin de résoudre ce problème de correction thermique, dont notamment celles décrites dans [BELLEVILLE et DUPLAIN, 1993], [HENRIKSSON et al., 1996], [RIOUBLANC, 1997], [LIU et al., 1998] ou [SMITH et al., 1999].

2.2.3.3 Synthèse

Le concepteur et l'utilisateur ont donc à leur disposition différents moyens pour appréhender l'influence de l'hygrométrie et de la température sur la mesure réalisée par des capteurs à fibre optique de déformation. De plus, pour les ouvrages considérés, les actions hydriques et thermiques sont à majorité d'origine climatique. Les actions thermiques de ce type sont essentiellement cycliques, et leurs effets mécaniques à long terme dépendent donc de l'écart entre la température initiale et la température moyenne de l'endroit où se situe l'ouvrage. Les actions hydriques peuvent également être de type cyclique, mais le séchage est 1000 à 10000 fois plus lent que le refroidissement [PRAT et al., 1997]. Par conséquent, l'effet de ces actions sur le comportement à long terme est insensible aux cycles courts, parce que lié avant tout aux hygrométries moyennes des périodes les plus sèches de l'année. Le capteur noyé au sein du béton ne subit en général pas de variation brutale d'hygrométrie et de température, contrairement au capteur fixé en surface d'ouvrage qui lui est directement exposé aux variations climatiques. Des études spécifiques pour chaque type de capteur sont donc nécessaires, ce qui n'étaient pas en accord avec notamment les contraintes expérimentales de l'étude. Dans la présente étude, afin de réduire les principales sources de variations des déformations, le ***milieu de mesure*** est considéré comme ***chimiquement stable***, et ***isotherme***. Ce qui se traduit par des ***températures*** et des ***hygrométries constantes*** pour tous les matériaux étudiés.

2.2.4 Autres sources de perturbations

2.2.4.1 Influence de la structure des capteurs à fibre optique

Les deux types de capteurs à fibre optique considérés ont des structures particulières (cf. Figure 2.8).

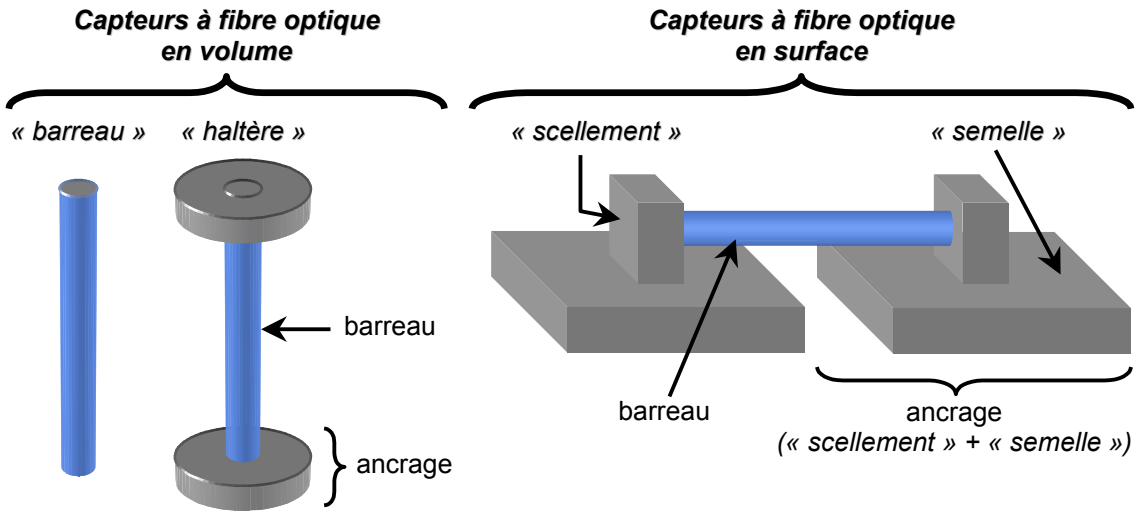


Figure 2.8 Structures des capteurs à fibre optique en volume et en surface considérés

Pour les capteurs à fibre optique en volume deux structures sont étudiées :

- une structure simple, composée d'un seul barreau cylindrique plein, et nommée simplement ***barreau*** ;
- une structure dont la forme est semblable à celle des extensomètres à corde vibrante, composée d'un cylindre plein équipé à chacune de ses extrémités d'un autre cylindre plein de diamètre supérieur et de faible longueur, constituant les ancrages, et nommée ***haltère***.

Pour les capteurs en surface, une structure simple telle qu'un barreau collé au béton sur toute sa longueur n'a pas été envisagée. En effet, cette configuration pose certaines difficultés de réalisation (ex. : choix d'une colle adaptée, état de surface du béton toujours détérioré sur site) et peut induire des perturbations supplémentaires sur la mesure de déformation (ex. : dégradation d'origine climatique de la surface du béton altérant la liaison *capteur / béton*, prise en compte de déformations locales non souhaitées dans le mesurage). Le cas qui consiste à pratiquer une rainure en surface de la structure en béton, au sein de laquelle est noyé le capteur à l'aide de colle ou de ciment, revient à considérer la problématique du cas en volume. Les capteurs en surface considérés sont fixés en deux points par des ancrages en surface de l'éprouvette en béton. La structure choisie pour l'étude est constituée d'un cylindre plein, ***barreau***, auquel est associé une ***paire d'ancrages*** composés de deux parallélépipèdes (cf. Figure 2.8) servant :

- de fixation au barreau, et nommé ***scellement*** ;
- d'embase aux ancrages, et nommé ***semelle***.

Les surfaces des ouvrages considérés sont en général planes à l'échelle des capteurs considérés (cf. 2.2.4.2). C'est pourquoi les embases des ancrages ont été choisies planes. De plus, des ancrages avec une embase adaptée à la géométrie cylindrique des éprouvettes normalisées considérées sont de conception moins aisée. La géométrie des éprouvettes a due être adaptée à de tels ancrages.

Les bases de mesure de ces capteurs dépendent fortement de la géométrie, des dimensions et des caractéristiques mécaniques des ancrages, mais aussi du type de sollicitation appliquée. En effet, pour les capteurs en volume de type haltère sollicités en compression, leur base de mesure est la longueur séparant les deux extrémités du barreau (cf. Figure 2.9). Il en est de même pour la structure de type barreau.

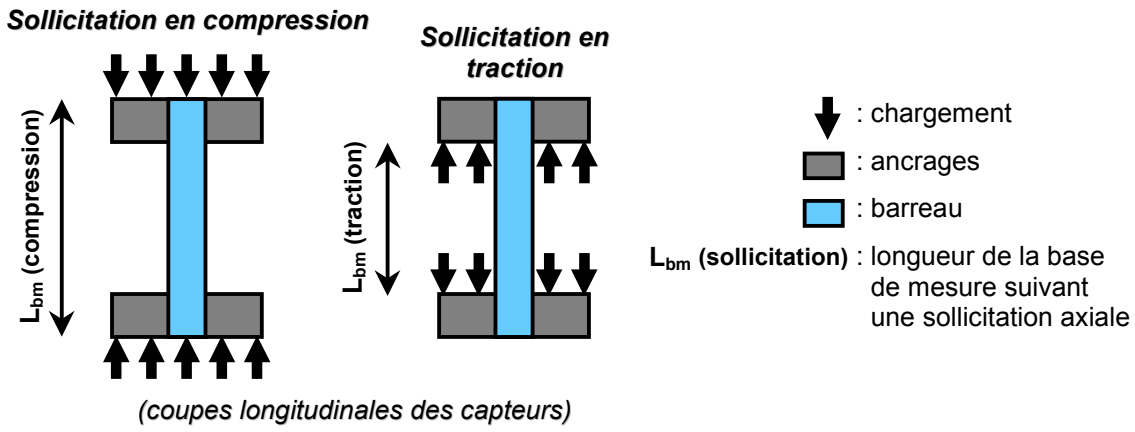


Figure 2.9 Bases de mesure des capteurs à fibre optique en volume de type haltère

Pour les capteurs en surface, de par la géométrie des ancrages considérés, la définition de leur base de mesure est plus complexe, ce problème étant analysé dans les chapitres suivants. En première hypothèse, cette base de mesure pour des sollicitations en compression est considérée comme étant également la longueur du barreau.

2.2.4.2 Influence des dimensions du capteur pris dans son ensemble

Les dimensions longitudinales des capteurs extensométriques sont conditionnées par la longueur de la base de mesure de ces capteurs. Celle-ci dépend essentiellement du milieu de mesure et de la mesure souhaitée :

- plus la base de mesure est longue, plus la mesure de déformation offre une meilleure représentativité de la déformation de la zone de béton autour du capteur ;
- plus la base de mesure est courte, plus l'observation de phénomènes très localisés est affinée, la mesure n'étant pas nécessairement représentative de la déformation de la zone de béton autour du capteur et pouvant être perturbée par les hétérogénéités du béton.

Par contre, aucun renseignement sur les dimensions transversales des capteurs extensométriques, n'a été recensé à travers les différents documents compulsés.

1) L_{bm} en fonction du milieu de mesure

L'hétérogénéité du béton provient essentiellement des granulats (cf. 2.1.2). Suivant le type d'ouvrage de Génie Civil, le béton n'a pas la même taille de granulat. Les exemples suivants qui sont issus de [GRANGER, 1996] et de [DE LARRARD, 2000], présentent les tailles minimales et maximales des granulats[1] de certains types d'ouvrages de Génie Civil :

- bâtiments en BO : 0/20
- ponts en béton à hautes performances *BHP* : 0/20
- enceintes de confinement en béton précontraint : 0/25
- barrages en béton : 0/63

Les granulats utilisés dans le béton des ouvrages considérés dans la présente étude, sont majoritairement des gravillons ($d \geq 1$ mm et $D \leq 31{,}5$ mm), excepté pour les barrages qui sont constitués en majorité de cailloux ($d \geq 20$ mm et $D \leq 80$ mm), selon la classification de la norme [NF P 18-101, 1983]. Les deux bétons choisis, l'un pour les essais en volume et l'autre pour les essais en surface (cf. 4.1.2.1) ont des granulats de dimensions respectivement de 0/20 et 0/25. Or pour des capteurs extensométriques, il est d'usage d'après la norme américaine [ASTM C 469-94, 1994] et [POLICELLA, 2000], de choisir une base de mesure au moins égale à trois fois le diamètre du plus gros granulat afin principalement de vérifier l'hypothèse d'homogénéité du béton. Par conséquent, la longueur minimale de L_{bm} des capteurs à fibre optique considérés est supérieure ou égale à 60 mm pour le cas en volume, et à 75 mm pour le cas en surface.

2) L_{bm} en fonction de la mesure souhaitée

Des capteurs tels que les jauges extensométriques (cf. 4.1.1.2 – a)) intègrent les déformations le long de leur base de mesure. Pour les capteurs à fibre optique considérés, la défor-

[1] Notées : d/D, avec : d = dimension minimale ; D = dimension maximale ; unité en mm [NF P 18-304, 1973]

mation est obtenue par la mesure du déplacement relatif des extrémités de la base de mesure rapportée à la longueur de cette dernière. En conséquence, si la déformation varie linéairement le long de la base de mesure du capteur, quelque soit la longueur de cette base, son point milieu restant fixe, la déformation mesurée est celle du point central du capteur (cf. Figure 2.10 a)).

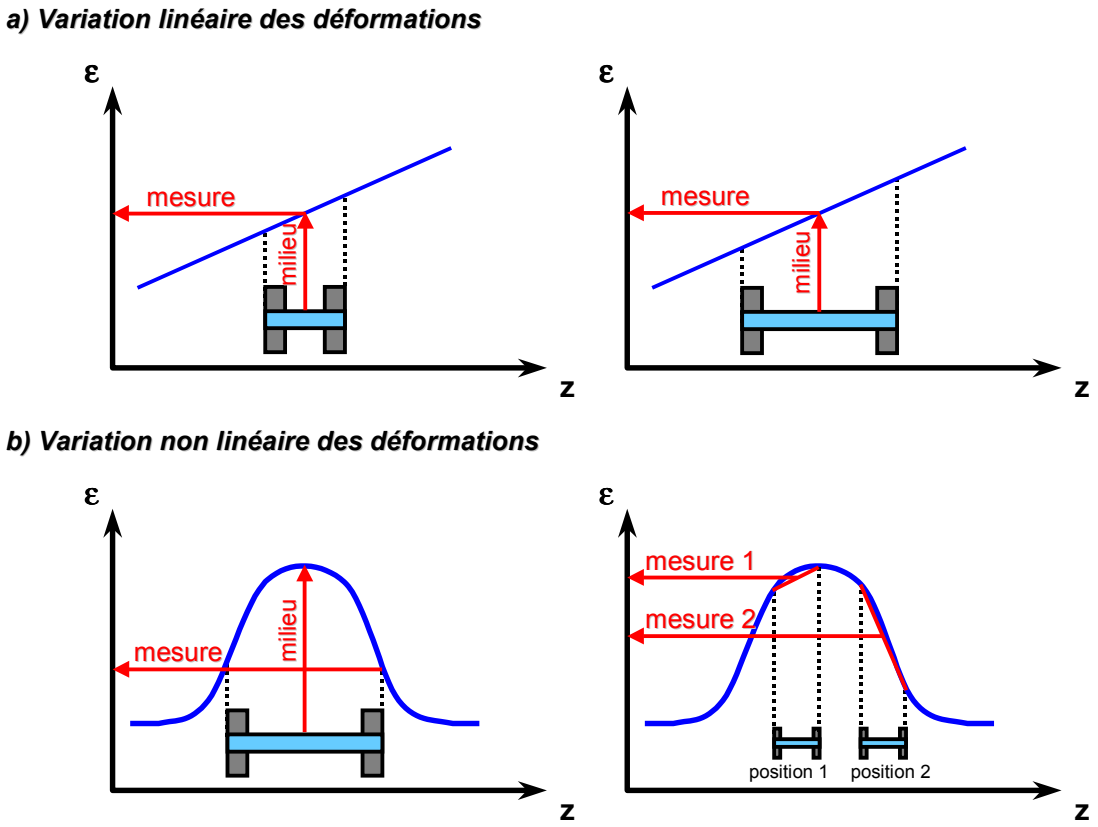


Figure 2.10 Influence de la longueur de la base de mesure des capteurs à fibre optique considérés, suivant la distribution des déformations le long de cette base

Par contre, si la variation de la déformation n'est pas linéaire le long de la base de mesure, la déformation mesurée peut différer de celle du point milieu de la base, et ne pas rendre compte des maximums de déformation même pour de petites longueurs de base (cf. Figure 2.10 b)). La distribution de la déformation n'est a priori pas connu et par conséquent le positionnement du capteur peut être éloigné des pics de déformation. Des différences de 30 % ou plus sont alors possibles entre les mesures réalisées et ces pics [LE GOËR et AVRIL, 1992].

Une éprouvette normalisée 16/32[1], qui est le plus petit échantillon de béton testé (cf. 4.1.2.2), sollicitée entre les deux plateaux d'une presse, peut avoir des variations de déformation non linéaires. En effet, si la base de mesure d'un capteur extensométrique en volume d'une telle éprouvette, mais surtout d'un capteur en surface, est trop grande, les déformations longitudinales peuvent être affectées par la friction[2] des extrémités de l'éprouvette. A ce titre, la norme américaine [ASTM C 469-94, 1994] retient une longueur maximale de deux tiers de

[1] C'est une éprouvette cylindrique d'élancement 2 : 16 cm de diamètre et de 32 cm de hauteur.
[2] C'est la résistance que présentent deux surfaces en contact à un mouvement de l'une par rapport à l'autre. Cela se traduit par un phénomène de blocage par frottement des déformations transversales et longitudinales aux extrémités de l'éprouvette en contact avec les plateaux de la presse.

la hauteur de l'éprouvette avec une préférence pour une longueur limite de la moitié de cette hauteur, c'est à dire respectivement pour une 16/32 : 213 mm et 160 mm. Une étude récente montre que la longueur L_{bm} d'un capteur de type extensométrique, ne doit pas excéder 1,1 fois le diamètre d'une éprouvette d'élancement 2, afin de limiter à 1 % l'erreur due aux effets de friction de ses extrémités sur les plateaux de la presse [BOULAY et al., 1999]. Dans le cas d'un 16/32 la longueur maximale de L_{bm} est donc dans ce cas limitée à 176 mm.

2.2.4.3 Influence des méthodes d'intégration des capteurs à fibre optique au milieu de mesure

Les capteurs de type extensométrique considérés, réalisent des mesures de déformation dans une direction donnée à un endroit précis de l'ouvrage instrumenté. Une des principales difficultés d'utilisation d'un capteur de ce type, est de maintenir cette direction et cette position durant le bétonnage (cas en volume), et pendant les opérations de fixation en surface du béton (cas en surface). Les méthodes d'intégration, qui sont avant tout fonction des pratiques des utilisateurs ainsi que du type d'ouvrage instrumenté, peuvent engendrer des perturbations sur le mesurage qui ne sont pas a priori négligeables. Il convient de déterminer, par des études préliminaires, une méthode perturbant le moins possible le mesurage en fonction de chaque type de capteur et de la structure instrumentée (ex. : mesure souhaitée, géométrie des capteurs, ossature de la structure testée).

1) Cas des capteurs en volume

Différentes méthodes d'installation des capteurs destinés à être noyés au sein du béton sont employées. Les plus courantes consistent à utiliser les éléments de la structure à instrumenter. Pour les bétons armés, les capteurs sont souvent fixés aux armatures. Lorsqu'il n'y a pas d'armatures, des montages sont fabriqués en atelier à l'aide de fer à béton par exemple, et sont mis en place par scellements à l'emplacement prévu. Ces montages peuvent être haubanés afin d'éviter leur renversement sous la pression du béton lors du coulage. Afin que les champs de contraintes et de déformations au voisinage proche soient très faiblement perturbés, le capteur doit être assez éloigné des supports de fixation faisant partie intégrante de l'ouvrage, telles que les armatures, ou étant rajoutés, lorsqu'il s'agit de montages. Ces derniers ne doivent pas perturber le comportement de la structure elle-même. Les fers à béton couramment utilisés pour ces montages ont des diamètres de 8 à 12 mm.

Pour ces méthodes, les capteurs sont fixés aux armatures ou aux barres des montages par des fils de fer reliés à leurs trous de fixation. Afin de ne pas perturber le comportement du béton et de faire en sorte que les attaches se déforment sans empêcher le béton de solliciter le capteur, ces fils de fer ont couramment un diamètre inférieur ou égal à 1 mm. De manière à ne pas mettre en déformation le capteur, les directions des tensions d'attache doivent être perpendiculaires à la direction de mesure du capteur. Les principaux inconvénients de ces méthodes résident dans leur mise en œuvre sur chantier. Par exemple, la fixation des capteurs aux armatures doit se faire au fur et à mesure du ferraillage, une fois que celui-ci est terminé l'accès aux zones à instrumenter devenant difficile voire impossible. De même, la mise en place du béton sur chantier est réalisée à l'aide de grosses aiguilles vibrantes (cf. 4.1.2.3). Des précautions, qui ne sont pas souvent compatibles avec les conditions de chantier, doivent alors être prises afin de ne pas détériorer les capteurs ainsi que leur système de fixation. D'autres méthodes sont couramment pratiquées comme par exemple, la fixation du capteur aux armatures à l'aide de colliers de serrage en plastique (problème : capteur mesurant d'avantage la déformation des armatures que celle du béton), ou l'enfouissement direct du capteur au fur et

à mesure du bétonnage (problème : difficulté pour maintenir la direction et la position du capteur).

Pour toutes ces méthodes, les câbles des capteurs doivent être orientés de façon à ce qu'ils n'apportent pas de perturbation. Ils ne doivent notamment pas passer trop près des autres capteurs afin de ne pas modifier les champs de contraintes et de déformations, ou gêner la mise en place du béton ni compliquer le coffrage par leur sortie, ou créer de point faible s'ils sont positionnés trop près de la surface.

2) Cas des capteurs en surface

A la différence du cas en volume, la fixation du capteur en surface d'ouvrage s'effectue une fois le bétonnage réalisé. Pour les ouvrages neufs, l'installation des capteurs peut même être réalisée hors des contraintes de chantier, lorsque la construction de l'ouvrage est entièrement achevée. Les zones à instrumenter ne sont pas souvent facile d'accès, ce qui impliquent dans la pratique l'utilisation de moyens lourds comme notamment des passerelles pour des ouvrages tels que les ponts [GODART, 1998]. En dehors de ces contraintes d'accès, le principal problème est la technique de fixation du capteur à la surface du béton.

Si l'ouvrage présente une certaine uniformité de champ de contraintes et de champ de déformations (ex. : éprouvette cylindrique, mur de géométrie simple, poteau), la mesure en surface peut être considérée comme le reflet direct de la déformation en volume, à condition que le capteur en surface n'ait pas d'effet intrusif. Or dans la réalité, le béton de surface n'est en général pas représentatif du béton de volume à cause notamment des *effets de peau*, qui sont par exemple, dus au décoffrage et aux intempéries [MOUTON et al., 1996], ou à des phénomènes physico-chimiques tels que l'action des sulfates et l'alcali-réaction [GODART et al., 1999]. Les capteurs à fibre optique en surface considérés dans la présente étude visent à déduire par le mesurage de déformation en surface d'ouvrage le champ de déformations en volume du béton correspondant, sans pour autant faire l'analyse de cette correspondance.

La structure des capteurs considérés prévoit des ancrages pouvant être scellés en profondeur afin de s'affranchir des effets de peau en surface des ouvrages de Génie Civil en béton. Pour les bétons armés, afin d'assurer la liaison entre les armatures et le béton ainsi que la protection des armatures contre la corrosion, mais aussi, une homogénéité avec le béton de masse, un enrobage minimal des armatures est nécessaire. Cet enrobage est généralement lié, à l'environnement selon son degré d'agressivité, au type d'ouvrage et à la dimension des granulats [ADAM, 1990]. Il définit la distance, notée e, entre une armature et la surface du béton : pour des ouvrages tels que des enceintes de confinement elle est de l'ordre de quelques centimètres (5 à 10 cm). Pour l'équilibre en flexion et la représentativité de la mesure de surface du comportement en volume, il est préférable que les ancrages pénètrent dans la nappe d'armature d'une profondeur au moins égale à e. Dans la présente étude, des précautions sont prises d'un point de vue expérimental pour que la surface des éprouvettes en béton ne subissent pas ces effets de peau (cf. 4.1.2.3). Les profondeurs d'ancrages considérées sont donc plus faibles que pour celles des ouvrages.

La pose des ancrages parfaitement parallèles en condition de chantier, est chose difficile (ex. : difficulté de perçage à 90° car la surface du béton n'est pas totalement plane, inclinaison de la perceuse, accès difficiles). Pour pallier ces incertitudes, la fixation des capteurs aux ancrages nécessite une liaison de type rotule afin que les têtes d'ancrages où sont fixés les extrémités du capteur soient bien alignées dans la direction de la déformation à mesurer. Pour

la présente étude, un encastrement parfait à chaque extrémité du capteur est considéré étant donné que la surface de l'éprouvette en béton est plane et que le perçage est plus aisé.

2.2.4.4 Synthèse

Les facteurs d'influence retenus, qui font l'objet des analyses des chapitres suivants, sont la ***géométrie*** et les ***dimensions*** (longueurs, diamètres) des deux ***inclusions*** (en volume et en surface), la ***méthode d'intégration*** au milieu de mesure par l'intermédiaire notamment de la ***liaison entre capteur et milieu de mesure*** qui est principalement réalisée par les ancrages. Les liaisons entre béton et capteur offrent en général une bonne adhérence surtout pour de faibles charges et de par les géométries des capteurs permettant d'optimiser ces liaisons. En réalité des frottements ou/et des glissements peuvent apparaître induisant également des perturbations dans le mesurage. Les liaisons *gaine mécanique / ancrages* ne sont pas étudiées, supposant une conception optimale à ce niveau.

2.3 Synthèse des hypothèses et présentation générale de l'analyse des facteurs d'influence considérés

Les principaux éléments du cadre de l'étude, ainsi que les différentes hypothèses définies précédemment, sont résumés ci-après :

a) L'ensemble des matériaux en présence, que ce soit ceux constituant les capteurs ou que ce soit celui du milieu de mesure, vérifient les hypothèses de l'extensométrie : ***continus***, ***homogènes*** et ***isotropes***, de comportement ***élastique linéaire*** en considérant les ***déformations infiniment petites***.

b) Dans ces conditions chacun des matériaux en présence est défini par deux coefficients nommés ***caractéristiques mécaniques*** du matériau : le ***module d'élasticité longitudinale E*** et le ***coefficient de Poisson ν***.

c) Le milieu de mesure est un ***béton ordinaire BO*** ($R_c \cong 40$ MPa à 28 jours) ***mature*** (âge supérieur à 28 jours).

d) Les structures en béton étudiées sont des ***éprouvettes cylindriques normalisées*** avec un ***élancement au moins de deux***, ***sans armature ni précontrainte***.

e) Les sollicitations appliquées sont des ***chargements en statique de compression***. Les matériaux en présence ne sont ***pas sollicités au-delà de*** leur limite d'élasticité en contraintes σ_e impliquant que l'***état fissuré du béton n'est pas atteint***.

f) Deux types de capteurs à fibre optique sont considérés : ***noyés au sein*** et ***fixés en surface du béton*** d'ouvrages de Génie Civil. Ce sont des ***capteurs ponctuels à fibre optique industrialisés***, réalisant un ***mesurage unidirectionnel*** de ***déformation*** suivant l'axe de leur base de mesure.

g) La ***fibre optique est le transducteur optique*** des capteurs considérés. La ***mesure de déformation reflète*** réellement ***la déformation du corps de la fibre optique***.

h) La base de mesure du transducteur optique est en générale plus petite que la base de mesure du capteur. L'hypothèse d'égalité entre les longueurs de ces bases de mesure est faite : L_{bm} *(capteur)* $= L_{bm}$ *(fibre optique)* $= L_{bm}$

i) La ***fibre optique*** des capteurs est une fibre ***cylindrique standard*** de télécommunications, avec un cœur et une gaine optique ***en silice***, et un ***revêtement primaire en polyimide*** : $\phi_{\text{cœur + gaine optique}} = 125$ µm ; $\phi_{\text{revêtement primaire}} = 150$ µm (c'est-à-dire une

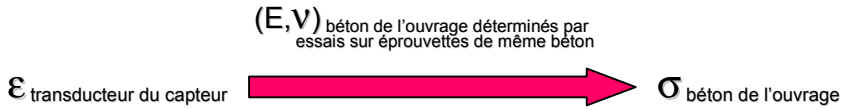
épaisseur de 12,5 µm). La ***gaine mécanique*** est ***cylindrique*** et ***composée d'un seul matériau***.

j) La ***liaison fibre optique / gaine mécanique*** est réalisée ***par collage***. La colle considérée est une ***résine époxyde*** et le ***joint de colle par manchonnage*** est essentiellement sollicité en ***cisaillement*** ou en arrachement.

k) Toutes ***les liaisons entre matériaux au sein du capteur*** sont considérées comme ***parfaitement adhérentes***.

l) Tous les matériaux sont considérés comme étant ***chimiquement stables*** *et* ***isothermes*** : température et hygrométrie constantes.

L'état de résistance mécanique réel d'un ouvrage est usuellement estimé à travers un nombre limité de capteurs. Les informations obtenues par ces capteurs doivent être représentatives de l'état de résistance mécanique d'autres points de l'ouvrage dépourvus de capteur mais soumis aux mêmes conditions mécaniques. La bonne connaissance de l'état de résistance mécanique de l'ouvrage à partir des mesures, par l'instrumentation en un nombre fini de points sur cet ouvrage, nécessite une méthodologie et des outils de calcul performants. L'analyse de ces outils et de la méthodologie associée ne font pas l'objet de la présente étude. Celle-ci se limite à l'analyse du processus permettant d'obtenir en chaque point instrumenté une information sur l'état de résistance du matériau la plus crédible et la plus exploitable possible à partir d'un capteur à fibre optique, afin que les calculs cités ci-dessus puissent remplir au mieux leurs objectifs. L'analyse courante de la résistance mécanique du béton d'ouvrage à l'aide du mesurage de déformation par capteurs de type extensométrique, peut-être schématisée de la manière suivante :



Cela implique que la mesure délivrée par le capteur soit le reflet direct de la déformation de la zone de béton instrumentée, et, par extension, le reflet direct de la déformation des autres zones de béton présentant une géométrie et des conditions de sollicitation similaire.

Cependant, soumis à différents types de facteurs d'influence, les capteurs à fibre optique considérés dans la présente étude induisent des perturbations au mesurage de déformation qu'ils réalisent. L'étude vise à déterminer le degré de ces perturbations, en établissant si possible leurs multiples causes. Ces perturbations sont représentées par un indicateur, ou ***coefficient de perturbations***, qui est défini de la manière suivante :

$$\Delta\varepsilon / \varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\text{mesurée}}}{\varepsilon_{\text{référence}}} - 1$$

avec :

- $\varepsilon_{\text{mesurée}}$: déformation délivrée par le transducteur du capteur (la fibre optique)
- $\varepsilon_{\text{référence}}$: déformation de l'échantillon de référence

Cet indicateur sert principalement à analyser les perturbations engendrées par l'inclusion au sein du béton ainsi que sur le mesurage. Il est aussi employé pour analyser les perturbations engendrées par la présence de la fibre optique et de la colle au sein de la partie sensible du capteur. Les échantillons de référence ne sont alors pas les mêmes : dans le premier cas il s'agit d'une éprouvette en béton sans inclusion identique à celle instrumentée par les capteurs à fibre optique ; dans le second cas il s'agit d'une structure d'enveloppe externe identique à celle la gaine mécanique, constituée d'un seul matériau (le même que la gaine mécanique).

L'influence sur le mesurage de déformation par capteurs à fibre optique des principaux facteurs identifiés dans le présent chapitre, est analysée dans les deux chapitres qui suivent : le Chapitre 3 et le Chapitre 4, le premier étant théorique et le second expérimental. Le ***Chapitre 3*** est basé sur des calculs par éléments finis réalisés à l'aide du code de calcul CESAR-LCPC. L'utilisation de méthodes analytiques est complexe voire même impossible lorsqu'il s'agit d'appréhender le comportement des différentes configurations bidimensionnelles ou tridimensionnels étudiées (notamment pour les capteurs en surface des éprouvettes en béton). Pour les configurations simples (parties sensibles), l'emploi de l'analytique est possible. Afin d'homogénéiser les outils de calcul, il a été préféré d'utiliser le numérique pour tous les calculs réalisés. C'est pourquoi une méthode numérique a été choisie, les éléments finis étant aujourd'hui très largement employée [PRAT et al., 1995]. Les facteurs d'influence sont plus facilement étudiés, avec des économies de temps et de moyens. Le ***Chapitre 4*** présente des essais en laboratoire permettant l'analyse d'autres facteurs d'influence, afin de compléter les résultats du Chapitre 3, mais aussi et principalement d'en confirmer certains. Des essais sur site n'ont pas pu se concrétiser durant la Thèse. Les facteurs d'influence étudiés présentés précédemment sont répartis dans ces deux chapitres de la manière suivante :

Chapitre 3

- Dimensions (diamètres, longueurs, épaisseurs) et géométrie de la partie sensible et de l'inclusion ;
- Caractéristiques mécaniques de la gaine mécanique, de l'inclusion mais aussi des éprouvettes ;
- Liaisons *inclusion / béton* ;
- Géométrie et caractéristiques mécaniques des ancrages.

Chapitre 4

- Comportement sous sollicitations des éprouvettes en béton sans capteur, et des capteurs seuls ;
- Choix de méthodes d'intégration des capteurs au milieu de mesure et liaisons *capteur / béton* ;
- Comportement à long terme (environ 7 mois) de capteurs à fibre optique au sein d'éprouvettes en béton ;
- Confrontation *théorie / expérience* pour des capteurs avec, des dimensions, une géométrie et des caractéristiques mécaniques particulières.

Un dernier chapitre regroupe les différents résultats des précédents chapitres sous forme de recommandations, destinées aux concepteurs et aux utilisateurs de capteurs à fibre optique de déformation pour le béton d'ouvrages de Génie Civil.

Chapitre 3

Simulation de capteurs à fibre optique de déformation dans leur milieu de mesure

Ce chapitre est une étude de sensibilité à différents paramètres géométriques et mécaniques. L'influence sur la mesure de déformation par capteur à fibre optique de certains facteurs identifiés précédemment (cf. 2.3) est analysée numériquement par la méthode des éléments finis, à l'aide du code de calcul CESAR-LCPC. Différents modèles et différentes configurations de capteur à fibre optique (ex. : caractéristiques mécaniques, dimensions, géométrie des ancrages pour les capteurs en surface,… particulières), nommées *cas d'étude*, sont ainsi simulés afin de quantifier l'influence sur le mesurage des facteurs considérés.

Les différents cas d'étude sont analysés suivant deux niveaux d'étude :

- Niveau 1 : analyse de l'influence de facteurs au niveau de la partie sensible des capteurs à fibre optique ;
- Niveau 2 : analyse de l'influence de facteurs au niveau des inclusions en volume et en surface d'éprouvettes en béton.

C'est principalement le problème d'échelle qui a amené à considérer deux niveaux d'étude. En effet, les dimensions des parties sensibles étudiées varient d'une dizaine de micromètres à quelques millimètres, alors que pour les inclusions et les éprouvettes, elles varient de quelques millimètres à quelques dizaines de centimètres. Les maillages de modèles considérant ces deux niveaux auraient été constitués d'un nombre trop important de nœuds et d'éléments, augmentant ainsi la durée des calculs et rendant même, pour certains, leur réalisation impossible. De plus, à chacun des deux niveaux d'étude correspond l'étude de facteurs d'influence qui lui sont propres et bien distincts. Le principe de superposition dans les calculs de structure permet d'analyser ces deux niveaux d'étude séparément. Cependant, pour garantir la cohérence entre les deux niveaux, il est nécessaire que les champs de contraintes et de déformations développés dans les inclusions pour le niveau 2, au droit de la partie sensible, correspondent à ceux développés dans la partie sensible du capteur du niveau 1, qui est un assemblage de plusieurs constituants de matériaux différents.

Le présent chapitre commence par une présentation du code de calcul utilisé, puis par la description des caractéristiques des calculs et des matériaux considérés, communes aux différents cas d'étude des deux niveaux. Ensuite, pour chaque niveau d'étude les cas d'étude et les résultats associés sont présentés. Le niveau 1 permet d'analyser l'influence de la géométrie, des dimensions et des caractéristiques mécaniques des constituants de la partie sensible des capteurs, mais aussi de vérifier la cohérence entre les deux niveaux. Le niveau 2 permet quant à lui une analyse de l'effet inclusif d'un capteur, représenté par un matériau ayant pour géométrie celle de l'enveloppe extérieure de l'ensemble du capteur, comprenant aussi les ancrages. Les principaux facteurs d'influence du niveau 2 sont les géométries, les dimensions, les caractéristiques mécaniques, ainsi que les liaisons avec le béton, des inclusions en volume et en surface considérées.

3.1 Code de calcul CESAR-LCPC

Les différents calculs numériques sont réalisés à l'aide de CESAR-LCPC (Version 3.2.4 – phase STANDARD DEC. 97). C'est un progiciel général de calcul par la méthode des éléments finis, développé depuis le début des années quatre-vingt par le LCPC et en constante évolution. Il est notamment dédié à la résolution de problèmes de Génie Civil : mécanique des sols et des roches, calcul d'ouvrages souterrains [MESTAT, 1997], calcul d'ouvrages d'art,… CESAR-LCPC désigne l'ensemble formé par :

- le pré-processeur MAX organisé en deux programmes : MAX2D (modèles bidimensionnels) et MAX3D (modèles tridimensionnels) ;

- le programme de calcul CESAR ;
- le post-processeur PEGGY organisé en deux programmes : PEG2D (modèles bidimensionnels) et PEG3D (modèles tridimensionnels) ;
- les programmes utilitaires.

MAX permet de générer le maillage et de préparer les autres données pour le programme de calcul CESAR. Ce dernier réalise la résolution numérique du problème étudié par la méthode des éléments finis. PEGGY permet d'interpréter graphiquement les résultats fournis par CESAR et de réaliser des documents graphiques. Pour plus de détails le lecteur peut se référer à [HUMBERT, 1989] ainsi qu'à la documentation de CESAR-LCPC (composée de quatre volumes : Manuel de formation – Mode d'emploi première partie ; Mode d'emploi deuxième partie ; Manuel d'exemples – Manuel de programmation ; Manuel théorique).

3.2 Caractéristiques des calculs

Les caractéristiques des calculs réalisés par CESAR-LCPC sont liées aux hypothèses établies au Chapitre 2. Ces caractéristiques sont les suivantes :

Classe de problème

Seuls les problèmes de mécanique ***statique*** dans les ouvrages de Génie Civil considérés, sont étudiés dans la présente étude.

Propriétés des matériaux

Les matériaux considérés sont ***homogènes*** et ***isotropes***, et ont un comportement ***élastique linéaire***.

Chargement

Les chargements considérés dans l'ensemble des cas d'étude sont uniquement des ***chargements en compression***. Etant donné que les forces agissant sur un élément de volume au sein d'un ouvrage de Génie Civil en béton quelconque, sont une combinaison du champ de forces et du champ de déplacements qui lui sont appliqués en sa périphérie (cf. 2.1.1), chaque cas d'étude réalisé prend en considération deux types de chargement :

* σ_{imp} : ***pression surfacique imposée***, qui consiste en l'application d'une pression uniforme (en MPa) sur une surface donnée du modèle étudié ;
* u_{imp} : ***déplacement surfacique imposé***, qui consiste à imposer un déplacement à tous les nœuds du maillage de la même surface que celle sur laquelle σ_{imp} est appliquée.

La valeur de σ_{imp} est fixée par les limites élastiques des matériaux considérés (cf. 3.3). La valeur de u_{imp} est fonction de celle de σ_{imp} et de la référence considérée. Par exemple pour une éprouvette en béton 16/32, en considérant l'éprouvette sur toute sa hauteur, le déplacement imposé u_{imp} en tête d'éprouvette correspondant à une pression imposée σ_{imp} vérifie (u_{imp} en µm) :

$$u_{imp} = \frac{3{,}2.10^5 \cdot \sigma_{imp}}{E_{béton}}$$

Conditions aux limites et type de calcul

Ces caractéristiques dépendent des modèles étudiés, et notamment de leurs symétries. Les conditions aux limites et le type de calcul sont donc définis pour chaque modèle étudié.

3.3 Matériaux considérés

Les différents matériaux considérés dans les deux niveaux d'étude, ainsi que certaines de leurs propriétés mécaniques, sont consignés ci-après (cf. Tableau 3.1). Les valeurs du tableau sont issues de différentes sources et principalement [GIECK, 1990], [LE NEINDRE, 1991], [HALOUI et al., 1992], [LIDE, 1993] et [PRAT et al., 1995].

Tableau 3.1 Quelques propriétés mécaniques des matériaux considérés

Type de matériau	E (GPa)	ν	σ_e en compression (MPa)	ρ (10^{-6} kg.mm^{-3})
Polyimide	3	0,4	51	1,3
Résine époxyde	4	0,35	37	1,2
Polyépoxyde + Fibres de verre	22	0,35	300	1,7
Béton	40	0,17	29	2,4
Résine époxyde + Fibres de carbone	43	0,31	> 100	1,75
Silice	70	0,25	7200	2,21
Aluminium	71	0,34	185	2,8
Titane	105	0,34	190	4,5
Invar	141	0,29	310	8,13
Acier inoxydable	200	0,3	550	7,9

En réalité, ces valeurs ne sont pas uniques pour chaque matériau. Suivant notamment la fabrication de ces matériaux et les essais de détermination de ces propriétés, ces valeurs peuvent varier de plus de 10 % par rapport à celles présentées dans le tableau [LE NEINDRE, 1991]. Il s'agit en fait d'un choix particulier réalisé pour les besoins de l'étude, l'ordre de grandeur des propriétés mécaniques des matériaux considérés étant respectée par rapport aux renseignements issus de la littérature.

Ces matériaux ont été choisis pour deux raisons :

- Ce sont des matériaux courants, qu'il est facile de se procurer et qui pour la plupart ont déjà été employés dans la conception de capteurs à fibre optique.
- Ils sont représentatifs des matériaux constitutifs des capteurs à fibre optique et des éprouvettes testés expérimentalement (cf. 4.1.1.1 et 4.1.2.1).

Parmi l'ensemble de ces matériaux, le béton est celui qui possède la plus petite limite élastique en contraintes en compression (29 MPa). Afin de vérifier l'hypothèse de comporte-

ment élastique pour chaque matériau en présence, les chargements surfaciques imposés sur les modèles ont donc une valeur inférieure à cette limite. Pour la pression surfacique imposée, il est fixé pour tous les cas d'étude : σ_{imp} = 28 MPa. La valeur de u_{imp} se déduit de cette valeur en fonction du modèle étudié (cf. 3.2). Par exemple, en considérant une éprouvette normalisée 16/32 en BO (E = 40 GPa) sur toute sa hauteur, le déplacement imposé vaut : u_{imp} = 224 µm.

3.4 Niveau 1 : Etude de la partie sensible des capteurs à fibre optique

3.4.1 Caractéristiques des modèles et des cas d'étude

La partie sensible du capteur à fibre optique a été définie au chapitre précédent (cf. 2.1.3) comme étant l'ensemble constitué par la partie de la fibre optique qui participe au mesurage (sur toute la longueur de sa base de mesure), la colle de liaison et la gaine mécanique. Le modèle de partie sensible étudié est un cas simple, mis en œuvre dans des conditionnements courants de capteurs à fibre optique industriels (cf. Figure 1.3). La fibre optique cylindrique est conditionnée par simple tubage : elle est collée au sein d'un cylindre creux servant de gaine mécanique au capteur (cf. Figure 3.1). Les chargements imposés σ_{imp} et u_{imp} ne sont appliqués qu'en tête de la gaine mécanique, afin que la fibre optique soit uniquement sollicitée par le collage.

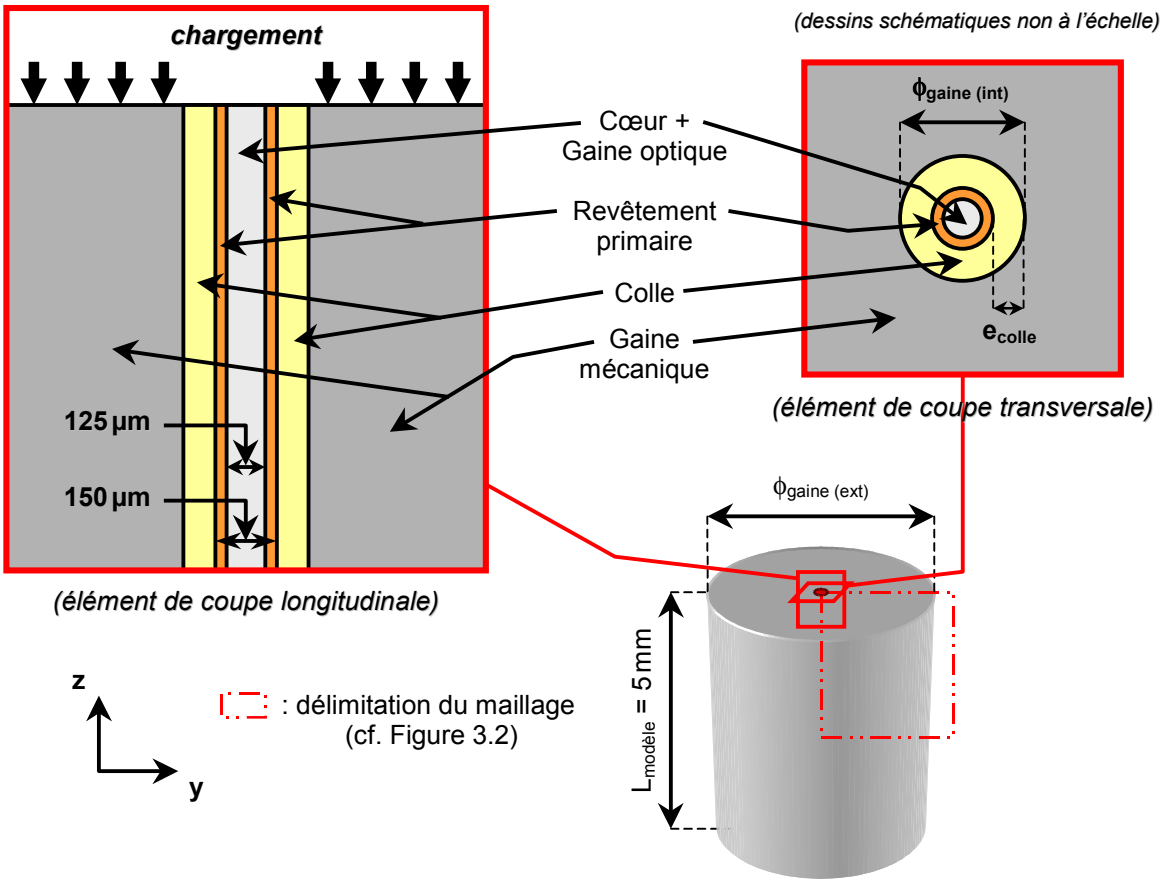


Figure 3.1 Modèle de partie sensible avec fibre optique au centre de la gaine mécanique

Les facteurs d'influence étudiés sont les suivants :

Diamètre extérieur de la gaine mécanique : $\phi_{gaine\ (ext)}$

Seulement deux valeurs sont considérées : 3,2 et 5 mm. Ce sont les valeurs des diamètres extérieurs des gaines mécaniques des capteurs à fibre optique testés expérimentalement (cf. 4.1.1.1).

Epaisseur de colle entre la fibre optique et la gaine mécanique : e_{colle}

Les valeurs considérées, de 34,6 à 200 µm, sont représentatives des épaisseurs de colle des capteurs à fibre optique testés expérimentalement mais aussi des épaisseurs optimales de joint de colle (cf. 2.2.2.2).

Caractéristiques mécaniques de la gaine mécanique : E_{gaine} ***et*** ν_{gaine}

Ces caractéristiques mécaniques sont celles de certains matériaux présentés précédemment (cf. Tableau 3.1) : polyimide, composites (polyépoxyde + fibres de verre, et, résine époxyde + fibres de carbone), aluminium, titane, invar et acier inoxydable.

De par les symétries, un maillage bidimensionnel *2D* représentant seulement le quart du modèle est effectué (cf. Figure 3.2). Les conditions aux limites de ce maillage sont représentées sur la figure. Suivant les cas d'étude, le maillage présenté est modifié : extraction d'éléments et/ou changement des caractéristiques (ρ ; E ; ν) de certains groupes d'éléments du maillage. Un exemple de cas d'étude est donné sur la figure. Du fait de ces simplifications de symétries, les calculs sont effectués en ***déformations axisymétriques***.

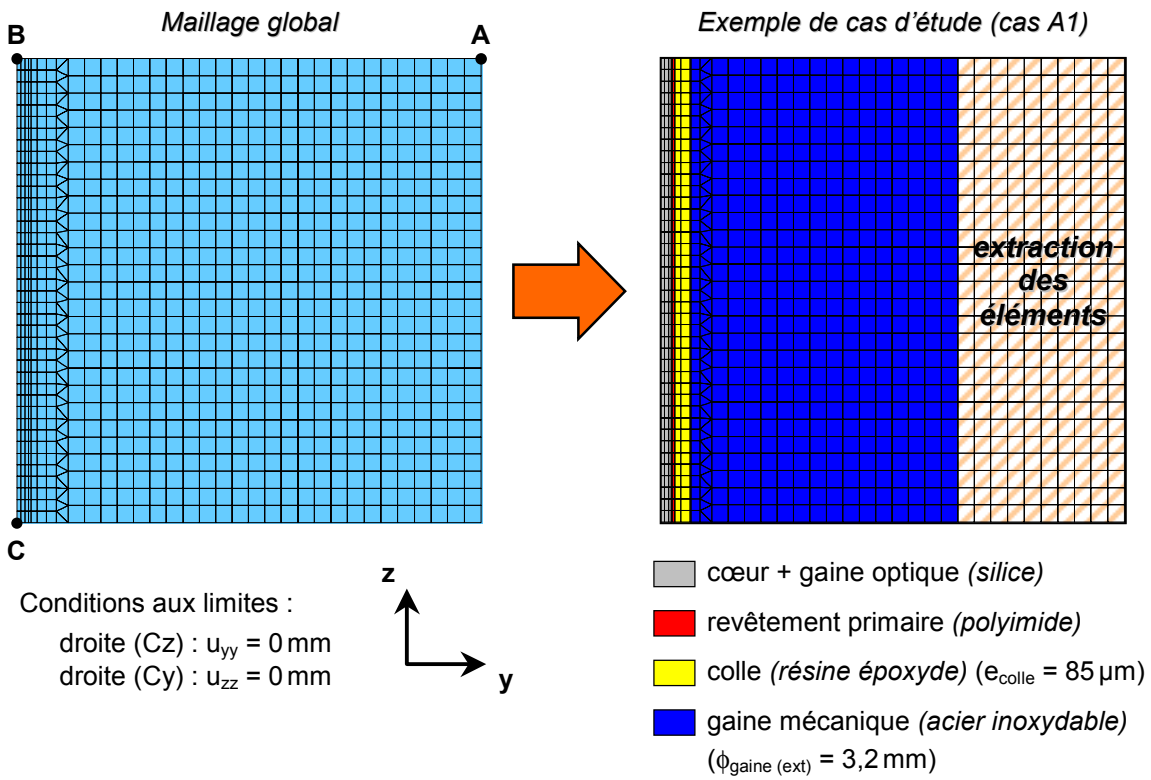


Figure 3.2 Maillages du modèle de partie sensible avec fibre optique au centre de la gaine mécanique

Un second modèle est étudié. La fibre optique est cette fois en périphérie de la gaine mécanique du capteur : elle est collée au sein d'une rainure pratiquée à sa surface (cf. Figure 3.3). Ce modèle s'inspire d'une technique de raccordement de fibres optiques, dans laquelle

les fibres optiques sont positionnées dans un *Vé* calibré [COZANNET et al., 1981]. Ce cas est étudié notamment afin de voir l'influence d'une telle structure par rapport à la première dont la réalisation est moins délicate, notamment en ce qui concerne l'usinage de la gaine mécanique du capteur. Les symétries du modèle permettent également de n'en mailler qu'un quart, mais ne rendent pas possible la réalisation d'un maillage 2D. Un maillage tridimensionnel *3D* est nécessaire.

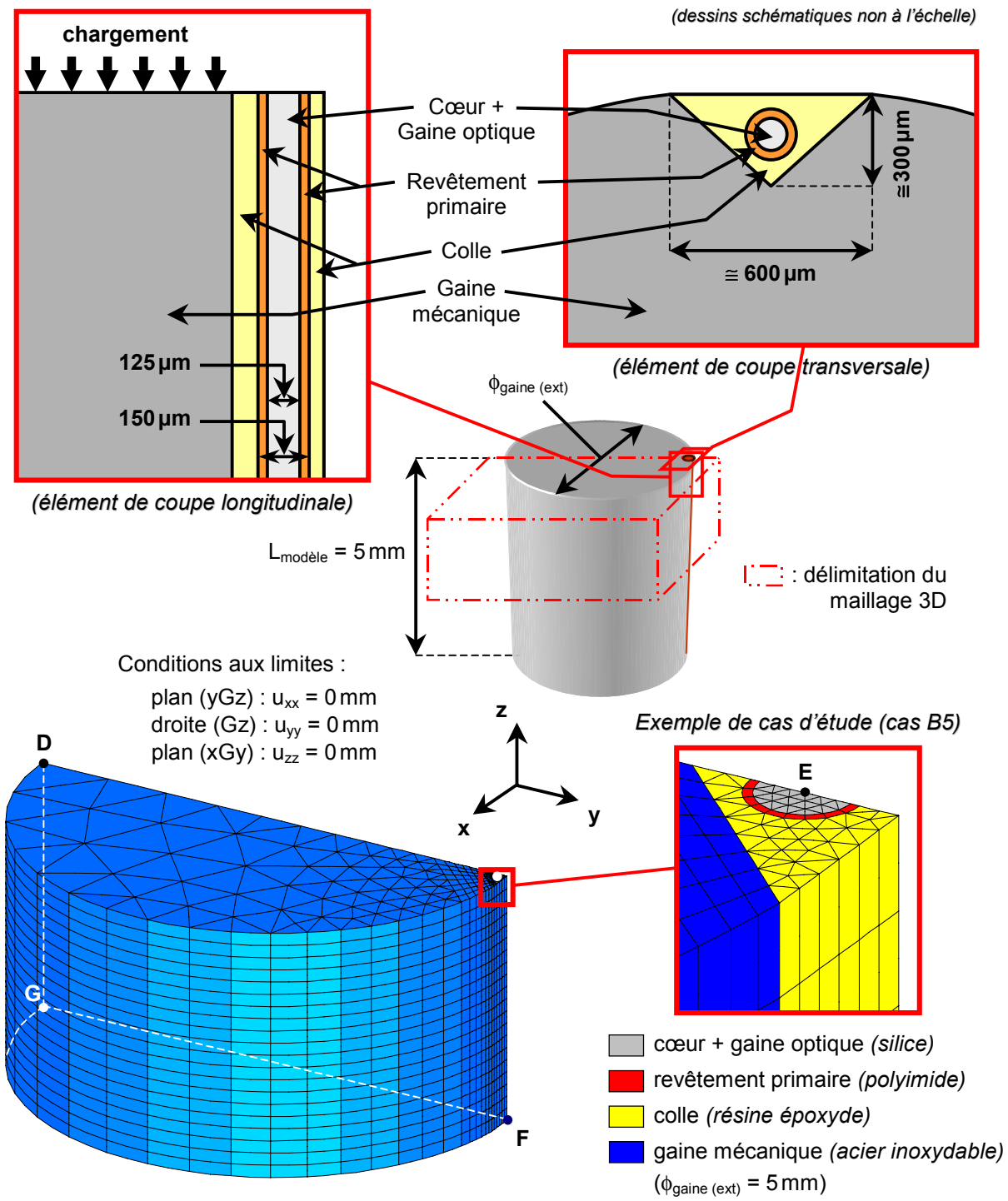


Figure 3.3 Modèle et maillage associé de partie sensible avec fibre optique en périphérie de la gaine mécanique

Il existe des invariants pour les parties sensibles considérées :

* Les fibres optiques des deux modèles sont identiques et leurs matériaux sont invariants pour tous les cas d'étude (cf. 2.1.3) :
  - Ensemble *cœur* + *gaine optique* en silice, d'un diamètre extérieur de 125 µm ;
  - Revêtement primaire en polyimide, d'un diamètre extérieur de 150 µm (épaisseur de 12,5 µm).
* La colle, pour tous les cas d'étude des deux modèles, garde les mêmes caractéristiques mécaniques (résine époxyde) (cf. 2.2.2.2).
* Les deux modèles ont une longueur fixe de 5 mm. Les longueurs des maillages ne sont donc que de 2,5 mm.

Le coefficient de perturbations (cf. 2.3) pour ces parties sensibles est défini de la manière suivante :

$$\Delta\varepsilon/\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\text{fibre optique}}}{\varepsilon_{\text{référence}}} - 1$$

avec :

- $\varepsilon_{\text{fibre optique}}$: déformation de la fibre optique sur une base de mesure définie entre ses deux extrémités (point B pour le premier modèle (cf. Figure 3.1) ou point E pour le second (cf. Figure 3.2))

$$\varepsilon_{\text{fibre optique}} = \frac{u_{zz}(\text{point B ou point E})}{\frac{L_{\text{modèle}}}{2}}$$

- $\varepsilon_{\text{référence}}$: déformation de la gaine mécanique, sans fibre optique ni colle, c'est-à-dire un cylindre plein constitué d'un seul matériau

$$\varepsilon_{\text{référence}} = \frac{\sigma_{\text{imp}}}{E_{\text{gaine}}} = \frac{u_{\text{imp}}}{\frac{L_{\text{modèle}}}{2}}$$

  En dehors de la relation ci-dessus, cette déformation est aussi déterminée à l'aide des calculs numériques en affectant dans les maillages des modèles considérés, les mêmes caractéristiques mécaniques que celles de la gaine mécanique à tous les éléments du maillage. Les écarts entre les résultats des calculs analytiques et théoriques sont négligeables pour les deux modèles étudiés :

  $\varepsilon_{\text{référence}}$ (analytique) – $\varepsilon_{\text{référence}}$ (numérique) < 0,01 µm.m^{-1} (pour $\varepsilon_{\text{référence}} \geq 140$ µm.m^{-1})

  Pour les cas d'étude du niveau 2 l'ordre de grandeur de ces écarts est le même.
- σ_{imp} = 28 MPa
- $L_{\text{modèle}}$ = 5 mm

3.4.2 Analyse des résultats

3.4.2.1 Influence des dimensions de la gaine mécanique

a) Diamètre extérieur de la gaine mécanique

Le tableau de résultats des deux cas d'étude concernant l'influence du diamètre extérieur de la gaine mécanique est présenté ci-après (cf. Tableau 3.2). L'épaisseur de colle est

fixe (e_{colle} = 85 µm) et la gaine mécanique est en acier inoxydable. La variation du diamètre extérieur de la gaine mécanique est en fait une variation de l'épaisseur d'acier inoxydable, le diamètre intérieur de la gaine restant fixe ($\phi_{gaine\ (int)}$ = 320 µm).

Tableau 3.2 Partie sensible : variation du diamètre extérieur de la gaine mécanique du modèle avec la fibre optique au centre de la gaine mécanique

Cas d'étude	$\phi_{gaine\ (ext)}$ (mm)	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$	
		σ_{imp}	u_{imp}
A1	3,2	– 13,9 %	– 13,6 %
A2	5	– 13,8 %	– 13,6 %

Les valeurs de $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ sont négatives. Les déformations de la fibre optique sont donc plus faibles que celles de la gaine mécanique de référence. C'est la même chose pour tous les autres cas d'étude réalisés pour le niveau 1 et présentés dans la suite du mémoire. L'analyse de ces valeurs y est alors faite sur leur valeur absolue : $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$.

La fibre optique est plus sollicitée pour un chargement en déplacement imposé que pour un chargement en pression imposée : $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|\sigma_{imp} > |\Delta\varepsilon/\varepsilon|u_{imp}$. Un chargement σ_{imp} correspondrait à une sollicitation appliquée en surface de la gaine mécanique par une presse constituée d'un matériau très déformable, alors que pour u_{imp} il serait indéformable. C'est pourquoi, suivant les caractéristiques mécaniques des éléments de la partie sensible, les unes par rapport aux autres, cette différence entre chargements peut être plus ou moins grande. Elle est néanmoins négligeable dans les cas présents (< 0,3 %).

Pour les cas A1 et A2, une augmentation d'environ 56 % de $\phi_{gaine\ (ext)}$ implique une diminution de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ de 0,01 % pour un chargement en pression imposée, et est invariable pour un chargement en déplacements imposés. La fibre optique se déforme alors plus : augmentation de 0,01 µm.m^{-1}. La variation du diamètre extérieur de la gaine mécanique en acier inoxydable, n'a donc pas d'incidence significative sur la déformation de la fibre optique calculée sur la base de mesure considérée (longueur du modèle maillé : 2,5 mm).

L'inertie du corps de la gaine mécanique par rapport à la fibre optique a un rôle prépondérant. En effet, le diamètre extérieur de la gaine de 3,2 mm est dix fois plus grand que son diamètre intérieur. De plus, de par la présence dans la partie sensible de matériaux se déformant plus facilement que lui, le matériau acier inoxydable est peu gêné pour se déformer. Par exemple avec un module d'élasticité longitudinale de 2 % de la valeur de celui de la gaine mécanique, la colle se déforme sous sollicitation axiale de compression 50 fois plus que la gaine mécanique en acier inoxydable (cf. Tableau 3.3).

La valeur de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ n'est pas négligeable, elle est pratiquement de 14 %. Pour une épaisseur de colle de 85 µm, et des dimensions et matériaux courants pour la fibre optique, la déformation de la fibre optique n'est donc seulement que de 86 % celle de la gaine mécanique. Etant donné la variation de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$, cette différence dépend d'autres facteurs que $\phi_{gaine\ (ext)}$.

Tableau 3.3 Partie sensible : comparaison du comportement des différents constituants

Eléments de la partie sensible	Matériau	$\varepsilon = \sigma / E$ ($\mu m.m^{-1}$)	$E_{éléments} / E_{gaine}$
Cœur + Gaine optique	Silice	400	35 %
Revêtement primaire	Polyimide	9333	1,5 %
Colle	Résine époxyde	7000	2 %
Gaine mécanique	Acier inoxydable	140	100 %

b) Dimensions, géométrie et positionnement de la cavité interne à la gaine mécanique

Etant donné que l'influence du diamètre extérieur de la gaine mécanique est négligeable pour les dimensions considérées, c'est en fait le diamètre intérieur $\phi_{gaine\ (int)}$ qui varie pour simuler différentes épaisseurs de colle e_{colle}. Les résultats des calculs réalisés pour les deux modèles (fibre optique au centre ou en périphérie de la gaine mécanique) sont consignés dans le tableau suivant (cf. Tableau 3.4). La gaine mécanique pour les cas d'étude considérés a un diamètre extérieur fixe de 5 mm et est en acier inoxydable.

Tableau 3.4 Partie sensible : variation de l'épaisseur de colle

Cas d'étude	e_{colle} (µm)	$\phi_{gaine\ (int)}$ (µm)	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$	
			σ_{imp}	u_{imp}
Fibre optique au centre de la gaine mécanique				
B1	34,6	219,2	– 10,6 %	– 10,4 %
B2	85	320	– 13,8 %	– 13,6 %
B3	137,5	425	– 16,4 %	– 16,1 %
B4	200	550	– 18,9 %	– 18,7 %
Fibre optique en périphérie de la gaine mécanique				
B5	*variable*		– 14,5 %	– 13,9 %

Les résultats obtenus pour les cas B1 à B4 montrent que plus l'épaisseur de colle est grande et moins la fibre optique se déforme. En effet, $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ augmente de 2,5 % pour une augmentation de 62 % de l'épaisseur de colle entre la fibre optique et la gaine mécanique. Les variations sont quasiment linéaires pour les cas B2 à B4. Pour l'ensemble des cas d'étude les courbes représentatives de ces variations ($e_{colle} = f(\Delta\varepsilon/\varepsilon)$) peuvent être approchée par une régression polynomiale d'ordre deux : $y = 10^{-6}x^2 - 0{,}0007x - c$, avec $c = 0{,}0825$ pour σ_{imp} et

0,0797 pour u_{imp}. D'après ces tendances, si l'épaisseur de colle tend vers 0 mm, alors $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ tend vers 8 %. La colle n'est donc pas la seule cause de ces perturbations.

La colle est un facteur prépondérant puisque les épaisseurs de colle sont en général difficilement contrôlables, surtout pour des valeurs aussi petites. Le joint de colle doit donc avoir une épaisseur la plus faible possible. Elle ne doit cependant pas être trop faible à cause de problèmes de continuité (cf. 2.2.2.2), l'épaisseur de colle de 34,6 µm étant déjà très faible. De plus, l'usinage d'une cavité d'un diamètre très petit est rendu plus délicat.

Une des difficultés du collage est d'assurer une épaisseur constante du joint de colle sur toute sa longueur. Dans le cas B5, où la fibre optique est en périphérie de la gaine mécanique en acier inoxydable, l'épaisseur de colle tout autour de la fibre optique n'est pas constante. Elle varie de 34,6 µm à un peu plus de 200 µm (cf. Figure 3.3). Néanmoins, en comparant ce cas, au cas B2, où la fibre optique est au centre de la gaine mécanique avec un volume de colle équivalent, la différence entre les valeurs de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ est inférieure à 0,7 %. La fibre optique est très légèrement plus sollicitée lorsqu'elle est liée à la gaine mécanique par la colle sur toute sa circonférence.

Pour ces cas d'étude, la géométrie et le positionnement de la cavité au sein de la gaine mécanique, n'affectent donc que très faiblement le comportement de la fibre optique. Cependant ceci n'est valable que pour le cas où la gaine mécanique est en acier inoxydable ainsi que pour des matériaux se déformant encore moins facilement. Pour des matériaux se déformant plus, soumis à des sollicitations équivalentes, l'influence des caractéristiques mécaniques de l'ensemble *fibre optique / colle* sur le comportement de la gaine mécanique, est plus grande.

3.4.2.2 Influence des caractéristiques mécaniques de la gaine mécanique

Les résultats des cas d'étude considérés sont présentés ci-après (cf. Tableau 3.5).

Tableau 3.5 Partie sensible : variation de (E ; ν) de la gaine mécanique

E_{gaine} (GPa)	ν_{gaine}	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$					
		Fibre optique au centre			*Fibre optique en périphérie*		
		Cas n°	σ_{imp}	u_{imp}	Cas n°	σ_{imp}	u_{imp}
3	0,4	C1	– 27,7 %	– 18,3 %	C8	– 40,3 %	– 21,6 %
22	0,35	C2	– 16,0 %	– 14,2 %	C9	– 19,7 %	– 15,2 %
43	0,31	C3	– 14,9 %	– 13,9 %	C10	– 17,0 %	– 14,5 %
71	0,34	C4	– 14,3 %	– 13,7 %	C11	– 15,8 %	– 14,2 %
105	0,34	C5	– 14,0 %	– 13,6 %	C12	– 15,1 %	– 14,0 %
141	0,29	C6	– 14,0 %	– 13,7 %	C13	– 14,8 %	– 14,0 %
200	0,3	C7	– 13,8 %	– 13,6 %	C14	– 14,5 %	– 13,9 %

Les variations des caractéristiques mécaniques de la gaine mécanique sont étudiées pour les deux modèles. Pour le modèle avec la fibre optique au centre de la gaine, les diamètres de celle-ci ainsi que l'épaisseur de colle sont fixes : $\phi_{gaine\ (ext)}$ = 5 mm ; e_{colle} = 85 µm (cela en traîne $\phi_{gaine\ (int)}$ = 320 µm). Le volume de colle est le même pour les deux modèles.

Les résultats de ce tableau sont présentés à la figure suivante sous formes de courbes (cf. Figure 3.4). Les courbes de cette figure présentent deux zones distinctes :

- une zone de forte variation entre 3 et environ 70 GPa, correspondant à $\Delta|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ allant jusqu'à 25 % ;
- une zone linéaire entre environ 70 et 200 GPa, pour laquelle $\Delta|\Delta\varepsilon/\varepsilon| < 1{,}3\ \%$.

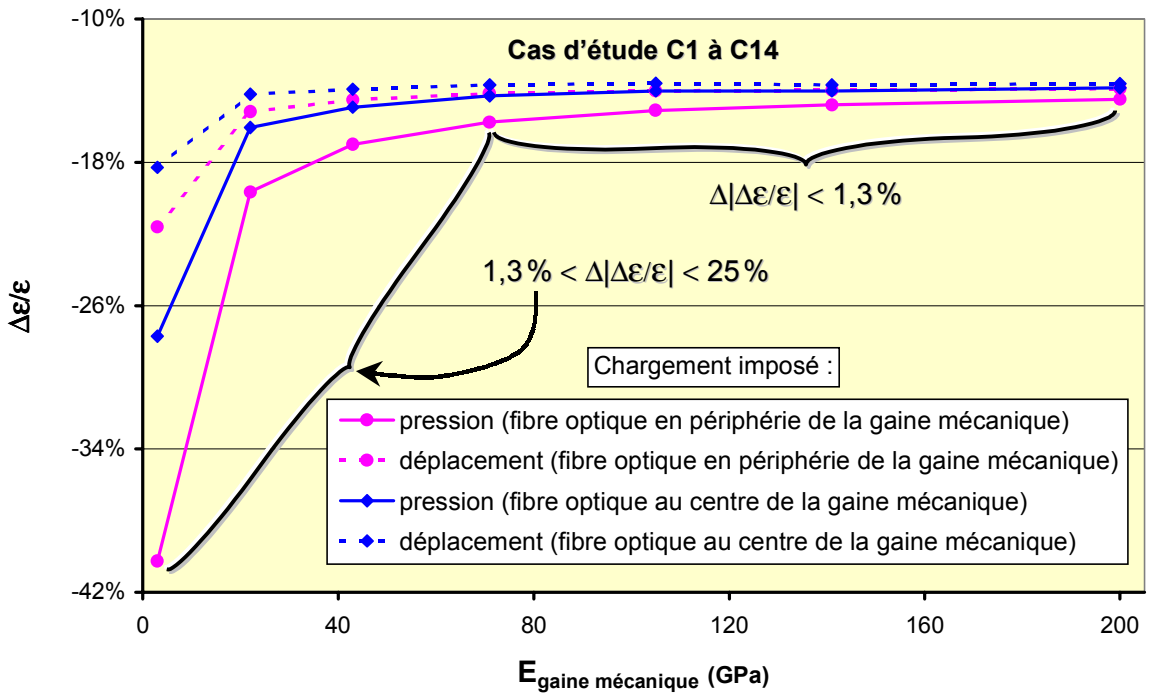


Figure 3.4 Partie sensible : variation des caractéristiques mécaniques de la gaine mécanique

L'allure de ces courbes résultent des déformations différentielles existant entre chaque matériau en présence, de par leurs caractéristiques mécaniques propres (cf. 2.2.2.1). Pour des modules d'élasticité longitudinale de la gaine mécanique supérieurs à ceux des matériaux de la cavité interne comprenant la fibre optique et la colle (module d'élasticité longitudinale le plus élevé : $E_{cœur\ +\ gaine\ optique}$ = 70 GPa), cette cavité perturbe très faiblement le comportement de la gaine. Par contre, pour des modules plus faibles elle peut influer plus fortement sur ce comportement (cf. Figure 3.5). La conséquence de ces perturbations sur le comportement de la gaine mécanique est que la fibre optique se déforme moins, pour un module d'élasticité longitudinale de la gaine de plus en plus faible.

Pour le cas où la fibre optique est en périphérie de la gaine mécanique, la différence de valeurs de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ entre σ_{imp} et u_{imp}, est à peine de 0,6 % pour l'acier inoxydable et de pratiquement 19 % pour le polyimide. En ce qui concerne le cas où la fibre optique est au centre de la gaine mécanique, ces différences sont plus faibles : moins de 0,3 % pour l'acier inoxydable et pratiquement 10 % pour le polyimide.

Les matériaux pour lesquels les modèles étudiés (fibre optique au centre ou en périphérie de la gaine mécanique) donnent des résultats quasiment identiques ($\Delta|\Delta\varepsilon/\varepsilon| = 0{,}8\,\%$), sont l'invar et l'acier inoxydable. Pour les autres matériaux, les résultats obtenus pour u_{imp} sont assez proches, avec une différence maximale d'un peu plus de 3 % pour le polyimide. Cet écart peut aller jusqu'à pratiquement 13 % pour ce même matériau pour σ_{imp}.

Afin d'éviter de trop grand écarts entre les deux types de chargement considérés, une épaisseur continue de colle tout autour de la fibre optique est donc préférable à la géométrie en périphérie qui favorise les discontinuités. Une géométrie en *U* de la rainure en périphérie serait alors plus adéquate que la géométrie en *V* étudiée, afin de mieux solliciter la fibre optique sur toute sa moitié inférieure.

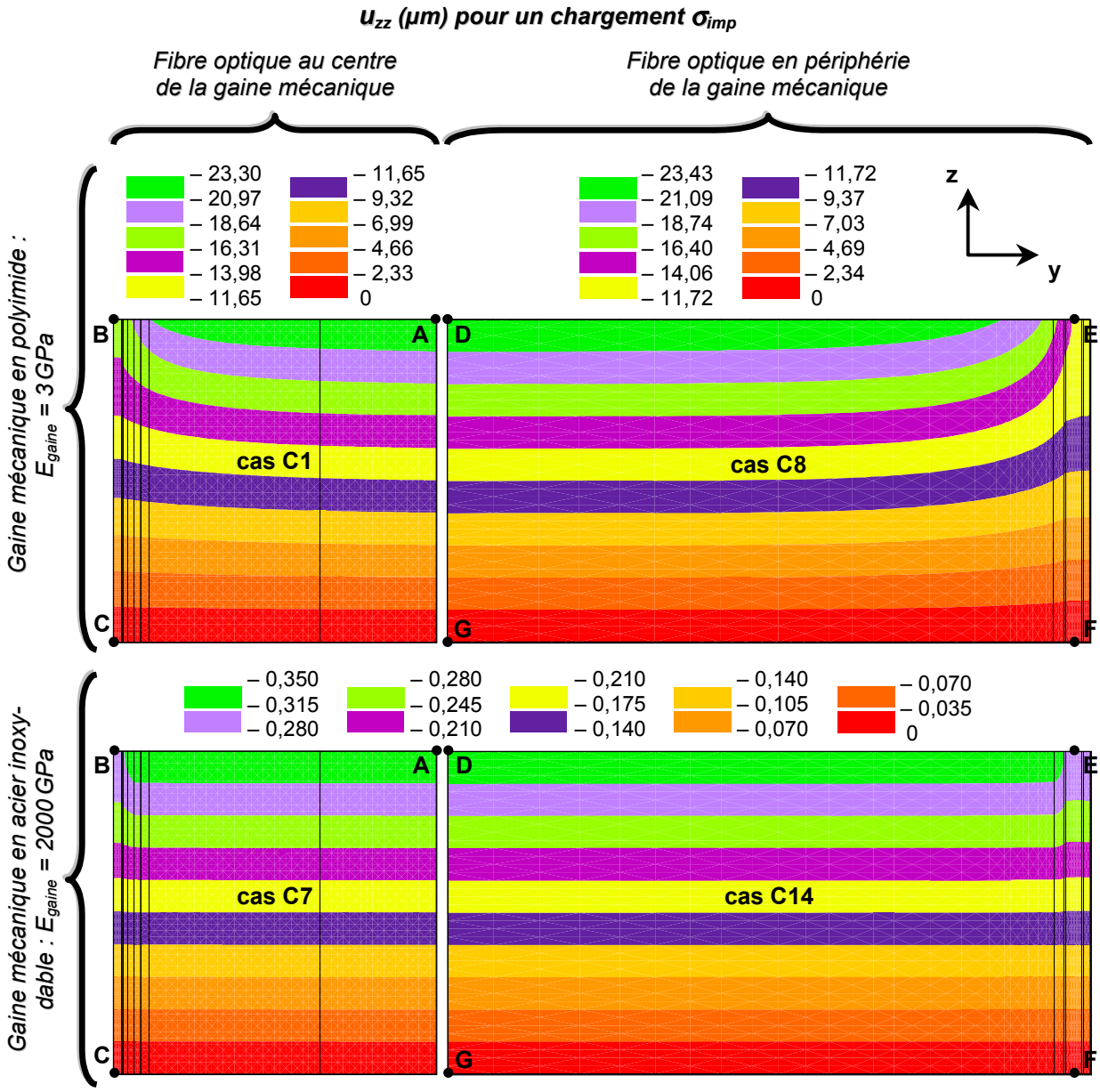


Figure 3.5 Partie sensible : zones d'isovaleurs des déplacements u_{zz} (en µm) pour des E_{gaine} particuliers pour les deux modèles en chargement en pression imposée

Pour les cas C5 et C6, pour le chargement u_{imp}, il y a inversement de tendance : $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ augmente alors que E_{gaine} augmente. Ce phénomène est dû au fait que la variation des valeurs de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ est faible entre ces deux cas, et que le coefficient de Poisson diminue, à l'inverse du module d'élasticité. Les cas D1 à D5 montrent que la variation du coefficient de Poisson de la gaine mécanique pour un module d'élasticité fixe (E_{gaine} = 43 GPa), entraîne une variation de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ (cf. Tableau 3.6) : diminution de 0,1 % pour u_{imp} et pour une augmentation du coefficient de Poisson de 13 % (cas D3 et D4). L'incidence de la variation du coefficient de Poisson de la gaine mécanique sur $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ peut donc être considérée comme négligeable. Cette variation peut néanmoins venir accentuer ou diminuer la valeur de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$, surtout lorsque cette dernière varie très peu, comme c'est le cas dans la zone linéaire des courbes présentées (cf. Figure 3.4). Par exemple, pour les cas C4 et C5 où seuls varient les modules d'élasticité, la variation de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ est inférieure à 0,1 % pour un chargement u_{imp}.

Tableau 3.6 Partie sensible : variation du coefficient de Poisson de la gaine mécanique du modèle avec la fibre optique en son centre pour E_{gaine} = 43 GPa

Cas d'étude	ν_{gaine} (E_{gaine} = 43 GPa)	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$	
		σ_{imp}	u_{imp}
D1	0,17	– 15,3 %	– 14,3 %
D2	0,25	– 15,1 %	– 14,1 %
D3	0,31	– 14,9 %	– 13,9 %
D4	0,35	– 14,8 %	– 13,8 %
D5	0,4	– 14,7 %	– 13,7 %

Les valeurs les plus faibles de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ pour les cas d'étude C1 à C14 sont de l'ordre de 14 %. Cela correspond à la zone linéaire des courbes (cf. Figure 3.4) pour une gaine mécanique en acier inoxydable. En prenant un matériau avec un module d'élasticité longitudinale plus élevé, de par la faible variation des valeurs dans cette zone, $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ ne pourra pas varier significativement pour tendre vers 0 %. L'écart estimatif minimal de 8 % pour l'épaisseur de colle (cf. 3.4.2.1 – b)) ne peut donc pas être repris en faisant varier les caractéristiques mécaniques de la gaine mécanique.

3.4.2.3 Influence de la base de mesure de la fibre optique

A la figure précédente (cf. Figure 3.5), il apparaît clairement une zone de perturbations localisées à l'extrémité de la fibre optique. La figure suivante présente les déformations de la fibre optique $\varepsilon_{fibre\ optique}$ pour les coupes CB et FE (cf. Figures 3.2, 3.3 et 3.5) des cas d'étude respectivement C7 et C14, pour un chargement σ_{imp} (cf. Figure 3.6).

Les déformations dans la zone en extrémité de fibre optique sont plus faibles que pour le reste de la fibre. Suivant la base de mesure choisie, la différence entre les valeurs de déformation de la fibre optique peuvent être importantes. Par exemple, pour une base de mesure de l'ordre de 3 mm (1,5 mm sur le modèle) $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ n'est plus que de 1,2 % alors qu'au point B, c'est-à-dire

pour une base de mesure définie entre les extrémités de la fibre optique, elle est de l'ordre de 14 %. Les écarts minimums de |Δε/ε| constatés précédemment sont donc principalement dus à ces *effets de bord*.

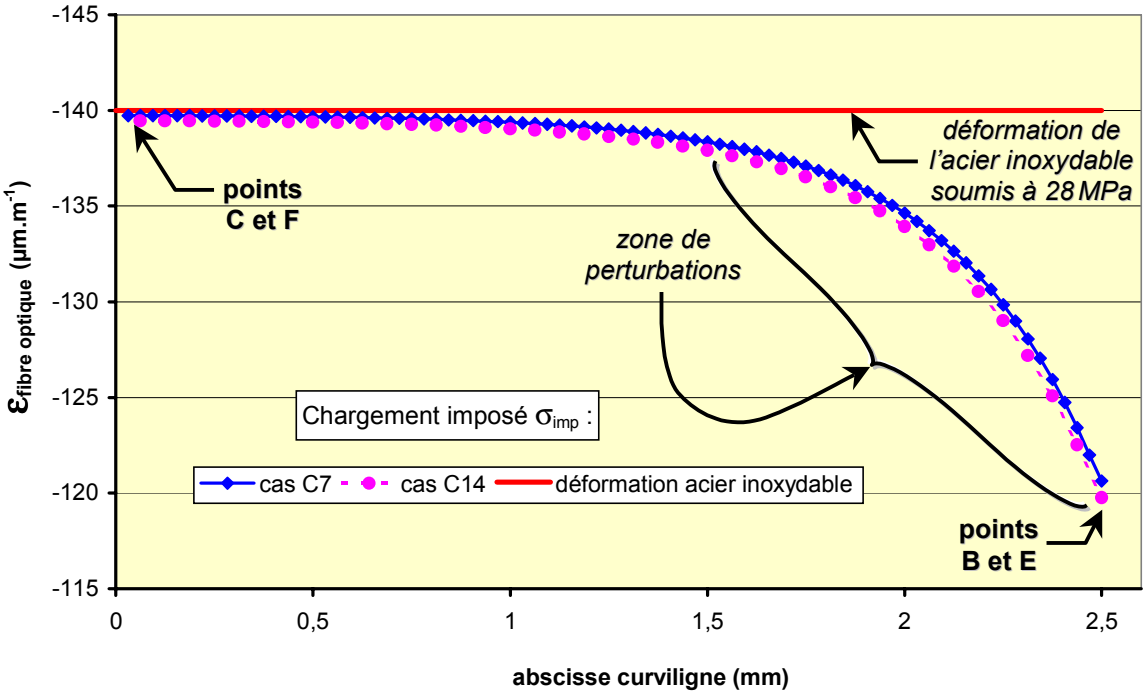


Figure 3.6 Partie sensible : déformation de la fibre optique le long de coupes longitudinales

Ces effets proviennent du fait que les sollicitations imposées sont appliquées uniquement en tête de gaine mécanique, l'extrémité de la fibre optique ne subissant pas directement le chargement en compression. Ils dépendent principalement de la taille de la cavité interne et essentiellement des épaisseurs des différents matériaux la constituant.

La base de mesure de la fibre optique dépend de la conception même du capteur, variant d'un constructeur à l'autre, ainsi que du principe de mesure (cf. 1.2.3) : elle peut être de l'ordre de quelques centimètres à quelques micromètres. Généralement, c'est une information qui n'est pas connue de l'utilisateur. Un choix pour la présente étude a dû être fait : *fibre optique collée sur toute la longueur de sa base mais pas de colle au-delà*. Les résultats présentés à la figure précédente montrent que ce choix n'est pas des plus judicieux. Il est préférable que la base de mesure de la fibre optique soit *complètement noyée* dans la colle afin de réduire les perturbations issues de ces effets de bord. Par exemple, pour le cas d'étude C7, le choix d'une base de mesure dont les extrémités sont à 1 mm des extrémités de la fibre optique permet de s'affranchir de la majeure partie de ces perturbations : la valeur de |Δε/ε| n'est plus que de 1 %.

Dans la suite, pour le niveau 2, la base de mesure de la fibre optique n'est pas considérée, l'analyse est basée sur celle du capteur. Le concepteur garantie à l'utilisateur que la déformation mesurée est celle correspondant à la base de mesure du capteur.

3.4.2.4 Liaison entre les deux niveaux d'étude

Comme expliqué en introduction du présent chapitre, la cohérence entre les deux niveaux d'étude doit être vérifiée. Le niveau 2 considère des inclusions telles que définies au chapitre précédent (cf. 2.1.3). Il convient de s'assurer que le matériau constituant l'inclusion considérée développe les mêmes champs de contraintes et de déformations qu'au sein de la partie sensible. Pour ce faire, les caractéristiques mécaniques de la partie sensible sont comparées à celles de la gaine mécanique, afin d'examiner l'impact de la présence de la cavité interne contenant la fibre optique et la colle. Cela revient à déterminer pour tous les matériaux considérés l'écart défini par la relation suivante :

$$\Delta E/E = \frac{\Delta E}{E} = \frac{E_{\text{partie sensible}}}{E_{\text{gaine mécanique}}} - 1$$

avec :

- $E_{\text{partie sensible}}$: module d'élasticité longitudinale de la partie sensible déterminé de la manière suivante :

  $$E_{\text{partie sensible}} = \frac{\sigma_{\text{imp}} \cdot L_{\text{modèle}}}{2 \cdot (u_{zz})_{\text{moyen}}}$$

  $(u_{zz})_{\text{moyen}}$ étant la moyenne des déplacements des nœuds de la gaine mécanique au niveau de la surface d'application du chargement (cf. Figures 3.1 et 3.3)

Les résultats des calculs pour les deux modèles considérés sont consignés dans le tableau suivant (cf. Tableau 3.7).

Tableau 3.7 Partie sensible : estimation de l'écart entre $E_{\text{partie sensible}}$ et $E_{\text{gaine mécanique}}$ pour un chargement en pression imposée

	ΔE/E	
Matériau	***Fibre optique au centre***	***Fibre optique en périphérie***
Polyimide	3,3 %	7,4 %
Polyépoxyde + Fibres de verre	0,6 %	1,4 %
Résine époxyde + Fibres de carbone	0,3 %	0,7 %
Aluminium	0,2 %	0,5 %
Titane	0,1 %	0,3 %
Invar	0,1 %	0,2 %
Acier inoxydable	0,1 %	0,2 %

Le matériau polyimide permet d'illustrer un comportement extrême d'un assemblage constitué d'une gaine mécanique dont le matériau est fortement déformable. Ce cas n'est pas à retenir pour une application pratique, l'ensemble *colle / fibre optique* perturbant trop significati-

vement le comportement de la gaine mécanique. Le matériau polyimide est tout de même pris en compte dans la suite pour les cas d'étude du niveau 2, afin d'illustrer des cas extrêmes de comportement. Pour tous les autres matériaux l'écart entre les modules de la partie sensible et de la gaine mécanique vérifie :

$$\Delta E/E < 1{,}4\,\%$$

Ces valeurs peuvent être considérées comme négligeables car comprises dans les aléas de fabrication de tels matériaux. Les caractéristiques mécaniques des différentes inclusions du niveau 2 peuvent donc être prises égales à celles du matériau de la gaine mécanique :

$$(E\ ;\ \nu)_{\text{partie sensible}} = (E\ ;\ \nu)_{\text{gaine mécanique}} = (E\ ;\ \nu)_{\text{inclusion}}$$

Les matériaux considérés sont toujours ceux qui ont été présentés au début du présent chapitre (cf. 3.3).

3.4.2.5 Conclusion

Différents facteurs d'influence concernant la partie sensible des capteurs à fibre optique considérés ont été analysés pour des modèles particuliers. Parmi ces facteurs, ceux qui ont une influence prépondérante sont la colle et les caractéristiques mécaniques de la gaine mécanique. Pour la colle, c'est l'épaisseur du joint de colle et ses caractéristiques mécaniques qui induisent un maximum de perturbations. Pour les caractéristiques mécaniques, la gaine mécanique doit être moins déformable que l'ensemble *fibre optique / colle* pour que cet ensemble ne perturbe pas trop de par sa présence son comportement. Ces caractéristiques mécaniques sont cependant à moduler suivant le milieu de mesure comme cela sera vu par la suite dans le second niveau d'étude.

Pour la colle, il a aussi été vu qu'elle pouvait poser des problèmes d'*effets de bord* pour la base de mesure de la fibre optique. Des écarts importants de l'ordre de 10 % pour $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ peuvent alors apparaître. Si la base de mesure de la fibre optique est correctement noyée dans la colle, avec une distance minimale à ses extrémités permettant de ne pas subir ces effets de bord, pour une épaisseur de colle correct au niveau de la conception (ex. : environ 100 µm) et pour une gaine mécanique avec des caractéristiques mécaniques sensiblement équivalentes à celles du béton, alors $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ peut être inférieur à 1 %. Dans la suite, les capteurs à fibre optique testés expérimentalement vérifient cet écart, les concepteurs assurant qu'il est compris dans la résolution même de ces capteurs (de l'ordre du micromètre).

Cette partie a également permis de créer la cohérence avec le second niveau d'étude.

3.5 Niveau 2 : Etude de l'inclusion en volume

3.5.1 Caractéristiques des modèles et des cas d'étude

Les structures des capteurs à fibre optique considérés ont été présentées au chapitre précédent (cf. Figure 2.8) et les éprouvettes cylindriques normalisées en béton considérées sont des 16/32. L'inclusion est noyée au sein de l'éprouvette en béton, positionnée en son centre et dont l'axe est confondu avec l'axe de révolution de l'éprouvette (cf. Figure 3.7). Les chargements en compression sont appliqués en tête d'éprouvette.

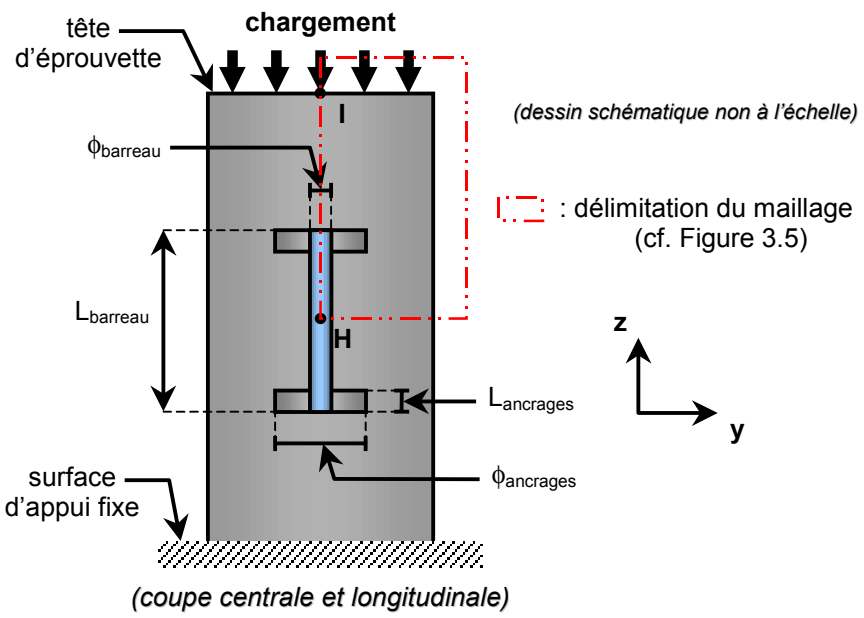


Figure 3.7 Modèle de l'inclusion en volume

Les facteurs d'influence étudiés de ce modèle sont les suivants :

Diamètre des ancrages : $\phi_{ancrages}$

Les valeurs considérées, de 5 à 30 mm, sont représentatives de celles des capteurs à fibre optique testés expérimentalement (cf. 4.1.1.1) mais aussi de capteurs plus classiques tels que des extensomètres à corde vibrante (cf. 4.1.1.2 – d)). Les deux valeurs extrêmes 5 et 30 mm, correspondent à deux cas limites d'étude, le premier étant le cas d'étude considérant uniquement la *structure barreau* (cf. Figure 2.8) pour un diamètre de gaine mécanique de 5 mm, et le second étant le maximum fixé pour l'étude.

Diamètre du barreau : $\phi_{barreau}$

Les diamètres considérés, de 3,2 et 5 mm, sont ceux des capteurs testés (cf. 4.1.1.1) avec en plus un diamètre limite de 10 mm, afin d'avoir un cas supplémentaire.

Longueur du barreau : $L_{barreau}$

Les longueurs considérés, de 70, 105 et 120 mm, sont celles des capteurs à fibre optique et des extensomètres à corde vibrante testés (cf. 4.1.1.1 et 4.1.1.2 – d)). La valeur maximale de 150 mm respecte les dimensions limites (de même pour 70 mm) présentées au chapitre précédent (cf. 2.2.4.2).

Caractéristiques mécaniques de l'inclusion et également de l'éprouvette en béton : respectivement ($E_{inclusion}$; $\nu_{inclusion}$) et ($E_{éprouvette}$; $\nu_{éprouvette}$)

Les caractéristiques mécaniques considérées pour l'inclusion sont celles de certains matériaux présentés précédemment (cf. Tableau 3.1 et 3.4.1). Le point de vue de l'utilisateur qui emploie un capteur donné avec ses propres caractéristiques, est pris en compte par l'étude de l'influence des caractéristiques mécaniques du béton de l'éprouvette sur $\Delta\varepsilon/\varepsilon$. Les différentes caractéristiques choisies sont reportées dans le tableau suivant (cf. Tableau 3.8), avec précision du type de béton et d'une application référencée dans des ouvrages scientifiques. Dans la suite du mémoire, seul le BO de type B40 est considéré comme précisé dans les hypothèses du précédent chapitre (cf. 2.1.2).

Liaisons éprouvette / inclusion :

Comme cela a été précisé au chapitre précédent (cf. 2.2.4), en réalité des frottements peuvent exister entre le béton et le capteur. Ces phénomènes sont fortement non linéaires

donc ne rentrant pas dans le cadre des hypothèses de l'étude. Il est néanmoins intéressant d'estimer l'influence de telles liaisons sur le mesurage de déformation réalisé par les capteurs à fibre optique. C'est pourquoi différents types de liaison sont simulés au niveau des ancrages et du barreau de l'inclusion : *adhérence parfaite*, *glissement*, *adhérence partielle*. Pour tous les autres cas d'étude les liaisons entre l'éprouvette et l'inclusion sont considérées comme ***parfaitement adhérentes***.

Seule la longueur des ancrages est invariante pour tous les cas d'étude : $L_{ancrages} = 5\,mm$.

Tableau 3.8 Caractéristiques mécaniques de différents bétons pour l'inclusion en volume

Type de béton		E (GPa)	ν	Exemple d'application
BO	B25	30	0,17	Bâtiment Opéra-Victoire de Paris [DE LARRARD, 2000]
BO	B40	40	0,17	Viaduc de Carrières-sur-Seine [DE LARRARD, 2000]
BHP *de base*	B80	50	0,17	Pont sur l'Elorn près de Brest [DE LARRARD, 2000]
BHP à faible chaleur d'hydratation	B60	60	0,25	Enceinte de confinement de Civaux 2 [GRANGER, 1996]
BPR	B800	70	0,28	Renforcement de structure [DUGAT et al., 1995]

Les symétries de l'ensemble *éprouvette / inclusion* permettent de ne mailler qu'un quart du modèle et de plus, en 2D (cf. Figure 3.8), avec des calculs réalisés en *déformations axisymétriques*. Les conditions aux limites sont précisées sur cette figure. Un seul maillage est réalisé pour les différents cas d'étude considérés. Pour chacun de ces cas, les propriétés (ρ ; E ; ν) de certains groupes d'éléments du maillage sont modifiées afin de simuler l'inclusion noyée au sein de l'éprouvette. Deux exemples de cas d'étude sont indiqués sur la figure.

Le coefficient de perturbations (cf. 2.3) pour ce modèle d'inclusion en volume est défini de la manière suivante :

$$\Delta\varepsilon/\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{barreau}}{\varepsilon_{référence}} - 1$$

avec :

- $\varepsilon_{barreau}$: déformation de l'inclusion sur la base de mesure situé entre les extrémités du barreau, au centre de ce dernier (cf. Figure 3.7)

$$\varepsilon_{barreau} = \frac{u_{zz(\text{extrémités barreau})}}{\frac{L_{barreau}}{2}}$$

- $\varepsilon_{référence}$: déformation de l'éprouvette 16/32 en béton sans inclusion

$$\varepsilon_{référence} = \frac{\sigma_{imp}}{E_{béton}} = \frac{u_{imp}}{\frac{L_{éprouvette}}{2}}$$

- σ_{imp} = 28 MPa
- $L_{éprouvette}$ = 320 mm

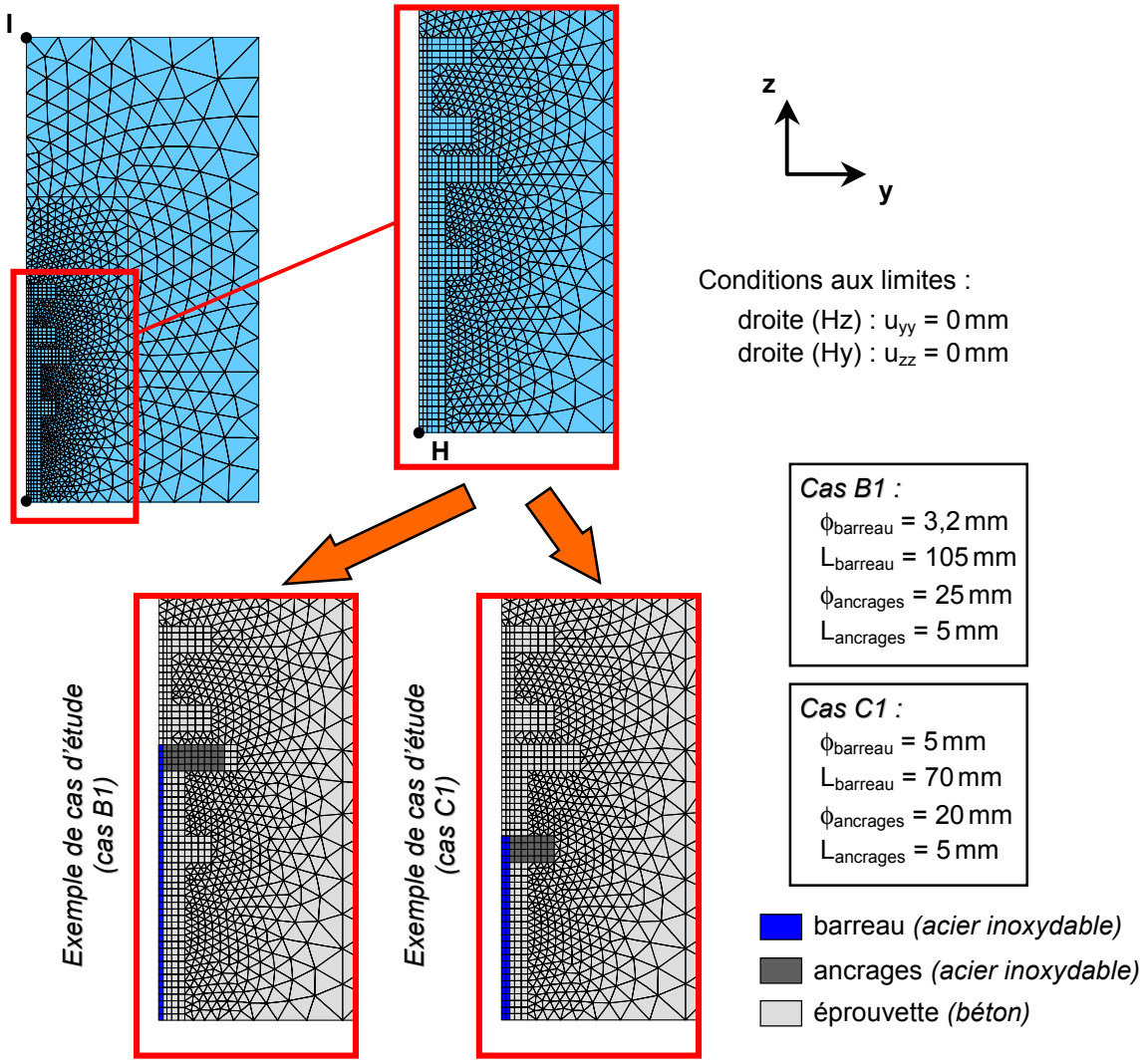


Figure 3.8 Maillages de l'inclusion en volume

3.5.2 Analyse des résultats

3.5.2.1 Influence des dimensions de l'inclusion

a) Diamètre des ancrages

Les résultats des cas d'étude réalisés sont présentés dans le tableau suivant (cf. Tableau 3.9). Les paramètres fixes sont également consignés dans ce tableau.

Les valeurs de $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ sont négatives dans tous les cas. Le barreau se déforme donc moins que l'éprouvette en béton de référence, l'inclusion ayant tendance à empêcher les déformations de l'éprouvette en béton. Ceci est valable pour la majorité des cas d'étude pour l'inclusion en volume. Dans ce qui suit l'analyse de ces valeurs est faite sur leur valeur abso-

lue : $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$. Les cas où $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ est positif, c'est-à-dire pour lesquels le barreau se déforme plus que l'éprouvette en béton de référence, sont précisés par la suite.

Tableau 3.9 Inclusion en volume : variation du diamètre des ancrages

Cas d'étude	$\phi_{ancrages}$ (mm)	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$		Paramètres fixes
		σ_{imp}	u_{imp}	
A1	5	– 9,1 %	– 9,0 %	$\phi_{barreau}$ = 5 mm
A2	12,5	– 8,3 %	– 8,1 %	$L_{barreau}$ = 105 mm
A3	20	– 8,0 %	– 7,9 %	$E_{inclusion}$ = 200 GPa
A4	25	– 8,0 %	– 7,8 %	$\nu_{inclusion}$ = 0,3
A5	30	– 8,0 %	– 7,8 %	$E_{éprouvette}$ = 40 GPa
				$\nu_{éprouvette}$ = 0,17

Pour un chargement u_{imp} le barreau a tendance à plus se déformer que pour un chargement σ_{imp} : $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|\sigma_{imp} > |\Delta\varepsilon/\varepsilon|u_{imp}$. Les raisons de cette tendance ont été expliquées au niveau 1 (cf. 3.4.2.1 – a)). Ceci est valable pour l'ensemble des cas d'étude de l'inclusion en volume, la différence, inférieure à 0,5 %, restant quand même relativement faible, voire même négligeable. Les différents facteurs considérés pour tous les cas d'étude des inclusions en volume n'ont donc pas d'influence notable sur le comportement global de l'éprouvette en béton.

Les cas A1 à A5 montrent que $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ diminue faiblement avec l'augmentation du diamètre des ancrages. En effet pour un diamètre des ancrages 6 fois plus grand, ce qui correspond à une augmentation du volume de l'inclusion d'environ 33 %, $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ varie de 1,1 % pour un chargement σ_{imp}, et de 1,2 % pour un chargement u_{imp}.

Le cas A1 correspond en fait à la *structure barreau* et les cas A2 à A5 à la *structure haltère* (cf. Figure 2.8). Avec des ancrages, le barreau se déforme plus. Il existe un *effet d'entraînement* des ancrages sur les extrémités du barreau, illustré par les isovaleurs de déplacements u_{zz} sur la figure suivante (cf. Figure 3.9). En dessous des ancrages, le béton se déforme plus que l'acier inoxydable du barreau. Par conséquent, les extrémités des ancrages se déplacent plus qu'au centre, entraînant la ligne complète où se trouve l'extrémité du barreau. Pour des diamètres des ancrages plus importants, cet effet d'entraînement n'agit plus beaucoup. Néanmoins, la différence entre ces deux structures n'est pas très importante, elle est inférieure à 1,2 %. L'intérêt de ces ancrages réside essentiellement dans le fait qu'une structure de type *haltère* est mieux solidarisée avec le béton qu'une structure de type *barreau*.

Comme précisé au chapitre précédent (cf. 2.2.4.2), aucune information n'a été recensée concernant les dimensions minimales et maximales des ancrages. Dans cette étude la longueur de ces ancrages a été fixée ($L_{ancrages}$ = 5 mm). Pour le diamètre, le choix de la valeur maximale a été arbitraire. Il convient de vérifier l'incidence d'un tel diamètre sur le comportement du béton de l'éprouvette.

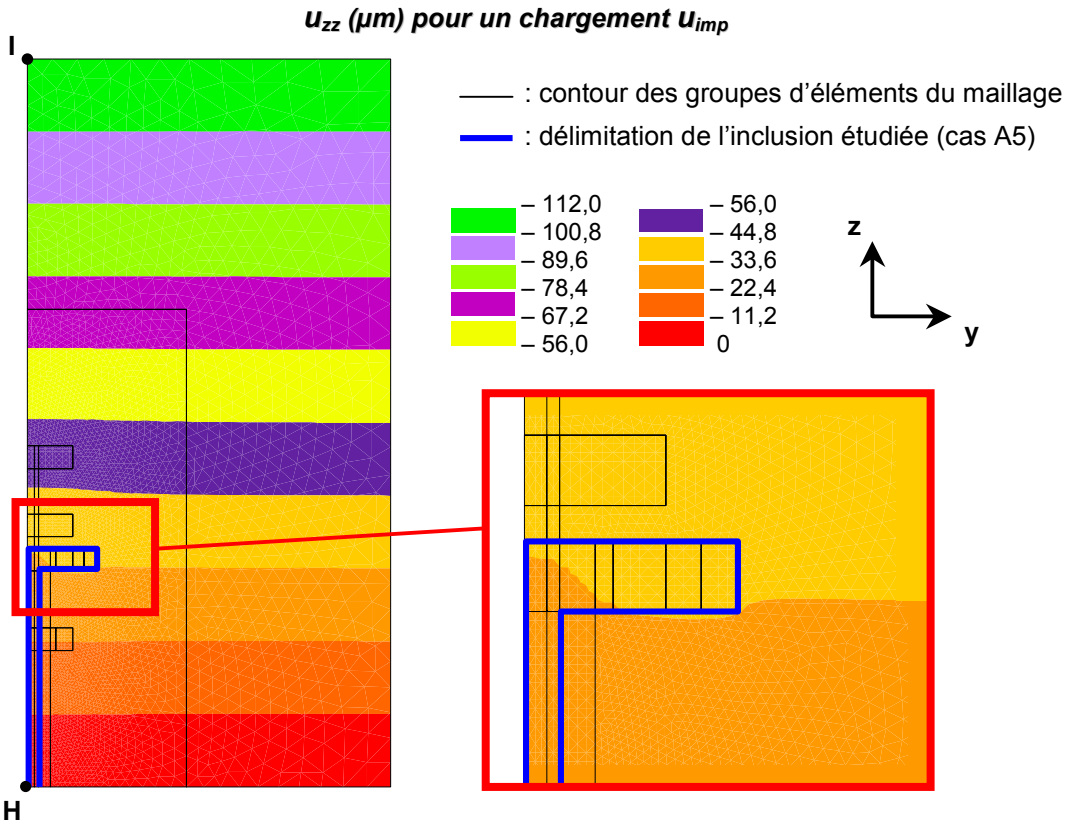


Figure 3.9 Inclusion en volume : zones d'isovaleurs des déplacements u_{zz} (en µm) pour un diamètre des ancrages de 30 mm et un chargement en déplacements imposés

Le tableau suivant (cf. Tableau 3.10) présente les valeurs maximales de $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ avec à la place de $\varepsilon_{barreau}$ la déformation minimale en surface du béton pour les trois plus grands diamètres étudiés : 20, 25 et 30 mm.

Tableau 3.10 Inclusion en volume : écarts maximums entre les déformations de surface et les déformations de référence pour différents diamètres des ancrages

Cas d'étude	$\phi_{ancrages}$ (mm)	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$[1]	
		σ_{imp}	u_{imp}
A3	20	– 0,3 %	– 0,1 %
A4	25	– 0,4 %	– 0,2 %
A5	30	– 0,5 %	– 0,2 %

[1]

$$\Delta\varepsilon/\varepsilon = \frac{\Delta\varepsilon}{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_{\text{béton surface}}}{\varepsilon_{\text{référence}}} - 1$$

avec :

$\varepsilon_{\text{béton surface}}$: déformation minimale en surface de l'éprouvette en béton avec inclusion

Le plus grand diamètre étudié implique une variation maximale de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ inférieure à 0,5 %. Ce diamètre peut être considéré comme une limite acceptable, ne perturbant que très faiblement le comportement global de l'éprouvette en béton, ce qui est également confirmé par l'allure des isovaleurs de déplacements verticaux présentées précédemment (cf. Figure 3.9). Dans la suite, pour les autres cas d'étude de l'inclusion en volume, un diamètre minimum de 20 mm a été choisi.

L'influence de l'augmentation du diamètre des ancrages sur la valeur $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ est vraiment faible. De plus la valeur minimale atteinte par $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ pour les cas étudiés, est de pratiquement 7,7 %. Des dimensions plus grandes des ancrages ne permettent pas de diminuer significativement cette valeur. Ce facteur n'est donc pas un facteur d'influence prépondérant.

b) Diamètre du barreau

Le tableau suivant présente les résultats des trois cas d'étude réalisés (cf. Tableau 3.11).

Tableau 3.11 Inclusion en volume : variation du diamètre du barreau

Cas d'étude	$\phi_{barreau}$ (mm)	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$		Paramètres fixes
		σ_{imp}	u_{imp}	
B1	3,2	– 5,7 %	– 5,6 %	$\phi_{ancrages}$ = 25 mm ; $L_{barreau}$ = 105 mm $E_{inclusion}$ = 200 GPa ; $\nu_{inclusion}$ = 0,3 $E_{éprouvette}$ = 40 GPa ; $\nu_{éprouvette}$ = 0,17
B2	5	– 8,0 %	– 7,8 %	
B3	10	– 16,0 %	– 15,5 %	

Les cas B1 à B3 montrent que $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ augmente avec l'augmentation de $\phi_{barreau}$. Pour un diamètre de barreau augmentant d'un peu plus de trois fois sa taille, $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ varie d'environ 10 % pour les deux types de chargement (σ_{imp} et u_{imp}). Donc plus la section du barreau est importante, et moins il se déforme. En effet, pour une sollicitation uniaxiale et dans le cadre des hypothèses de l'extensométrie, la loi de Hooke s'exprime de la manière suivante [NF X 10-001, 1958] :

$$\varepsilon_{zz} = \frac{F_{zz}}{E \cdot S}$$

Pour une même force de chargement et un même module d'élasticité, plus la surface de la section transversale par rapport à l'axe (0z) est importante, c'est-à-dire un diamètre du barreau plus important, et plus les déformations suivant cet axe diminuent. Cela explique aussi que plus $\phi_{barreau}$ augmente et plus la différence entre $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|\sigma_{imp}$ et $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|u_{imp}$ est importante : pour un diamètre de 3,2 mm l'écart est de 0,1 %, et pour un diamètre de 10 mm il est de 0,4 %. Ces écarts restent néanmoins faibles.

La valeur minimale de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ est de l'ordre de 6 % pour le diamètre de barreau le plus petit considéré (3,2 mm). D'après la quasi-linéarité de la variation de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ en fonction de $\phi_{barreau}$, et en supposant cette tendance valable pour de très faibles diamètres, si $\phi_{barreau}$ tend

vers 0 mm alors |Δε/ε| tend vers 0,6 %. Ces cas d'étude révèlent que le diamètre du barreau est un des facteurs dont l'influence est la plus importante sur les valeurs de |Δε/ε|.

c) Longueur du barreau

Les résultats des cas d'étude considérés sont présentés ci-après (cf. Tableau 3.12).

Tableau 3.12 Inclusion en volume : variation de la longueur du barreau

Cas d'étude	$L_{barreau}$ (mm)	Δε/ε		Paramètres fixes
		σ_{imp}	u_{imp}	
C1	70	– 11,8 %	– 11,7 %	$\phi_{ancrages}$ = 20 mm $\phi_{barreau}$ = 5 mm $E_{inclusion}$ = 200 GPa $\nu_{inclusion}$ = 0,3 $E_{éprouvette}$ = 40 GPa $\nu_{éprouvette}$ = 0,17
C2	105	– 8,0 %	– 7,9 %	
C3	120	– 7,1 %	– 6,9 %	
C4	150	– 5,7 %	– 5,5 %	

Les cas C1 à C4 montrent que |Δε/ε| diminue plus la longueur du barreau augmente. Pour une longueur de barreau 2 fois plus grande, la variation de |Δε/ε| est d'environ 6 %. Donc plus le barreau est long et plus la déformation sur la base de mesure définie entre ses deux extrémités est grande. L'épaisseur de béton entre la tête d'éprouvette et l'extrémité du barreau diminue pour des longueurs plus grandes, permettant à cette extrémité de subir des déplacements plus importants.

Par extrapolation, si $L_{barreau}$ tend vers $L_{modèle}$ qui est égale à la longueur de l'éprouvette, alors |Δε/ε| tend vers 0 %, ceci n'étant valable que pour un chargement en déplacements imposés. Cependant, comme cela a été vu au Chapitre 2, afin de limiter à 1 % l'erreur due aux effets de bords sur l'intégration des déformations sur une base de mesure donnée, cette dernière doit être inférieure à 176 mm voire 160 mm pour une éprouvette 16/32. La valeur de |Δε/ε| correspondant à cette valeur maximale, est d'environ 5 %. De plus, une longueur trop importante peut venir perturber le comportement même de l'ensemble de l'éprouvette en béton. L'influence de ce facteur est sensiblement équivalente à celle du diamètre du barreau.

3.5.2.2 Influence des caractéristiques mécaniques

a) Inclusion

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (cf. Tableau 3.13).

Pour les cas d'étude D1 à D7, |Δε/ε| varie d'environ 24 %. Cette variation n'est pas linéaire (cf. Figure 3.10). Deux zones distinctes apparaissent :

- une zone courbe de forte variation (21,4 %), pour $E_{inclusion}$ de 3 à environ 100 GPa ;
- une zone linéaire de faible variation (3,1 %), pour $E_{inclusion}$ d'environ 100 à 200 GPa.

Tableau 3.13 Inclusion en volume : variation des caractéristiques mécaniques de l'inclusion

Cas d'étude	$E_{inclusion}$ (GPa)	$\nu_{inclusion}$	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$		Paramètres fixes
			σ_{imp}	u_{imp}	
D1	3	0,4	+ 16,6 %	+ 16,3 %	
D2	22	0,35	+ 2,6 %	+ 2,5 %	$\phi_{barreau}$ = 5 mm
D3	43	0,31	– 0,7 %	– 0,7 %	$L_{barreau}$ = 105 mm
D4	71	0,34	– 3,1 %	– 3,1 %	$\phi_{ancrages}$ = 25 mm
D5	105	0,34	– 4,8 %	– 4,7 %	$E_{éprouvette}$ = 40 GPa
D6	141	0,29	– 6,2 %	– 6,1 %	$\nu_{éprouvette}$ = 0,17
D7	200	0,3	– 8,0 %	– 7,8 %	

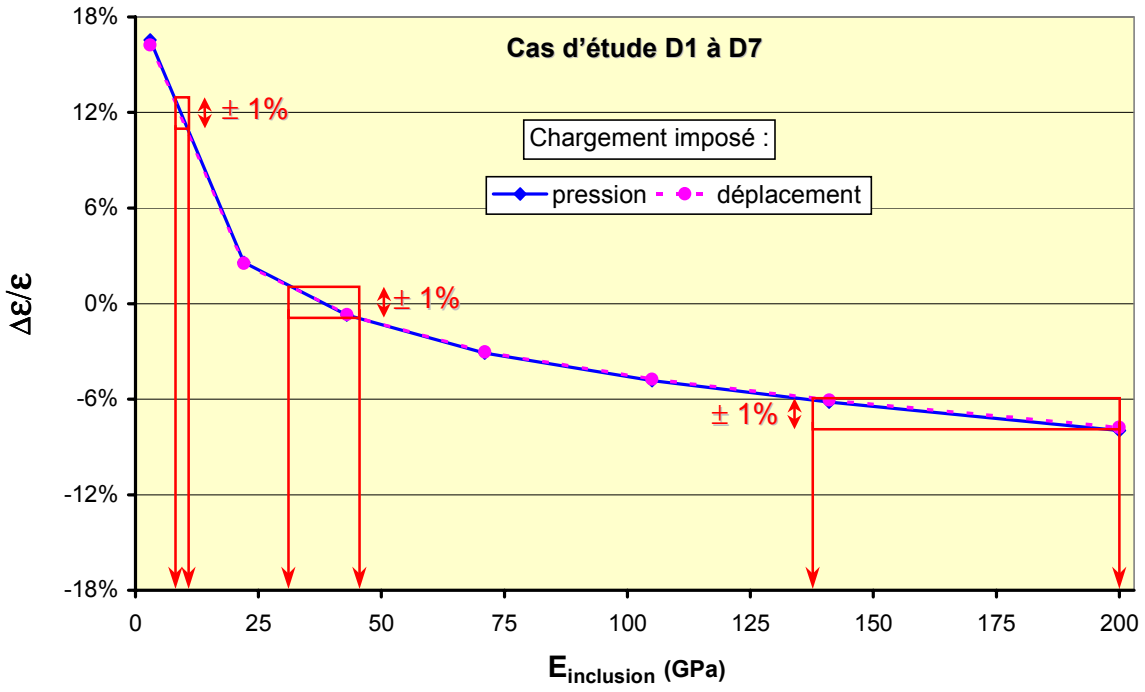


Figure 3.10 Inclusion en volume : variation des caractéristiques mécaniques de l'inclusion

Selon la valeur du module d'élasticité longitudinale, les déformations du barreau ne traduisent pas le même comportement :

* $E_{inclusion} < E_{éprouvette}$: L'inclusion constituée d'un matériau avec un module d'élasticité très faible, a tendance à se comporter comme une cavité au sein du béton, que ce dernier *remplit* lorsqu'il est soumis à sollicitation. Pour le cas du polyimide, la valeur de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ est d'un peu plus de 16 %. Ce cas est à éviter, surestimant la déformation du

béton sans inclusion ($\Delta\varepsilon/\varepsilon > 0$) et fragilisant le milieu de mesure. De plus, les intervalles de $E_{inclusion}$ correspondants à des valeurs de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ à ± 1 % près sont petits (ex. : 8 à 11 GPa). La fabrication de matériaux avec des modules d'élasticité longitudinale compris dans ces intervalles n'est pas aisée de par les aléas qui y sont liés.

* $E_{inclusion} = E_{éprouvette}$: La valeur de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ est égal à 0 %. Les déformations du barreau sont équivalentes à celles de l'éprouvette de référence. L'intervalle correspondant à ± 1 % près est plus important que le précédent mais n'offre néanmoins pas beaucoup de marge d'erreur pour la conception de tels matériaux (ex. : 32 à 46 GPa).
* $E_{inclusion} > E_{éprouvette}$: Pour le cas de l'acier inoxydable, l'inclusion se comporte comme une armature empêchant le béton de se déformer librement. Le module d'élasticité de l'inclusion est ainsi 5 fois plus élevé que celui du béton, générant une valeur de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ d'environ 8 %. Le barreau sous-estime notablement la déformation de l'éprouvette en béton sans inclusion. L'intervalle de $E_{inclusion}$ correspondant à un $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ à ± 1 % près est plus grand, ce qui permet une conception plus aisée de tels matériaux (ex. : 137,5 à 200 GPa).

Pour les cas d'étude D1 à D7, le module d'élasticité longitudinale n'est pas le seul paramètre à varier. Le coefficient de Poisson varie d'un matériau à un autre dans le respect des caractéristiques mécaniques des matériaux considérés, mais pas forcément dans le même sens que le module d'élasticité longitudinale. Son influence est étudiée en considérant une inclusion en composite ($E_{inclusion}$ = 43 GPa) dont le coefficient de Poisson peut varier suivant le procédé de fabrication. Les résultats sont consignés dans le tableau suivant (cf. Tableau 3.14). Les cas E1 à E5 montrent que l'influence de la variation du coefficient de Poisson sur $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ est très faible : pour une augmentation de $\nu_{inclusion}$ de plus de 2 fois sa valeur, la variation de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ est environ de 0,9 %. Le coefficient de Poisson de l'inclusion n'a donc pas d'effet notable sur les valeurs de $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ pour les cas D1 à D7.

Tableau 3.14 Inclusion en volume : variation du coefficient de Poisson de l'inclusion pour $E_{inclusion}$ = 43 GPa

Cas d'étude	$\nu_{inclusion}$ ($E_{inclusion}$ = 43 GPa)	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$		Paramètres fixes
		σ_{imp}	u_{imp}	
E1	0,17	– 0,4 %	– 0,4 %	$\phi_{barreau}$ = 5 mm $L_{barreau}$ = 105 mm $\phi_{ancrages}$ = 25 mm $E_{éprouvette}$ = 40 GPa $\nu_{éprouvette}$ = 0,17
E2	0,25	– 0,5 %	– 0,5 %	
E3	0,31	– 0,7 %	– 0,7 %	
E4	0,35	– 0,9 %	– 0,9 %	
E5	0,4	– 1,3 %	– 1,3 %	

Le module d'élasticité de l'inclusion est un facteur d'influence d'importance. Il permet au contraire des autres facteurs étudiés, d'annuler les perturbations ($|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ = 0 %) sans prise en compte des autres paramètres de l'inclusion.

b) Eprouvette

Dans le cadre d'un capteur conçu pour être utilisable pour une large gamme de caractéristiques mécaniques de béton, deux types d'inclusion sont étudiés : une inclusion constituée par un matériau composite avec un module d'élasticité longitudinale proche de celui d'un BO de 40 GPa, et une inclusion en acier inoxydable se déformant moins que les bétons considérés. Les résultats des cas d'étude réalisés sont consignés dans le tableau suivant (cf. Tableau 3.15). Les paramètres fixes sont les mêmes qu'au précédent tableau.

Tableau 3.15 Inclusion en volume : variation des caractéristiques mécaniques du béton pour $E_{inclusion}$ = 43 et 200 GPa

$E_{éprouvette}$ (GPa)	$\nu_{éprouvette}$	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$					
		($E_{inclusion}$ = 43 GPa ; $\nu_{inclusion}$ = 0,31)			($E_{inclusion}$ = 200 GPa ; $\nu_{inclusion}$ = 0,3)		
		Cas n°	σ_{imp}	u_{imp}	Cas n°	σ_{imp}	u_{imp}
30	0,17	F1	– 2,1 %	– 2,0 %	F6	– 9,6 %	– 9,4 %
40	0,17	F2	– 0,7 %	– 0,7 %	F7	– 8,0 %	– 7,8 %
50	0,17	F3	+ 0,4 %	+ 0,4 %	F8	– 6,8 %	– 6,7 %
60	0,25	F4	+ 1,6 %	+ 1,6 %	F9	– 5,9 %	– 5,7 %
70	0,28	F5	+ 2,6 %	+ 2,6 %	F10	– 5,1 %	– 5,0 %

Les cas d'étude F1 à F10 montrent que pour un module d'élasticité du béton doublant de valeur, $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ varie de pratiquement 5 %. Les analyses des cas D1 à D7 basées sur les différences entre $E_{inclusion}$ et $E_{béton}$, restent valables pour les présents cas d'étude.

L'inclusion en composite permet de considérer le cas où $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ est égal à 0 %. Pour ce cas, à ± 1 % près, les valeurs du module d'élasticité longitudinale du béton sont comprises entre 38 et 55 GPa, c'est-à-dire un module du béton de 46,5 GPa ± 8,5 GPa. Cette intervalle encadre les erreurs liées à la détermination expérimentale du module d'élasticité du béton par sa résistance à la compression. L'utilisateur peut dans ce cas précis bénéficier d'une marge de manœuvre plutôt confortable et maîtrisable dans la fabrication de son béton.

Le coefficient de Poisson du béton a encore moins d'incidence sur les résultats de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ que celui de l'inclusion : pour une augmentation de $\nu_{éprouvette}$ de plus de 2 fois sa valeur, $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ augmente d'environ 0,1 %.

3.5.2.3 Influence des liaisons *éprouvette / inclusion*

Des éléments de contact sans épaisseur sont introduits dans le maillage global entre l'inclusion et l'éprouvette, afin de simuler des frottements à l'interface *éprouvette / inclusion*. Le cas d'étude considéré est le D7 (cf. Tableau 3.13). Deux zones d'interface sont différenciées : au niveau des ancrages et des extrémités du barreau, et, le long du barreau. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (cf. Figure 3.16), uniquement pour le chargement en pression imposée.

Tableau 3.16 Inclusion en volume : différents types de liaison entre inclusion et béton

Cas d'étude	Liaisons inclusion / éprouvette	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$ σ_{imp}	Paramètres fixes
G1	adhérence parfaite partout	– 8,0 %	$\phi_{barreau}$ = 5 mm $L_{barreau}$ = 105 mm $\phi_{ancrages}$ = 25 mm $E_{inclusion}$ = 200 GPa $\nu_{inclusion}$ = 0,3 $E_{éprouvette}$ = 40 GPa $\nu_{éprouvette}$ = 0,17
G2	adhérence partielle au niveau des ancrages et des extrémités du barreau, et adhérence parfaite le long du barreau	– 8,0 %	
G3	adhérence partielle partout	– 8,1 %	
G4	adhérence parfaite au niveau des ancrages et des extrémités du barreau, et glissement le long du barreau	– 8,6 %	
G5	glissement partout	– 10,0 %	

L'adhérence parfaite d'une zone est obtenue en enlevant les éléments de contact de cette zone. Pour l'adhérence partielle elle est simulée à l'aide des éléments de contact par la loi de Coulomb, dont les paramètres choisis sont les suivants :

* R_T = 0,5 MPa : résistance à la traction ;
* c = 0 MPa : cohésion ;
* φ = 21,8 ° : angle de frottement (valeur pour un contact *acier / béton* d'après [PRAT et al., 1995]) ;
* ψ = 0 ° : angle de dilatance (valeur nulle en général).

Le choix des valeurs de R_T et c est arbitraire. Ces valeurs sont issues d'une étude paramétrique réalisée afin de simuler un comportement d'adhérence partielle agissant significativement sur $\Delta\varepsilon/\varepsilon$. Le glissement est obtenu en prenant tous les paramètres de la loi de Coulomb nuls.

Globalement, les cas d'étude G1 à G5 montrent que moins la liaison *éprouvette / inclusion* est adhérente et plus $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ augmente. Le barreau se déforme alors moins que l'éprouvette en béton de référence. D'autres renseignements peuvent être tirés en considérant certains cas d'étude :

- G1 et G3 : Les frottements considérés n'influencent pas significativement $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$, qui varie seulement de 0,1 %.
- G1 et G5 : La disparition de l'adhérence entre l'éprouvette et l'inclusion, implique une variation non négligeable de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ d'environ 2 %.
- G1 à G4 : La différence entre les valeurs de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ de ces cas d'étude, est au maximum de 0,7 %. L'influence de l'adhérence au niveau du barreau est donc faible. C'est l'état de l'adhérence au niveau des ancrages et des extrémités du barreau qui influence significativement les valeurs de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$.

L'apparition des frottements à l'interface *éprouvette / inclusion*, même à faible sollicitation, n'induit pas de perturbations notables. C'est principalement la géométrie des inclusions qui permet de correctement les solliciter.

3.5.2.4 Conclusion

Les facteurs d'influence prépondérants qui ont été identifiés pour l'inclusion en volume sont les suivants (cf. Figure 3.11) :

- Dimensions de l'inclusion (essentiellement le diamètre et la longueur du barreau) et de l'éprouvette qui limite les dimensions maximales de l'inclusion ;
- Caractéristiques mécaniques de l'inclusion et de l'éprouvette, essentiellement le module d'élasticité longitudinale.

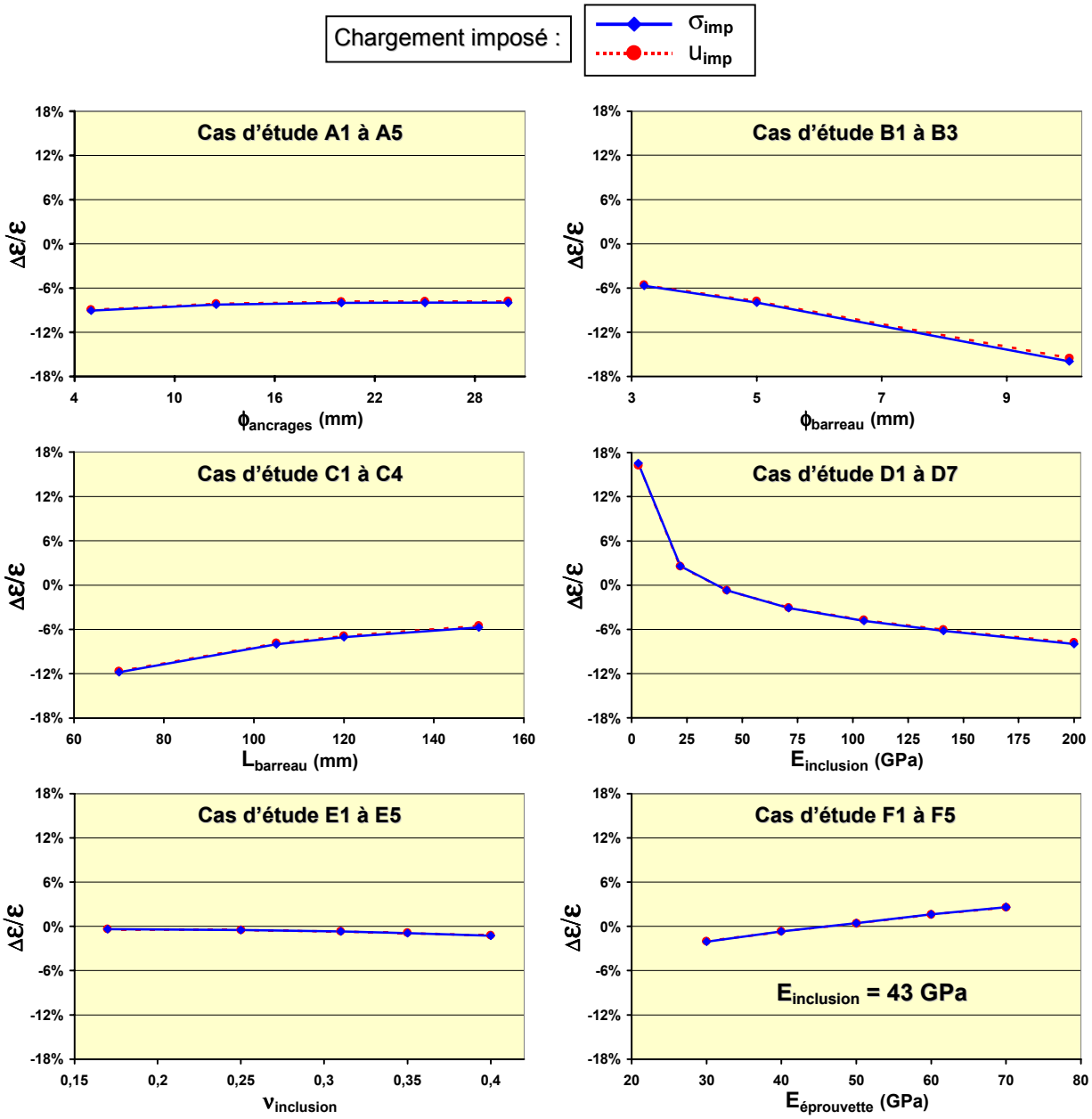


Figure 3.11 Inclusion en volume : représentation de l'ensemble des cas d'étude

C'est principalement ce qui est communément appelé pour des sollicitations en compression la *rigidité du matériau* qui influence le plus les déformations de l'inclusion. Cette rigidité est

défini par le produit du module d'élasticité longitudinale E et de la section du corps considéré. Pour un barreau, la rigidité est donc défini par :

$$E_{barreau} \cdot S_{barreau} = E_{barreau} \cdot \left(\frac{\pi \cdot (\phi_{barreau})^2}{4} \right)$$

Différents compromis peuvent être faits entre ces différents facteurs afin de corriger ou de contrôler leurs diverses influences, et ce selon les intérêts du concepteur ou de l'utilisateur. Par exemple, si l'objectif est de réduire au minimum les perturbations engendrées par la présence de l'inclusion, celle-ci devra posséder des caractéristiques mécaniques proches de celles du béton. Si au contraire une conception moins contraignante de l'inclusion est privilégiée, la déformation de cette inclusion sera affectée d'un biais systématique.

3.6 Niveau 2 : Etude de l'inclusion en surface

3.6.1 Caractéristiques des modèles et des cas d'étude

L'inclusion en surface considérée à la même géométrie que les capteurs à fibre optique en surface présentés au chapitre précédent (cf. Figure 2.8). L'éprouvette en béton considérée est une éprouvette 16/32 *modifiée* afin d'avoir deux faces planes parallèles en sa surface suivant l'axe de révolution, permettant la fixation des ancrages de l'inclusion. L'éprouvette est équipée de deux inclusions en surface (cf. Figure 3.12) permettant à l'ensemble *éprouvette / inclusions* d'avoir plus de plans de symétrie, dans le but de réduire le nombre de nœuds et d'éléments des maillages du modèle étudié.

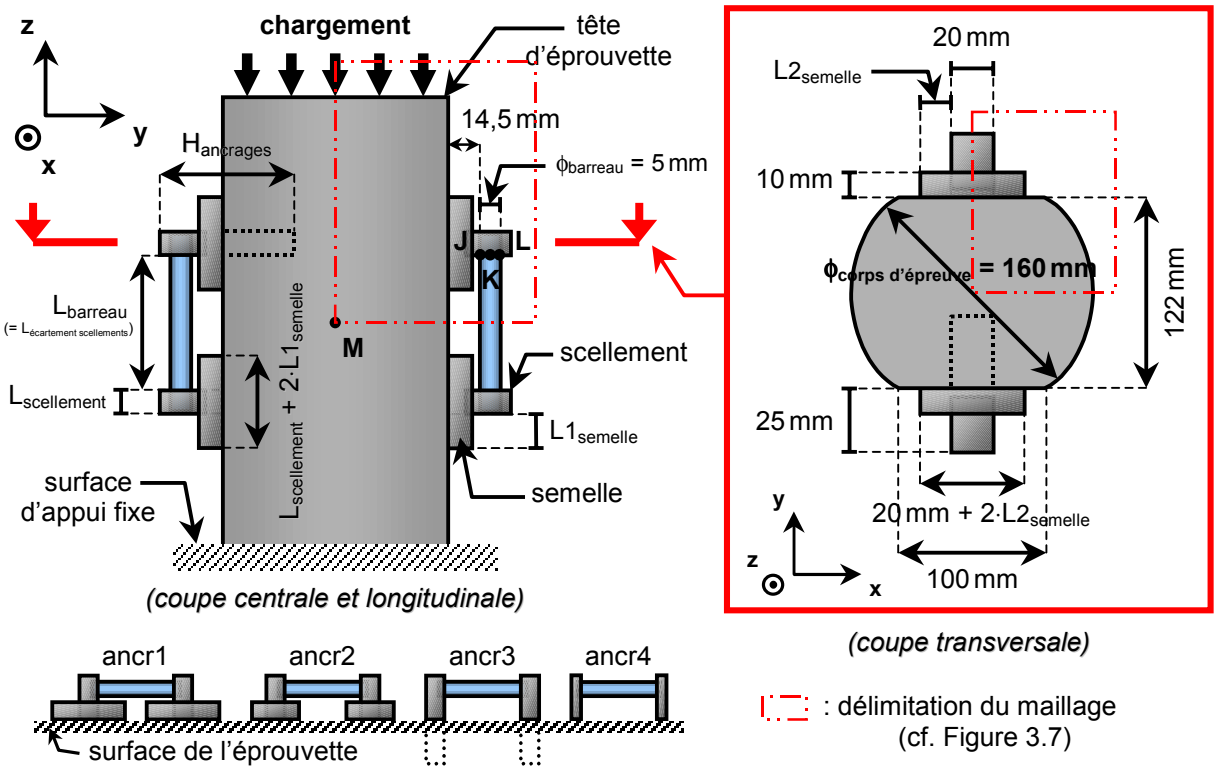


Figure 3.12 Modèle de l'inclusion en surface

Même si elles sont au nombre de deux, dans la suite il sera question de *l'inclusion en surface*. Les chargements en compression sont appliqués en tête d'éprouvette, et pour tous les cas d'étude les liaisons *éprouvette / inclusion* sont considérées comme ***parfaitement adhérentes***.

Les facteurs d'influence étudiés sont les suivants :

Géométrie des ancrages : ancr1, ancr2, ancr3 et ancr4

Quatre géométries d'ancrages différentes sont considérées (cf. Figure 3.12). Les dimensions propres à chacune d'elle sont consignées dans le tableau ci-après (cf. Tableau 3.17). Les ancrages ancr1 correspondent à ceux des capteurs à fibre optique testés expérimentalement (cf. 4.1.1.1). Les autres sont des variantes de cette géométrie.

Tableau 3.17 Dimensions des différentes géométries d'ancrages de l'inclusion en surface

Géométrie	$L1_{semelle}$ (mm)	$L2_{semelle}$ (mm)	$L_{scellement}$ (mm)
ancr1	22,5	20	15
ancr2	15	20	15
ancr3	0	0	15
ancr4	0	0	7,5

Hauteur des ancrages : $H_{ancrages}$

Les hauteurs des ancrages sont en fait liées à leur profondeur de scellement dans le béton. Les scellements sont de simples parallélépipèdes. La première hauteur considérée (25 mm) correspond à des ancrages fixés en surface de l'éprouvette sans profondeur de scellement. Les profondeurs considérées se déduisent de la première hauteur par la relation suivante : $H_{ancrages} = 25 + 15{,}25 \times n$ (n = 1 à 4). La plus grande hauteur correspond à des scellements traversant de part en part l'éprouvette.

Longueur du barreau : $L_{barreau}$

Seulement deux valeurs sont considérées : 75 et 85 mm. La première correspond à celle des capteurs à fibre optique de surface testés expérimentalement (cf. 4.1.1.1). La deuxième correspond à l'encombrement maximal de 160 mm d'un capteur avec des ancrages ancr1 (cf. 2.2.4.2). La longueur du barreau $L_{barreau}$ définit également l'écartement des scellements, notamment dans les cas où le barreau n'est pas modélisé.

Caractéristiques mécaniques de l'inclusion, avec différentiation entre le barreau et les ancrages : respectivement ($E_{barreau}$; $\nu_{barreau}$) et ($E_{ancrages}$; $\nu_{ancrages}$)

Ces caractéristiques mécaniques sont celles de certains matériaux présentés en début de chapitre (cf. Tableau 3.1 et 3.4.1).

Le diamètre du barreau ($\phi_{barreau}$ = 5 mm) ainsi que les caractéristiques mécaniques du béton de l'éprouvette ($E_{éprouvette}$ = 40 GPa ; $\nu_{éprouvette}$ = 0,17) sont invariants.

De par ses symétries seulement un huitième du modèle étudié peut être maillé. Cependant celles-ci ne permettent pas la réalisation de maillages 2D, les différents maillages étant obligatoirement en 3D. Un des maillages est présenté ci-après (cf. Figure 3.13). Il s'agit du

maillage le plus général : le barreau à un diamètre de 5 mm et une longueur de 75 mm, et les ancrages ont une géométrie ancr1. Les autres maillages sont obtenus en modifiant ce maillage à l'aide du pré-processeur MAX de CESAR-LCPC : extraction et/ou déplacement de certains éléments du maillage. Les différents cas d'étude sont donc obtenus en considérant tous ces maillages et en modifiant les propriétés (ρ ; E ; ν) de différents groupes. Un exemple illustre ces modifications sur la figure.

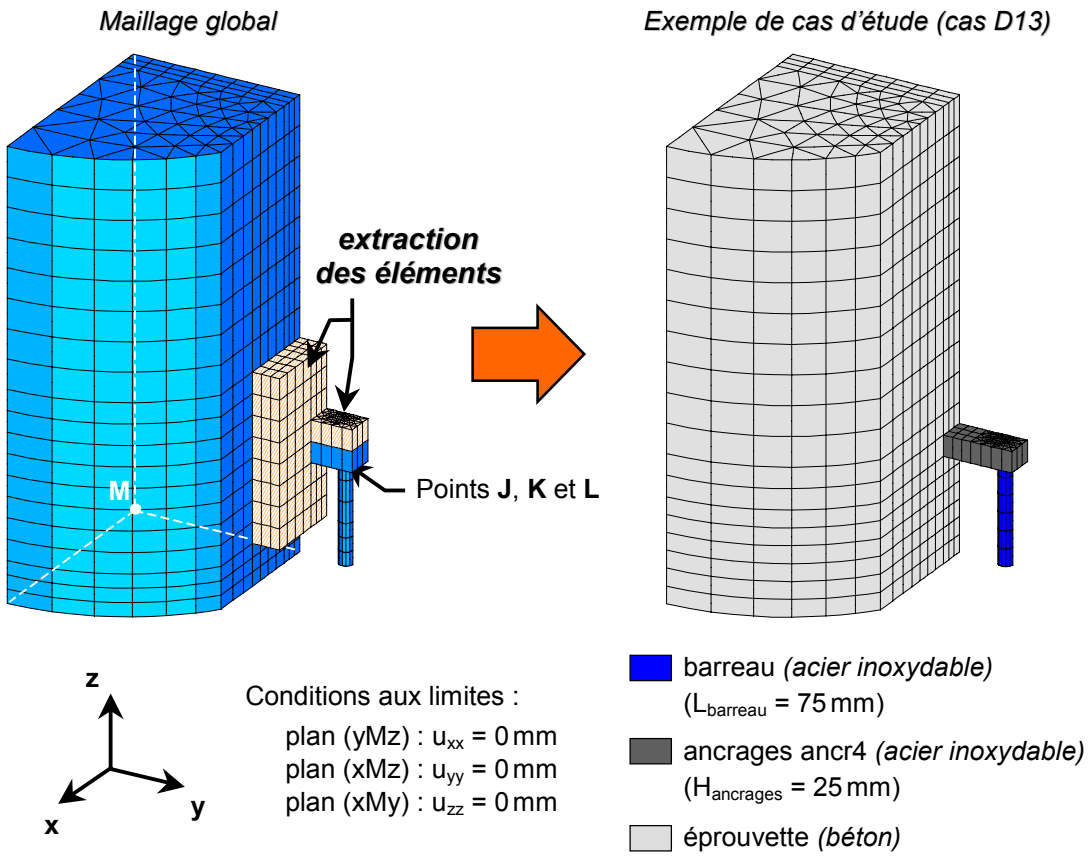


Figure 3.13 Maillages de l'inclusion en surface

Le coefficient de perturbations (cf. 2.3) pour l'inclusion en surface est défini de la même manière que celui de l'inclusion en volume (cf. 3.5.1). La base de mesure considérée pour $\varepsilon_{barreau}$ est définie au centre du barreau, au niveau du point K (cf. Figure 3.12).

3.6.2 Analyse des résultats

3.6.2.1 Influence des dimensions de l'inclusion

a) Géométrie des ancrages

Les cas d'étude réalisés considèrent quatre différentes géométries d'ancrages (cf. Figure 3.12 et Tableau 3.17) : ancr1, ancr2, ancr3 et ancr4. Les résultats associés sont consignés dans le tableau suivant (cf. Tableau 3.18). Le barreau n'est pas modélisé afin d'analyser uniquement l'influence des ancrages.

Tableau 3.18 Inclusion en surface : variation de la géométrie des ancrages

Cas d'étude	Géométrie des ancrages	Δε/ε		Paramètres fixes
		σ_{imp}	u_{imp}	
A1	ancr1	+ 14,5 %	+ 17,4 %	sans barreau $L_{écartement\ scellements}$ = 75 mm $H_{ancrages}$ = 25 mm $E_{ancrages}$ = 200 GPa $\nu_{ancrages}$ = 0,3
A2	ancr2	+ 17,0 %	+ 18,6 %	
A3	ancr3	+ 20,5 %	+ 20,5 %	
A4	ancr4	+ 10,3 %	+ 10,3 %	

Les valeurs de Δε/ε sont positives pour ces quatre cas d'étude. La déformation calculée entre scellements est donc plus élevée que celle de l'éprouvette en béton sans inclusion. En fait, le module d'élasticité longitudinale est cinq fois plus élevé que celui du béton. Les ancrages se déformant donc peu comparé à l'éprouvette, ont un mouvement d'ensemble conditionné par des déplacements u_{zz} plus élevés que ceux de la référence au droit du point K. En effet, les zones d'isovaleurs des déplacements verticaux pour ces cas d'étude présentées ci-après (cf. Figure 3.14), montrent que pour le cas A3 par exemple, les déplacements du côté du scellement le plus proche de la tête d'éprouvette, sont quasiment les mêmes que ceux du côté où se trouve le point K. Pour la majorité des autres cas d'étude de l'inclusion en surface, les valeurs de Δε/ε sont aussi positives. C'est pourquoi, par la suite, l'analyse de ces valeurs est faite sur leur valeur absolue (|Δε/ε|), et les cas où Δε/ε est négatif, c'est-à-dire où la déformation entre scellements est plus faible que celle de l'éprouvette en béton de référence, sont précisés.

Pour les présents cas d'étude, le chargement en déplacements imposés rapproche plus les deux scellements qu'en pression imposée : $(\Delta\varepsilon/\varepsilon)\sigma_{imp} < (\Delta\varepsilon/\varepsilon)u_{imp}$. Le chargement σ_{imp} a tendance à plus déformer le centre de l'éprouvette que sa surface du fait du module d'élasticité longitudinale plus élevé des ancrages par rapport à celui du béton (cf. 3.4.2.1 – a)). Cette tendance est valable pour l'ensemble des cas d'étude de l'inclusion en surface pour lesquels $E_{ancrages} > E_{éprouvette}$.

Les cas d'étude A1 à A3 montrent que plus les dimensions des semelles sont importantes et plus |Δε/ε| est faible. Les semelles permettent aux scellements de réduire leur déplacement d'ensemble et donc de diminuer le déplacement du point K. En effet, pour le cas d'étude A3 où seuls les scellements servent d'ancrages il y a plus de 20 % d'écart entre la déformation entre scellements et celle de référence, alors qu'avec des semelles massives et les mêmes scellements (cas A1) cet écart est inférieur à 17,5 %. Les semelles apportent cependant des perturbations supplémentaires aux champs de contraintes et de déformations au sein du béton (cf. Figure 3.14). Les écarts entre les valeurs de |Δε/ε| des deux chargements confirment ces perturbations : pratiquement 3 % pour le cas A1 et pour les cas A3 et A4 cette différence est inférieure à 0,1 %.

En réduisant la largeur du scellement, l'écart entre les déplacements entre scellements et les déplacements de l'éprouvette sans inclusion diminue notablement : |Δε/ε| varie d'environ 10 % en passant de la géométrie du cas A3 (ancr3) à celle cas A4 (ancr4). Or, les plus faibles

valeurs de |Δε/ε| sont obtenues pour le cas A4 (10,3 %). Elles restent néanmoins importantes. En réduisant d'avantage la longueur des scellements ($L_{scellement}$), |Δε/ε| peut alors s'approcher de 0 %. Des scellements trop fins peuvent cependant entraîner des problèmes de flexion surtout avec un barreau se déformant peu comparé au béton de l'éprouvette.

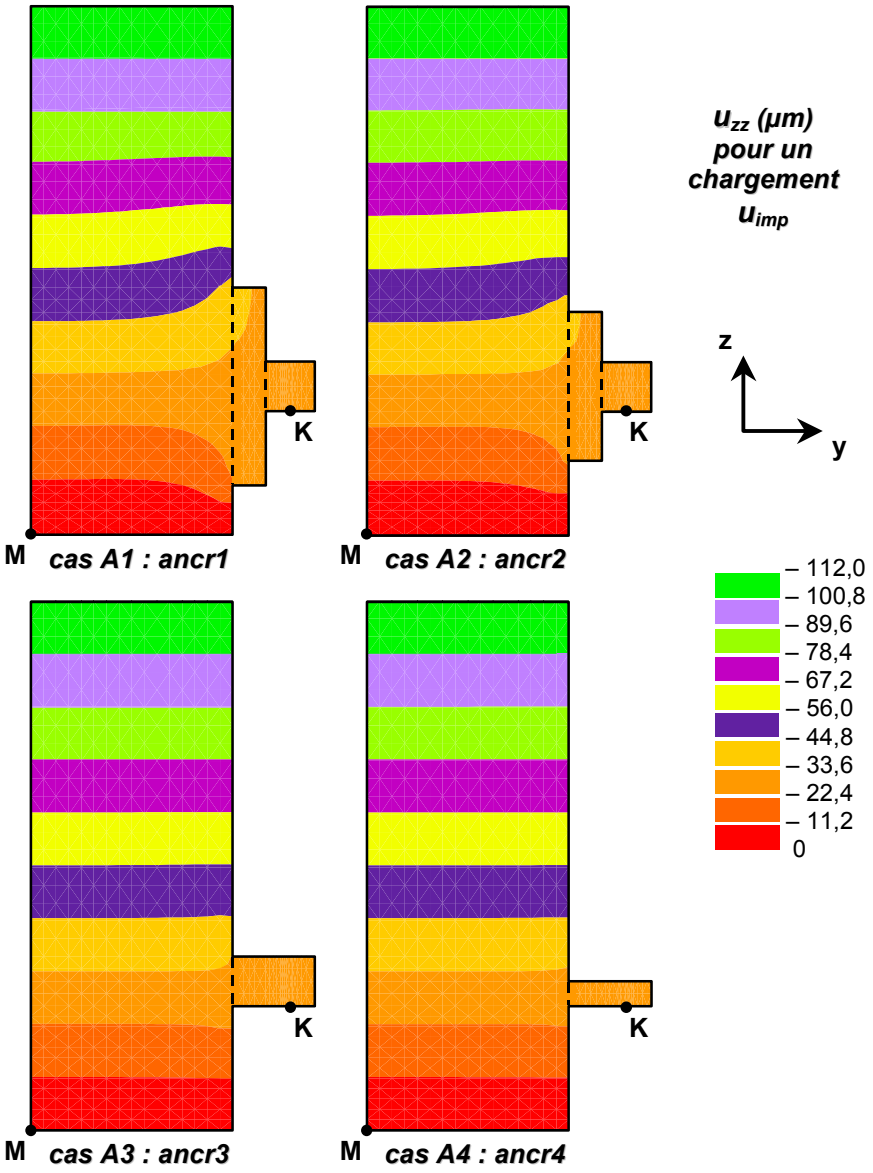


Figure 3.14 Inclusion en surface : zones d'isovaleurs des déplacements u_{zz} (en µm) pour différentes géométries des ancrages et pour un chargement en déplacements imposés

La géométrie des ancrages est un facteur d'influence d'importance : une réduction de volume de moitié de l'ancrage entraîne une diminution de 10 % sur |Δε/ε|. L'influence de la géométrie est néanmoins intimement liée aux caractéristiques mécaniques de l'éprouvette et des ancrages mêmes, mais également à celles du barreau (cf. 3.6.2.2 – a)).

b) Hauteur des ancrages

Les résultats associés aux cas d'étude considérés sont présentés dans le tableau suivant (cf. Tableau 3.19). La géométrie des ancrages pour ces cas d'étude est ancr3. Cette géométrie est moins favorable que ancr4 comme cela a été vu précédemment mais les scellements correspondant au sein du béton ont des dimensions et une géométrie proches de celles des scellements des capteurs testés expérimentalement (cf. 4.1.1.1). Il n'y a toujours pas de barreau pour ces cas d'étude.

Tableau 3.19 Inclusion en surface : variation de la hauteur des ancrages

Cas d'étude	$H_{ancrages}$ (mm)	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$		Paramètres fixes
		σ_{imp}	u_{imp}	
B1	25	+ 20,5 %	+ 20,5 %	ancr3 sans barreau $L_{écartement\ scellements}$ = 75 mm $E_{ancrages}$ = 200 GPa $\nu_{ancrages}$ = 0,3
B2	40,25	+ 19,1 %	+ 19,6 %	
B3	55,5	+ 18,1 %	+ 19,1 %	
B4	70,75	+ 17,2 %	+ 18,6 %	
B5	86	+ 16,5 %	+ 18,3 %	

Les cas B1 à B5 montrent que plus les scellements sont profonds et plus $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ diminue. Cette variation est d'environ 4 % pour un chargement σ_{imp} et d'un peu plus de 2 % pour un chargement u_{imp}. Les scellements se déplacent plus, d'avantage influencés par le déplacement d'ensemble de l'éprouvette. Les écarts entre les valeurs de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ des deux chargements pour un même cas, sont de plus en plus grands lorsque $H_{ancrages}$ augmente. Les ancrages étant plus volumineux, ils perturbent donc plus le comportement du béton (cf. Figure 3.15).

Le type d'ancrages et les profondeurs étudiés ne permettent pas aux valeurs $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ de se rapprocher sensiblement de 0 % (environ 16 % pour le minimum). La hauteur des ancrages, ou profondeur des scellements, n'est donc pas un facteur d'influence prépondérant pour les cas d'étude considérés. La géométrie ancr4 est préférable et est choisie par la suite pour les autres cas d'étude de l'inclusion en surface. Elle est comparée à la géométrie ancr1 qui est celle correspondant aux capteurs testés expérimentalement (cf. 4.1.1.1). Par contre, aucune profondeur de scellement n'est prise en compte ($H_{ancrages}$ = 25 mm) pour l'ensemble de ces cas d'étude, excepté pour l'étude de l'influence des caractéristiques mécaniques des ancrages (cf. 3.6.2.2 – b)), car leur influence n'est pas réellement significative pour une profondeur proche de celle des capteurs testés (cf. 4.2.2.2) : la variation de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ entre le cas B1 et le cas pour lequel $H_{ancrages}$ = 47 mm serait de moins de 2 % pour σ_{imp} et moins de 1 % pour u_{imp}.

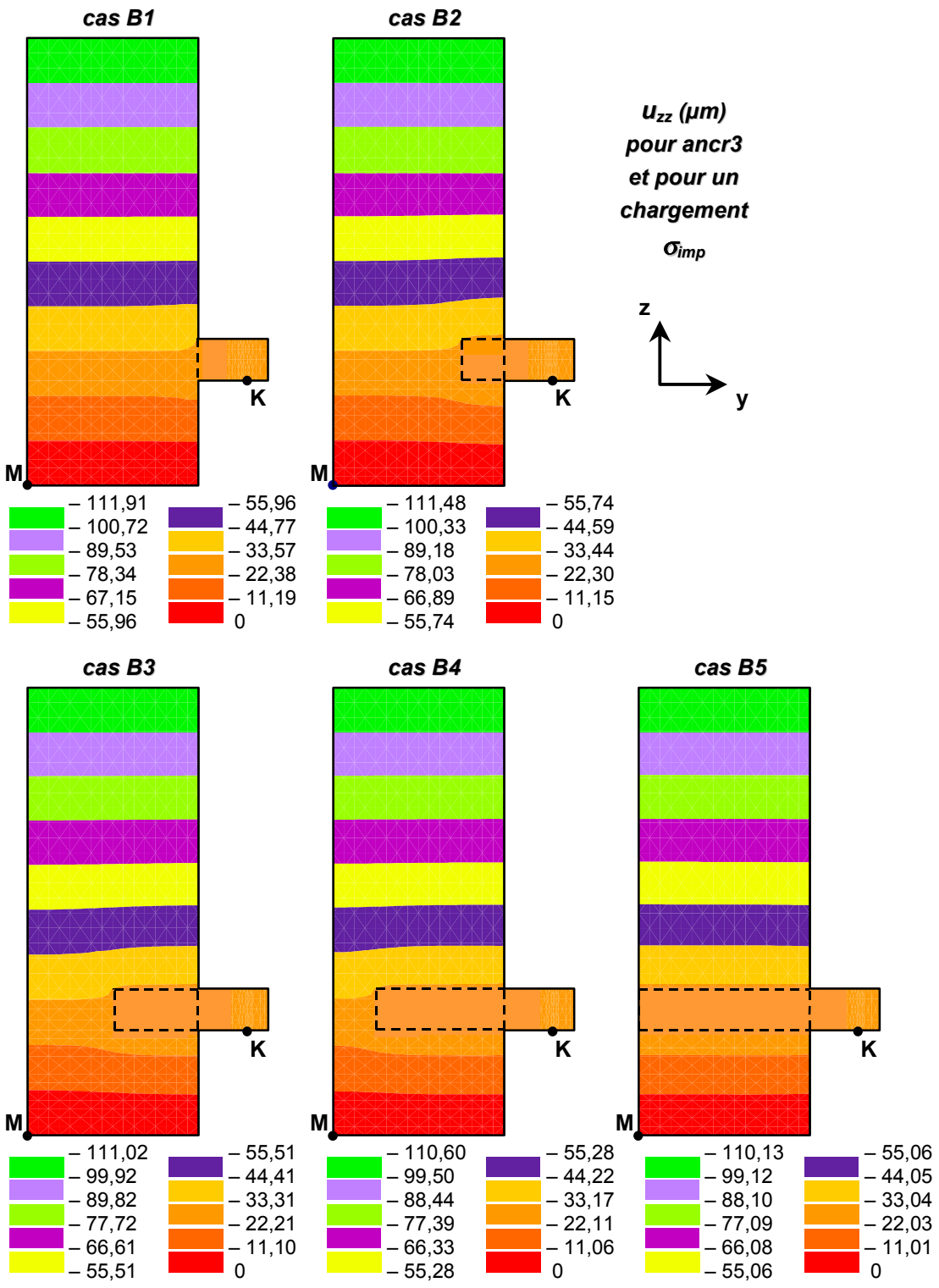


Figure 3.15 Inclusion en surface : zones d'isovaleurs des déplacements u_{zz} (en µm) de différentes profondeurs de scellement et pour un chargement en pression imposée

c) Longueur du barreau

Les résultats pour les cas d'étude considérés sont présentés dans le tableau suivant (cf. Tableau 3.20). Les cas C1 et C2, dont la géométrie des ancrages est ancr4, ne considèrent

toujours pas de barreau afin d'identifier la part d'influence des ancrages seuls dans les variations de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$.

Tableau 3.20 Inclusion en surface : variation de la longueur du barreau

Cas d'étude	$L_{barreau}$ (= $L_{écartement\ scellements}$) (mm)	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$		Paramètres fixes
		σ_{imp}	u_{imp}	
C1	75	+ 10,3 %	+ 10,3 %	ancr4 ; sans barreau ; $H_{ancrages}$ = 25 mm $E_{ancrages}$ = 200 GPa ; $\nu_{ancrages}$ = 0,3
C2	85	+ 9,2 %	+ 9,3 %	

Pour ces cas d'étude, plus la distance entre scellement est importante, et plus $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ diminue. Lorsque les scellements s'écartent, chacun d'eux subit moins les perturbations engendrées dans le béton par celui qui lui est associé sur une même face de l'éprouvette. La variation maximale de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ pour le type d'ancrages étudié (ancr4) est néanmoins de l'ordre de 1 %, ce qui est relativement faible pour une augmentation d'environ 13 % de la longueur entre scellements.

Du fait de l'encombrement de ces ancrages, cette longueur ne peut excéder 135 mm (cf. 2.2.4.2). En considérant la tendance observée pour les cas d'étude C1 et C2 vérifiée jusqu'à ce maximum, une augmentation d'environ 80 % de $L_{barreau}$ (en prenant comme référence la longueur de 75 mm) implique une variation de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ de l'ordre de 6 %. Ce qui correspond alors à une valeur de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ de pratiquement 4 % : l'écart entre la déformation entre scellements et celle de la référence diminue, mais cette dernière est toujours surestimée par la première ($\Delta\varepsilon/\varepsilon > 0$). Dans la configuration envisagée (ancrages en acier inoxydable et de type ancr4), ce facteur n'a donc pas assez d'influence pour faire tendre $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ vers 0 %.

Par la suite la seule longueur considérée est $L_{barreau}$ = 75 mm.

3.6.2.2 Influence des caractéristiques mécaniques de l'inclusion

a) Barreau

Les présents cas d'étude sont réalisés pour deux géométries d'ancrages (ancr1 et ancr4) en acier inoxydable ($E_{ancrages}$ = 200 GPa ; $\nu_{ancrages}$ = 0,3) avec $H_{ancrages}$ = 25 mm. Le tableau suivant présente les résultats associés (cf. Tableau 3.21).

La figure suivante (cf. Figure 3.16) illustre l'évolution de $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ en fonction des caractéristiques mécaniques du barreau pour les deux types d'ancrages étudiés (ancr1 et ancr4). La variation de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ est au maximum d'un peu plus de 20 % pour ancr1 et de pratiquement 80 % pour ancr4, pour les deux types de chargement. Suivant le type d'ancrages les courbes de la Figure 3.16 n'ont pas la même allure : elles sont quasiment linéaires pour les cas ancr1 alors qu'elles ne le sont pas pour les cas ancr4 qui présentent une forte décroissance. Le barreau influence moins le comportement des ancrages pour ancr1 : plus $E_{barreau}$ est élevé et plus le barreau déforme les ancrages. Les semelles et une longueur de scellements plus importante permettent aux ancrages de moins se déformer. Pour de faibles valeurs de $E_{barreau}$ (de quelques

GPa) de par la géométrie de type ancr4, le barreau déforme les ancrages entraînant une sous-estimation des déformations de l'éprouvette en béton sans inclusion ($\Delta\varepsilon/\varepsilon < 0$).

Tableau 3.21 Inclusion en surface : variation des caractéristiques mécaniques du barreau

$E_{barreau}$ (GPa)	$\nu_{barreau}$	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$					
		ancr1			*ancr4*		
		Cas n°	σ_{imp}	u_{imp}	Cas n°	σ_{imp}	u_{imp}
3	0,4	D1	+ 14,1 %	+ 17,1 %	D8	+ 4,7 %	+ 4,7 %
22	0,35	D2	+ 11,7 %	+ 14,6 %	D9	– 20,5 %	– 20,5 %
43	0,31	D3	+ 9,2 %	+ 12,1 %	D10	– 37,1 %	– 37,1 %
71	0,34	D4	+ 6,0 %	+ 8,9 %	D11	– 50,9 %	– 50,8 %
105	0,34	D5	+ 2,5 %	+ 5,3 %	D12	– 61,1 %	– 61,1 %
141	0,29	D6	– 1,0 %	– 1,8 %	D13	– 68,1 %	– 68,0 %
200	0,3	D7	– 6,2 %	– 3,5 %	D14	– 75,3 %	– 75,3 %

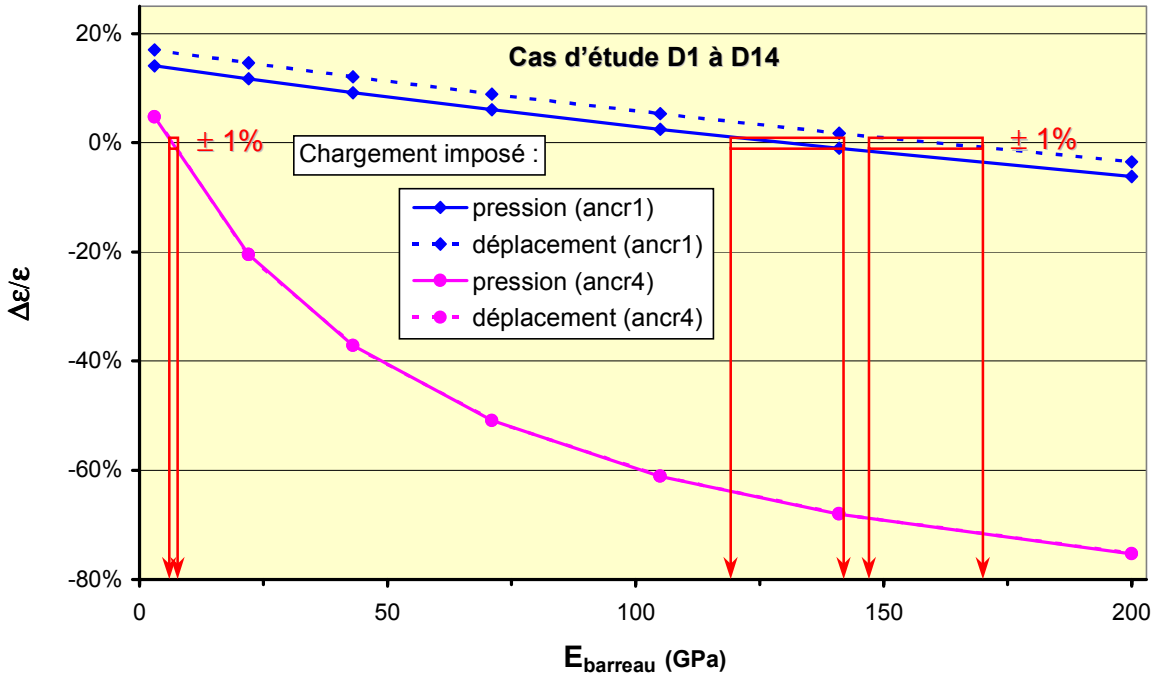


Figure 3.16 Inclusion en surface : variation des caractéristiques mécaniques du barreau avec des ancrages en acier inoxydable

Le passage par 0 %, c'est-à-dire pour des déformations du barreau identiques à celles de l'éprouvette en béton sans inclusion, ne se fait pas pour les mêmes valeurs de $E_{barreau}$:

- Pour les ancrages ancr1, $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ s'annule pour des intervalles de $E_{barreau}$ qui ne sont pas les mêmes selon le type de chargement :
  - pour σ_{imp}, $E_{barreau}$ est compris entre 128,1 et 148,1 GPa, soit environ une valeur de 138 GPa ± 10 GPa ;
  - pour u_{imp}, $E_{barreau}$ est compris entre 157,5 et 177,5 GPa, soit environ une valeur de 167 GPa ± 10 GPa.

  Un matériau tel que l'invar se déformant moins que le béton, permet de corriger les perturbations engendrées par les ancrages. Par contre l'inclusion, composée par des ancrages massifs en acier inoxydable et par un barreau en invar, perturbe sensiblement le comportement de l'éprouvette en béton (cf. Figure 3.17).
- Pour les ancrages ancr4, $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ s'annule pour σ_{imp} et u_{imp}, pour $E_{barreau}$ compris entre 5,5 et 7 GPa, soit environ une valeur de 6,3 GPa ± 0,8 GPa. Un faible module d'élasticité pour le barreau permet de corriger les perturbations créées par les ancrages de type ancr4. Le barreau perturbe ainsi très peu le comportement du béton de l'éprouvette (cf. Figure 3.17).

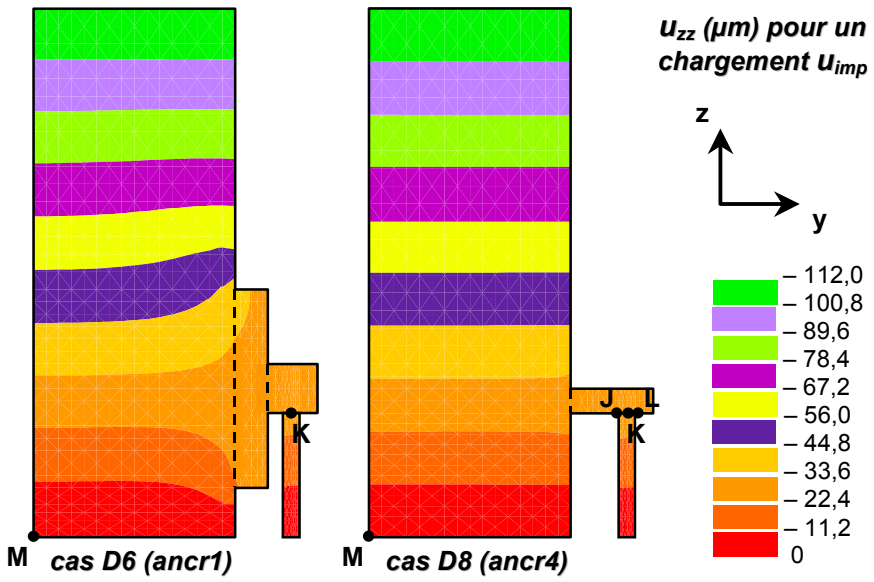


Figure 3.17 Inclusion en surface : zones d'isovaleurs des déplacements u_{zz} (en µm) de deux types d'ancrages (ancr1 et ancr4, avec $E_{barreau}$ = 141 et 3 GPa), pour u_{imp}

Deux modèles de partie sensible ont été précédemment analysés : fibre optique au centre et en périphérie du corps du capteur (cf. 3.4). Le deuxième modèle peut poser des problèmes pour le cas de l'inclusion en surface. En effet, pour le cas D8 avec un chargement u_{imp} par exemple (cf. Figure 3.17), les valeurs de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ ne sont pas les mêmes en périphérie du barreau (point J et point L) et en son centre (point K) :

- au point J : $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ = 5,6 % ; au point L : $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ = 3,9 % ;
- au point K : $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ = 4,7 %.

L'écart entre les deux points en périphérie est pratiquement de 1,7 %. Cet écart peut aller jusqu'à 26 % avec un barreau en acier inoxydable. Plus le module d'élasticité longitudinale du

barreau est élevé et plus les ancrages se déforment, provoquant des écarts de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ pouvant être importants pour les points du diamètre défini par la droite (JL).

Le module d'élasticité longitudinale du barreau est un facteur d'influence d'importance. Une augmentation d'environ 65 % du module d'élasticité du barreau (de 43 à 71 GPa) entraîne une variation de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ de pratiquement 14 % pour les ancrages ancr4. L'influence du coefficient de Poisson sur les résultats des cas D1 à D14 est négligeable : la variation du coefficient de Poisson de l'inclusion (de 0,17 à 0,4) pour un barreau en composite (avec un $E_{barreau}$ de 43 GPa) et pour des ancrages ancr4, entraîne une diminution de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ de moins de 0,3 %.

b) Ancrages

Les cas d'étude E1 à E8 ont été réalisés sans modéliser le barreau, afin de quantifier uniquement l'influence due aux perturbations générées par les ancrages seuls. Les résultats de ces cas d'étude sont consignés dans le tableau suivant (cf. Tableau 3.22). De même que pour le barreau, les géométries d'ancrages ancr1 et ancr4 sont considérées, avec $H_{ancrages}$ = 25 mm.

Tableau 3.22 Inclusion en surface : variation des caractéristiques mécaniques des ancrages pour $H_{ancrages}$ = 25 mm

$E_{ancrages}$ (GPa)	$\nu_{ancrages}$	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$					
		ancr1			*ancr4*		
		Cas n°	σ_{imp}	u_{imp}	Cas n°	σ_{imp}	u_{imp}
3	0,4	E1	+ 19,2 %	+ 19,3 %	E5	+ 10,0 %	+ 10,0 %
71	0,34	E2	+ 16,3 %	+ 18,2 %	E6	+ 10,2 %	+ 10,2 %
141	0,29	E3	+ 15,1 %	+ 17,7 %	E7	+ 10,2 %	+ 10,3 %
200	0,3	E4	+ 14,5 %	+ 17,4 %	E8	+ 10,3 %	+ 10,3 %

La tendance et les ordres de grandeur de la variation de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ pour une augmentation du module d'élasticité longitudinale des ancrages de 3 à 200 GPa, ne sont pas les mêmes pour les deux ancrages considérés :

- Pour ancr1, $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ diminue : variation de l'ordre de 5 % pour σ_{imp} et pratiquement de 2 % pour u_{imp}. La géométrie de ces ancrages massifs induit une diminution des déplacements des scellements au point K.
- Pour ancr4, $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ augmente : variation inférieure à 0,3 % pour σ_{imp} et u_{imp}. Les ancrages se déformant moins ont donc un déplacement d'ensemble plus important comme cela a été précisé précédemment (cf. 3.6.2.1 – a)), induisant une augmentation des déplacements des scellements au point K. Cette augmentation reste tout de même très faible.

L'influence des caractéristiques mécaniques des ancrages peut être encore plus grande lorsque ces derniers possèdent une profondeur de scellement au sein du béton et qu'en plus un

barreau leur est adjoint. Des cas d'étude ont été réalisés dans ce sens et les résultats sont consignés dans le tableau suivant (cf. Tableau 3.23). Le barreau est en polyimide avec des ancrages de type ancr4 et une hauteur $H_{ancrages}$ = 70,75 mm. Ces cas correspondent à la configuration précédente pour laquelle la valeur de $|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ est proche de 0 %.

Tableau 3.23 Inclusion en surface : variation des caractéristiques mécaniques des ancrages pour $H_{ancrages}$ = 70,75 mm

Cas d'étude	$E_{ancrages}$ (GPa)	$\nu_{ancrages}$	$\Delta\varepsilon/\varepsilon$		Paramètres fixes
			σ_{imp}	u_{imp}	
F1	3	0,4	– 51,9 %	– 52,6 %	ancr4 $H_{ancrages}$ = 70,75 mm $L_{barreau}$ = 75 mm $E_{barreau}$ = 3 GPa $\nu_{barreau}$ = 0,4
F2	43	0,31	– 2,6 %	– 2, 6 %	
F3	200	0,3	+ 4,5 %	+ 5,0 %	

Pour le cas F1 les scellements sont dans un matériau dont le module d'élasticité est inférieur à celui du béton, d'où la même tendance que pour l'inclusion en volume entre les deux types de chargement : $(\Delta\varepsilon/\varepsilon)\sigma_{imp} > (\Delta\varepsilon/\varepsilon)u_{imp}$. Le scellement noyé dans le béton est fortement déformé alors que la partie en surface se déforme peu (cf. Figure 3.18).

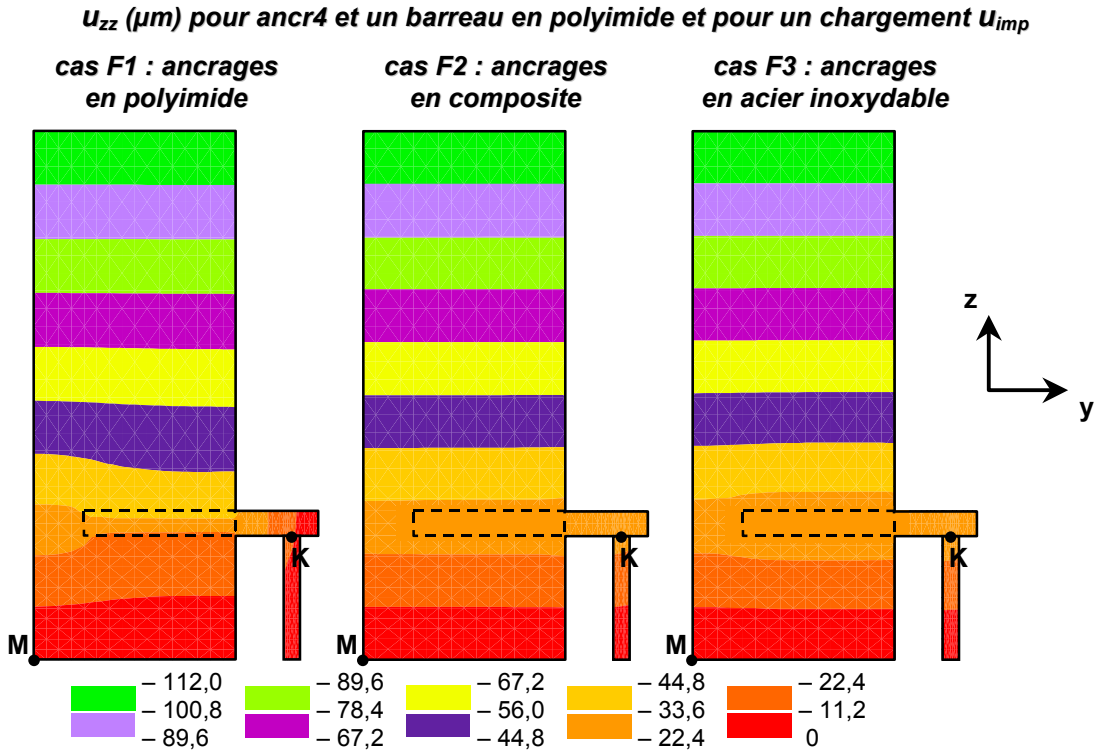


Figure 3.18 Inclusion en surface : zones d'isovaleurs des déplacements u_{zz} (en µm) avec des ancrages ancr4 particuliers ($E_{ancrages}$ = 3, 43 et 200 GPa), pour u_{imp}

Pour les cas F2 et F3 la tendance est la même que pour les précédents cas d'étude de l'inclusion en surface. Les ancrages en polyimide ou en acier inoxydable sont sources de perturbations au sein du béton de l'éprouvette (cf. Figure 3.18). Avec un module d'élasticité longitudinale de 43 GPa, sensiblement équivalent à celui du béton, les ancrages perturbent que très faiblement le comportement de l'éprouvette.

Les caractéristiques mécaniques des ancrages sont aussi des facteurs d'influence prépondérants qu'il faut choisir en fonction principalement des profondeurs de scellement mais également en fonction des caractéristiques mécaniques du barreau.

3.6.2.3 Conclusion

Les facteurs d'influence prépondérants identifiés pour l'inclusion en surface sont la géométrie des ancrages et les caractéristiques mécaniques de l'inclusion (cf. Figure 3.19).

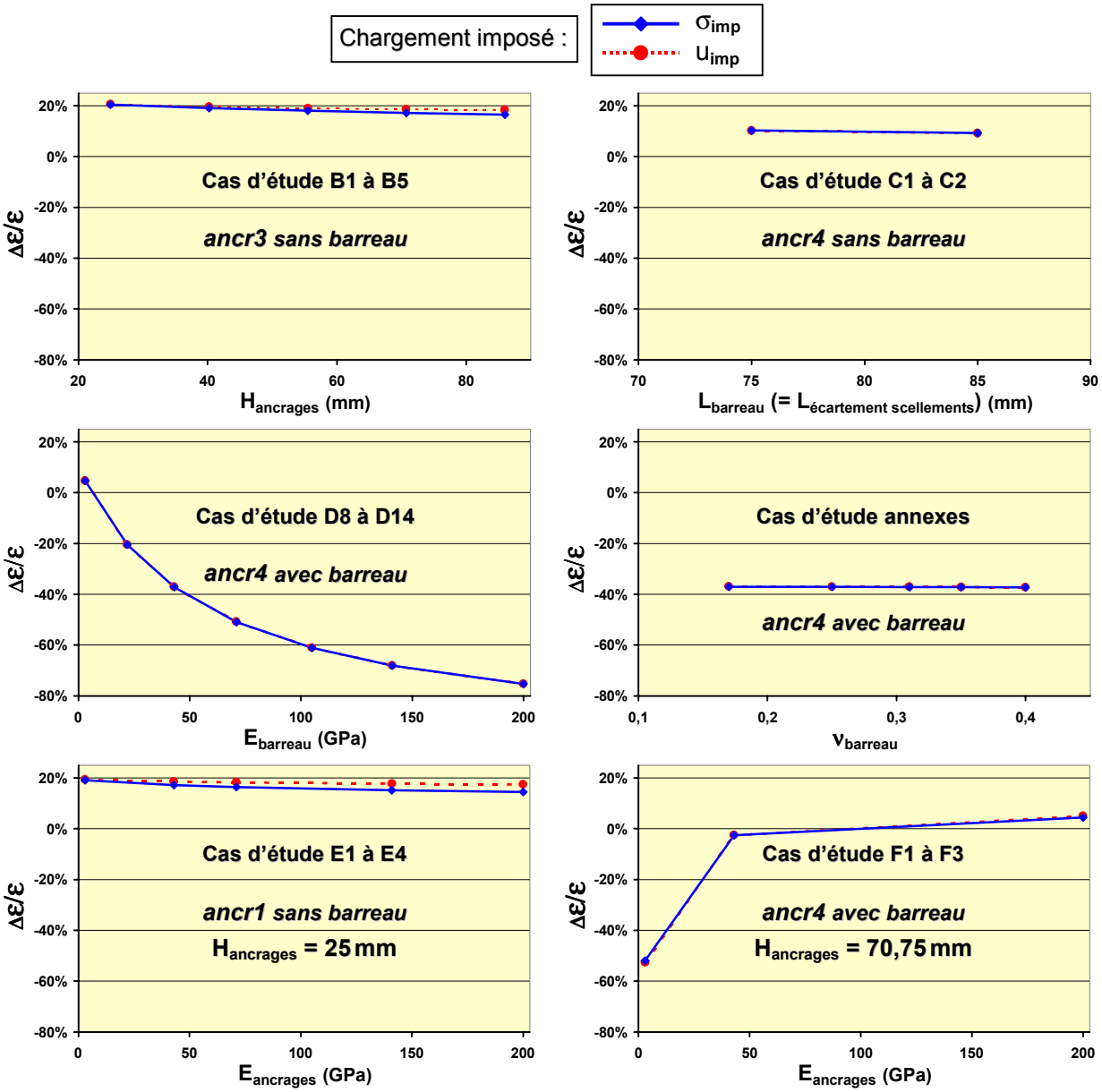


Figure 3.19 Inclusion en surface : représentation de l'ensemble des cas d'étude

Comme pour le cas en volume, pour les caractéristiques mécaniques du barreau, la rigidité de compression ($E \times S$) est la plus influente. C'est plus complexe pour les caractéristiques mécaniques des ancrages. Leur influence dépend en fait de divers autres paramètres dont notamment la profondeur des scellements, les caractéristiques mécaniques du barreau et de l'éprouvette, et la géométrie des ancrages.

Les ancrages représentent le point délicat de l'inclusion en surface. Par le choix de ses caractéristiques mécaniques, le barreau permet de corriger les perturbations engendrées par les ancrages. Une telle correction de ces perturbations est délicate, difficilement maîtrisable : *créer une perturbation pour en corriger une autre*. En choisissant un barreau ayant une faible influence sur le comportement mécanique des autres éléments, la correction a posteriori des déformations est restreinte à la seule prise en compte des perturbations produites par les ancrages. Il reste à faire en sorte que ceux-ci ne perturbent que très faiblement le comportement de l'éprouvette en béton.

3.7 Conclusion

Ce chapitre a permis de mieux identifier et de quantifier l'influence de certains facteurs sur la déformation mesurée par des capteurs à fibre optique. Les facteurs prépondérants pour les cas étudiés sont rappelés dans les conclusions des deux niveaux d'étude pour la partie sensible et les inclusions en volume et en surface (cf. 3.4.2.5, 3.5.2.4 et 3.6.2.3). Certains de ces facteurs (ex. : caractéristiques mécaniques de la gaine mécanique du capteur) peuvent induire des différences importantes entre les déformations du capteur et celles du milieu de mesure sans capteur ($|\Delta\varepsilon/\varepsilon|$ pouvant aller jusqu'à plusieurs dizaines de %). Pour les différents cas d'étude considérés, il ressort une méthodologie d'analyse de l'influence de ces facteurs :

1. $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ reste quasiment constant ($\Delta|\Delta\varepsilon/\varepsilon| < 1$ %) sur l'étendue de variation du facteur étudié : la déformation du capteur possède un biais systématique dont la valeur peut dépendre d'autres facteurs.
2. $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ varie linéairement de plus de 1 % sur l'étendue de variation du facteur étudié : le facteur est alors très perturbateur, et il est nécessaire de connaître sa valeur réelle afin de pouvoir correctement interpréter l'influence induite sur la déformation du capteur.
3. La variation de $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ sur l'étendue de variation du facteur étudié fait apparaître deux zones distinctes : une zone de forte variation et une zone de faible variation, voire un palier de stabilisation sur lequel $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ varie au plus de 1 %. Il convient alors de se ramener au cas 1. et 2. précédents.

Les modèles et les maillages associés étudiés permettent de réaliser des calculs de cas d'étude qui sont comparés aux résultats expérimentaux du chapitre suivant : deux cas présentés pour l'inclusion (D6 en volume et en surface) et un autre cas pour l'inclusion en volume calculé dans les mêmes conditions.

Chapitre 4

Expérimentations en laboratoire sur des capteurs à fibre optique de déformation

Afin de compléter les résultats de l'étude théorique du Chapitre 3, des campagnes expérimentales en laboratoire sont réalisées. En effet, cette étude ne permet pas d'appréhender par exemple, le problème de la fixation du capteur à fibre optique au milieu de mesure, ou tout autre problème lié à la préparation et à la réalisation de mesurages en conditions réelles d'utilisation des capteurs. Ces campagnes ont également pour finalité de valider l'ensemble des résultats du précédent chapitre, par confrontation directe entre les résultats de certains cas d'étude théoriques et les mesures expérimentales correspondantes. Principalement deux laboratoires ont participé à la réalisation des campagnes expérimentales : le LCPC-Paris pour les essais de capteurs à fibre optique en volume ; le LRPC-Strasbourg pour les essais de capteurs à fibre optique seuls et en surface. Les essais sont réalisés dans le respect des hypothèses définies au Chapitre 2 et en fonction des contraintes liées aux moyens expérimentaux utilisés.

Le présent chapitre s'articule autour de deux parties. La première présente les moyens expérimentaux et les principes de l'ensemble des essais réalisés. La seconde partie concerne l'exploitation des essais et des résultats expérimentaux afin d'analyser les principaux facteurs influençant le mesurage de déformation par capteurs à fibre optique. Seuls les résultats expérimentaux les plus significatifs sont exploités. Cette analyse est réalisée à travers différentes études : étude du comportement propre à chaque capteur à fibre optique et à chaque éprouvette en béton sans capteur ; étude de méthodes d'intégration de ces capteurs aux différentes éprouvettes ; étude du comportement des capteurs à fibre optique intégrés aux éprouvettes. C'est lors de cette dernière étude que les résultats expérimentaux sont confrontés aux résultats des cas d'étude correspondants du Chapitre 3.

4.1 Description des expérimentations

4.1.1 Systèmes de mesure

4.1.1.1 Instrumentation à fibre optique

La présente étude se veut globale et non pas axée sur un capteur à fibre optique donné. Il a néanmoins fallu se fixer une instrumentation particulière, et surtout disponible. Le choix des capteurs à fibre optique a été orienté par des collaborations existantes et créées pendant la Thèse. Dans le souci de rester fidèle aux objectifs de l'étude, ni ces collaborations et ni les produits testés sont nommés. De même, les informations sur la conception des capteurs, que ce soit sur les différentes dimensions des constituants, sur leurs caractéristiques respectives ou sur les principes utilisés par ces capteurs, ne sont pas fournis. Seules des informations générales et nécessaires à la description de ces systèmes de mesure ainsi qu'à leur utilisation, sont fournies dans la suite du mémoire.

Les capteurs à fibre optique testés sont des capteurs extensométriques ponctuels, réalisant des mesures de déformation selon des principes exposés au premier chapitre (cf. 1.2.3). Trois types de capteur à fibre optique sont considérés pour ces essais et nommés respectivement CFO n°1, CFO n°2 et CFO n°3. Pour chaque type, plusieurs capteurs sont testés : 6 pour les CFO n°1 ; 5 pour les CFO n°2 ; 5 pour les CFO n°3. Les CFO n°1 et n°2 sont destinés à être noyés au sein des éprouvettes en béton, alors que le CFO n°3 est destiné à être fixé à leur surface. Les parties sensibles des CFO n°2 et n°3 possèdent le même principe de mesure, les mêmes constituants et sont fabriquées de la même manière. Les trois types de capteurs ont des structures identiques à celles présentées au Chapitre 2 (cf. Figure 2.8) : les CFO n°1 et n°2 ont

une structure de type *haltère*, et le CFO n°3, une structure de type ***barreau avec ancrages***. Les schémas des coupes longitudinales de ces capteurs sont présentés à la figure suivante (cf. Figure 4.1).

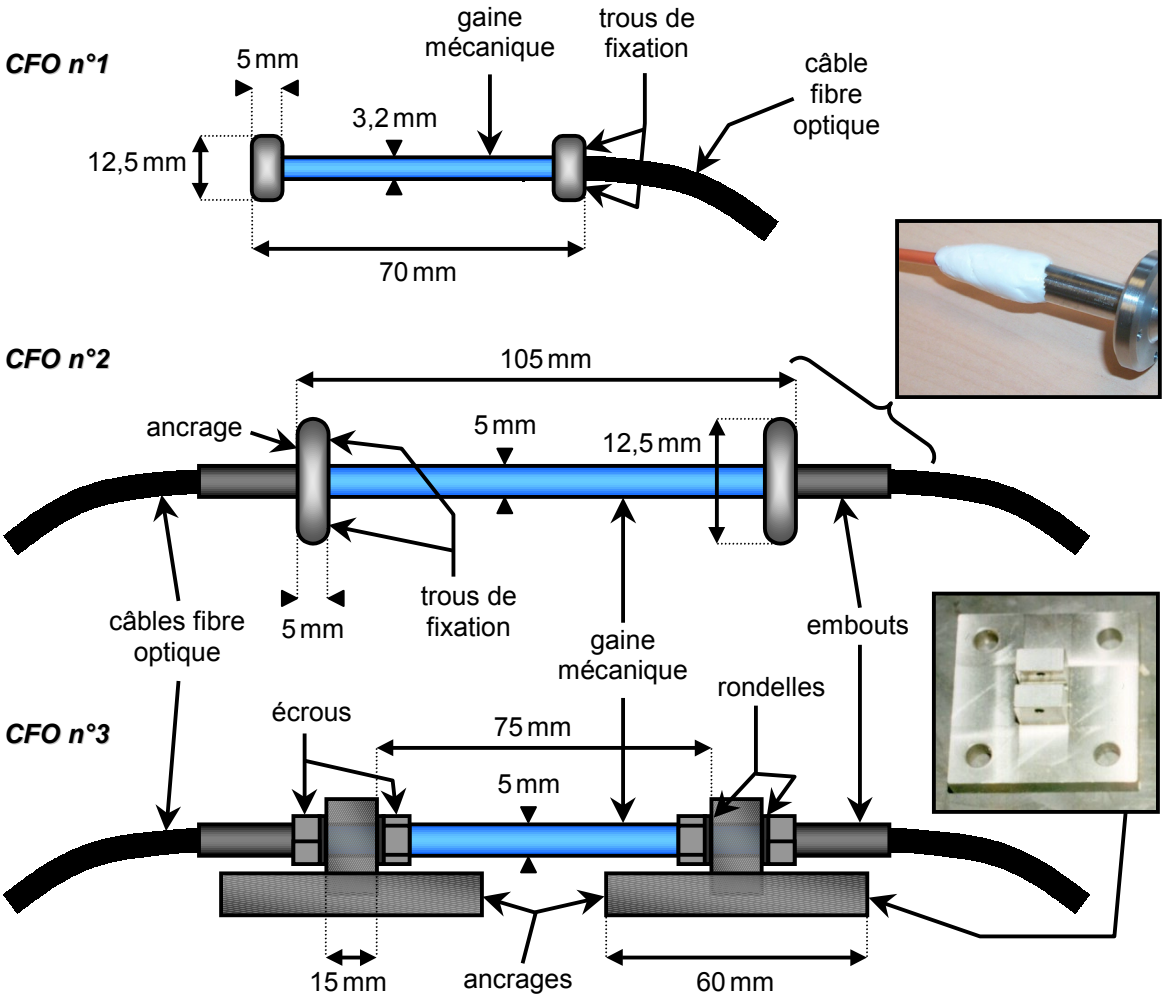


Figure 4.1 Schémas des coupes longitudinales des capteurs à fibre optique testés

Les CFO n°2 et n°3 possèdent des embouts contrairement aux structures présentées au Chapitre 2 et étudiées dans le Chapitre 3. Pour le capteur en surface, ces embouts sont des éléments inertes d'un point de vue mécanique. Pour le capteur en volume, les embouts peuvent modifier la base de mesure du capteur qui est normalement délimitée par les extrémités des ancrages de l'haltère lors de sollicitations en compression. En effet, le diamètre de ces embouts n'est pas négligeable (8 mm). Cependant les câbles à fibre optique sortent par les deux extrémités du capteur au niveau des embouts (les CFO n°2 et n°3 peuvent fonctionner en réflexion mais aussi en transmission), réduisant ainsi la surface de ces extrémités. De plus, suite à la rupture du câble à fibre optique à l'une des extrémités d'un des CFO n°1 lors d'une mauvaise manipulation, un gel silicone a été appliqué à chacune des extrémités de ce type de capteur, afin de consolider la jonction *câble / embouts* (cf. Figure 4.1). Ces embouts n'offrent alors plus de surface perpendiculaire à la direction des sollicitations de compression selon l'axe du capteur.

Les ancrages des CFO n°3 ont une géométrie légèrement différente de celle des ancrages présentés au Chapitre 2 : un évidement permet d'accueillir le corps du capteur. Ce dernier est solidarisé aux ancrages à l'aide de rondelles et d'écrous. Les deux types d'ancrages offrent au capteur une fixation de type encastrement.

Les principales caractéristiques métrologiques de ces capteurs, fournies par les constructeurs, sont référencées dans le tableau suivant (cf. Tableau 4.1).

Tableau 4.1 Principales caractéristiques métrologiques des capteurs à fibre optique testés

Notation	Etendue de mesure	Résolution	Température d'utilisation
CFO n°1	$\pm$ 2500 µm.m^{-1}	0,5 µm.m^{-1}	– 55 °C à + 85 °C
CFO n°2 et 3	$\pm$ 2500 µm.m^{-1}	1 µm.m^{-1}	– 25 °C à + 80 °C

Les conditionneurs de signaux et les postes de lecture sont spécifiques à chaque type de capteur utilisé. Pour le CFO n°1 des postes de lecture à 1 et 4 voies de mesures ont été utilisés. Pour les CFO n°2 et n°3 l'appareillage utilisé est celui du fabricant des capteurs, prêté dans le cadre d'une collaboration. De même que pour les principes de mesure des capteurs à fibre optique, aucun détail n'est donné sur ces systèmes d'interrogation et de traitement.

4.1.1.2 Instrumentation classique

Différents capteurs classiques sont mis en parallèle des capteurs à fibre optique, que ce soit au niveau des éprouvettes ou au niveau des capteurs à fibre optique eux-mêmes. Cette instrumentation classique permet d'avoir des moyens de validation et de comparaison. Les différents capteurs utilisés sont présentés ci-après.

a) Jauges extensométriques

Les jauges extensométriques sont des capteurs à variation de résistance. Elles sont réalisées sur la base d'un élément résistif monté en pont qui détecte en chaque point de la longueur active la déformation de la structure sur laquelle elles sont collées, par une variation proportionnelle de la résistance électrique de l'élément. En l'absence de perturbation thermique, le coefficient reliant la variation relative de résistance à la déformation relative est appelé *facteur de jauge*. De nombreux ouvrages exposent plus en détail le principe de mesure de ce type de capteur, comme par exemple [ZELBSTEIN, 1956], [CHATELAIN, 1969], ou [ASCH et al., 1987].

Différentes appellations sont rencontrées dans la littérature : *jauges de contrainte* (employé à tort puisque que la jauge est un moyen indirect de mesure dans le domaine de l'*analyse des contraintes*), ou *jauges électriques résistives*, ou *jauges à fil résistant*,… autant de termes pour désigner un même type de capteur. Dans cette étude, le terme de ***jauge de déformation*** est employé pour désigner ce type de capteur.

Les applications sont diverses dans le domaine du Génie Civil, que ce soit pour des essais en laboratoire, sur des éprouvettes 16/32 pour la mesure de module d'élasticité longitudinale du béton, ou sur ouvrages, pour des mesures lors de réception de ponts par exemple.

Il existe différentes technologies de jauges de déformation [TOUX, 1990]. Les plus courantes, celles utilisées pour les expérimentations, sont les suivantes (cf. Figure 4.2) :

- Jauges à fil : L'élément résistif est un fil de section généralement circulaire, qui est collé ou capsulé sur un support.
- Jauges à trame pelliculaire : L'élément résistif est un circuit imprimé de quelques micromètres d'épaisseur, obtenu généralement par photogravure d'une plaque mince de métal laminé, qui est collé ou capsulé sur un support souple et isolant (ex. : polyimide).

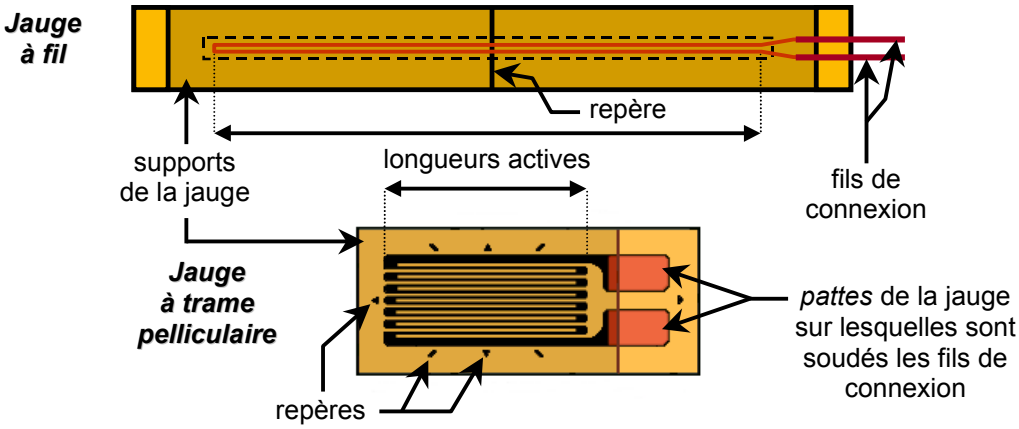


Figure 4.2 Jauges à fil et à trame pelliculaire

Différentes jauges de déformation sont utilisées pour ces expérimentations. Les principales caractéristiques de ces jauges, données par les constructeurs, sont regroupées dans le tableau suivant (cf. Tableau 4.2).

Tableau 4.2 Principales caractéristiques métrologiques des jauges de déformation utilisées

Notation	Technologie	Résistance de jauge (à 24 °C)	Longueur active	Facteur de jauge (à 24 °C)
J1	Jauges à fil	120,2 Ω ± 0,2 %	120 mm	2,13 ± 1,0 %
J2	Jauges à trame pelliculaire	120,0 Ω ± 0,3 %	20 mm	2,085 ± 0,5 %
J3		120,0 Ω ± 0,15 %	2,9 mm	2,05 ± 0,5 %

Les jauges J1 sont destinées à instrumenter la surface des éprouvettes en béton pour les essais avec les capteurs en volume. Elles sont collées au droit des capteurs noyés, suivant la direction axiale de l'éprouvette. Trois jauges sont ainsi collées à 120 ° afin d'avoir une infor-

mation locale mais aussi moyenne sur l'ensemble de la surface de l'éprouvette. Il en est de même au milieu des éprouvettes sans capteur noyé, servant à déterminer les caractéristiques mécaniques du béton, avec en plus trois jauges collées à 120 ° suivant le périmètre central des éprouvettes. Les jauges J2 sont quant à elles destinées à instrumenter la surface des éprouvettes en béton pour les essais avec les capteurs en surface. Elles sont collées entre les ancrages des CFO n°3. Comme cela est précisé dans [CHATELAIN, 1969], la longueur active doit être au moins égale à trois fois le diamètre du plus gros granulat. C'est le cas pour les jauges J1 mais pas pour les jauges J2. Le choix était restreint puisque la distance entre les ancrages ne permet pas une longueur active plus grande. Les jauges J3 sont collées sur la gaine mécanique du capteur des CFO n°3. Elles permettent ainsi d'avoir une comparaison directe avec la mesure par fibre optique des déformations de ce corps. Les CFO n°1 et n°2 ne sont pas instrumentés par ces jauges qui ne peuvent pas être noyées dans le béton sans protection. Des jauges de déformation avec revêtement de protection spécifiques existent mais les dimensions rencontrées ne permettaient pas un collage aisé et rigoureux de par les dimensions de la gaine mécanique des capteurs, et notamment celles du CFO n°1. De plus, la présence d'une jauge de déformation avec un quelconque conditionnement aurait modifié la géométrie même de ces capteurs, pouvant perturber les mesures réalisées.

Le collage des jauges sur ces différents corps est réalisé suivant des procédures décrites dans la documentation des fabricants ainsi que dans [CHATELAIN, 1969] ou [POLICELLA et al., 2000], et suivant l'expérience des équipes des laboratoires d'essais. Le respect de ces procédures est capital car la *qualité* de la mesure par jauges repose avant tout sur celle de la liaison par collage. Celle-ci ne doit non seulement pas varier dans le temps, mais aussi être telle que la partie sensible de la jauge soit placée à faible distance de la surface de la pièce (couche de colle aussi mince que possible), faute de quoi une erreur systématique s'introduit. La colle ainsi que le fil résistif de la jauge ont des modules d'élasticité longitudinale très faibles comparés à ceux des matériaux avec lesquels ils sont en contact. Les jauges de déformation ne perturbent donc pas le milieu de mesure.

b) Capteurs inductifs

Deux types de capteur de déplacement à variation d'induction sont utilisés :

- Capteurs LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) ;
- Capteurs à inductances variables.

Capteurs LVDT

Ils sont composés d'un enroulement primaire et de deux enroulements secondaires séparés par un noyau ferromagnétique assurant le couplage. L'alimentation des enroulements primaires avec un signal alternatif produit un champ magnétique alternatif au centre du capteur qui induit un signal dans les enroulements secondaires, lequel varie suivant une relation linéaire avec le déplacement mécanique du noyau. Ce principe de mesure est décrit plus en détail dans [DESJARDINS, 1975]. Ces transformateurs différentiels mesurent donc des déplacements absolus qui ramenés à la base de mesure définie entre, le point où le déplacement est mesuré, et le point de fixation du capteur, donnent des déformations. Une gamme importante et variée de capteurs LVDT existe et est disponible. Pour les essais, deux types de capteur LVDT sont utilisés pour instrumenter d'une part la surface des éprouvettes destinées aux essais à court terme pour les capteurs en volume (cf. 4.1.1.2 – c)), et d'autre part la surface des éprouvettes destinées aux essais à long terme pour les capteurs en volume (cf. 4.1.3.2).

Capteurs à inductances variables

Ces capteurs d'allongement comportent trois pointes (cf. Figure 4.3). Deux d'entre elles se trouvent sur un collier fixé sur le corps du capteur. Ce collier peut se déplacer suivant l'axe du capteur après desserrage de la vis de fixation. Cela permet de modifier très simplement la base de mesure entre 15 et 200 mm. La troisième pointe se trouve sur la partie mobile, elle-même reliée à un *plongeur* (noyau ferromagnétique). Le déplacement de ce plongeur provoque le déséquilibre du demi-pont inductif monté dans le système de mesure du capteur [ASCH, 1987]. Ces capteurs sont positionnés sur les têtes d'ancrages des CFO n°3 ainsi qu'en surface des éprouvettes destinées aux essais à court terme pour les capteurs en surface. Dans la suite du mémoire ces capteurs sont désignés par l'abréviation CIV.

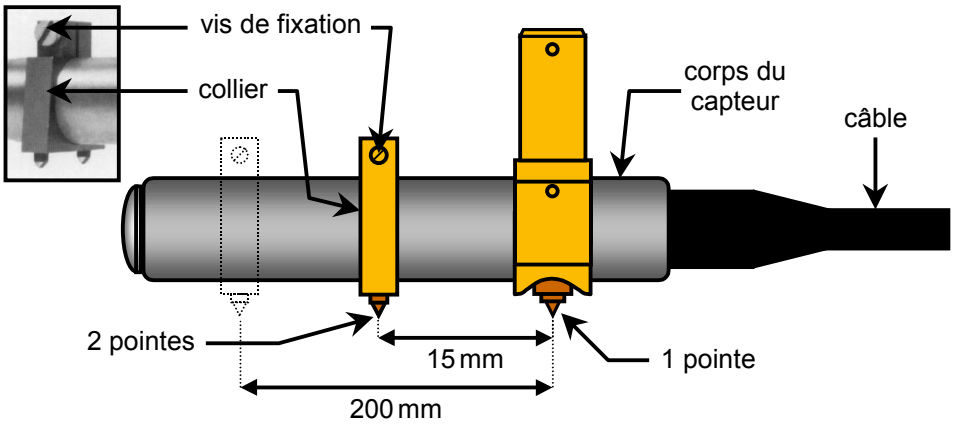


Figure 4.3 Schéma des capteurs à inductances variables utilisés

Les étendues de mesure des capteurs inductifs utilisés vont jusqu'à ± 1 mm, leur résolution étant inférieure à 1 µm. Ces capteurs ont l'avantage de présenter une mesure réalisée sans contact (pas de frottement entre le noyau et le corps du capteur) et d'une durée de vie quasi illimitée, même en milieu difficile. Ils sont de plus sans raideur. Ils ne perturbent donc pas la mesure réalisée.

c) Extensomètre J2P

L'extensomètre J2P a été développé afin de réaliser des essais de détermination de modules d'élasticité longitudinale et de coefficients de Poisson de bétons d'éprouvettes normalisées [BOULAY et COLSON, 1981]. Le J2P est composé de deux couronnes d'aluminium, fixées dans la partie centrale de l'éprouvette à tester par trois pointeaux situés à 120 ° (cf. Figure A.3) L'effort de contact entre l'éprouvette et le pointeau est assuré par une liaison prismatique et reste ainsi constant pendant toute la durée du chargement. Les pointeaux sont verticalement espacés d'une longueur de base de 110 mm. Au droit des pointeaux, entre les couronnes, sont placés trois capteurs LVDT qui mesurent le déplacement relatif entre pointeaux. Trois systèmes de fixation placés sur la couronne inférieure, permettent d'utiliser trois autres capteurs LVDT afin de mesurer le déplacement latéral de la surface de l'éprouvette.

Cet appareil est fixé suivant une procédure rigoureuse [LAPLANTE, 1993] en surface des éprouvettes de la campagne d'essais des capteurs en volume pour la majorité des essais à court terme, l'appareil ne pouvant pas être monopolisé sur le long terme. L'emploi d'un ex-

tensomètre de ce type n'était pas possible pour les essais avec les capteurs de surface du fait de l'encombrement de l'instrumentation utilisée.

La précision de cet extensomètre est de 0,625 $\mu m.m^{-1}$ [BOULAY et COLSON, 1981]. Contrairement à d'autres extensomètres conventionnels de ce type, l'extensomètre J2P, fixé en surface d'une éprouvette en béton, est apte à décrire des cycles de montées et descentes en charge sans glissement des pointeaux et sans effet de frettage. De par sa conception, ce capteur ne perturbe pas le comportement du corps d'épreuve qu'il instrumente.

d) Extensomètres à corde vibrante

Ces extensomètres à corde vibrante sont des capteurs à variation de fréquence. Le corps du capteur est une corde métallique tendue entre deux points ancrés dans une structure ou dans un élément de capteur, soumis à contrainte ou à déplacement. Cette corde est mise en vibration par un dispositif (ex. : électro-aimant) traversé par une impulsion de courant. Après un temps de stabilisation la fréquence de vibration de la corde est directement fonction de sa longueur, qui dépend elle-même de l'effort s'exerçant à ses deux extrémités. La mesure de cette fréquence permet de remonter à la déformation de la corde sur la base de mesure définie par les points d'ancrage. Le principe de mesure, ainsi que les équations permettant la correspondance *fréquences / déformations*, sont développés dans [LEVALLOIS, 1994].

Parmi les nombreux termes rencontrés dans la littérature (ex. : *témoin sonore*, *extensomètre à corde vibrante*), il est utilisé dans la suite du mémoire celui de ***capteur à corde vibrante*** (noté CCV).

Les applications de ce type de capteur pour la surveillance d'ouvrages de Génie Civil sont multiples. Ils sont notamment destinés à la mesure, d'ouverture de fissures, du tassement dans les barrages, de la pression interstitielle dans les barrages ou les tunnels, de charge dans les supports pour tunnels,… mais également à la mesure de déformation au sein et en surface de structures en béton (ex. : barrages, enceintes de confinement, ponts,…).

Ces capteurs bénéficient d'un bon retour d'expériences du fait des nombreuses sociétés de par le monde qui les commercialisent et les développent depuis plusieurs dizaines d'années [ASCH, 1987]. En conséquence, différents types de capteur à corde vibrante sont disponibles. Les capteurs à corde vibrante utilisés sont des capteurs développés par le LCPC-Paris, dont les principales caractéristiques sont présentées dans [LARIVE et al., 2000]. La relation de conversion *fréquences / déformations* est obtenue pour chacun des capteurs par un étalonnage préalable, permettant également de déterminer l'erreur relative sur la mesure de l'ensemble de la chaîne de mesure (qui est inférieure à 1 %). Ils se différencient principalement des capteurs à corde vibrante traditionnels par leur faible raideur et le fait d'avoir supprimé le petit bloc latéral à mi-longueur contenant les électro-aimants d'entretien et d'écoute (ceux-ci ont été miniaturisés), les sorties de fils ne se faisant plus au milieu du capteur mais à l'une des extrémités.

Ces capteurs sont destinés à être noyés au sein des éprouvettes en béton pour les essais des capteurs en volume. Leur faible raideur leur permet de ne pas rigidifier le béton, ce qui est indispensable pour rendre compte de déformation de gonflement dû à des phénomènes telle que l'alcali-réaction [LARIVE, 1998].

e) Autres capteurs

En dehors des capteurs de déformation, d'autres capteurs classiques sont utilisés et notamment :

- des *capteurs de pression*, au niveau des presses d'essais pour suivre les sollicitations appliquées aux corps d'épreuve ;
- des *capteurs de température*, tels que des thermocouples[1] et des sondes à résistance[2], pour suivre la température ambiante lors des essais.

f) Appareillage

Le conditionnement des signaux de ces capteurs est réalisé par des appareils courants. Pour les jauges de déformation, les conditionneurs utilisés sont des montages en quart de pont [POLICELLA, 2000]. Pour le J2P, chaque LVDT est alimenté par un conditionneur qui recueille les informations individuelles lues par les capteurs et qui peut également en faire la moyenne. Pour les capteurs à corde vibrante utilisés, un nouveau conditionneur a été conçu ainsi que des multiplexeurs (8, 16 et 48 voies) [LARIVE, 1998]. Les chaînes de mesure pour les essais des capteurs en volume et ceux des capteurs en surface, sont schématisées et présentées en annexe (cf. Figure A.1).

4.1.2 Eprouvettes en béton

4.1.2.1 Choix du béton

Conformément aux hypothèses d'étude (cf. 2.3 –c)), les bétons utilisés sont des bétons ordinaires couramment employés dans certains ponts. Le béton utilisé pour les essais avec les capteurs en volume bénéficie d'un retour d'expériences conséquent, spécialement dans le laboratoire d'essais. En effet, de nombreux travaux ont eu pour objectif d'étudier sa composition, ses caractéristiques mécaniques et ses comportements notamment à long terme et sous chargement [LAPLANTE, 1993] [LE ROY, 1996]. C'est cette expérience et une bonne connaissance du comportement de fluage qui ont orienté le choix de ce béton. Pour les essais sur les capteurs en surface, le choix s'est porté pour un béton pour lequel le laboratoire d'essais possède de nombreuses informations, puisqu'il est utilisé dans un des ponts dont il effectue la surveillance.

La composition de chacun de ces bétons est donnée dans le tableau suivant (cf. Tableau 4.3) pour un volume de $1\,m^3$ du mélange des différents constituants.

[1] Le principe de mesure d'un thermocouple est basé sur le développement d'une force électromotrice entre deux fils de métaux de nature différente, lorsque leurs jonctions sont à des températures différentes (les jonctions étant la soudure intime des métaux à chacune des extrémités des fils) [ICHINOSE et KOBAYASHI, 1990]. L'une des deux jonctions, nommée jonction de référence ou *soudure froide*, est maintenue à température constante. Dans ces conditions, l'autre jonction (*soudure chaude*), se comporte comme un thermomètre, qui répond en fonction de la température du milieu avec lequel elle est en contact thermique. C'est une méthode de mesure par comparaison.

[2] Le principe de mesure d'une sonde à résistance est basé sur la variation de résistance d'un conducteur métallique en fonction de la température [ICHINOSE et KOBAYASHI, 1990]. Il s'agit en général, d'un fil très fin, ductile, obtenu par tréfilage (ex. : le platine est le métal donnant les indications les plus stables sur une très grande étendue de mesure). La variation de résistance est elle-même mesurée en faisant traverser la résistance par un faible courant (1 à 10 mA) et en appliquant la loi d'Ohm. La loi de variation n'est pas linéaire, dépendant de la nature du métal choisi, de son degré de pureté et des traitements mécaniques qu'il a subi. C'est une méthode de mesure directe.

Tableau 4.3 Composition des bétons

Constituants	Cas en volume (béton B0)		Cas en surface (béton n°671023)	
	Type	*Poids (kg/m³)*	*Type*	*Poids (kg/m³)*
gravillon	5/20	1200	4/25	1140
sable	0/5	670	0/4	570
ciment	CEM I 52,5	342	CEM VA 32,5	400
eau ajoutée		171		190

4.1.2.2 Types d'éprouvette et de moules

Les éprouvettes utilisées sont des éprouvettes cylindriques définies par les normes nationales AFNOR (cf. 2.1.2).

Pour les essais en volume, elles sont de deux types : 16/32 et 16/100. Ces dimensions sont les plus utilisées pour les essais courants de détermination des caractéristiques mécaniques du béton (16/32) et les essais de fluage (16/100). De plus, l'utilisation du capteur de référence J2P imposait un diamètre d'éprouvette de 16 cm, l'appareil disponible au laboratoire d'essais étant conçu pour cette dimension. Des diamètres plus grands n'étaient pas nécessaires, étant donné les dimensions des capteurs à fibre optique à noyer au sein du béton qui permettent de s'astreindre des effets de bord.

Pour les essais en surface, les éprouvettes sont des 16/32 *modifiées* (cf. Figure 4.4).

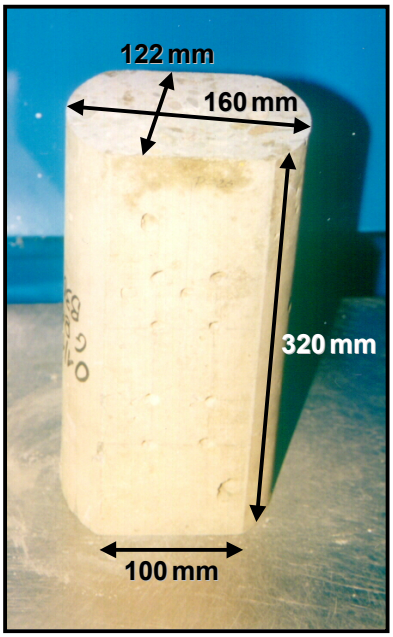


Figure 4.4 Eprouvette en béton 16/32 « modifiée » pour les essais en surface

Les éprouvettes possèdent deux faces planes parallèles suivant l'axe de révolution étant donné que les ancrages des CFO n°3 ont une embase plane. Les éprouvettes sont instrumentées par deux capteurs à fibre optique afin d'avoir une symétrie dans l'instrumentation permettant notamment d'éviter des problèmes de flexion.

Selon la norme [NF P 18-403, 1969] le choix du format des moules est conditionné par le diamètre des granulats. Le diamètre du moule ne doit pas être inférieur à quatre fois le diamètre maximum des granulats :

$$(\phi_{\text{éprouvette}} = 160\,\text{mm}) > (4 \times \phi_{\text{maximum gravillon}}) = 80\,\text{mm (en volume) ou } 100\,\text{mm (en surface)}$$

Il existe différents types de moules. Les moules cylindriques sont en général en métal (acier), en matière plastique ou en carton [NF P 18-400, 1981]. Pour les éprouvettes 16/32, des moules en carton, dont la paroi latérale intérieure et le fond qui en est solidaire sont en carton paraffiné, sont choisis pour plusieurs raisons : moules courants dans les laboratoires d'essais ; commodités au démoulage (il suffit de déchirer le carton) ; facilité d'usinage pour la fixation des capteurs en volume (cf. 4.2.2.1). Pour les capteurs en surface, afin d'obtenir les deux faces planes à la surface des éprouvettes, deux plaques en acier de dimensions appropriées sont fixées à l'intérieur des moules. Pour les 16/100, les moules utilisés couramment au laboratoire d'essais sont en acier composés de deux parties à assembler suivant un plan de joint axial avec des fonds traditionnellement en acier [Service du matériel du LCPC, 1976].

Un corps d'épreuve supplémentaire est employé, afin de déterminer le mode de fixation adéquat des ancrages des CFO n°3 à la surface des éprouvettes en béton (cf. 4.2.2.2). Il s'agit d'une plaque rectangulaire en acier doux fabriquée sur mesure et ayant les dimensions suivantes :

- largeur : 100 mm
- longueur : 401,5 mm
- épaisseur : 12 mm

Le choix pour ces essais d'un tel corps d'épreuve est conditionné par le fait qu'il est constitué d'un matériau homogène, facile d'usinage et permettant ainsi de ne pas détériorer les corps d'épreuve en béton.

4.1.2.3 Mode opératoire pour la confection des éprouvettes en béton

Le gâchage et le malaxage sont réalisés conformément aux prescriptions de la norme [NF P 18-403, 1969]. Pour les essais en volume, du fait de la quantité importante de béton nécessaire et de la taille des malaxeurs du laboratoire d'essais, deux gâchées, dans un malaxeur de 150 litres, sont réalisées (environ 220 litres de béton). Pour les essais en surface, une seule gâchée a suffi (environ 37 litres de béton).

Une fois le coulage du béton réalisé, sa mise en place (appelé aussi serrage) est effectuée. La mise en place normale du béton varie avec la consistance de ce dernier, mesurée par l'essai d'affaissement conformément à la norme [NF P 18-451, 1981]. Des essais de ce type sont réalisés pour chaque gâchée. L'affaissement étant à chaque fois inférieur à 9 cm, selon la norme [NF P 18-403, 1969] la mise en place normale du béton pour des cylindres de 16 cm de diamètre doit être effectuée par *microtable vibrante*. Le poids des éprouvettes 16/100 ne permettant pas d'effectuer la mise en place sur ce type de table, une table vibrante de puissance appropriée (*table 3000*) est utilisée. La mise en place des éprouvettes 16/32 pour les essais en volume est alors réalisée avec la même table vibrante.

L'arasement de la face supérieure des éprouvettes est effectué conformément au mode opératoire de la norme [NF P 18-403, 1969].

Les éprouvettes sont conservées dans la salle où sont réalisés le coulage et la mise en place du béton. Le démoulage est réalisé entre deux et quatre jours après le coulage. Trois modes de conservation sont alors possible après démoulage :

- *Dans l'eau :*

C'est le mode normal de conservation préconisé par la norme [NF P 18-403, 1969]. Cette conservation est généralement réalisée en piscine et permet d'obtenir facilement des conditions aux limites uniformes. Elle n'est cependant pas très représentative du mode de conservation réel du béton en volume ou en surface d'un ouvrage. De plus, la manipulation des éprouvettes en piscine est délicate, notamment pour les 16/100.

- *A l'air libre :*

Le béton d'ouvrages est lui aussi à l'air libre. Cependant, comme le prouvent certaines études par gammadensimétrie [MENSI et al., 1988], le séchage du béton est essentiellement un phénomène de peau, tout du moins pendant la première année. L'état d'éprouvettes normalisées de 16 cm de diamètre ainsi conservées n'est pas très représentatif de l'état du béton à cœur des ouvrages [GRANGER, 1996].

- *En « auto dessiccation » :*

Un autre mode de conservation consiste à conserver le béton en *auto dessiccation*, c'est-à-dire sans échange d'humidité avec le milieu extérieur. Il est à noter que ce mode de conservation a le mérite d'être plus représentatif du béton de masse de l'ouvrage et surtout d'offrir la plus grande homogénéité au sein de l'éprouvette. Pour ce faire, au démoulage, chaque éprouvette de béton est entourée de couches d'aluminium autocollant. Les performances d'une telle méthode ont été étudiées et mises en avant par certains expérimentateurs afin d'en favoriser la pratique [ATTOLOU et al., 1989].

Le choix du mode de conservation a son importance. En effet, comme le montre [BOSTVIRONNOIS et DE LARRARD, 1991] le mode de conservation d'éprouvettes 16/32 d'un même béton peut influer sur les caractéristiques mécaniques de ce dernier : plus l'atmosphère de conservation des éprouvettes est humide et plus la résistance du béton est élevée. De manière à assurer une bonne représentativité du mode de conservation des éprouvettes de béton par rapport au béton à cœur d'ouvrage, les éprouvettes pour les essais en volume sont conservées en auto dessiccation. Toutes les éprouvettes ainsi conservées sont stockées dans la salle d'essais de fluage (cf. Figure 4.5), à température constante de 21 °C (± 1 °C). Les sorties des câbles des éprouvettes en béton sont renforcées avec du gel silicone afin d'éviter les arrachements. Pour les essais en surface, les éprouvettes sont conservées à l'air libre dans une salle à 20 °C (± 1 °C) afin que le béton soit plus représentatif d'un béton en surface d'ouvrage.

Toutes les éprouvettes sont par la suite rodées sur leurs deux faces au lapidaire, afin d'assurer un bon contact ultérieur avec les plateaux de la presse (cf. 4.1.3.1) ou les casques métalliques des bâtis de fluage (cf. 4.1.3.2). Le rodage doit être effectué avec le plus grand soin, une éprouvette mal rodée pouvant voir sa résistance à la compression diminuer significativement [BOULAY et al., 1999]. Pour effectuer les opérations de rodage les protections en aluminium aux extrémités des éprouvettes pour les essais en volume sont retirées puis remises une fois ces opérations terminées. La conservation des éprouvettes est toujours effectuée dans la salle d'essais de fluage.

16/32

16/100

Figure 4.5 Conservation en auto dessiccation des éprouvettes pour les essais en volume

4.1.3 Principe des essais

Deux types d'essais sont réalisés :

- les essais à court terme, de quelques minutes à quelques heures ;
- les essais à long terme, de plusieurs mois.

4.1.3.1 Essais à court terme

Ces essais sont réalisés à l'aide des presses suivantes, dont les photos sont présentées en annexe (cf. Figure A.2) :

- Presse n°1 : presse *MFL 5000* du LCPC-Paris ;
- Presse n°2 : presse de compression *Walter + Bai* du LRPC-Strasbourg (force maximale de 3000 kN) ;
- Presse n°3 : presse de traction *Trebel* du LRPC-Strasbourg (force maximale de 25 kN sur l'échelle considérée) ;
- Presse n°4 : presse de traction *Schopper* du LRPC-Strasbourg (force maximale de 150 kN sur l'échelle considérée).

1) Essais de détermination des caractéristiques mécaniques des bétons

a) Résistance à la compression

L'essai de rupture en compression simple, réalisé sur les éprouvettes en béton, permet de déterminer une résistance conventionnelle qui est égale à la charge maximale supportée par une éprouvette de section constante divisée par la valeur de cette section. La norme [NF P 18-406, 1981] définit le mode opératoire de cet essai proprement dit : précautions contre la dessiccation ; pesée ; préparation des faces d'appui ; centrage sur la presse ; mise en charge ; rédaction du compte-rendu d'essais.

Cet essai consiste à exercer un effort de compression de manière continue et sans chocs sur une éprouvette jusqu'à la rupture de celle-ci. Au moment de cette rupture, la presse utilisée indique l'effort maximum atteint. Les éprouvettes pour les cas en volume et en surface sont des éprouvettes 16/32 testées à l'aide respectivement des presse n°1 et n°2, et la vitesse de chargement, constante pendant toute la durée de la montée en charge, est de 0,5 MPa.s^{-1}.

b) Module d'élasticité longitudinale et coefficient de Poisson

L'*American Society for Testing and Materials* (ASTM) propose une méthode d'essai standard pour déterminer le module d'élasticité longitudinale et le coefficient de Poisson des bétons en compression [ASTM C 469-94, 1994]. En France il n'existe pas de norme associée. La réalisation de l'essai repose donc sur le savoir-faire des laboratoires d'essais. Le LCPC-Paris travaille actuellement à la rédaction d'un processus d'essai en vue de sa normalisation [TORRENTI et al., 1999].

Pour les essais en volume, c'est ce processus qui est utilisé pour la détermination du module d'élasticité longitudinale et du coefficient de Poisson. Le principe de cette méthode consiste à soumettre une éprouvette à un chargement en compression continue et cyclique entre 5 % et 30 % de la charge de rupture déterminée par des essais préalables. Le mode opératoire de l'essai est le même que celui de l'essai de rupture en compression simple. Les éprouvettes testées sont des 16/32 et la vitesse de charge et de décharge est constante et égale (0,5 MPa.s^{-1}). Quatre cycles sont réalisés (durée totale de l'essai : environ 10 minutes). Les mesures effectuées sont d'une part celle de l'effort appliqué à l'aide de la presse n°1, et d'autre part celle de la déformation. Cette dernière ne peut être obtenue que par une mesure extensométrique, c'est-à-dire une mesure prélevée directement sur l'éprouvette à l'exclusion de toute mesure du déplacement relatif des plateaux de la presse. En effet, cette mesure ne concerne pas uniquement les déformations de l'éprouvette mais aussi les déformations des surfaces en contact (presse et faces d'appui des cylindres). Les courbes $\sigma = f(\varepsilon)$ des mesures extensométriques sont quasiment rectilignes alors que celles des mesures entre plateaux présentent une concavité vers le haut qui est typique des problèmes de tassements d'appuis [BOULAY et al., 1999]. C'est pourquoi le J2P et des jauges de déformation collées au milieu des éprouvettes parallèlement et perpendiculairement à leur axe (6 jauges par éprouvette), sont utilisés pour ces mesures.

Pour les essais en surface, seule la détermination du module d'élasticité longitudinale des éprouvettes 16/32 modifiées est réalisée à l'aide de la presse n°2. La géométrie de ces éprouvettes n'a pas permis la même instrumentation que pour les essais en volume. Des CIV (4 en tout) avec une base de mesure de 200 mm sont positionnés sur les faces cylindriques (cf. Figure 4.6). Le mode opératoire de l'essai est le même que pour les essais en volume.

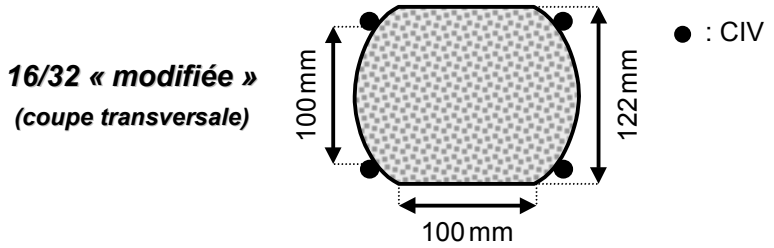


Figure 4.6 Instrumentation des 16/32 modifiées pour la détermination de E

2) Essais de chargement/déchargement par paliers de charge

a) Cas en volume

Les essais consistent à effectuer des cycles de montées et descentes en charge (compression) à l'aide de la presse n°1 avec une charge maximale à environ 40 % de la résistance à la rupture en compression (18 MPa). Un programme de pilotage automatique de la presse est réalisé permettant d'effectuer deux types de cycles (*cycles rapides* et *cycles longs*) ayant les caractéristiques suivantes (cf. Figure 4.7 a)) :

- environ 1 MPa en 10 secondes
- paliers tous les 2 MPa, de 10 secondes pour les cycles rapides et de 2 minutes pour les cycles longs afin de laisser à certains capteurs un temps suffisant de réponse ;
- 4 minutes pour le maximum de charge et 2 minutes pour le minimum de charge (non nul pour éviter des problèmes de pilotage de presse).

La durée totale d'un essai est environ de 3h45min.

Une variante de ces essais consiste à aller jusqu'à 65 % de la résistance à la rupture en compression (28 MPa) (cf. Figure 4.7 b)). Le nombre de paliers par cycle est augmenté et donc la durée totale de l'essai s'en trouve modifiée (environ 4h30min). La charge maximale de 18 MPa est appliquée aux 16/100 afin de ne pas trop solliciter les éprouvettes destinées aux essais de fluage (cf. 4.1.3.2).

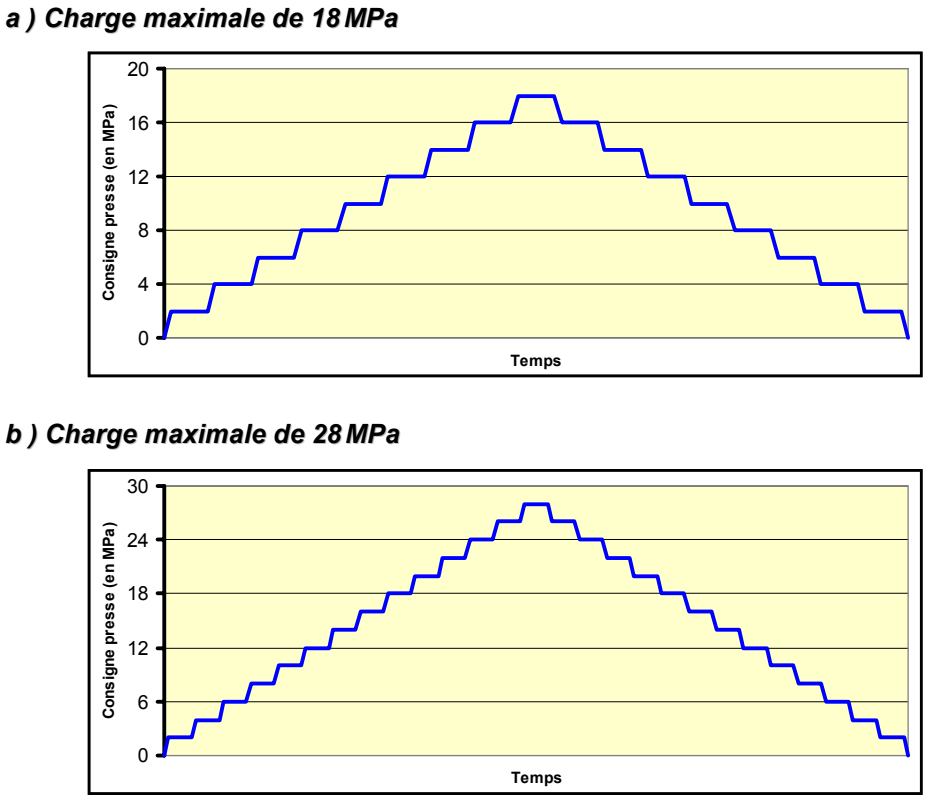


Figure 4.7 Essais par paliers de charge sur éprouvette en béton pour le cas en volume

b) Cas en surface

Les essais consistent à réaliser des cycles de montées et descentes en charge (compression) à l'aide de la presse n°2 avec une charge maximale de 400 kN. Des cycles rapides par paliers de 200 kN précèdent des cycles plus longs par palier de 40 kN (cf. Figure 4.8). Le pilotage de la presse étant réalisé manuellement, les paliers sont maintenus le temps de la stabilisation de la charge et n'ont donc pas la même durée. Celle-ci est en moyenne de 30 secondes.

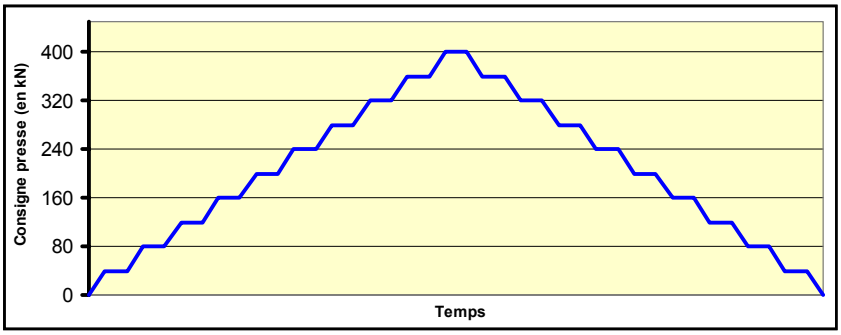


Figure 4.8 Essais par paliers de charge sur éprouvette en béton pour le cas en surface

c) Autres cas

Les CFO n°3 sont testés en traction directe sans les ancrages. Les essais consistent à effectuer des cycles de montées et descentes en charge à l'aide de la presse n°3 jusqu'à une charge maximale de 5 kN (cf. Figure 4.9). Un cycle rapide, avec des paliers intermédiaires de 1 kN et 2,5 kN, précède trois cycles longs avec des paliers de 0,5 kN. Le pilotage de la presse est manuel. Les paliers ont une durée d'environ 1 minute.

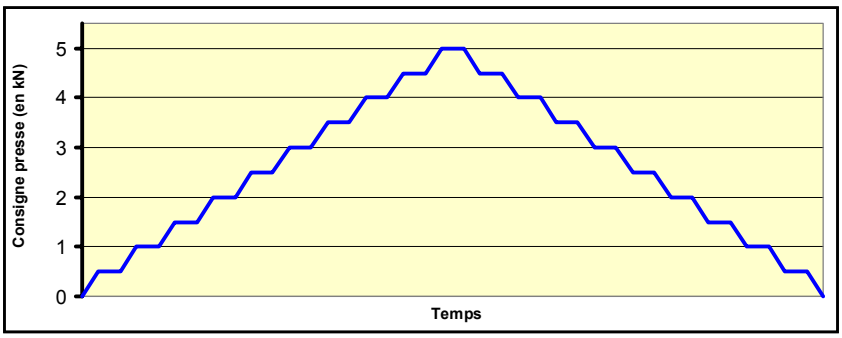


Figure 4.9 Essais par paliers de charge sur les CFO n°3

La plaque en acier, instrumentée par deux CFO n°3 avec en parallèle des jauges de déformation et des CIV, est testée en traction. Les essais consistent à réaliser des montées et descentes en charge à l'aide de la presse n°4 avec une charge maximale de 150 kN. Des cycles rapides par paliers de 75 kN ainsi que des cycles plus longs par paliers de 15 kN sont réalisés. Une valeur initiale de 2,5 kN est imposée afin que les mors de la presse puissent serrer la plaque. Le pilotage de la presse étant réalisé manuellement, chaque palier de charge n'a pas la même durée.

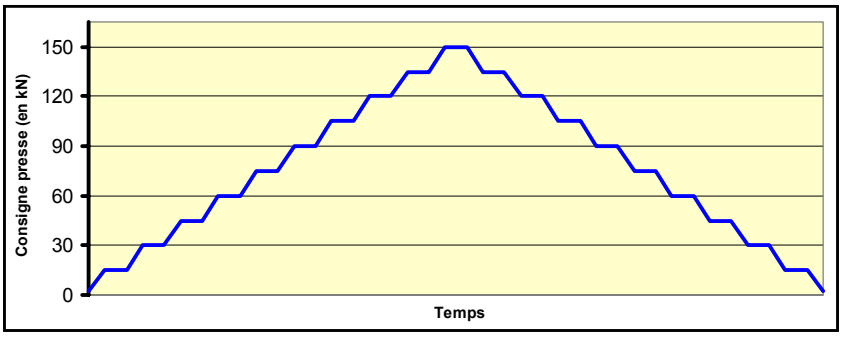


Figure 4.10 Essais par paliers de charge sur plaque en acier pour le cas en surface

4.1.3.2 Essais à long terme

Les essais à long terme sont réalisés à l'aide du matériel d'essais mis au point il y a de nombreuses années par le LCPC-Paris [Service du matériel du LCPC, 1976]. L'ensemble de l'équipement est appelé *bâti de fluage* (cf. Figure 4.11).

Un bâti métallique est composé d'un plateau inférieur et d'un plateau supérieur reliés par quatre tirants cylindriques. Un système à écrous permet d'élever le plateau supérieur pour l'engagement de l'éprouvette en béton 16/100. Entre le plateau inférieur et le casque d'appui de l'éprouvette est intercalé un vérin plat hydraulique en série avec un accumulateur hydropneumatique à vessie. Cet accumulateur est composé d'un corps cylindrique en acier contenant le liquide sous pression (de l'huile), d'une vessie en caoutchouc synthétique qui est gonflée à l'aide d'un gaz neutre (de l'azote), d'une valve de gonflage à clapet et d'un ensemble de raccordement.

L'accumulateur maintient constante la force en compression appliquée par le vérin plat, limitant les variations de pression d'huile qui ont tendance à s'effectuer sous l'effet du raccourcissement de l'éprouvette. Ce raccourcissement engendre une variation de volume d'huile dans l'accumulateur, qui ne provoque qu'une légère chute de pression de l'azote. Cette chute est d'autant plus faible que la variation relative de volume est faible, donc que le volume de l'accumulateur est grand (5 litres). Une cellule de pression intercalée entre le plateau supérieur et l'extrémité de l'éprouvette permet de contrôler la force de compression [LAPLANTE, 1993].

La mesure de déformation de l'éprouvette en béton en cours de fluage est réalisée sur une base de 500 mm (centrée par rapport à la mi-hauteur pour éliminer les effets de bords). Cette base de mesure est définie par deux sections droites de l'éprouvette en béton. Pour chacune de ces sections, trois inserts répartis à 120 ° sont scellés à même le béton en périphérie d'éprouvette. Des logements sur les parois des moules sont prévus pour positionner et maintenir les inserts pendant la coulée du béton. Des plots sont vissés dans ces inserts, sur lesquels s'appuient des tiges verticales en invar (pour éviter les problèmes de dilatation thermique lors des essais). Des *triangles de mesure*, s'appuyant sur ces tiges en partie supérieure du bâti, matérialisent deux plans dont la variation de distance est mesurée par un capteur LVDT. Les bâtis de fluage (au nombre de trois) sont étalonnés suivant la procédure préconisée par [Méthode de vérification périodique, 1992].

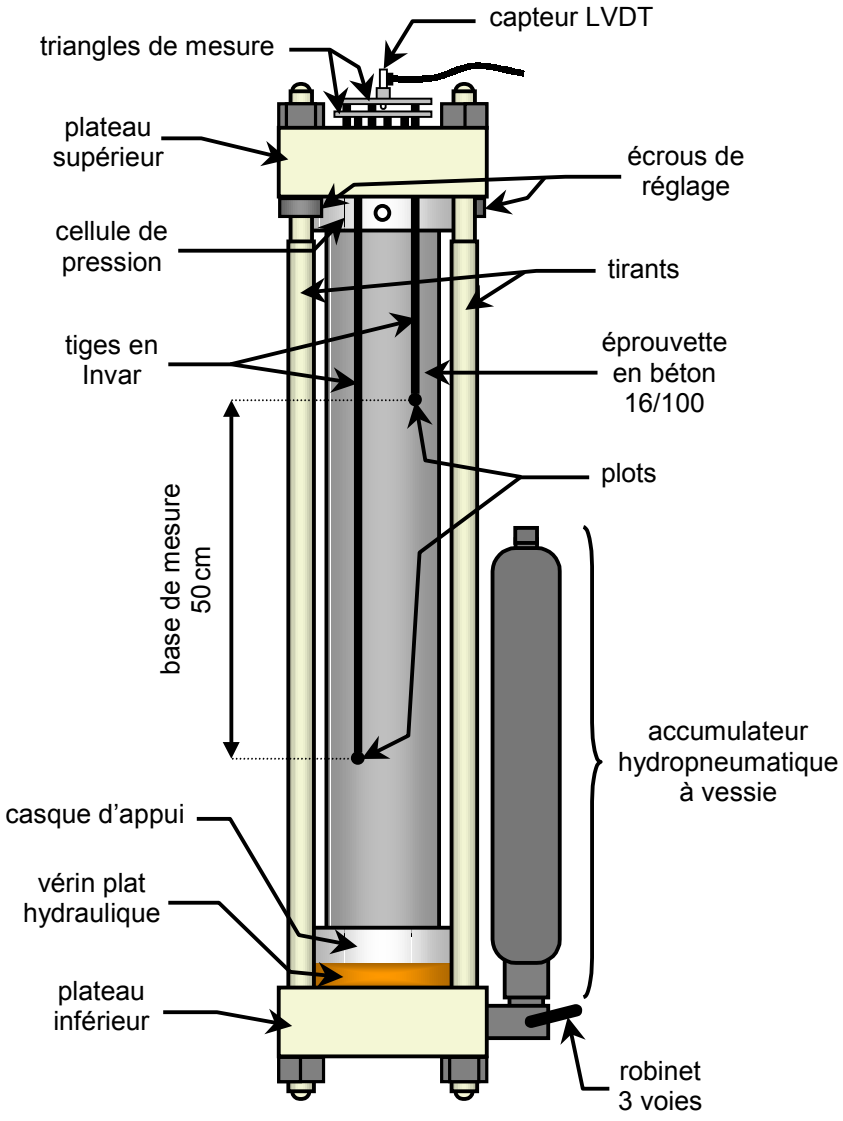


Figure 4.11 Bâti de fluage

Les essais de fluage sont des essais de maintien en pression à long terme (7 mois). Le mode opératoire de l'essai est décrit dans [LAPLANTE, 1993] et [LE ROY, 1996]. Dans la présente étude, le maintien en pression est effectué à environ 40 % de la résistance à la rupture en compression (18 MPa) et la mise en compression dure quelques minutes (environ 5 minutes) afin d'avoir suffisamment de points de mesure. Les éprouvettes testées sont des éprouvettes 16/100 avec un CFO n°2 et un CCV noyés au sein de chacune d'elles.

4.1.4 Bilan expérimental

La figure suivante présente l'ensemble des corps d'épreuve instrumentés et les essais correspondants (cf. Figure 4.12). Des photos de ces corps d'épreuve sous essais sont présentés en annexe (cf. Figures A.3 et A.4).

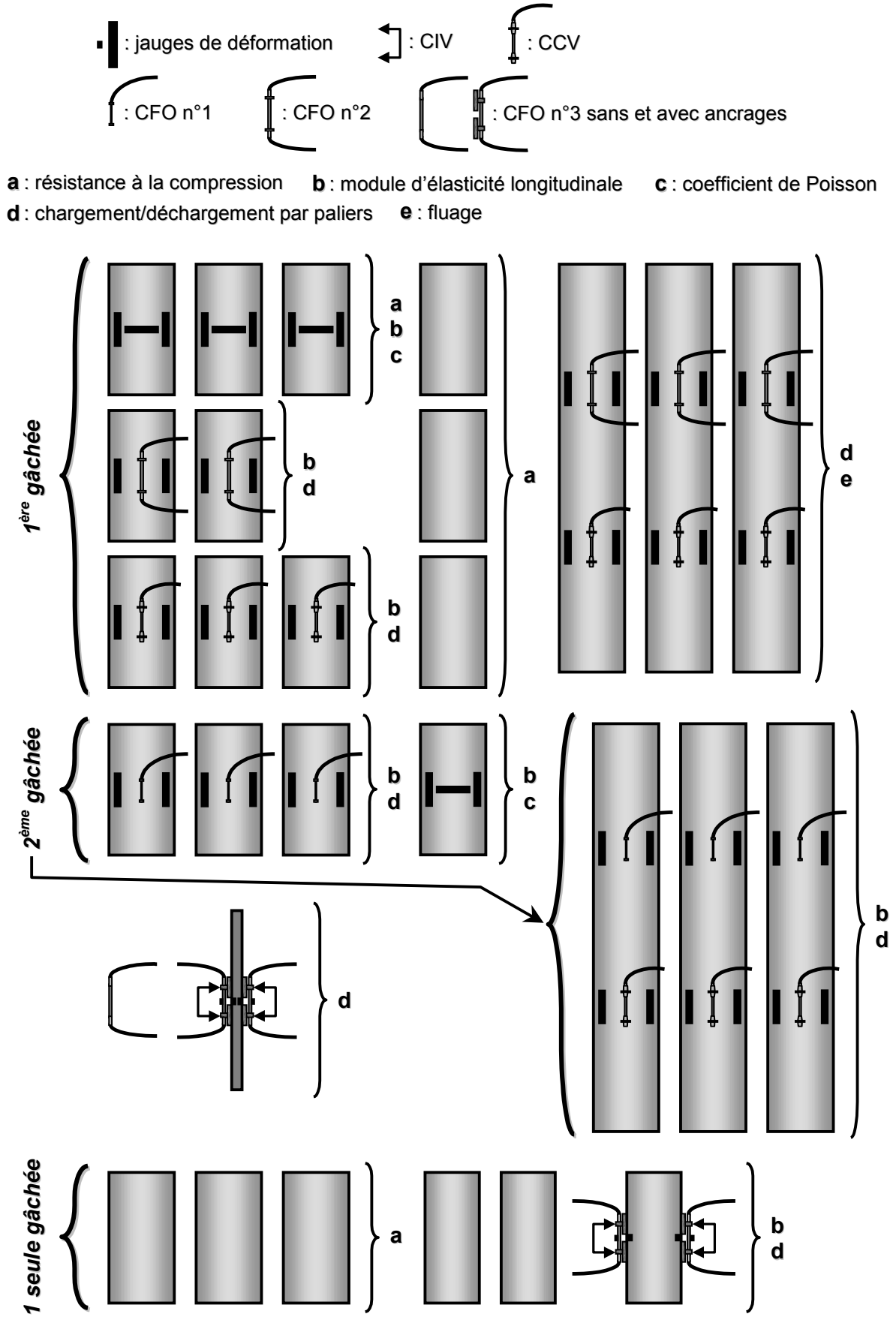


Figure 4.12 Corps d'épreuve instrumentés et essais correspondants

Remarques

- L'extensomètre J2P n'est pas représenté sur les schémas pour une question de lisibilité. Il est utilisé pour toutes les éprouvettes en béton testées pour le cas en volume. Pour les essais de fluage il n'était pas possible de l'utiliser à cause des tirants des bâtis, ni de le monopoliser pendant plusieurs mois. Pour le cas en surface ce type d'instrumentation n'a pas pu être utilisé du fait de la géométrie des éprouvettes en béton et de l'encombrement des autres capteurs.
- Les capteurs LVDT utilisés pour le fluage ne sont pas représentés.
- Comme le précise la norme [NF 18-403, 1969], le nombre d'éprouvettes pour chaque type de configuration d'instrumentation est au moins de trois, excepté pour le CFO n°2 noyé au sein de 16/32 du fait du nombre réduit de capteurs acquis.

4.1.5 Incertitudes de mesure

D'après la norme [NF X 07-001, 1994], l'incertitude de mesure est le *paramètre, associé au résultat d'un mesurage, qui caractérise la dispersion des valeurs qui pourraient raisonnablement être attribuées au mesurande*. En effet, le guide ISO *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure* [NF ENV 13005, 1999], appelé communément le *GUM* (*Guide to the expression of Uncertainty in Measurement*), conduit à considérer que tout résultat de mesure est une variable aléatoire caractérisée grâce à deux paramètres : la valeur annoncée, qui est l'estimateur de l'espérance mathématique de la variable aléatoire *résultat de mesure*, et l'incertitude-type, qui est l'estimateur de l'écart-type de la variable *résultat de mesure*.

L'estimateur de l'écart-type expérimental est donné par [NF X 07-001, 1994] :

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} \left(x_i - \bar{x} \right)^2 \right)}$$

avec :

- x_i : résultat du $i^{ème}$ mesurage
- $\bar{x}$: moyenne arithmétique des n résultats considérés : $\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \left(\sum_{i=1}^{n} x_i \right)$

Du fait des caractéristiques des systèmes de mesure utilisés, mais également des précautions prises lors de la fabrication des corps d'épreuve en béton ainsi que lors des essais, l'incertitude de mesure pourra être estimée au travers de l'incertitude élargie définie par [PRIEL, 1999] :

$$U = k \cdot s$$

où k, qui est le *facteur d'élargissement*, peut être choisi égal à 2, ce qui revient conventionnellement à considérer un intervalle avec un niveau de confiance d'approximativement 95 %.

Dans la suite de ce chapitre, seuls les *écarts-types expérimentaux* sont donnés avec les résultats de mesurage correspondants, et sont simplement notés *écart(s)-type(s)*.

Les résultats théoriques interviennent lors de la confrontation *théorie / expérience*. L'incertitude sur ces résultats a été estimée en réalisant différents maillages pour chaque cas d'étude considéré. Les écarts entre les coefficients de perturbations déterminés pour différents maillages d'un même cas d'étude vérifient :

$$\Delta|\Delta\varepsilon/\varepsilon| < 0{,}5\,\%$$

4.2 Analyse des principaux facteurs d'influence expérimentaux

4.2.1 Comportement propre des capteurs à fibre optique et des éprouvettes

4.2.1.1 Cas des capteurs à fibre optique

D'après [MOREAU et al., 1982] les matériels de mesure utilisés en Génie Civil sont en pratique rarement soumis à des procédures d'étalonnage ou de vérifications à partir de recommandations ou de normes adaptées. Partant de ces constatations, il a été mis en évidence le besoin d'une méthodologie de contrôle des matériels de mesure utilisés en Génie Civil et en particulier les capteurs. L'utilisateur a la possibilité pour des appareils de mesure courants (largement diffusés dans divers domaines et aux caractéristiques connues) de procéder à leur étalonnage ou à leur vérification, que ce soit dans son organisme ou en faisant appel à un organisme habilité et appartenant à la chaîne du Bureau National de Métrologie *BNM*. Pour les matériels spécifiques en Génie Civil, cette possibilité est beaucoup plus restreinte, particulièrement pour des capteurs tels que les pendules, les capteurs de déformation (extensomètres et autres),… De plus, une fois en place ces capteurs deviennent souvent inaccessibles à toute opération d'étalonnage ou de vérification. Ces remarques s'appliquent bien évidemment aux capteurs à fibre optique considérés dans la présente étude. C'est pourquoi il convient avant toute utilisation de ces capteurs de vérifier les spécifications des constructeurs quant à leur comportement sous sollicitations.

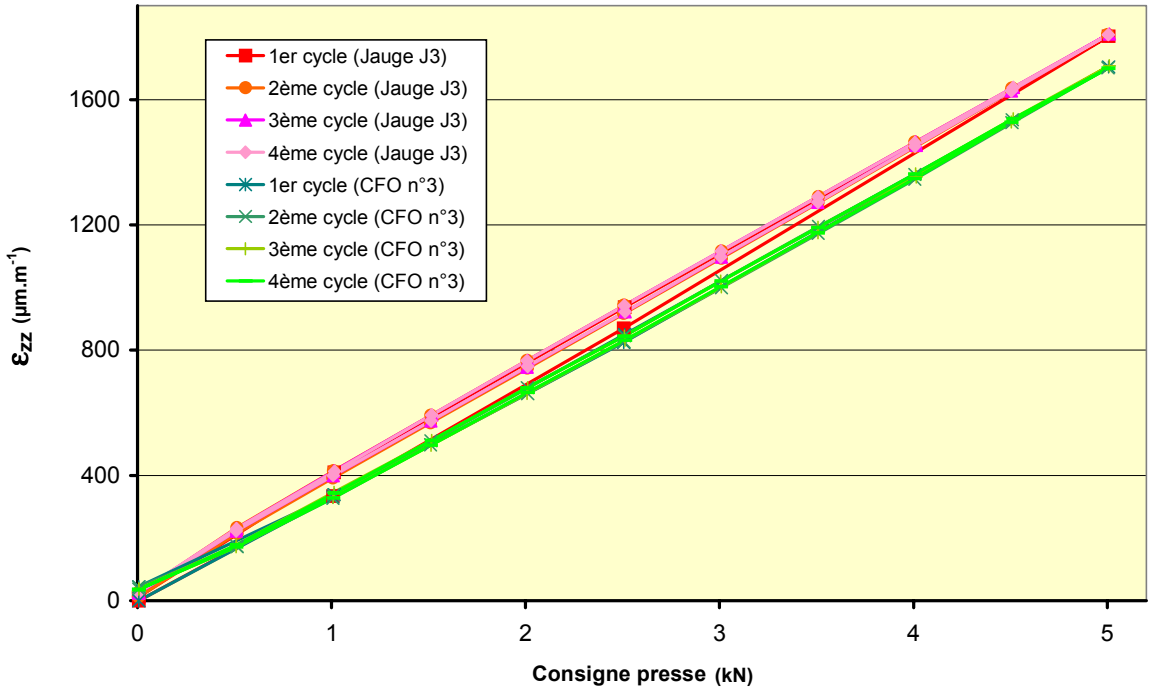
Pour les CFO n°1, le fabricant procède à des essais de traction et de compression pour chacun des capteurs qu'il commercialise. Les modules d'élasticité longitudinale des capteurs ainsi déterminés sont de l'ordre de 200 GPa, ce qui est cohérent avec le module théorique du matériau du corps du capteur qui est un acier inoxydable : 199,86 GPa d'après [LE NEINDRE, 1991].

Pour les CFO n°2 et n°3 le fabricant a fourni des résultats d'essais de traction et de compression effectués sur des capteurs de même conception mais de dimensions plus grandes. Ces capteurs sont soumis à essai afin de vérifier leur comportement sous sollicitations. Des essais de traction directe des capteurs sont réalisés à l'aide de la presse n°3. La géométrie des CFO n°2 ne permet pas une fixation aisée dans les mors de la presse. C'est pourquoi seuls les CFO n°3 (5 en tout) sont testés. Une jauge de déformation de type J3 est collée en surface au milieu de la gaine mécanique pour chacun de ces capteurs (cf. Figure A.4).

La figure suivante présente les résultats de mesure d'un capteur à fibre optique et de la jauge associée en fonction de la consigne de presse pour un essai de quatre cycles de montées et descentes en charge (cf. Figure 4.13 a)). Les résultats de mesurage présentent une assez bonne répétabilité à partir du deuxième cycle. Le premier cycle participe à ce qui est communément appelé la *mise en place des matériaux* les uns par rapport aux autres. Le comportement viscoélastique des colles en est l'un des principaux acteurs. Le deuxième graphique (cf. Figure 4.13 b)) illustre plus clairement cette mise en place. Il présente, pour chaque montée en charge de chacun des cycles, les déformations mesurées par le capteur à fibre optique en fonction de celles mesurées par la jauge. A partir du début de la montée en charge du deuxième cycle (à partir de 0,5 kN), il y a une assez bonne répétabilité des résultats de mesurage, au-delà l'écart maximum entre les différentes déformations mesurées est au plus de $8\,\mu m.m^{-1}$. Un autre point important se dégage de ce graphique : les courbes des montées en charge, à partir du deuxième cycle, ne sont linéaires qu'au-delà de 1,5 kN. Cette valeur est variable suivant les essais réalisés, c'est à dire pour une nouvelle position du capteur à fibre

optique dans les mors de la presse. Ces derniers imposent des efforts au capteur qui sont supérieurs à ceux de la consigne de presse pour les faibles chargements.

a) Résultats bruts des cycles de montées et descentes en charge



b) Comparaison entre la jauge de déformation et le capteur à fibre optique

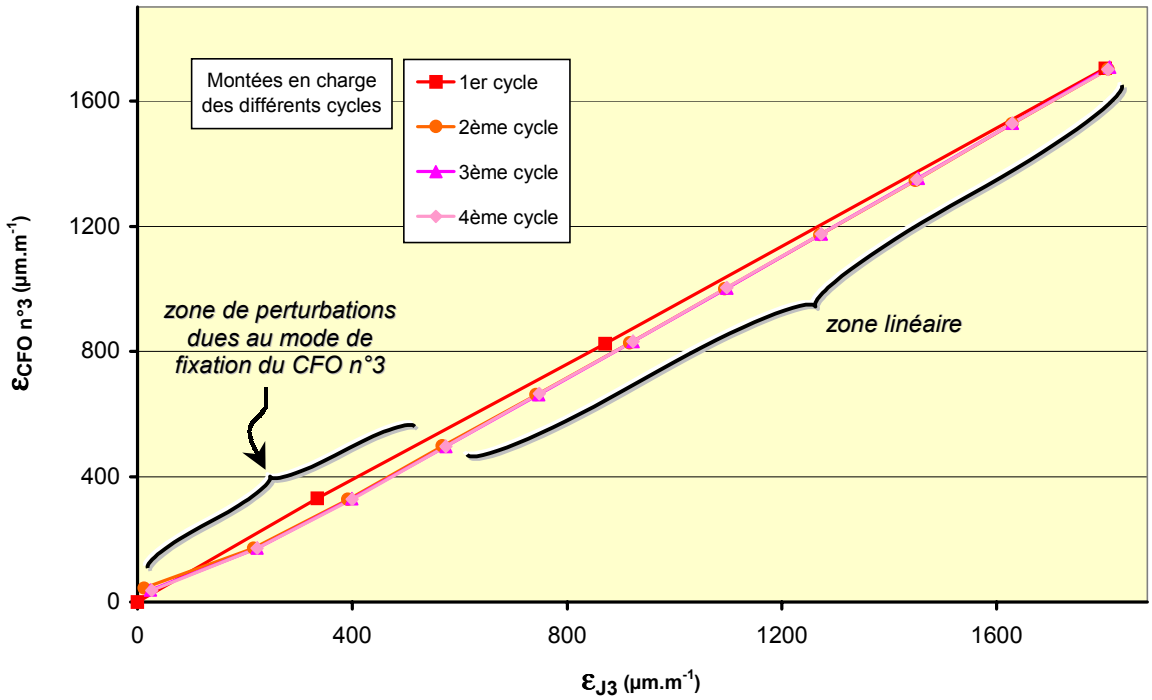


Figure 4.13 Cycles de chargement/déchargement de traction directe d'un CFO n°3

Ce n'est qu'après avoir fait ces constats que la détermination du module d'élasticité longitudinale global des capteurs CFO n°3 est réalisée. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant (cf. Tableau 4.4). Les valeurs de ce tableau sont pour chaque capteur (capteur à fibre optique et jauge) la moyenne des pentes des courbes $\sigma_{consigne\ presse} = f(\varepsilon_{capteur})$ (avec σ en MPa et ε sans unité) pour l'ensemble des cycles de chargement (à partir du deuxième cycle), seulement pour les montées en charge et pour des valeurs de 2 kN jusqu'à 5 kN.

Tableau 4.4 Résultats des essais de traction directe des CFO n°3

	$E_{CFO\ n°3}$ (GPa)	
	Moyenne	***Ecart-type***
J3	145,9	3,4
CFO n°3	144,4	1,8

Le module d'élasticité longitudinale moyen des capteurs à fibre optique testés de type CFO n°3 est donc d'environ 145 GPa. Ce qui correspond bien au module de l'invar, le principal matériau de ce type de capteur, qui est d'après [LE NEINDRE, 1991] de 141 GPa.

4.2.1.2 Cas des éprouvettes en béton

Les bétons utilisés ont déjà fait l'objet d'études sur leurs propriétés mécaniques. Cependant l'évolution de ces propriétés dépend de plusieurs facteurs. Par exemple pour la résistance en compression du béton, les plus importants facteurs sont d'après [LAPLANTE, 1993] :

- la formulation du béton : le ciment (type et marque), le rapport eau/ciment, les adjuvants chimiques et les ajouts minéraux ;
- les conditions de mûrissement.

De plus, pour le même béton pour le cas en volume deux gâchées sont nécessaires. Or d'une gâchée à une autre, pour un même béton, les propriétés mécaniques peuvent être modifiées de façon significative [ADAM et al., 1984]. C'est pourquoi il est important de vérifier par des essais les propriétés mécaniques des bétons utilisés et notamment la résistance en compression R_c, le module d'élasticité longitudinale E et le coefficient de Poisson ν. C'est d'autant plus important que ces propriétés sont celles de l'éprouvette servant de référence dans la présente étude. Les résultats des essais de rupture en compression pour les deux bétons utilisés sont présentés dans le tableau suivant (cf. Tableau 4.5).

Tableau 4.5 Propriétés mécaniques des bétons utilisés

	Age du béton (jours)	R_c (MPa)	
		Moyenne	***Ecart-type***
Cas en volume (B0)	55	43,0	1,0
Cas en surface (n°671023)	28	47,6	0,3

La figure suivante présente un de ces essais pour le cas en volume, l'éprouvette testée étant instrumentée par trois jauges et le J2P (cf. Figure 4.14).

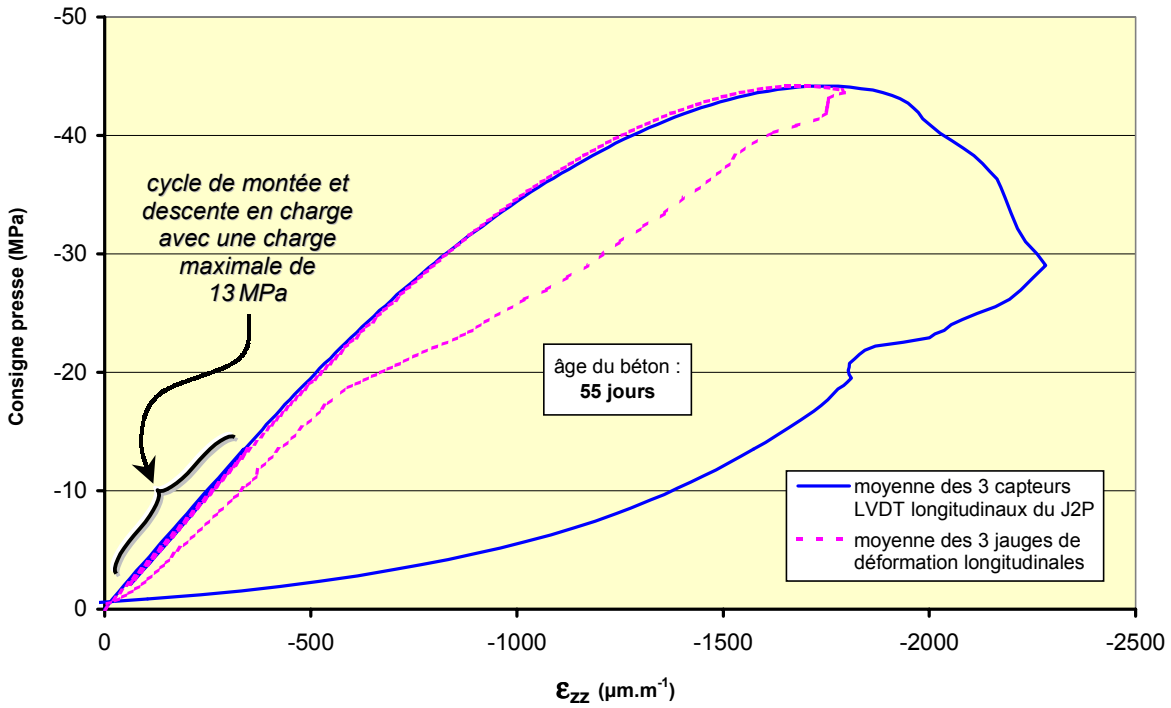


Figure 4.14 Détermination de R_c du béton pour le cas en volume

Les différences entre les jauges et le J2P lors de la descente en charge s'expliquent par la manière dont s'effectue la rupture de l'éprouvette ainsi que par la différence entre les fixations de ces capteurs. La rupture se produit dans la zone centrale de l'éprouvette et celle-ci n'est plus formée que par deux cônes inversés dont les bases sont en contact avec les plateaux de la presse [DE LARRARD, 2000]. Le béton restant au centre et à la surface de l'éprouvette est complètement détérioré (ex. : fissures, morceaux détachés). La descente en charge de l'ensemble est mieux suivie par un capteur collé sur toute sa longueur que par un capteur fixé en deux points qui ne suivent plus correctement la déformation d'ensemble (ex. : glissement, blocage dans une fissure).

Les courbes suivantes présentent un essai de détermination du module d'élasticité longitudinale du béton pour le cas en volume (cf. Figure 4.15). L'allure de ces courbes illustre le comportement viscoélastique du béton. Le module d'élasticité longitudinale est la moyenne des pentes des courbes $\sigma_{\text{consigne presse}} = f(\varepsilon_{\text{capteur}})$ des montées en charge des trois derniers cycles. Le coefficient de Poisson est la moyenne des pentes des courbes $\varepsilon_{\text{transversales}} = f(-\ \varepsilon_{\text{longitudinales}})$ des montées en charge des trois derniers cycles (cf. Figure 4.16).

En pratique, le module d'élasticité longitudinale peut-être évalué à partir de la résistance en compression selon la formule réglementaire suivante [BAEL91, 1992] :

$$E = 11000 \cdot \sqrt[3]{R_c}$$

Cette formule est une estimation par défaut du module et dont les limites sont décrites dans [TOUTLEMONDE, 1999].

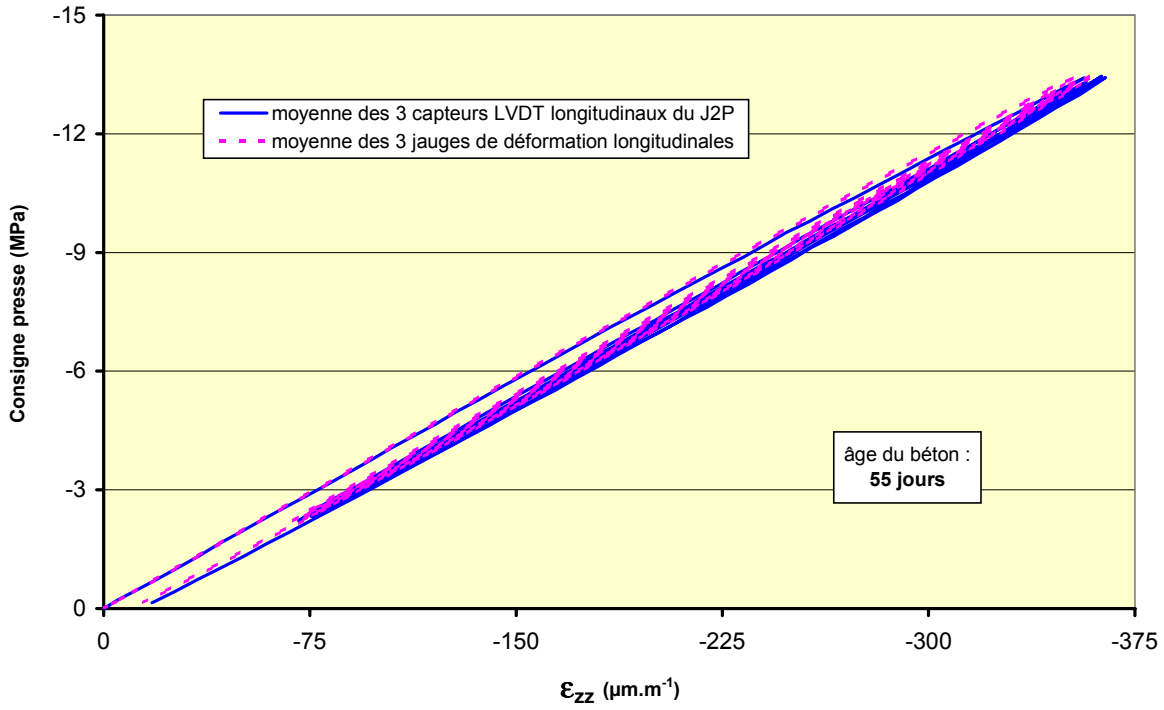


Figure 4.15 Détermination de E du béton pour le cas en volume

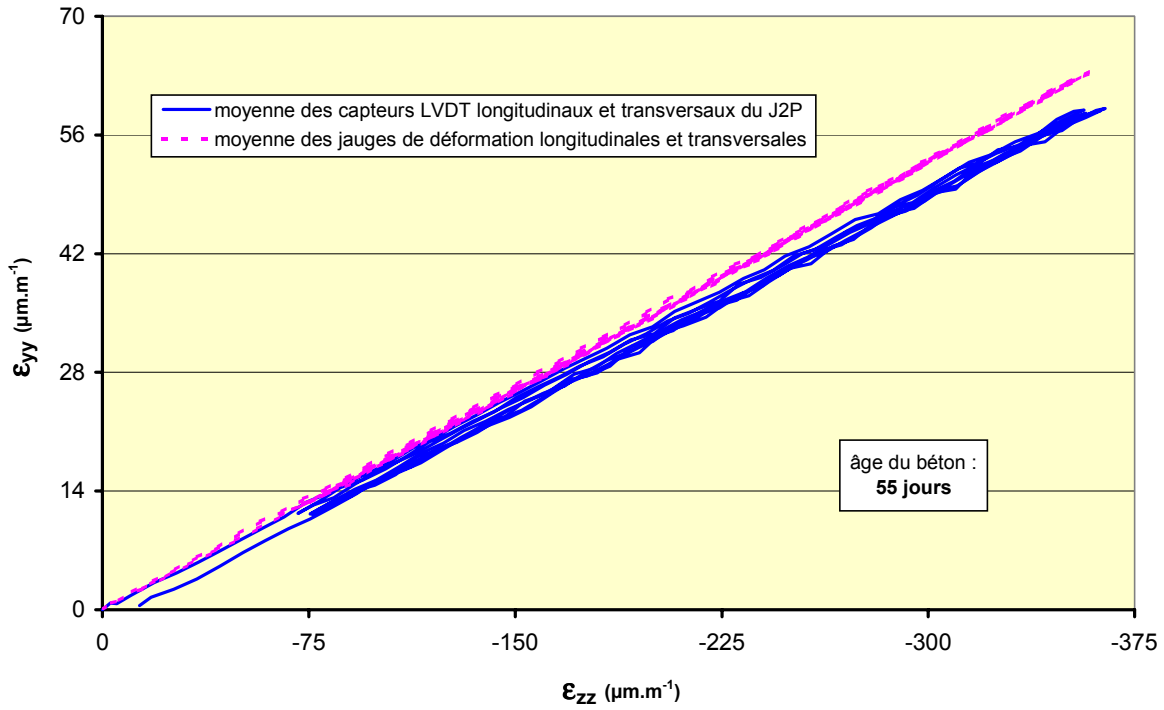


Figure 4.16 Détermination de ν du béton pour le cas en volume

Les résultats des essais de détermination de E et ν d'un béton âgé de 55 jours pour le cas en volume sont consignés dans le tableau suivant (cf. Tableau 4.6). Le module d'élasticité longitudinale déterminé par les essais est de 39 GPa et le coefficient de Poisson de 0,17. Le module d'élasticité longitudinale déterminé par la formule réglementaire est légèrement plus faible (écart inférieur à 0,5 GPa).

Tableau 4.6 Caractéristiques mécaniques du béton pour le cas en volume

	Cas en volume : Béton B0			
	$E_{\text{béton B0}}$ (GPa)		$\nu_{\text{béton B0}}$	
	Moyenne	***Ecart-type***	***Moyenne***	***Ecart-type***
Jauges	39,1	0,3	0,169	0,010
J2P	38,9	0,9	0,169	0,004
BAEL91	38,6	0,3		

Les essais sur les éprouvettes avec les capteurs noyés en leur sein ont débuté avec un béton âgé de 101 jours. Afin d'évaluer l'évolution avec le temps des propriétés mécaniques du béton, qui est faible au-delà de 28 jours, des essais de rupture en compression sont réalisés. La résistance en compression à 101 jours est en moyenne de 48,1 MPa avec un écart-type de 0,6 MPa. Les ordres de grandeur des résultats expérimentaux de [LAPLANTE, 1993] sont vérifiés. Le module d'élasticité longitudinale obtenu par la formule réglementaire du BAEL91 est de 40 GPa. En prenant en compte l'écart à 55 jours entre les résultats des essais et ceux des calculs, ainsi que la durée des essais (environ 40 jours), le module d'élasticité longitudinale pendant les essais avec les capteurs en volume vérifie :

$$40\ \text{GPa} \leq E_{\text{béton volume}} \leq 41\ \text{GPa}$$

Les essais de détermination du coefficient de Poisson ne sont pas réalisés à nouveau, puisqu'il est insensible à l'âge du béton et peut être considéré constant [OLUOKUN et al., 1991].

Pour le cas en surface, les essais de rupture en compression donnent une résistance en compression moyenne de 47,6 MPa avec un écart-type de 0,3 MPa pour un béton âgé de 28 jours. Le module d'élasticité longitudinale obtenu par la formule réglementaire est de l'ordre de 40 GPa. Les essais avec les capteurs à fibre optique fixés en surface d'éprouvettes ont débuté avec un béton âgé de 124 jours. Compte tenu de ce qui a été écrit pour le cas en volume ainsi que des autres résultats expérimentaux sur ce béton, le module d'élasticité longitudinale pendant les essais avec les capteurs en surface vérifie :

$$40\ \text{GPa} \leq E_{\text{béton surface}} \leq 41\ \text{GPa}$$

Le coefficient de Poisson n'est pas déterminé expérimentalement. Selon les essais déjà réalisés sur ce type de béton, il est de l'ordre de 0,17.

La courbe de la figure suivante est la moyenne des quatre CIV pour une 16/32 modifiée, pour les montées en charge des trois derniers cycles à partir d'une consigne de presse de 2 MPa environ (cf. Figure 4.17).

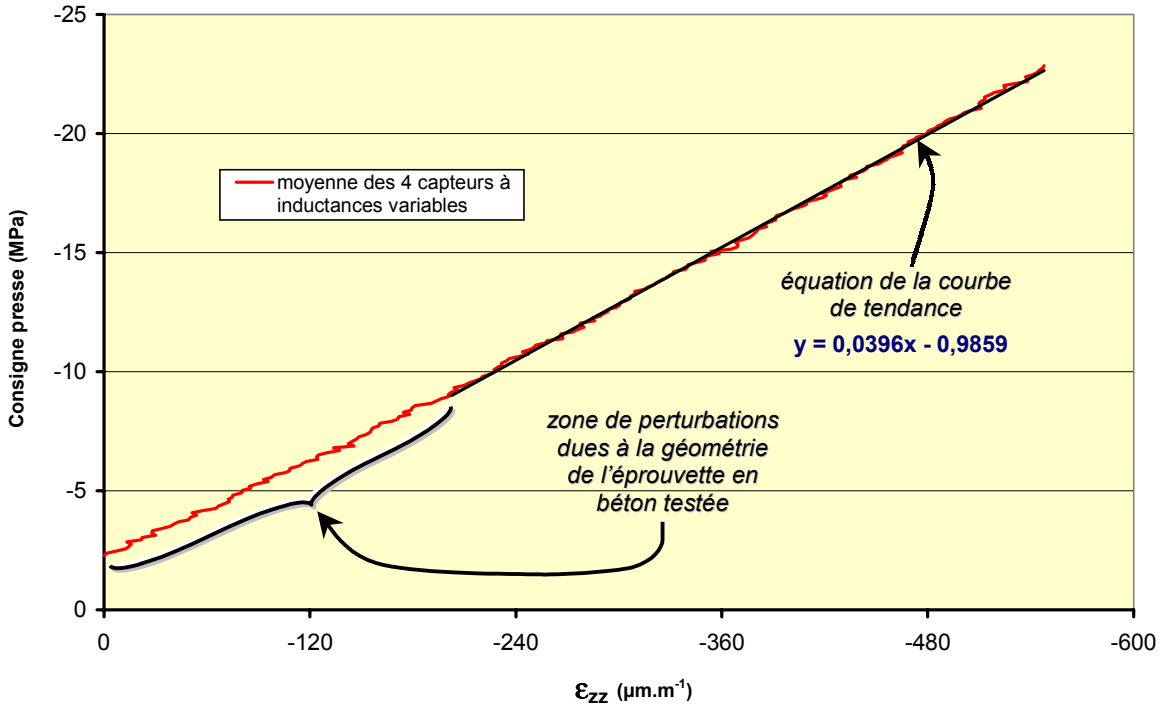


Figure 4.17 Détermination de E pour une 16/32 modifiée en béton pour le cas en surface

Cette courbe est linéaire, à partir de 160 kN (environ 9 MPa). Le module d'élasticité longitudinale dans cette zone est de l'ordre de 40 GPa. La zone non linéaire étant due à la géométrie même de l'éprouvette, ses méplats ne sont pas tout à fait parallèles. Les deux autres éprouvettes fabriquées présentant des défauts géométriques plus importants (dus à la fabrication et au séchage) ne sont pas testées.

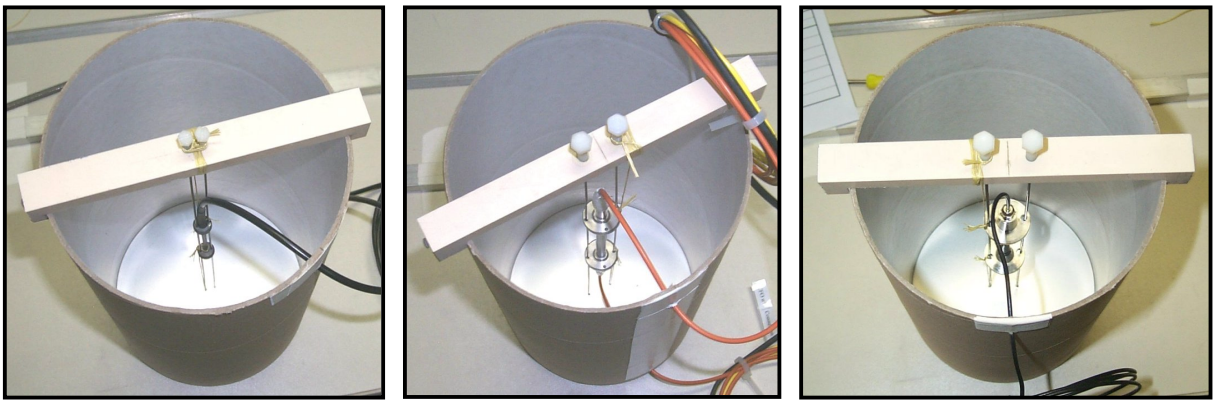
4.2.2 Intégration des capteurs à fibre optique au corps d'épreuve en béton

4.2.2.1 Cas en volume

Les moules des éprouvettes servent de support de fixation aux capteurs à noyer au sein du béton.

Pour les éprouvettes 16/32, le système est facilement réalisé. La figure suivante présente les photos des trois montages différents(cf. Figure 4.18). Chacune de ces photos présente un seul des divers moules instrumentés pour chaque capteur. Deux tiges en acier, guidées par un *portique* en tête de moule solidaire de ce dernier et traversant son fond, permettent de maintenir le capteur dans l'axe de l'éprouvette. Ces deux tiges passent dans les trous de fixation que comportent chaque capteur à leurs ancrages et sont bloquées au niveau du portique par vissage. Des fils en kevlar, composés d'une multitude de brins, permettent de fixer les extrémités du capteur au portique et au niveau du fond du moule sans effort de traction (contrôlé par la mesure des déformations des capteurs). Ils empêchent le capteur de descendre (lors du coulage du béton) ou de remonter (principalement lors de la mise en place du béton). D'un diamètre suffisant pour éviter la flexion, les tiges sont enlevées tout de suite après la mise en place par vibration et les fils sont coupés en tête d'éprouvette, restant à demeure dans le béton

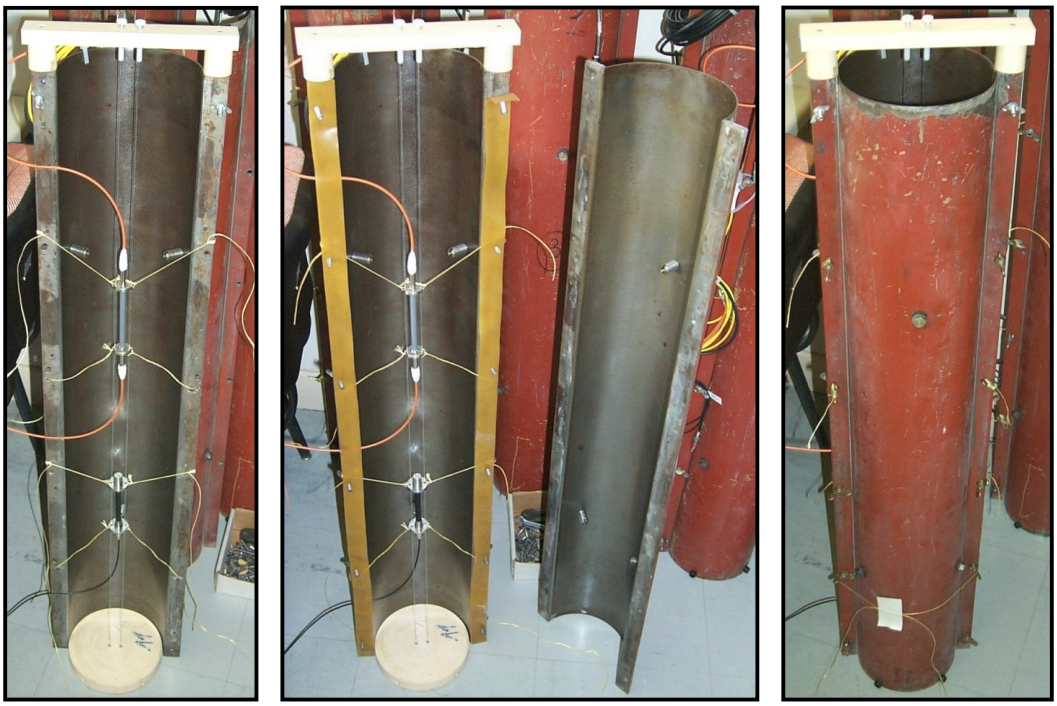
sans le perturber. Pour les sorties des câbles une entaille dans le moule en carton est réalisée avec à son extrémité un trou du diamètre du câble. Cette découpe est effectuée avec soin afin de ne pas détériorer la surface intérieure du moule. Une fois le câble à poste, l'entaille est refermée par un adhésif toilé afin d'éviter son ouverture et des fuites éventuelles pendant le coulage et la mise en place du béton. De par les différences entre les capteurs (dimensions, diamètre et sorties des câbles), le procédé est adapté suivant l'instrumentation à fixer (entraxes des trous pour passer les tiges, diamètre des trous pour les câbles,…).



CFO n°1 **CFO n°2** **CCV**

Figure 4.18 Fixation dans les moules des éprouvettes 16/32 des capteurs à noyer

Pour les 16/100, les montages sont plus compliqués à réaliser. La figure suivante présente les photos d'un montage *CCV / CFO n°2* dans une éprouvette 16/100 (cf. Figure 4.19).



CFO n°2 + CCV

Figure 4.19 Fixation dans les moules des éprouvettes 16/100 des capteurs à noyer

Le *premier problème* rencontré se situe au niveau des tiges en acier. Les diamètres des trous de fixation des ancrages ne permettent pas d'utiliser des tiges de diamètre suffisamment important pour empêcher leur flexion sous le poids des capteurs. De plus, l'entraxe de ces trous de fixation n'étant pas les mêmes, des tiges trop rigides ne conviennent pas. Des câbles en acier galvanisé de 0,7 mm de diamètre sont utilisés et tendus par un système de vissage au niveau du portique avec blocage au fond des moules. Des fonds en avcodur sont réalisés spécialement pour ces essais aux dimensions précises des moules, afin de faciliter leur usinage pour la conception du système de fixation.

Sortir les câbles des moules métalliques présente un *second problème*. Pour le résoudre, une entaille est pratiquée au niveau du joint d'une des deux coques métalliques. De la même manière que pour les 16/32, les capteurs sont maintenus en hauteur sans effort de traction (contrôlé par la mesure de déformation des capteurs) par des fils en kevlar, reliant les capteurs directement aux parois des moules où des trous de fixation sont usinés. Afin de faciliter cette mise en œuvre, toutes ces opérations sont réalisées sur une seule coque (*coque de travail*) et non sur l'ensemble du moule assemblé (cf. Figure 4.19). Un autre problème apparaît lors de l'assemblage des deux coques : les fils en kevlar se détendent suite à la diminution de diamètre de la coque de travail. Par conséquent, seules les extrémités supérieures des capteurs sont fixées à la coque de travail, la longueur des fils tenant compte du raccourcissement du diamètre de la coque. Une fois les deux coques assemblées, les fils en kevlar, préalablement fixés aux extrémités inférieures des capteurs, sont tendus et solidarisés au moule une fois assemblé, tout en respectant l'alignement des capteurs entre eux dans l'axe du moule. Les inserts sont préalablement fixés aux deux coques. La surface intérieure des coques et le fond du moule sont graissés pour permettre un démoulage plus aisé. Le procédé de fixation est le même pour l'ensemble des éprouvettes 16/100. Il a l'avantage d'être applicable à des capteurs de dimensions différentes. Une fois le coulage et la mise en place du béton réalisés, les câbles métalliques sont coupés en tête d'éprouvette et les fils en kevlar sont coupés au niveau des coques métalliques. Ces câbles et fils ne perturbent en rien les expérimentations.

La mise au point de l'ensemble de ces procédés (16/32 et 16/100) a nécessité la réalisation d'une série de tests. Les différents montages réalisés sont testés, avec des gabarits usinés aux mêmes dimensions que les capteurs à fibre optique, selon la procédure suivante : après avoir coulé et vibré le béton, séchées environ une ou deux heures, les éprouvettes sont démoulées et le béton frais délicatement retiré ; le positionnement exact des capteurs est mesuré, en le comparant avec les mesures initiales (écart de position avant et après bétonnage inférieur à 0,5 mm). Une illustration présentant le cas d'une éprouvette 16/100 est donnée figure suivante (cf. Figure 4.20).

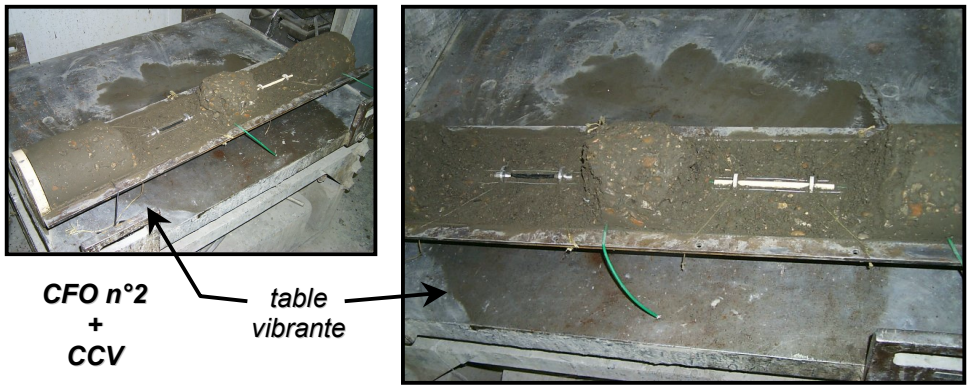


Figure 4.20 Test sur les fixations dans les moules des éprouvettes 16/100

Ces tests ont permis de mettre au point les opérations de coulage et de mise en place du béton pour les deux types d'éprouvette. Ces opérations sont réalisées de la manière suivante :

- 16/32 : L'opération est réalisée comme suit : remplissage de la totalité du moule, déposé sur la table vibrante ; ajout de béton pendant la vibration afin de remplir le moule jusqu'à la tête de l'éprouvette (cf. Figure 4.21).

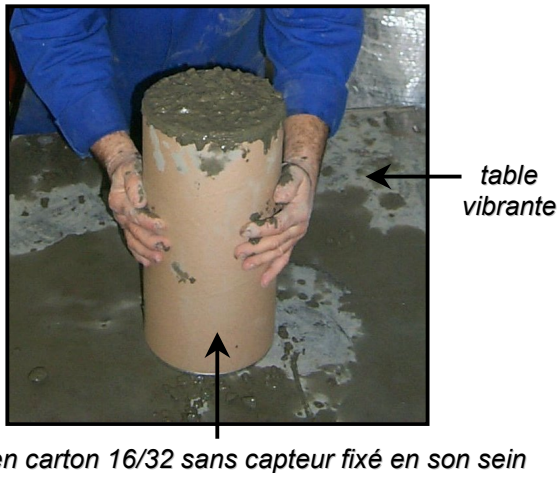


Figure 4.21 Coulage et mise en place du béton pour les éprouvettes 16/32

- 16/100 : Pour le coulage, deux plaques en aluminium sont usinées afin de protéger les capteurs lors de l'opération. En effet, le coulage du béton pour une éprouvette de 1 m de hauteur peut détériorer les systèmes de fixation des capteurs au sein des moules ou les capteurs eux-mêmes. Ces plaques sont remontées au fur et à mesure du coulage afin de les libérer plus facilement sans risquer de détériorer les installations au sein des moules (cf. Figure 4.22). Pour une question de poids, le remplissage est entièrement effectué sur la table vibrante. Ce remplissage est réalisé en deux temps pour éviter au capteur situé dans la partie inférieure du moule des pressions trop fortes lors de la mise en vibration : remplissage jusqu'à la moitié du moule puis vibration de 30 secondes ; remplissage jusqu'à la tête de l'éprouvette, puis vibration ; ajout de béton pendant la vibration afin de compléter jusqu'à la tête de l'éprouvette.

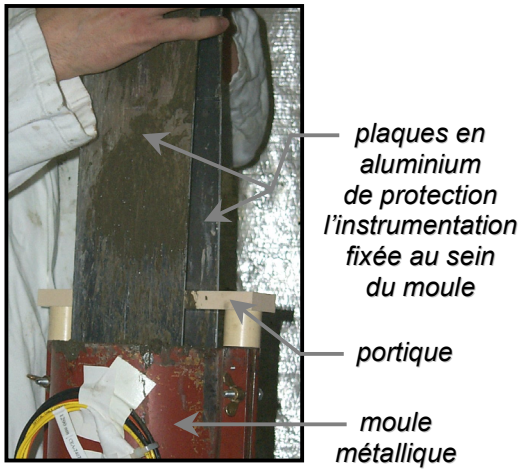


Figure 4.22 Coulage du béton pour les éprouvettes 16/100

4.2.2.2 Cas en surface

Les capteurs étudiés sont fixés au béton en deux points d'ancrage (cf. 2.2.4.1). Ces capteurs devant rendre compte du comportement en volume du béton, les ancrages possèdent une certaine profondeur de scellement. Des tests sont réalisés afin de déterminer une méthode de fixation des ancrages des CFO n°3 à l'éprouvette en béton. Il ne s'agit pas à travers ces tests d'étudier diverses techniques de fixation mais de faire en sorte que la liaison *ancrages / béton* soit la plus parfaitement adhérente possible.

La plaque en acier est instrumentée par deux capteurs à fibre optique, nommés respectivement CFO n°3a et CFO n°3b, ainsi que par quatre jauges de déformation (une sur chaque gaine mécanique du capteur et une sur la plaque entre chaque paire d'ancrages) et deux CIV (un positionné sur les têtes de chaque paire d'ancrages) (cf. Figure 4.12).

Dans un premier temps les deux capteurs à fibre optique sont fixés à la plaque à l'aide des ancrages par *simple boulonnage*. Les boulons servent de scellement aux ancrages. Les tiges filetées des boulons utilisés ont un diamètre (6 mm) inférieur au diamètre des trous de l'embase des ancrages (8 mm) et inférieur au diamètre des trous dans la plaque acier (7 mm) afin que le transfert des efforts se fasse directement de la plaque aux ancrages sans matériau intermédiaire. Il y a quatre boulons pour chaque ancrage, les ancrages en vis-à-vis des deux capteurs à fibre optique ont donc les quatre mêmes boulons de fixation (cf. Figure A.4 : Presse n°4). La plaque ainsi instrumentée est testée en traction à l'aide de la presse n°4. La figure suivante (cf. Figure 4.23) présente les résultats de cet essai (*ancrages boulonnés*), pour les trois cycles de montés et descente en charge, pour seulement un côté instrumenté de la plaque, afin d'avoir une meilleure lisibilité, pour la jauge de déformation de la plaque ainsi que pour le CIV, afin de regarder uniquement le transfert des efforts de la plaque aux ancrages.

Alors que les résultats de mesure de la jauge présentent une bonne répétabilité, les résultats des CIV font apparaître dès le premier cycle qu'il y a glissement des ancrages sur la plaque. La fixation par simple boulonnage peut engendrer d'importantes irréversibilités même si les trous de la plaque sont usinés aux mêmes dimensions que ceux des ancrages et en choisissant des boulons de même diamètre. Il y aura toujours du jeu entre les différents éléments dû aux pas de vis ou à des imperfections de fabrication. De plus, les efforts ne sont transmis qu'en des points particuliers et non pas à l'ensemble de l'embase des ancrages, ce qui pose le problème de la base de mesure au niveau du capteur.

C'est pourquoi dans un deuxième temps, les ancrages sont fixés à la plaque par boulonnage et collage. La colle utilisée est un adhésif époxyde bicomposant à durcissement rapide de type araldite. Des boulons avec des tiges filetées de diamètre égal à celui des trous dans les cavaliers (8 mm) sont utilisés et les trous dans la plaque sont d'un diamètre plus grand (8 mm). La plaque ainsi instrumentée est à nouveau testée en traction. Elle subit tout d'abord deux cycles rapides avant trois cycles de mesure (cf. Figure 4.23) (*ancrages boulonnés et collés*).

La liaison *ancrages / plaque* est meilleure. La répétabilité des mesures par le CIV n'est cependant pas parfaite, s'améliorant néanmoins avec les cycles : écart maximum entre les différentes déformations mesurées de 16 $\mu m.m^{-1}$ entre le premier et le second cycle de mesure, et de 13 $\mu m.m^{-1}$ entre le second et le troisième cycle de mesure. En effet, pour des raisons liées à des contraintes expérimentales (délais), la colle n'a été appliquée que 6 heures avant l'essai, alors que la durée de prise à 20 °C préconisée par le fabricant est de 24 heures.

La courbe ne devient linéaire qu'à partir d'un d'effort de l'ordre de 45 kN. Un certain niveau de traction est nécessaire pour reprendre tous les efforts initiaux dans la plaque et les capteurs

à fibre optique, provenant essentiellement de la fixation par boulonnage de la gaine mécanique des capteurs dans les ancrages, ainsi que de la fixation de la plaque instrumentée dans les mors de la presse.

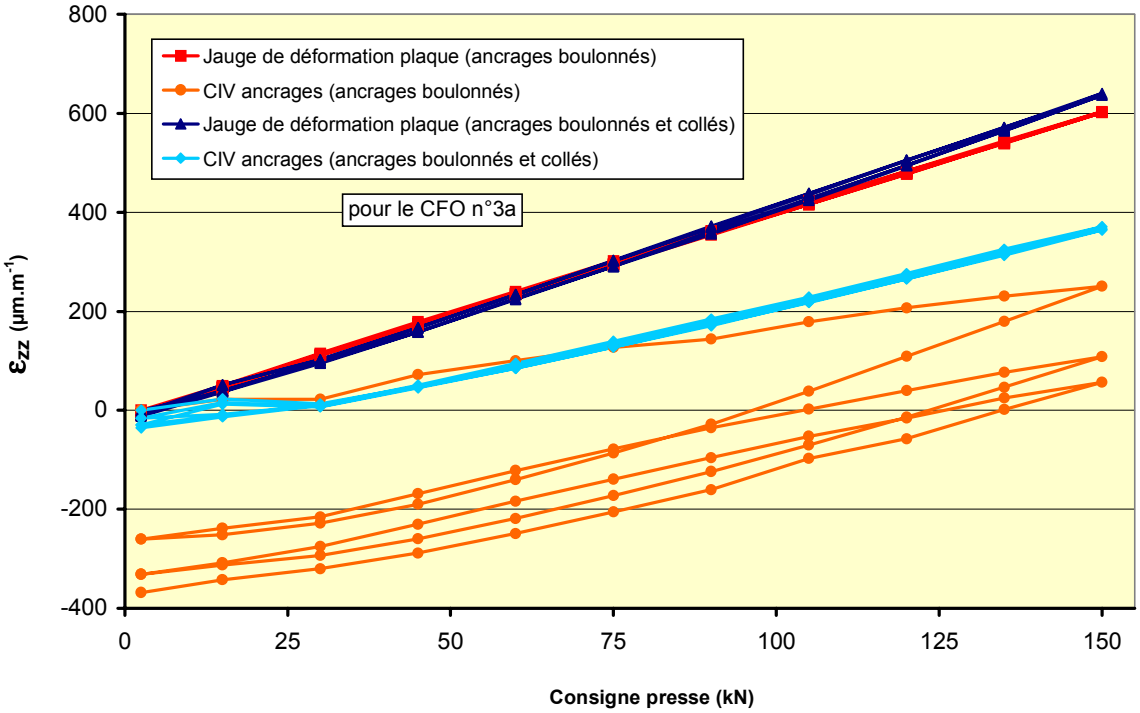


Figure 4.23 Essais sur la plaque en acier pour tester la fixation des ancrages

Cette méthode de fixation est retenue pour l'éprouvette en béton. Les ancrages sont fixés au béton à l'aide de boulons (8 mm de diamètre), de chevilles (la profondeur des scellements est de 22 mm) et de colle. Cette dernière est un adhésif bicomposant rapide à froid permettant d'avoir une durée de prise réduite.

Il a été constaté lors des opérations de fixation combien il était difficile de réaliser quatre trous parfaitement centrés et perpendiculaires au parement sur l'éprouvette en béton, malgré un mannequin de perçage et des conditions de travail en laboratoire favorables.

L'éprouvette en béton est instrumentée par deux capteurs à fibre optique nommés respectivement CFO n°3a et CFO n°3b, ainsi que par la même instrumentation classique que celle de la plaque en acier (cf. Figure 4.12). Elle est testée en compression à l'aide de la presse n°4. Après deux cycles rapides, trois cycles de mesure sont réalisés et sont présentés ci-après (cf. Figure 4.24) avec seulement les mesures des jauges de déformation du béton et des CIV des deux côtés instrumentés de l'éprouvette.

Les résultats de mesurage présentent une très bonne répétabilité, l'écart maximum entre les différentes déformations mesurées pour les cycles de mesure étant au plus de 5 µm.m^{-1}. La liaison *ancrages / éprouvette* est donc considérée satisfaisante. Les allures des courbes (cf. Figure 4.24) sont dues à des problèmes de géométrie de l'éprouvette (cf. 4.2.1.2) ainsi qu'à l'implantation des capteurs à fibre optique à sa surface. L'analyse de ces résultats est présentée dans la suite du présent chapitre (cf. 4.2.3.2).

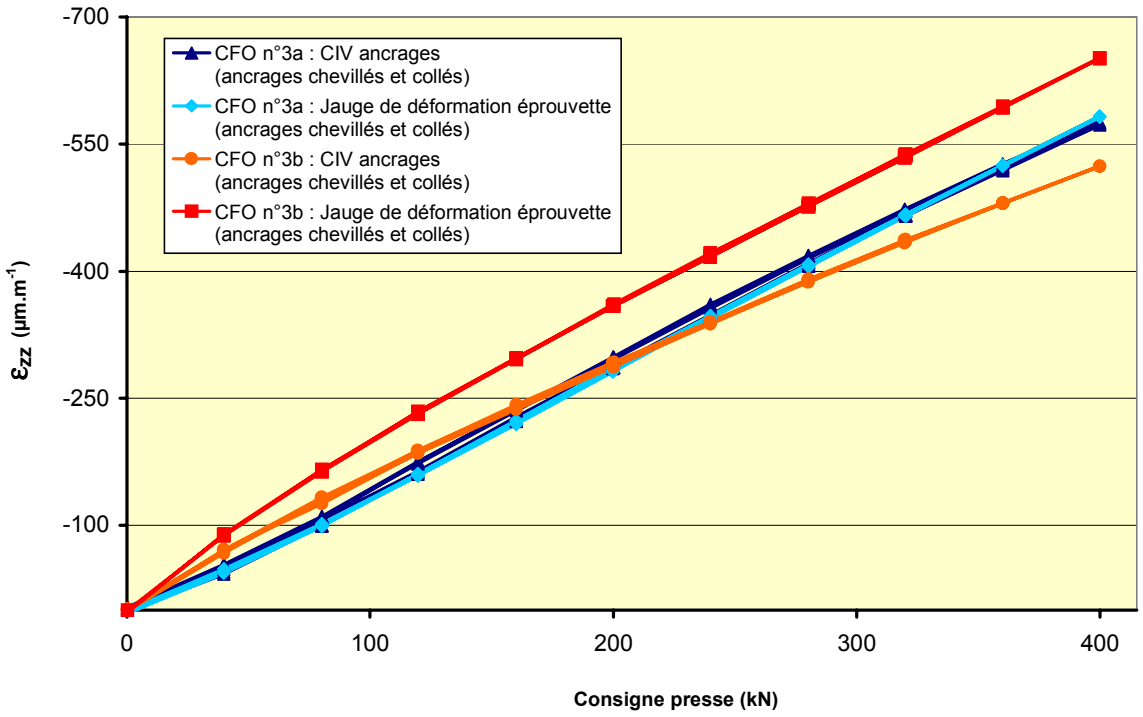


Figure 4.24 Essais sur l'éprouvette en béton pour tester la fixation des ancrages

4.2.3 Comportements de l'ensemble capteur à fibre optique / éprouvette

4.2.3.1 Cas en volume

1) Essais de détermination du module d'élasticité longitudinale

Les résultats des essais de détermination du module d'élasticité longitudinale des différentes éprouvettes en béton avec des capteurs noyés en leur sein sont consignés dans le tableau suivant (cf. Tableau 4.7).

Tableau 4.7 Module d'élasticité longitudinale des éprouvettes en béton B0 avec un ou deux capteurs noyés en leur sein

Capteur noyé	$E_{béton}$ (GPa) déterminé par les capteurs classiques au droit des capteurs noyés	
	Moyenne	***Ecart-type***
CFO n°1	40,6	0,2
CFO n°2	40,8	0,1
CCV	40,1	0,3

Les modules d'élasticité longitudinale de ce tableau correspondent à la moyenne des modules mesurés par tous les capteurs classiques au droit de chaque capteur noyé pour l'ensemble des éprouvettes testées. Seules les éprouvettes 16/100 avec un CFO n°2 et un CCV en volume destinées aux essais de fluage ne sont pas testées. La figure suivante présente les mesures des capteurs classiques d'un de ces essais relatif à une éprouvette 16/32 avec un CFO n°2 noyé en son sein (cf. Figure 4.25).

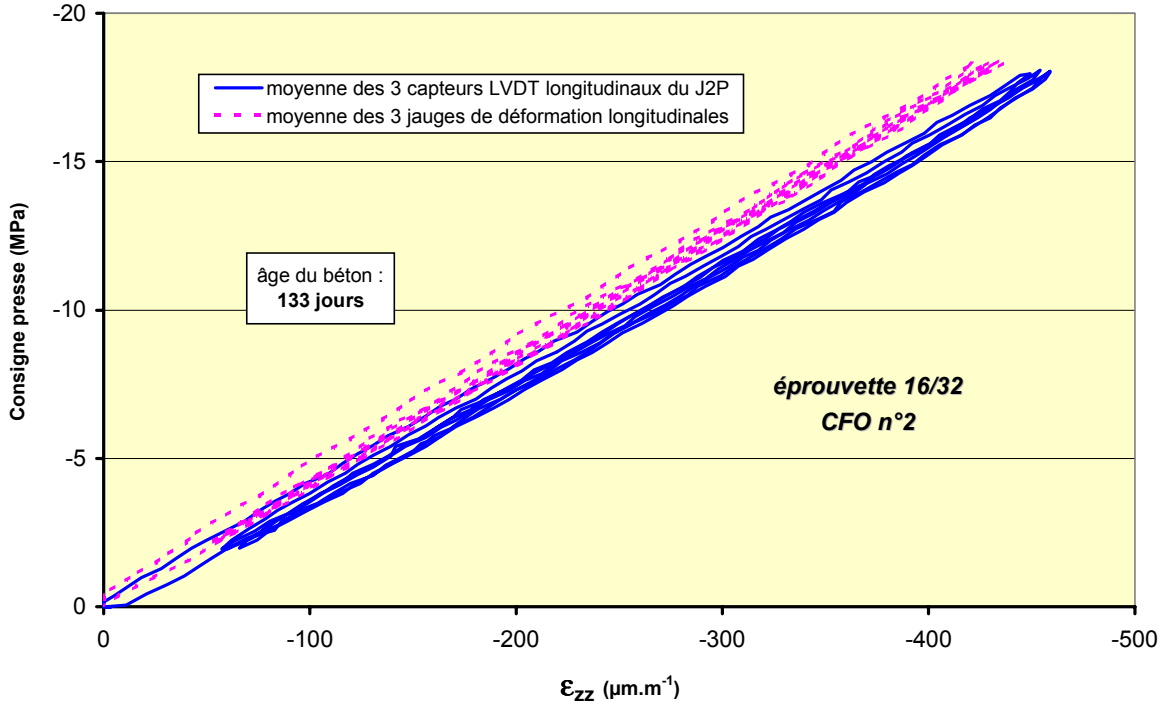


Figure 4.25 Détermination de $E_{béton\ avec\ capteur\ noyé}$

Les modules d'élasticité longitudinale, déterminés par les mesures des capteurs classiques, sont sensiblement identiques et sont compris dans l'intervalle expérimental du module d'élasticité longitudinale du béton B0 (cf. 4.2.1.2) :

$$40\,\text{GPa} \leq E_{béton\ avec\ capteur\ noyé} \leq 41\,\text{GPa}$$

La présence des capteurs noyés au sein des éprouvettes en béton testées n'a donc pas de réelle influence sur le comportement d'ensemble de ces éprouvettes. Les capteurs noyés influencent le comportement du béton dans une zone l'avoisinant. Le module d'élasticité longitudinale de cette zone varie suivant les caractéristiques mécaniques du capteur qui y est inclus. D'après les données des concepteurs et des essais réalisés sur les capteurs noyés dans les éprouvettes en béton, le module d'élasticité longitudinale le plus faible est celui des CCV et le plus élevé celui des CFO n°1 :

$$E_{CFO\ n°1} > E_{CFO\ n°2} > E_{CCV}$$

Selon cette tendance, les modules d'élasticité longitudinale de la zone avoisinant les capteurs noyés devraient vérifier (cf. Figure 2.5) :

$$E_{béton\ avec\ CFO\ n°1} > E_{béton\ avec\ CFO\ n°2} > E_{béton\ B0} > E_{béton\ avec\ CCV} \quad (E_{CCV} < 40\,\text{GPa})$$

2) Essais de chargement/déchargement par paliers de charge

Les figures suivantes (cf. Figures 4.26, 4.27, 4.28 et 4.29) présentent les résultats obtenus lors des essais de chargement/déchargement par paliers de charge. Les courbes présentées correspondent aux moyennes, avec les écarts-types correspondants, des mesures des trois cycles longs (cf. 4.1.3.1 – 2) – a)) pour les deux ou trois éprouvettes avec le même type de configuration d'instrumentation. Les déformations sont prises nulles au début des cycles.

A chacune de ces figures correspond un type d'éprouvette précis et une configuration d'instrumentation particulière :

Figure 4.26 : éprouvette en béton 16/32 avec trois jauges et le J2P en surface, et un CFO n°1 en volume ;

Figure 4.27 : éprouvette en béton 16/32 avec trois jauges et le J2P en surface, et un CFO n°2 en volume ;

Figure 4.28 : éprouvette en béton 16/100 avec six jauges et le J2P en surface, et, un CFO n°1 et un CCV en volume ;

Figure 4.29 : éprouvette en béton 16/100 avec six jauges et le J2P en surface, et, un CFO n°2 et un CCV en volume.

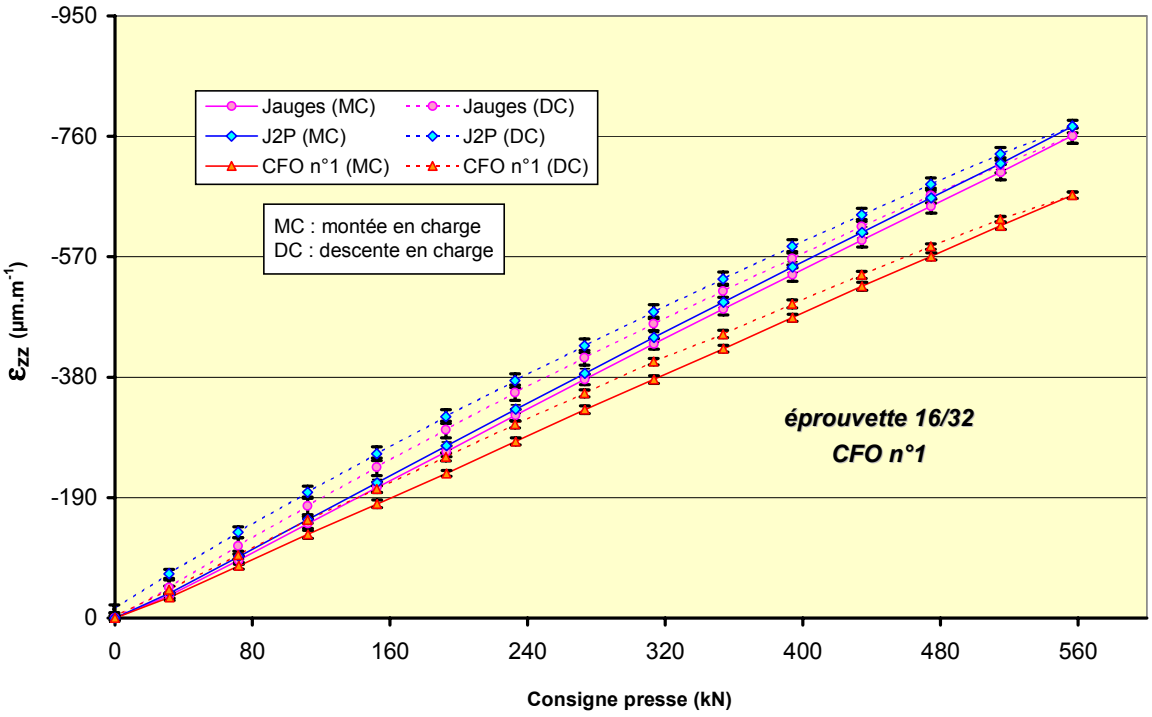


Figure 4.26 Essais en volume de chargement/déchargement par paliers de charge : éprouvette 16/32 avec CFO n°1

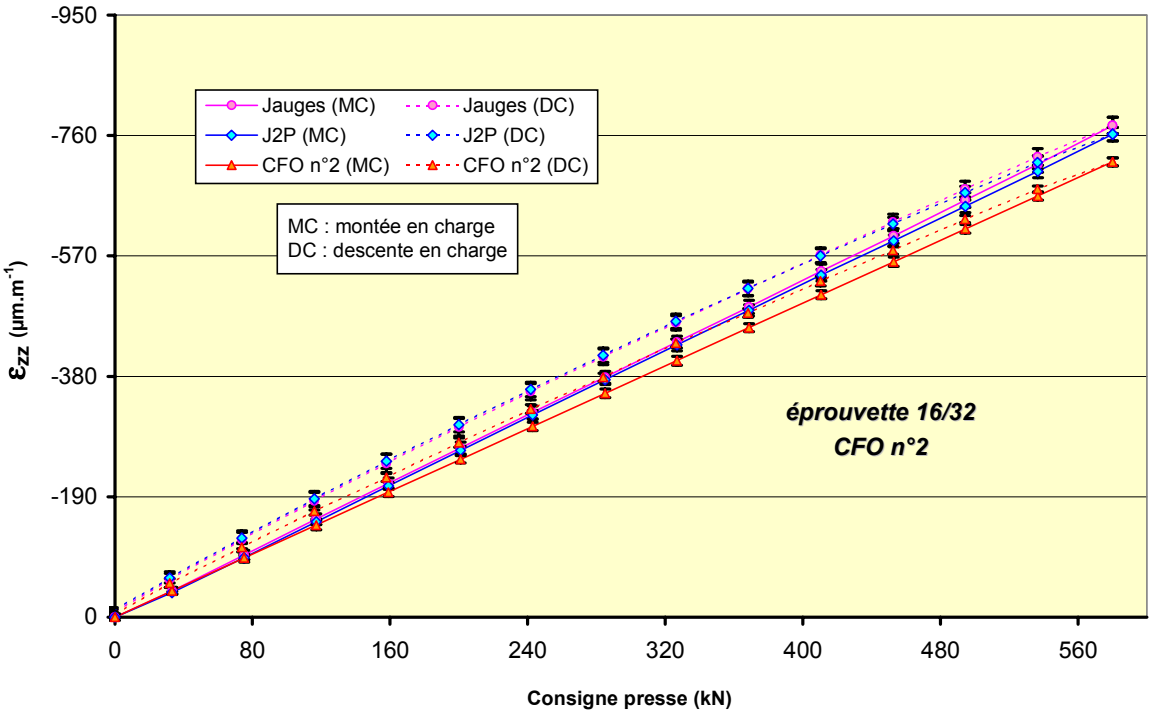


Figure 4.27 Essais en volume de chargement/déchargement par paliers de charge : éprouvette 16/32 avec CFO n°2

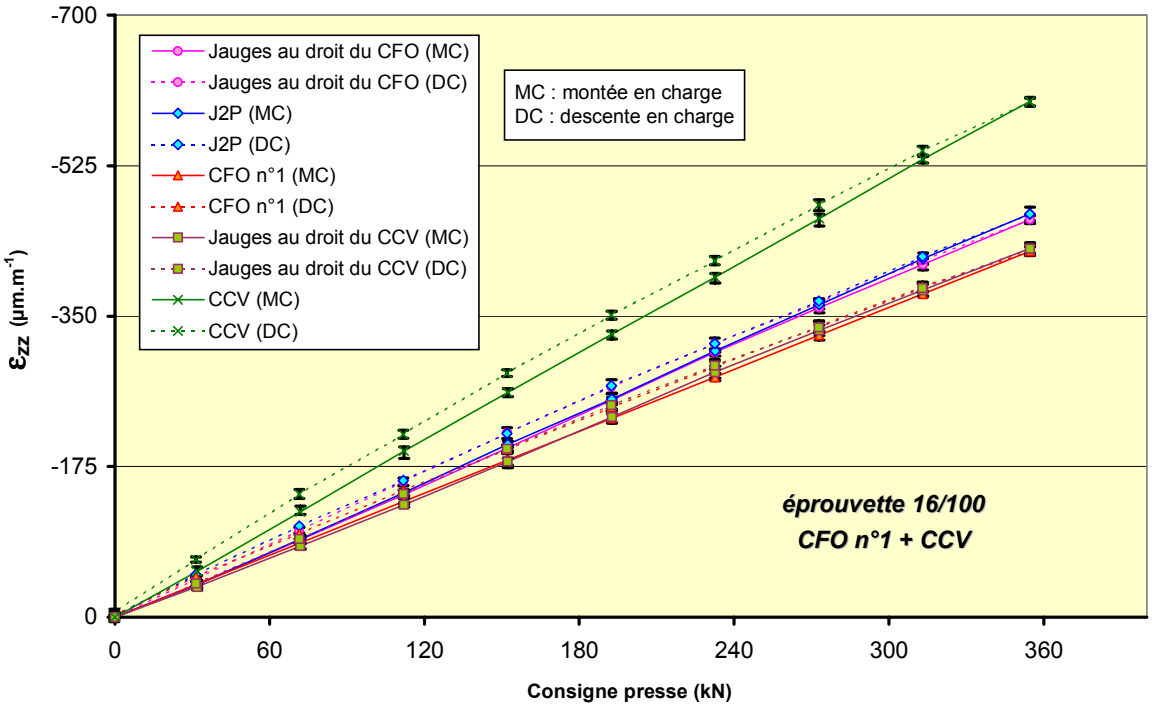


Figure 4.28 Essais en volume de chargement/déchargement par paliers de charge : éprouvette 16/100 avec CFO n°1 et CCV

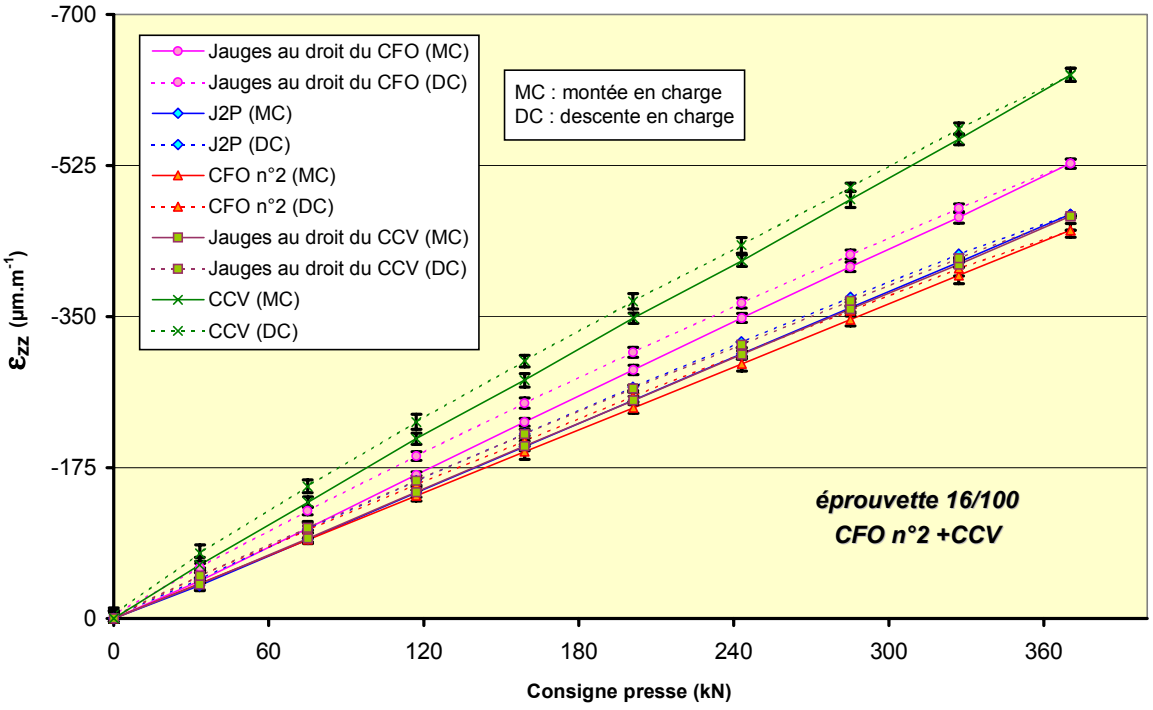


Figure 4.29 Essais en volume de chargement/déchargement par paliers de charge : éprouvette 16/100 avec CFO n°2 et CCV

Pour les éprouvettes 16/32 et 16/100, les jauges et le J2P donnent des déformations qui sont élevées comparées à la charge maximale (la déformation du béton seul pour une 16/32 devrait être de l'ordre de 700 µm.m^{-1}). Cela provient essentiellement de la durée des paliers de charge qui induit le fluage du béton. Des déformations plus importantes apparaissent alors. Le fluage explique aussi la non linéarité et les déformations plus élevées de la descentes en charge comparé à la montée. Le phénomène de relaxation du béton [LE ROY, 1996] intervient également lors de la descente en charge. Ces constations sont valables pour l'ensemble des capteurs qui suivent le comportement du béton.

Les déformations mesurées par les capteurs classiques (jauges et J2P) pour les éprouvettes 16/32 et 16/100 avec CFO n°1 sont plus faibles que celles pour les éprouvettes 16/32 et 16/100 avec CFO n°2. Ces deux groupes d'éprouvettes proviennent de deux gâchées différentes. Les jauges des 16/100 avec CFO n°2 donnent des déformations anormalement élevées. Certaines de ces jauges se sont décollées pendant les essais, les moyennes présentées ne les prennent pas en compte, induisant ainsi des erreurs dans les résultats (moyenne calculée pour une ou deux génératrices).

Les capteurs à fibre optique mesurent une déformation moins élevée que celle mesurée par les jauges et le J2P. Le problème de déformations différentielles évoqué au Chapitre 2 (cf. 2.2.2.1) et analysé au Chapitre 3 (cf. 3.5.2.2) en est la cause. Le constat est le même pour les CCV. Par contre ces derniers mesurent une déformation plus élevée que celle des autres capteurs classiques. Leur faible raideur (cf. 4.1.1.2 – d)) explique ce comportement : le béton a tendance à remplir la *cavité* formée par le capteur en son sein. Ces capteurs illustrent assez bien le cas du polyimide étudié au chapitre précédent (cf. 3.5.2.2). Sous sollicitation, des

capteurs à faible raideur peuvent donc poser des problèmes alors qu'ils sont préconisés pour des mesures de gonflement du béton par exemple [LARIVE, 1998] n'empêchant pas ainsi le matériau de se déformer.

3) Essais de fluage

La figure suivante présente les résultats de la montée en charge pour un bâti de fluage (cf. Figure 4.30). Les montées en charge sont réalisées les unes après les autres dans une même journée pour un béton âgé de 110 jours.

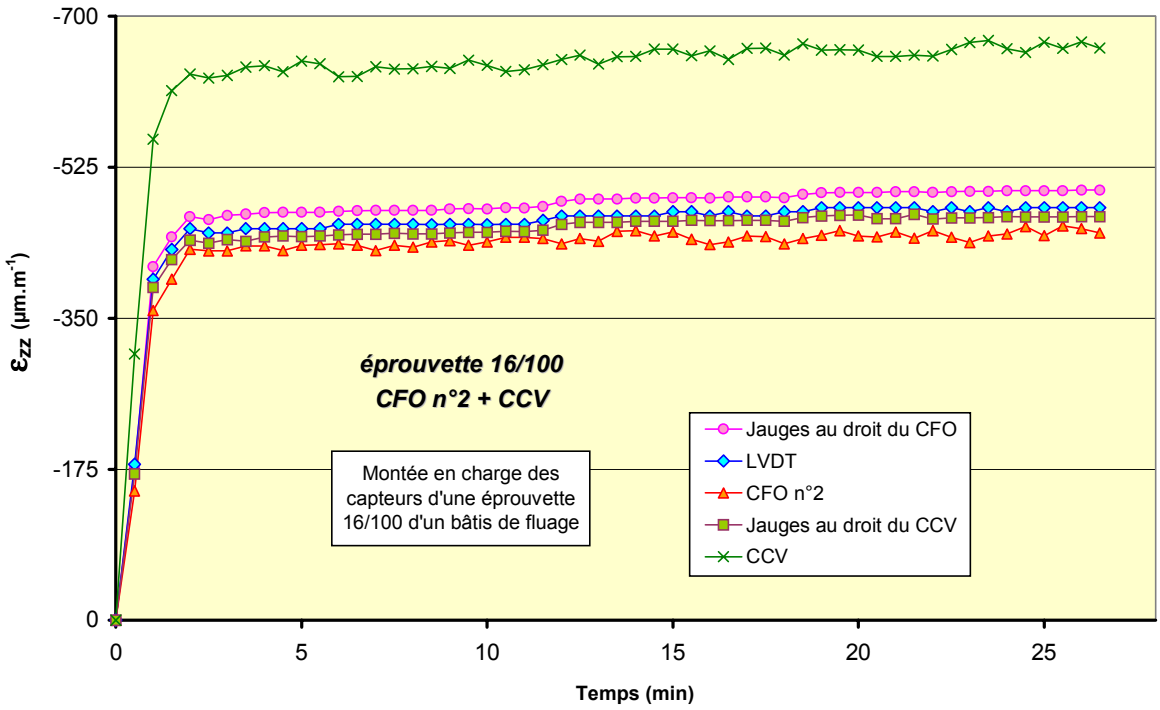


Figure 4.30 Essais en volume de fluage : montée en charge d'un bâti avec une éprouvette 16/100, avec CFO n°2 et CCV noyés en son sein

Les tendances entre capteurs de la *Figure 4.29* sont globalement respectées (il s'agit dans le cas présent que d'une seule éprouvette). Les déformations de chaque capteur augmentent avec le temps rendant compte du fluage du béton. La réponse des CCV possèdent un bruit. Cela provient d'un problème au niveau du conditionneur, réglé par la suite.

Les contraintes expérimentales liées à la Thèse ne permettaient pas de réaliser un enregistrement continu de l'ensemble des capteurs, notamment des capteurs à fibre optique. Des mesures ponctuelles sont réalisées et sont consignées dans le tableau suivant (cf. Tableau 4.8). Les valeurs de ce tableau correspondent à la moyenne des résultats des trois bâtis de fluage. Les valeurs des jauges n'y figurent pas puisque aucune de celles-ci n'a fonctionné dans le long terme. Leur réponse n'ont pas cessée de décroître laissant supposé une traction ou plutôt un relâchement des jauges. Leur décollement ou des problèmes d'humidité sont probablement responsables de ces comportements.

Tableau 4.8 Mesures ponctuelles des essais de fluage

Age du béton (jours)	Durée du chargement (jours)	ε_{fluage} (µm.m^{-1}) (pour un chargement constant en compression de 18 MPa)								
		LVDT		*CFO n°2*					*CCV*	
		Moyenne	*Ecart-type*	*Bâtis 1*	*Bâtis 2*	*Bâtis 3*	*Moyenne*	*Ecart-type*	*Moyenne*	*Ecart-type*
110	0	– 503	6	– 463	– 478	– 456	– 466	11	– 683	25
203	93	– 722	30	– 578	– 551	– 598	– 576	24	– 990	6
301	191	– 804	39	– 593	– 550	– 626	– 590	38	– 1078	10
336	226	– 838	43	– 593	– 571	– 626	– 597	28	– 1110	18

D'une éprouvette à l'autre les résultats des capteurs à fibre optique sont assez disparates. Une tendance est néanmoins observée : deux d'entre eux ne se déforment plus entre le 191ème et 226ème jours de chargement, et pour l'autre, il ne se déforme pas entre le 93ème et 191ème jours de chargement. La faible et lente évolution des déformations du béton dans le temps ne suffit peut-être pas à déformer les capteurs à fibre optique, à cause notamment d'une éventuelle redistribution des efforts au sein du béton. Ou encore, les capteurs à fibre optique peuvent avoir un fluage propre au niveau notamment de la colle, ne permettant plus à la fibre optique de suivrent les déformations de la gaine mécanique.

Pour des raisons liées à des contraintes expérimentales, les essais de fluage n'ont pas pu se poursuivre et d'autres essais complémentaires n'ont pas pu être réalisés, ne permettant pas d'analyser plus avant ces hypothèses de comportement.

4) Confrontation théorie / expérience

Seuls les résultats expérimentaux des montées en charge présentées aux figures précédentes pour les éprouvettes 16/32 (cf. Figures 4.26 et 4.27) sont confrontées aux résultats issus des calculs du Chapitre 3 (cf. Figure 4.31). Les déformations indiquées pour les calculs sont celles de l'inclusion en chargement en pression imposée, en supposant qu'elles sont équivalentes à celles du capteur à un écart négligeable près (cf. 3.4.2.3 et 3.4.2.5).

Les tendances entre les résultats de mesure des capteurs sont les mêmes pour la théorie et pour l'expérience : le capteur à fibre optique se déforme notamment moins que les capteurs classiques en surface. Cependant, des écarts importants sont observés : les déformations mesurées expérimentalement par les capteurs classiques et les capteurs à fibre optique sont plus importantes que celles déterminées par les calculs.

Les calculs ne prennent pas en compte le fluage du béton pendant les paliers de chargement. Les déformations dues à ce fluage sont mesurées expérimentalement par les différents capteurs. Il peut y avoir jusqu'à 8 µm.m^{-1} de déformation en plus par palier de charge. Ces résultats de mesurage sont en accord avec ceux du fluage de la présente étude (cf. 4.2.3.1 – 3)) et ceux d'études réalisées sur un béton ayant une même composition [CLEMENT et LE MAOU, 2000].

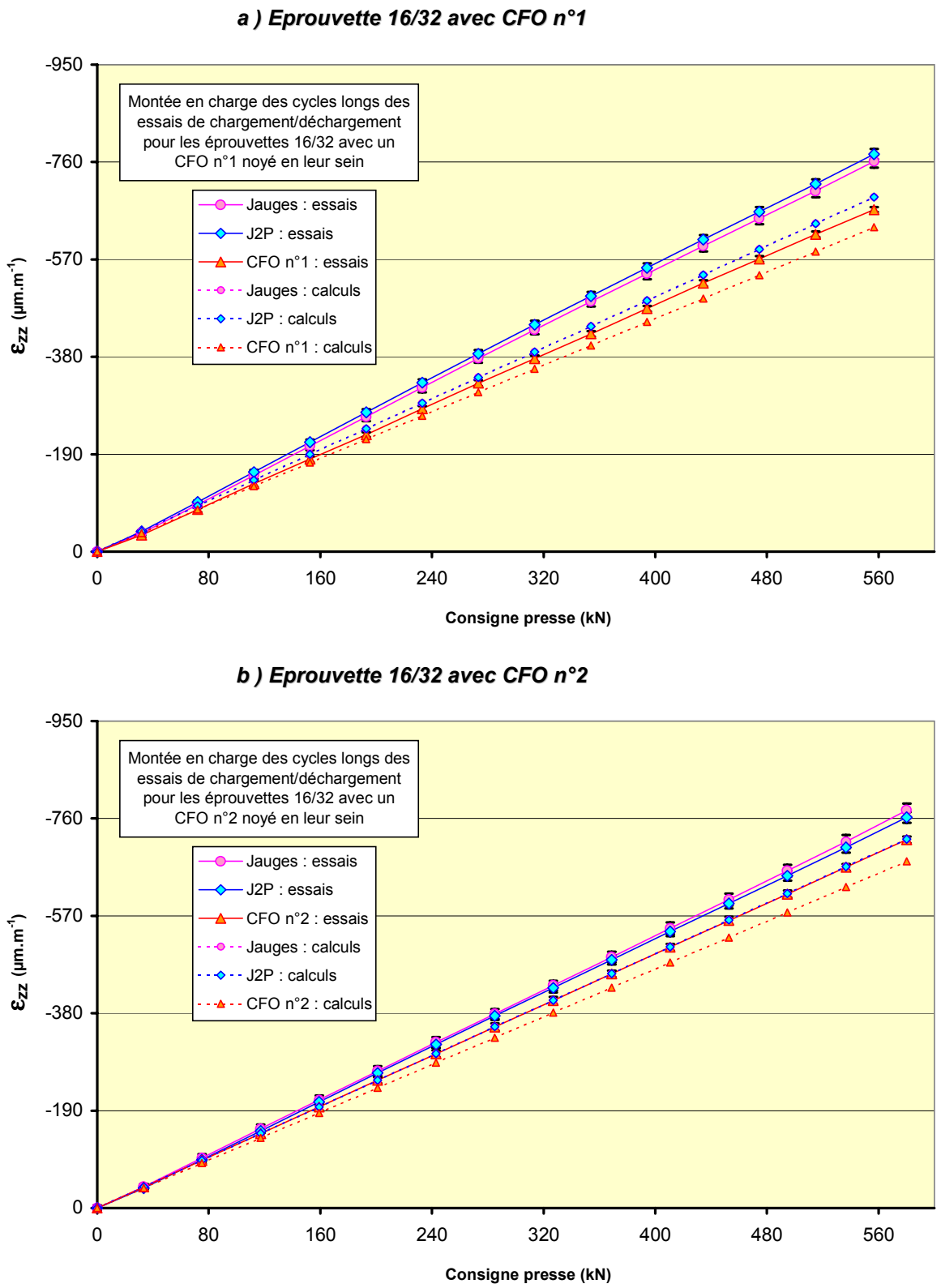


Figure 4.31 Cas en volume : confrontation essais / calculs

Le tableau suivant présente les moyennes des déformations de fluage mesurées lors des essais par chaque capteur, sur la totalité des paliers de charge et uniquement pour la montée en chargement (cf. Tableau 4.9). Les capteurs à fibre optique mesurent des déformations de

fluage plus faibles que les capteurs classiques. Pour le CFO n°2 cette différence est du même ordre de grandeur que l'écart entre les mesures *instantanées* réalisées par ce type de capteur et les capteurs classiques. Pour le CFO n°1 cette différence est très supérieure à l'écart des mesures *instantanées* (environ 35 % de plus). La principale différence entre ces deux cas, en dehors du fait que les capteurs à fibre optique ne possèdent pas les mêmes caractéristiques (ex. : matériau de la gaine mécanique, dimensions), provient du béton des éprouvettes 16/32 qui n'est pas issu de la même gâchée (cf. Figure 4.12). Les essais réalisés ne permettent pas d'expliquer plus avant ces différences pour le CFO n°1.

Tableau 4.9 Variation due au fluage des déformations des capteurs des éprouvettes 16/32 avec les CFO n°1 et n°2 noyés en leur sein, uniquement pour les montées en charge

	$\Delta\varepsilon_{fluage}$ (µm.m^{-1})			
	16/32 avec CFO n°1		**16/32 avec CFO n°2**	
	Moyenne	***Ecart-type***	***Moyenne***	***Ecart-type***
Jauges	75	5	57	2
J2P	84	5	52	2
CFO	41	7	49	8

Des phénomènes éventuels de friction au niveau des plateaux de la presse n'ont également pas été pris en compte dans les calculs. Afin d'identifier leur effet sur les déformations, des calculs supplémentaires sont réalisés. Les deux cas d'étude considérés (cf. 3.5.1) sont repris en bloquant le déplacement horizontal des nœuds du maillage en tête d'éprouvette. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant, en comparaison avec les calculs réalisés sans prise en compte de la friction (cf. Tableau 4.10).

Tableau 4.10 Effets de la friction entre plateaux de presse et tête d'éprouvette pour les essais en volume

	$\Delta\varepsilon/\varepsilon = (\varepsilon_{capteur} - \varepsilon_{référence}) / \varepsilon_{référence}$ (%) (avec : $\varepsilon_{référence} = -700$ µm.m^{-1} ($E_{béton} = 40$ GPa))							
	16/32 avec CFO n°1				**16/32 avec CFO n°2**			
	sans friction		***avec friction***		***sans friction***		***avec friction***	
	σ_{imp}	u_{imp}	σ_{imp}	u_{imp}	σ_{imp}	u_{imp}	σ_{imp}	u_{imp}
Jauges	– 0,08	– 0,02	– 0,42	+ 0,31	– 0,20	– 0,05	– 0,54	+ 0,28
J2P	– 0,08	– 0,02	– 0,33	+ 0,39	– 0,20	– 0,06	– 0,45	+ 0,36
CFO	– 8,59	– 8,54	– 7,99	– 7,18	– 6,19	– 6,05	– 5,35	– 4,51

Les écarts maximums engendrés par de la friction sur les déformations du capteur, déterminés par le calcul, peuvent atteindre jusqu'à 10 µm.m^{-1} pour le CFO n°1 et 12 µm.m^{-1} pour le CFO

n°2. Les effets réels de la friction lors des essais sont compris entre ces deux cas extrêmes : glissement parfait ou déplacement nul de la tête d'éprouvette sur les plateaux de la presse.

Le chargement expérimental est également compris entre les deux types de chargement considérés dans les calculs, les plateaux de la presse étant en acier et se déformant également sous la réaction des éprouvettes [BOULAY et al., 1999].

De plus, les caractéristiques mécaniques des matériaux en présence peuvent ne pas coïncider avec celles des matériaux constituant le capteur. Les valeurs choisies pour les calculs sont des valeurs issues de la littérature, les matériaux constituants les capteurs à fibre optique n'ayant pas été testés avant leur conception. Cependant il a été vu dans les calculs réalisés que pour des matériaux tels que l'invar ou l'acier inoxydable, une variation de ses caractéristiques mécaniques n'influence que très faiblement la valeur de $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ (cf. 3.5.2.2). Il en est de même pour le béton : pour une variation de 1 GPa (40 GPa $\leq E_{\text{béton B0}} \leq$ 41 GPa) on a $\Delta(\Delta\varepsilon/\varepsilon) < 0{,}2\,\%$.

Le tableau suivant présente les résultats expérimentaux de la figure précédente (cf. Figure 4.31) pour le maximum de charge, avec les résultats corrigés des calculs (cf. Tableau 4.11). Ces résultats prennent en compte les déformations dues au fluage du béton mesurées expérimentalement, ainsi que les écarts dus à de la friction éventuelle et aux types de chargements, déterminés et considérés dans les différents calculs.

Tableau 4.11 Cas en volume : confrontation des déformations essais / calculs avec prise en compte dans les résultats des calculs du fluage et de la friction

	$\varepsilon_{\text{capteurs}}$ (µm.m^{-1})							
	16/32 avec CFO n°1				**16/32 avec CFO n°2**			
	Essais		***Calculs** (corrigés)*		***Essais***		***Calculs** (corrigés)*	
	Moyenne	***Ecart-type***	***Moyenne***	***Ecart-type***	***Moyenne***	***Ecart-type***	***Moyenne***	***Ecart-type***
Jauges	**– 761**	12	**– 767**	8	**– 776**	13	**– 777**	5
J2P	**– 776**	10	**– 776**	8	**– 762**	10	**– 771**	5
CFO	**– 667**	3	**– 674**	12	**– 719**	6	**– 725**	14

Les valeurs de ce tableau montrent que les résultats corrigés des calculs coïncident avec les résultats des essais aux différents écarts-types près.

4.2.3.2 Cas en surface

1) Essais de chargement/déchargement par paliers de charge

Les figures suivantes présentent les résultats des essais de chargement/déchargement par paliers de charge pour le cas en surface (cf. Figures 4.32 et 4.33). Ces valeurs sont les moyennes, avec les écarts-types, correspondant aux mesures de déformation des trois cycles longs (cf. 4.1.3.1 – 2) – b)) pour chaque côté de l'éprouvette testée, les déformations étant prises nulles au début des cycles.

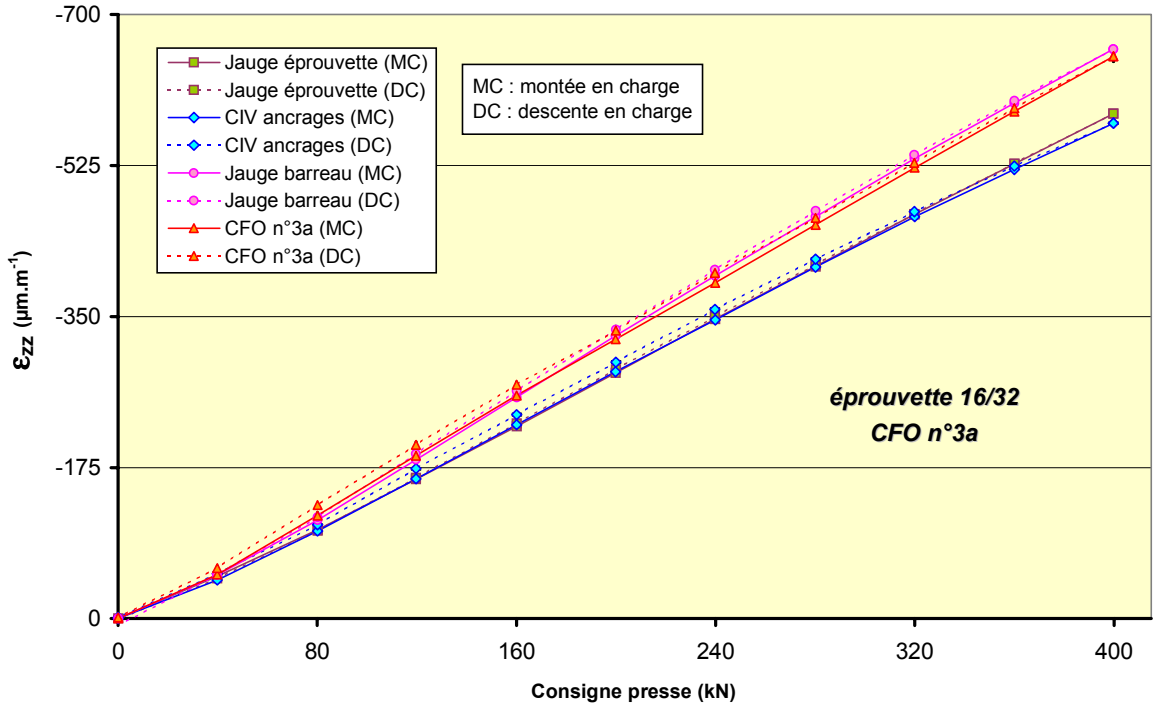


Figure 4.32 Essais en surface de chargement/déchargement par paliers de charge : éprouvette 16/32 côté CFO n°3a

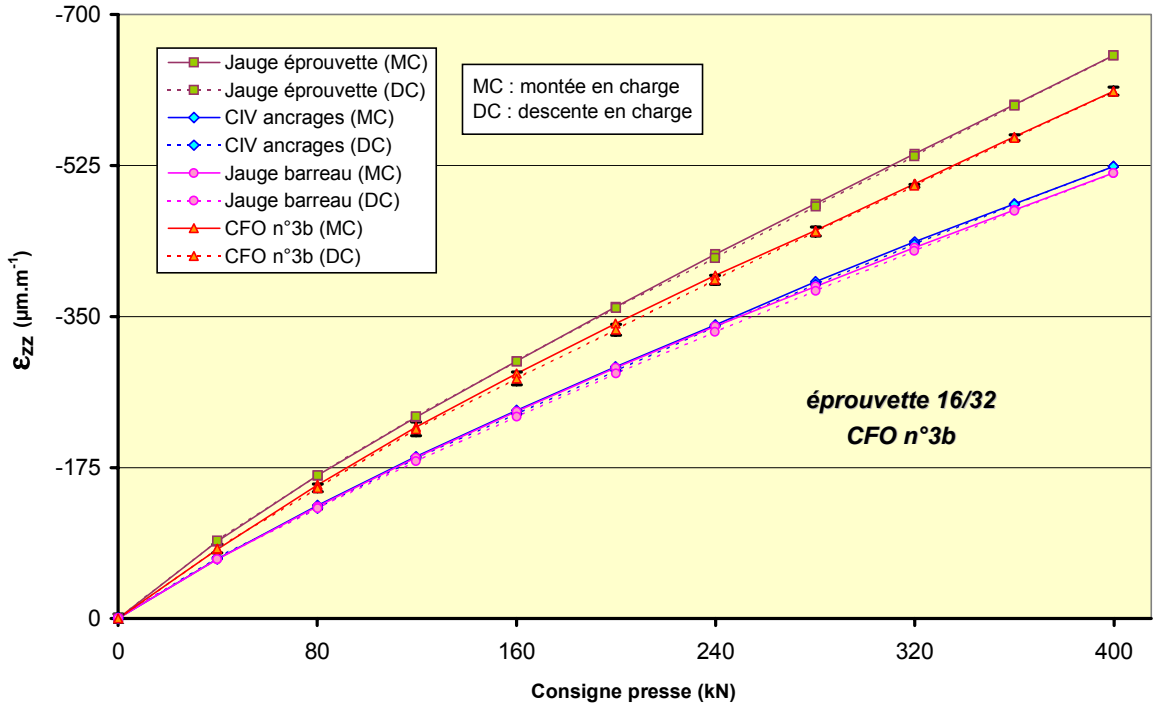


Figure 4.33 Essais en surface de chargement/déchargement par paliers de charge : éprouvette 16/32 côté CFO n°3b

L'allure des courbes ainsi que les tendances entre capteurs ne sont pas du tout les mêmes pour les deux côtés. Les montées en charge sont linéaires à partir d'une certaine valeur de charge (160 kN). Cette non linéarité du début provient de la géométrie même de l'éprouvette (cf. 4.2.1.2). Les descentes en charge ne sont pas linéaires et ne s'effectuent pas de la même manière de chaque côté de l'éprouvette. Du côté du CFO n°3a, les déformations de descente en charge sont supérieures à celles de la montée alors que c'est majoritairement l'inverse pour le CFO n°3b. *Majoritairement* car pour la zone non linéaire les déformations de descente en charge sont supérieures à celles de la montée. La tendance ne s'inverse qu'à partir d'une charge qui n'est pas la même suivant les capteurs (ex. : CIV ≅ 70 kN ; jauge éprouvette ≅ 160 kN). En fait l'implantation des capteurs à fibre optique n'est pas exactement la même de chaque côté de l'éprouvette. Les contraintes de réalisation engendrent une asymétrie de perçage de part et d'autre de l'éprouvette, induisant L_{bm}(CFO) plus importante pour l'un de deux capteurs avec en plus un décalage par rapport au milieu de l'éprouvette. Le CFO n°3b est le plus rapidement déformé en début de chargement. Pour des charges plus élevées, les variations de déformation sont plus faibles alors que pour le CFO n°3a elles sont de plus en plus élevées. Les capteurs à fibre optique interagissent entre eux et influencent les mesures de déformation.

Les déformations mesurées par l'ensemble des capteurs sont plus élevées que les déformations d'une éprouvette en béton sans inclusion (qui devrait, pour le maximum de charge, se situer autour de 500 $\mu m.m^{-1}$). Là encore, le fluage pendant les paliers de charge en est le principal responsable.

De même que pour la théorie, pour les deux côtés de l'éprouvette, les capteurs à fibre optique donnent des mesures de déformation globalement plus élevées que les capteurs classiques.

2) Confrontation théorie / expérience

Etant donné que les capteurs à fibre optique interagissent entre eux, c'est la moyenne des résultats des capteurs des deux côtés de l'éprouvette qui est confrontée aux résultats des calculs du Chapitre 3. Les déformations prises en compte sont celles obtenues à partir de la charge de 160 kN (cf. Figure 4.34), afin de s'affranchir des perturbations liées à la géométrie de l'éprouvette. Les valeurs des déformations et de chargement sont ramenées à une valeur nulle à partir de cette charge. Les écarts-types pour les résultats des essais ne figurent pas sur la figure pour plus de clarté.

En dehors de la *jauge éprouvette ancrages*, les tendances entre les mesures des différents capteurs pour les essais et pour les calculs sont les mêmes :

$$\varepsilon_{\text{CFO n°3}} > \varepsilon_{\text{jauge barreau}} > \varepsilon_{\text{CIV ancrages}}$$

Cependant les écarts ne sont pas du même ordre de grandeur.

Les déformations, issues des calculs pour la *jauge éprouvette ancrages*, sont très élevées comparées à celles obtenues par les essais. Dans les calculs, la colle entre les ancrages et le béton n'est pas prise en compte, considérant une adhérence parfaite entre l'acier des ancrages et le béton. Cela a pour conséquence d'engendrer des perturbations du champ de contraintes et déformations pour cette zone de faible dimensions (*points durs* dans le béton au niveau des ancrages en acier inoxydable). Ce qui est nommé *jauge éprouvette sans CFO* dans la figure précédente, correspond à une jauge fictive qui serait collée en surface de l'éprouvette en son milieu et au point le plus éloigné des ancrages. Ce sont les déformations calculées pour

cette jauge, plus représentatives de la déformation de surface du béton, qui sont considérées par la suite (nommée *jauge éprouvette sans CFO*, ou simplement *jauge éprouvette*). Les valeurs obtenues par les essais doivent cependant leur être supérieures compte tenu de la présence des ancrages.

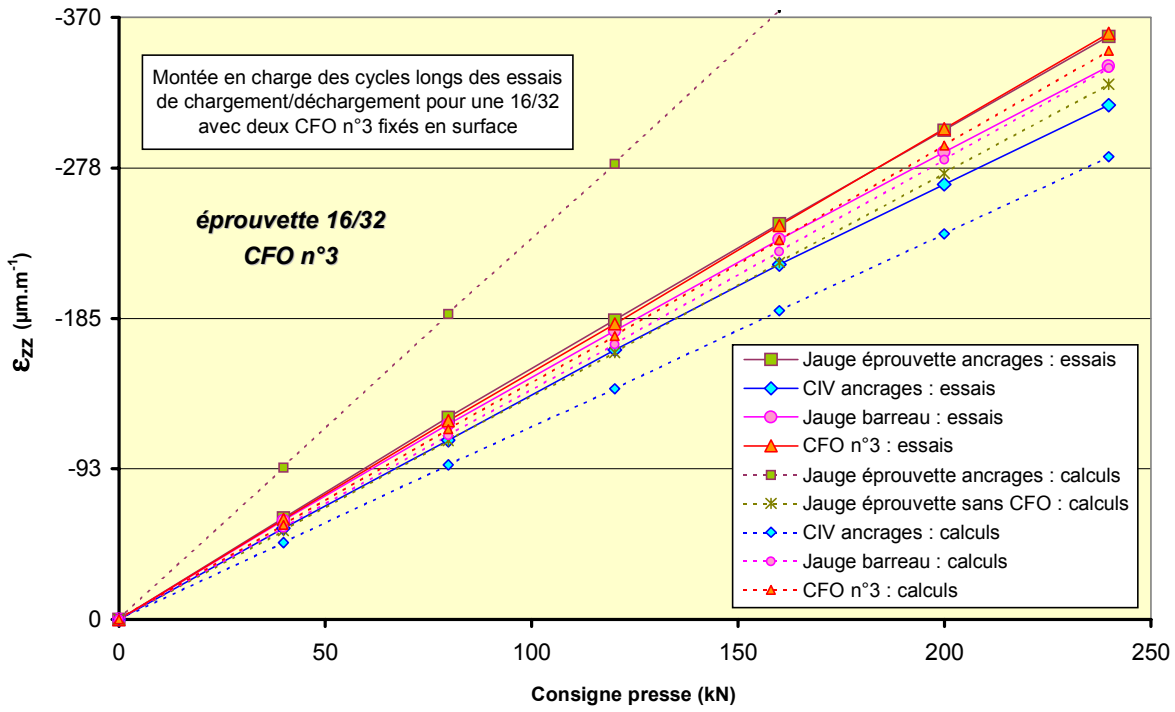


Figure 4.34 Cas en surface : confrontation essais / calculs

Les paliers de charge sont plus courts que ceux en volume, le fluage du béton en est donc diminué. Ceci est confirmé par le tableau suivant qui présente les moyennes des déformations de fluage, mesurées lors des essais par chaque type de capteur, sur la totalité des paliers de charge et uniquement pour la montée en chargement (cf. Tableau 4.12).

Tableau 4.12 Variation due au fluage des déformations des capteurs des éprouvettes 16/32 avec les CFO n°3 noyés en leur sein, uniquement pour les montées en charge

	$\Delta\varepsilon_{fluage}$ (µm.m^{-1})	
	Moyenne	***Ecart-type***
CIV ancrages	12,1	3,8
Jauge barreau	10,8	2,1
CFO n°3	10,5	1,0
Jauge éprouvette	19,4	4,8

Pour la friction éventuelle en tête d'éprouvette, des calculs sont également réalisés. Le tableau suivant regroupe les résultats qui en sont issus, en comparaison avec les calculs réalisés sans la prise en compte de la friction (cf. Tableau 4.13).Ces résultats montrent que l'influence de la friction est légèrement plus grande pour le cas en surface que pour le cas en volume : écart maximum pour le capteur à fibre optique de 14 µm.m^{-1}.

Tableau 4.13 Effets de la friction pour les essais en surface

	$\Delta\varepsilon/\varepsilon = (\varepsilon_{barreau} - \varepsilon_{référence}) / \varepsilon_{référence}$ (%) (avec : $\varepsilon_{référence}$ = – 700 µm.m^{-1} ($E_{béton}$ = 40 GPa))			
	sans friction		***avec friction***	
	σ_{imp}	u_{imp}	σ_{imp}	u_{imp}
CIV ancrages	– 16,98	– 14,65	– 16,38	– 13,59
Jauge barreau	– 1,04	+ 1,73	– 0,39	+ 2,95
CFO n°3	+ 2,05	+ 4,91	+ 2,65	+ 6,12
Jauge éprouvette	– 3,97	– 1,38	– 4,51	– 1,21

De même que pour le cas en volume, l'influence de différences entre les caractéristiques mécaniques des matériaux en présence dans les capteurs à fibre optique testés expérimentalement et celles considérées dans les calculs est négligeable.

Le tableau suivant présente les mêmes résultats expérimentaux qu'à la figure précédente (cf. Figure 4.34) pour le maximum de charge, avec en plus les résultats corrigés des calculs (cf. Tableau 4.14). Comme pour le cas en volume, ces résultats prennent en compte les déformations dues au fluage du béton mesurées expérimentalement, ainsi que les écarts dus à de la friction éventuelle et aux types de chargements, déterminés et considérés dans les calculs.

Tableau 4.14 Cas en surface : confrontation des déformations essais / calculs avec prise en compte dans les résultats des calculs du fluage et de la friction

	$\varepsilon_{capteurs}$ (µm.m^{-1})			
	Essais		***Calculs*** *(corrigés)*	
	Moyenne	***Ecart-type***	***Moyenne***	***Ecart-type***
CIV ancrages	**– 316**	1	**– 297**	16
Jauge barreau	**– 340**	2	**– 350**	16
CFO n°3	**– 360**	3	**– 360**	15
Jauge éprouvette	**– 358**	2	**– 348**	15

En prenant en compte les différences identifiées, les résultats des calculs recoupent ceux issus des expérimentations réalisées.

4.3 Conclusion

Ce chapitre a par exemple permis de mettre en évidence différentes difficultés auxquelles est confronté un utilisateur lors de l'intégration de capteurs à fibre optique à un milieu de mesure tel que le béton. Les répercutions sur les mesures de déformation de certains *écarts de réalisation* (ex : au niveau des liaisons *ancrages / béton* ou au niveau de la fixation des capteurs à la structure avant coulage du béton) ont ainsi pu être quantifiées. Ces difficultés de mise en œuvre peuvent être considérablement amplifiées dans des conditions de chantier. Ce chapitre a également mis en évidence l'importance d'une *mise en place* des différents matériaux en présence lors du chargement (écarts entre le premier et le deuxième cycle de chargement de $\Delta\varepsilon/\varepsilon$ pouvant être de l'ordre de 10 %).

Le Chapitre 4 complète donc le chapitre théorique précédent en analysant l'influence de certains facteurs qui n'y sont pas étudiés. L'analyse de ces facteurs est cependant limitée par le cadre de l'étude et surtout par les contraintes expérimentales qui y sont liées, ne permettant pas d'étudier plus avant d'autres configurations (ex. : tests sur d'autres colles, essais sur différents types d'ancrages). Ce chapitre a également permis la confrontation de résultats expérimentaux avec certains résultats issus des calculs du Chapitre 3 pour trois capteurs différents (2 capteurs en volume et 1 capteur en surface). Les résultats se recoupent, aux écarts-types près, validant ainsi les études théoriques du Chapitre 3. Les enseignements et les perspectives issus de l'ensemble des résultats de ces deux chapitres sont consignés dans le chapitre suivant sous forme de recommandations.

Chapitre 5

Enseignements et perspectives

La plupart des résultats issus des différentes études réalisées, sont autant d'informations capitales pour la pertinence des mesures de capteurs à fibre optique par rapport à la grandeur physique recherchée. L'analyse ciblée de ces résultats permet l'établissement de recommandations générales destinées aux utilisateurs et aux concepteurs de capteurs à fibre optique de déformation pour l'instrumentation d'ouvrages en béton de Génie Civil.

Les recommandations proviennent essentiellement des cas particuliers d'étude des chapitres 2, 3 et 4. Elles vérifient donc l'ensemble des hypothèses d'étude (cf. 2.3 – a) à l)). La présente étude se voulant globale, les recommandations établies restent générales. Le lecteur est renvoyé aux différents chapitres précités afin d'identifier l'origine de chacune des recommandations et de les illustrer à l'aide de cas d'étude particuliers.

Le présent chapitre se décline en trois parties. La première concerne les recommandations pour les constituants du capteur. La deuxième est relative à l'intégration des capteurs à la structure et aux liaisons *capteur / béton*. La troisième présente des recommandations pour une meilleure exploitation des résultats de mesure.

5.1 Recommandations pour les capteurs à fibre optique

De manière générale, la principale recommandation pour les capteurs à fibre optique est de réduire au minimum le nombre de matériaux différents les constituant, ce qui paraît être une évidence mais qui n'est généralement pas mis en pratique. L'homogénéisation de ces constituants permet de diminuer les perturbations liées aux problèmes de déformations différentielles et de liaisons internes (cf. 2.2.2.1 et 2.2.2.2).

5.1.1 Revêtement primaire

Le revêtement primaire de la fibre optique est indispensable (cf. 1.1.2). Afin de réduire les perturbations occasionnées par les déformations différentielles entre les différents matériaux (cf. 2.2.2.1), il est préférable de choisir un matériau avec des caractéristiques proches de celles de l'ensemble *cœur / gaine optique*, voire supérieures (cf. 3.4.2.2).

Or les revêtements primaires couramment utilisés sont en matière plastique, comme par exemple le polyimide, se déformant plus sous un même chargement que les matériaux du cœur et de la gaine optique : $E_{polyimide} = 3\,GPa$ et $E_{cœur} = E_{gaine\ optique} = E_{silice} = 70\,GPa$ (cf. 3.3). Si l'emploi de ce type de revêtement est imposé, il faudra alors veiller que son épaisseur soit la plus faible possible (même principe que pour l'épaisseur de colle (cf. 3.4.2.1 – b)).

5.1.2 Liaison fibre optique / gaine mécanique

L'idéal serait de ne pas avoir de matériau supplémentaire entre le revêtement primaire de la fibre optique et la gaine mécanique. L'application de cette gaine par fusion, dans le cas par exemple d'un matériau composite, directement sur le revêtement primaire, permettrait de ne pas utiliser de matériau de liaison.

Le collage est cependant la technique d'assemblage la plus courante entre la fibre optique et la gaine mécanique (cf. 2.2.2.2). C'est celle choisie dans la présente étude. L'usage du collage pour assurer cette liaison mécanique est à doser avec précaution. Les faibles dimen-

sions transversales de la fibre rendent plus délicates les préparations de la surface de contact ainsi que son maniement lors de l'opération de collage. De plus, comme pour le revêtement primaire, les colles sont en général des matériaux très déformables sous faibles chargements : $E_{\text{résine époxyde}} = 4\,\text{GPa}$. Cela implique d'avoir une épaisseur de joint de colle la plus faible possible afin de réduire les perturbations engendrées (cf. 3.4.2.1 – b)) : une épaisseur de l'ordre de 100 µm est convenable. La tenue mécanique dans le temps du joint de colle s'en trouve améliorée face notamment au comportement de fluage et aux variations de température. De faibles épaisseurs de colle peuvent néanmoins poser des problèmes de continuité, et rendre difficile la maîtrise de l'épaisseur mais aussi de la constance de celle-ci sur chaque génératrice de la fibre optique.

Il a été vu que les joints de colle peuvent induire des perturbations au niveau de la base de mesure de la fibre optique (cf. 3.4.2.3). Cette dernière doit être distante d'au moins 1 mm des extrémités du joint de colle, pour une épaisseur de celui-ci de 100 µm environ, afin d'éviter les perturbations dues aux effets de bord.

Le collage et d'autres matériaux étant fragilisé par les agressions de l'humidité (cf. 2.2.3.1), le capteur à fibre optique doit être protégé en conséquence pour qu'il soit rendu insensible aux actions hydriques.

5.1.3 Gaine mécanique

5.1.3.1 Dimensions

1) Cavité interne

La cavité interne à la gaine mécanique contenant la fibre optique sera de préférence située au centre de cette gaine afin de ne pas apporter de perturbation supplémentaire sur la mesure lorsque les sollicitations ne sont pas parfaitement axiales, comme c'est souvent le cas dans la réalité en conditions de chantier (positionnement du capteur et prévision de la direction difficiles sur ouvrage).

Pour ce qui est du collage, une faible épaisseur du joint de colle implique de faibles dimensions de la cavité interne à la gaine mécanique, contenant la fibre optique et la colle. Dans le cas où cette cavité est au centre de la gaine mécanique, son usinage est rendu plus difficile pour de faibles dimensions (diamètre de l'ordre de 400 µm) et l'insertion de la fibre optique y est plus délicate. Une rainure pratiquée en surface de la gaine mécanique est plus facile d'usinage. Pour un même matériau, ayant une plus faible déformation par rapport à la fibre optique et la colle (ex. : acier inoxydable), les mesures de déformation sont sensiblement les mêmes pour une cavité au centre et en périphérie de la gaine mécanique (cf. 3.4.2.1 – b)). Une enduction soignée de la colle dans la rainure est nécessaire afin d'appliquer la colle sur toute sa surface et ainsi d'éviter les discontinuités de collage.

Une géométrie en *U* de la rainure en périphérie est cependant plus adéquate que la géométrie en *Vé* étudiée, afin de mieux solliciter la fibre optique sur toute sa moitié inférieure avec une épaisseur de colle relativement faible et continue (cf. 3.4.2.2). Ce cas, où la fibre optique est en périphérie de la gaine mécanique, peut néanmoins induire des perturbations supplémentaires non négligeables pour des capteurs en surface, dans le cas d'une configuration d'ancrages et de gaine mécanique particulière impliquant des déformations variant sur tout le diamètre de la gaine mécanique (cf. 3.6.2.2 – a)).

2) Diamètre extérieur

Le diamètre extérieur de la gaine mécanique dépend essentiellement des dimensions des granulats du béton et du diamètre de la fibre optique :

- Pour le cas en volume, le diamètre de la gaine mécanique ne doit pas être trop petit à cause du poinçonnement possible des granulats du béton pouvant détériorer la fibre optique. Un matériau plus dur que le béton est alors préférable (ex. : acier inoxydable) (cf. Tableau 3.11). Pour des diamètres plus importants, le matériau de la gaine mécanique peut être moins dur, la fibre optique subissant alors peu les effets de bord, avec des caractéristiques mécaniques se rapprochant de celles du béton (cf. 3.5.2.2 – a)).

- Le diamètre extérieur de la gaine mécanique doit être suffisamment grand par rapport au diamètre de la fibre optique afin de pouvoir entraîner correctement cette fibre et ne pas être perturbé par sa présence (cf. 3.4.2.1 – a)) : d'après les dimensions considérées (3,2 et 5 mm) un rapport de 10 convient.

3) Longueur

Les dimensions parallèles à l'axe des sollicitations (longueur du capteur) dépendent principalement de la taille des granulats du béton et des dimensions de la structure instrumentée (cf. 2.2.4.2, 3.5.2.1 – c), et 3.6.2.1 – c)) :

- La longueur minimale doit être supérieure ou égale à trois fois la plus grande dimension du plus gros granulat. Cette longueur dépend également des dimensions de la zone des perturbations dans le béton engendrées par les ancrages.

- La longueur maximale dépend des effets de bords impliquant des distributions particulières du champ de contraintes et de déformations du béton. D'après les études réalisées sur le sujet et les résultats de la présente étude, la longueur du capteur doit être inférieure ou égale à deux fois la distance le séparant d'éléments induisant des perturbations des champs de contraintes et de déformations (ex.: armatures, bords de la structure).

5.1.3.2 Caractéristiques mécaniques

Les caractéristiques mécaniques de la gaine mécanique doivent être plus élevées que celles de l'ensemble *fibre optique / liaison entre la fibre optique et la gaine mécanique* (cf. 3.4.2.2) : les matériaux utilisés peuvent aller de l'acier inoxydable ($E_{acier\ inoxydable}$ = 200 GPa) jusqu'à un matériau composite avec des caractéristiques mécaniques proches de celles d'un BO B40 ($E_{composite}$ = 43 GPa). Les caractéristiques mécaniques des matériaux constituant l'ensemble *fibre optique / liaison entre la fibre optique et la gaine mécanique* ne perturbent alors que très faiblement le comportement de la gaine mécanique. Une solution consisterait à appliquer à la fibre optique un revêtement en composite directement par fusion lors de sa fabrication sur la tour de fibrage (cf. 1.1.3), avec la possibilité de doser la composition du matériau pour faire varier ses caractéristiques mécaniques suivant les besoins, mais également de contrôler ses dimensions et formes.

Les caractéristiques mécaniques de la gaine mécanique sont aussi fonction des caractéristiques mécaniques du béton (cf. 3.5.2.2 – a) et b), et, 3.6.2.2 – a) et b)) :

- Pour le cas en volume, le capteur doit posséder les mêmes caractéristiques mécaniques que le volume de béton qu'il remplace dans le but de minimiser les perturbations. Si le concepteur veut pouvoir avoir une marge d'erreur plus confortable dans la fabrication du

capteur, il est alors préférable qu'il prenne pour la gaine mécanique un matériau se déformant moins que le béton (ex. : acier inoxydable), un biais systématique apparaît alors dans les déformations mesurées (cf. Tableau 3.13) que l'utilisateur doit prendre en compte. Suivant les dimensions du capteur ce choix peut néanmoins être perturbateur pour le comportement même du béton. Les matériaux de gaine mécanique se déformant plus que le béton sont à éviter pour le cas en volume, perturbant trop significativement les mesures et fragilisant le béton.

- Pour le cas en surface c'est l'inverse. Pour des ancrages perturbant peu la mesure (cf. Figure 3.16), il est préférable que la gaine mécanique du capteur soit constituée d'un matériau se déformant plus facilement comparé aux autres matériaux en présence (notamment ceux des ancrages). De même que pour le cas en volume, le capteur doit avoir des caractéristiques mécaniques similaires au matériau qu'il *remplace* (l'air dans le cas présent) afin d'avoir un minimum de perturbations sur le mesurage de déformation. Une solution consisterait à tendre entre les deux ancrages une fibre optique avec une gaine mécanique en composite ou seulement avec son revêtement primaire (en polyimide par exemple). Elle serait prétendue à une tension lui permettant à la fois de travailler en relâchement (sollicitations de compression) mais aussi en traction, dans la plage de déformations souhaitée par l'utilisateur.

5.1.3.3 Conditionnement de la fibre optique

Afin de minimiser les tensions de liaison entre la fibre optique, les constituants du conditionnement et le béton, il est préférable que ce conditionnement possède un coefficient de dilatation thermique linéaire intermédiaire entre celui de la fibre optique et celui du béton (cf. 2.2.3.2).

5.2 Recommandations pour l'intégration au milieu de mesure

5.2.1 Méthodes d'intégration des capteurs à fibre optique au béton

Les méthodes d'installation courantes des capteurs à fibre optique en volume et en surface d'une structure en béton ont été décrites (cf. 2.2.4.3). Les recommandations à ce sujet sont directement précisées par ces descriptions. Lors de la conception, il ne faut pas oublier pour les capteurs en volume de prévoir des trous de fixation au niveau des ancrages, qui sont généralement présents pour la plupart des capteurs industriels existants. Pour les capteurs en surface, il faut prévoir de pouvoir les retirer et les fixer à nouveau facilement, sans pour autant modifier l'environnement de mesure, afin notamment de pouvoir les réétalonner (le système de prétension de la fibre optique pourrait être inclus au niveau des ancrages).

Les recommandations de montage et de fixation ne sont pas forcément compatibles avec les conditions de chantier. Nécessitant un soin plus particulier pour les capteurs en volume (cf. 4.2.2.1), elles impliquent de passer plus de temps pour la mise en place du béton, contrainte peu compatible avec la construction de l'ouvrage (ex. : temps, personnel supplémentaire ou formé). Ce temps passé est néanmoins nécessaire pour optimiser le mesurage. Le cas échéant, il faut alors opter pour une fixation directe aux fers à bétons par collier ne perturbant pas les mises en place du béton par aiguilles vibrantes. Ce type de fixation est pratique courante sur chantier que ce soit pour les capteurs à fibre optique ou que ce soit pour les capteurs classiques tels que les capteurs à corde vibrante. Dans ces conditions il serait préférable d'instrumenter à cœur ces fers par une fibre optique, afin de ne pas subir les perturbations

liées à l'interface *fers / béton*. Cependant l'interprétation des mesures réalisées par des capteurs à fibre optique fixés directement aux armatures ou intégrés au cœur des fers à bétons n'est pas immédiate notamment lorsqu'il s'agit d'armatures passives.

5.2.2 Ancrages

5.2.2.1 Cas en volume

Pour le cas en volume les ancrages doivent avoir un diamètre assez grand pour ancrer le plus solidairement possible le capteur au béton (cf. 3.5.2.1 – a)). A cet effet, un choix de diamètre d'ancrages d'au moins trois fois le diamètre extérieur de la gaine mécanique apparaît judicieux. Il faut cependant veiller à ce que ces dimensions ne perturbent pas trop significativement le comportement aux limites du volume de béton instrumenté : le diamètre maximal des ancrages doit être inférieur à la moitié de la distance les séparant d'éléments induisant des perturbations dans la distribution des champs de contraintes et de déformations (ex.: armatures, bords de la structure). Tout élément pouvant réduire la surface de ces ancrages est à proscrire (ex. : embouts) (cf. 4.1.1.1).

La liaison *gaine mécanique / ancrages* pour les capteurs en volume doit être réalisée au niveau des extrémités de la base de mesure du capteur. Des ancrages trop volumineux impliquent des problèmes de définition de la base de mesure du capteur suivant les sollicitations appliquées. Afin que le capteur puisse fonctionner en compression et en traction ces ancrages doivent être les plus fins possibles (cf. Figure 2.9) et la gaine mécanique doit être liée au béton uniquement par les ancrages (tube de protection isolant la gaine mécanique du béton).

5.2.2.2 Cas en surface

Pour le cas en surface, afin d'éviter les problèmes de définition de la base de mesure du capteur et de diminuer les perturbations apportées par les ancrages, ceux-ci doivent être le plus ponctuels possible, évitant d'être liés au béton par une trop grande surface (cf. 3.6.2.1 – a)). Un barreau, ou un parallélépipède plein, de faibles dimensions transversales, et scellé en profondeur dans le béton, peut être une solution.

Ces ancrages de surface doivent très peu se déformer comparé au béton (ex. : acier inoxydable) (cf. 3.6.2.2 – b)) et doivent être suffisamment profond dans le béton pour que la mesure soit représentative des déformations du béton en volume de la structure (ex. : de 5 à 10 cm pour les enceintes de confinement) (cf. 2.2.4.3 –2), et, 3.6.2.1 – b)). Leur hauteur par rapport à la surface de la structure instrumentée doit être la plus petite possible afin d'éviter tout problème de flexion.

La liaison entre une fibre optique tendue et ces ancrages de surface peut être faite par collage ou pincement. La fixation de la gaine mécanique du capteur aux ancrages ne doit pas être source de couples ou de moments quelconques, les encastrements étant à proscrire.

La liaison entre les ancrages et le béton peut se faire par collage (cf. 4.2.2.2) pour les ouvrages où le forage est limité voire proscrit (ex. : enceintes de confinement). Ce collage doit être effectué en considérant les mêmes recommandations que pour le capteur à fibre optique, avec une préparation de surface du béton particulière, décrite dans certains ouvrages comme par exemple [POLLICELLA, 2000] et une protection de cette liaison notamment vis-à-vis de l'humidité (cf. 2.2.3.1).

5.2.3 Câbles à fibre optique

La sortie des câbles fibre optique au niveau de l'interface *béton / air* doit être progressive (ex. : protection par gainage plastique) afin d'éviter de sectionner la fibre optique lors d'une mauvaise manipulation (cf. 4.1.2.3). Il en est de même au niveau de la jonction *câble fibre optique / capteur* qui ne doit pas être *brutale* afin d'éviter des cassures éventuelles de la fibre optique lors de manipulations ou lors des mesures (cf. 4.1.1.1).

5.3 Recommandations pour l'exploitations des résultats

5.3.1 Correspondance entre comportements en volume et en surface du béton

Il est difficile de relier le comportement en surface du béton à son comportement en volume (cf. 2.2.4.3 – 2)). C'est pourquoi, toute instrumentation en volume, installée lors de la construction d'un ouvrage, devrait être couplée immédiatement avec une instrumentation en surface. Cela permettrait d'estimer expérimentalement la non uniformité des champs de contraintes et de déformations, et par là même la fonction de transfert existante, mais aussi d'assurer une continuité des mesures lorsque les capteurs en volume tombent en panne, ne pouvant pas être substitués. Il doit y avoir de plus compatibilité avec les systèmes de mesure classiques (ensemble des chaînes de mesure) : les capteurs qui sont déjà installés dans les structures ne sont pas laissés de côté mais vont continuer d'être scrutés. L'utilisation d'un seul système d'interrogation et d'acquisition est privilégié pour des raisons évidentes de coût.

5.3.2 Mise en place des matériaux en présence

Il a été observé pour le premier cycle de chargement, voire même le deuxième, qu'il y avait une *mise en place* des matériaux en présence les uns par rapport aux autres, avant d'avoir répétabilité de la mesure (cf. 4.2.1.1 et 4.2.1.2). Procéder à une *mise en place* préalable de l'instrumentation est compliqué, essentiellement pour le cas en volume. La *mise en place* est plus facilement envisageable pour le cas en surface en considérant un capteur de type *fil tendu*. Cependant, même en sollicitant le capteur avant installation, il y a un temps de recouvrement et la *mise en place* se produit à nouveau après une nouvelle mise en charge. La solution serait peut-être de savoir apprécier cette *mise en place* pour différentes configurations de capteur, en estimant l'écart par des essais en laboratoire. Des corrections seraient alors intégrées lors de l'exploitation des résultats.

5.3.3 Estimation des perturbations dues aux variations thermiques et au fluage

Les dispositifs de correction en température des capteurs à fibre optique ne prennent généralement pas en compte les trois types de dilatation thermique présentés au Chapitre 2 (cf. 2.2.3.2) qui sont sources de perturbations dans le mesurage des déformations du béton. La prise en compte des perturbations d'origine thermique est difficile.

Un moyen de les approcher pourrait être de concevoir des échantillons témoins permettant d'effectuer les corrections nécessaires sur les résultats de mesurage. Des capteurs de température, intégrés ou non au capteur à fibre optique, sont disposés dans l'ouvrage dans une zone tout autour du capteur (zone de la taille d'une éprouvette 16/32) ainsi que sur celui-ci.

Des éprouvettes témoins en béton 16/32, instrumentées en volume ou en surface par un capteur à fibre optique de même type que celui de l'ouvrage (au moins 3 éprouvettes pour chaque configuration d'instrumentation), sont fabriquées dans le même béton, le même jour que le coulage du béton d'ouvrage. Des éprouvettes en béton seul sans inclusion sont également confectionnées. En étudiant la réponse de ces éprouvettes témoins ainsi que celle du capteur à fibre optique seul, testés dans une enceinte pour des variations de température similaires à celles mesurées sur ouvrage, il pourrait alors être possible de quantifier les perturbations d'origine thermique liées à la présence du capteur.

Ceci est une approche de la réalité, les éprouvettes en béton ne réagissant pas de la même manière que l'ouvrage aux actions thermiques. Il est donc également souhaitable de positionner des éprouvettes témoins (avec et sans capteur) à proximité du capteur fixé en surface, mais aussi des capteurs non liés mécaniquement à la structure, soumis directement aux variations climatiques subies par la surface de l'ouvrage. Cela permet de compléter les informations obtenues par les essais en enceinte et d'identifier d'autres sources de perturbations provenant par exemple de l'humidité ambiante.

Ce procédé de correction pourrait être très efficace mais est lourd de mise en œuvre.

Un procédé de même type, avec différents échantillons témoins (ex. : capteur seul, éprouvettes avec et sans capteur, sous sollicitation mécanique seule (contrôle de l'hygrométrie et de la température (cf. 4.1.3.2)) à long terme, tout au long de la vie de l'ouvrage), pourrait permettre de corriger les mesures réalisées des perturbations liées aux éventuelles déformations de fluage des matériaux constituant les capteurs à fibre optique. Ce procédé est néanmoins plus compliqué à mettre en œuvre que celui pour corriger les perturbations engendrées par les actions thermiques au niveau des éléments constitutifs des capteurs à fibre optique.

Conclusion

Les principaux facteurs d'influence sur le mesurage de déformation du béton par capteurs à fibre optique, ont été identifiés à travers les deux premiers chapitres (principalement le second) essentiellement à l'aide d'ouvrages et de documents divers (cf. Références bibliographiques). Certains de ces facteurs ont fait l'objet d'études théoriques et expérimentales, présentées dans les Chapitres 3 et 4, dans le but de quantifier leur influence sur le mesurage de déformation réalisé par un type particulier de capteurs à fibre optique : *capteurs extensométriques ponctuels noyés au sein et fixés en surface du béton*. Les autres facteurs d'influence identifiés, comme notamment la *température*, n'ont pas été étudiés pour des raisons essentiellement liées aux contraintes expérimentales de la Thèse. De plus des solutions existent, et ont été énoncées dans le Chapitre 2, afin que la mesure de déformation réalisée puisse être corrigée des effets perturbateurs de ces facteurs.

Il ressort des études effectuées que les facteurs d'influence prépondérants proviennent essentiellement du *conditionnement* de la fibre optique : *géométrie*, *dimensions* et *caractéristiques mécaniques* de tous les *constituants du capteur*. Les perturbations sont principalement induites par la différence de comportement sous sollicitations entre le milieu de mesure qu'est le béton et les constituants du capteur. L'influence de ces facteurs peut être considérable. Pour une configuration de capteur industriel donné, les déformations mesurées peuvent fortement sous-estimer ou surestimer les déformations qui sont développées dans le milieu de mesure sans la présence du capteur, et ce jusqu'à *deux fois moins* de déformation pour certains cas d'étude. Des *biais systématiques* doivent alors être considérés par l'utilisateur afin d'exploiter correctement les résultats du mesurage.

Les résultats ainsi que les enseignements issus des différentes analyses et études réalisées sur les facteurs d'influence considérés, ont permis d'établir des *recommandations*, présentées en fin de mémoire dans le Chapitre 5. Celles-ci sont spécifiques aux différents cas d'étude analysés mais elles peuvent également s'appliquer à tous les capteurs à fibre optique rentrant dans le cadre de la présente étude. Elles peuvent d'ailleurs s'étendre à un certain nombre de capteurs de conception électrique (ex. : extensomètres à corde vibrante). Ces recommandations restent néanmoins générales et non pas axées sur un capteur industriel particulier. Les résultats des études théoriques présentées au Chapitre 3 peuvent également servir de *corrections* sur le mesurage mais sous réserve que les capteurs utilisés soient identiques à ceux des cas d'étude correspondants.

Chaque capteur doit être spécifique à la partie d'ouvrage en béton à instrumenter et aux besoins propres en surveillance associés. Le capteur nécessite alors une attention particulière dans son utilisation mais surtout dans sa conception même afin que les mesures réalisées puissent être maîtrisées et performantes. C'est pourquoi les recommandations établies au Chapitre 5 sont destinées aux utilisateurs mais également aux concepteurs. La prise en compte de ces recommandations implique une étroite collaboration entre ces deux intervenants. L'utilisateur soumet ses besoins au concepteur. Ce dernier conçoit alors le capteur répondant au cahier des charges, et pour lequel les perturbations engendrées par le conditionnement sont maîtrisées. Le concepteur doit fournir à l'utilisateur toutes les caractéristiques des constituants du capteur et toutes les informations nécessaires sur les tests effectués. L'utilisateur exploite le capteur et selon ses besoins, complète les tests et études du concepteur.

Ces recommandations permettent une meilleure maîtrise du processus de mesurage de la déformation au sein et en surface du béton, en se positionnant à la place de l'utilisateur ou du concepteur. En les intégrant lors du processus de fabrication ainsi que pendant leur utilisation, les capteurs à fibre optique, tels que ceux considérés dans la présente étude, seront tout à fait à même de répondre aux besoins de surveillance d'ouvrages en béton de Génie Civil, tels que

des ouvrages d'art ou des ouvrages de production d'électricité. Des études complémentaires sont évidemment à réaliser si le béton ou les capteurs ne correspondent pas exactement à ceux considérés dans la présente étude (ex. : géométrie différente).

Cependant ce type de capteur ne peut aujourd'hui pas réellement concurrencer les capteurs classiques employés couramment dans le mesurage de déformation du béton de tels ouvrages. En effet, les capteurs classiques ont un retour d'expériences plus conséquent, et de plus, le point de mesure revient moins cher. La cause principale de la différence de prix ne provient pas des capteurs eux-mêmes mais du système d'interrogation et d'acquisition. Des laboratoires privés et publiques s'efforcent cependant à mettre à niveau tous ces produits. Les capteurs à fibre optique considérés ne constituent pas en plus un bond technologique conséquent puisqu'il s'agit du même type de capteur (extensomètres) mais avec un élément sensible différent (la fibre optique).

A contrario, les capteurs à fibre optique présentent des avantages d'utilisation que certains capteurs classiques ne possèdent pas (ex. : utilisation dans des milieux hostiles ou sous de fortes températures, insensibilité aux perturbations électromagnétiques). En plus de ces utilisations particulières, les capteurs à fibre optique possèdent une valeur ajoutée par rapport aux capteurs classiques avec notamment la possibilité d'effectuer plusieurs points de mesure sur une même fibre, que ce soit des mesures réparties ou des mesures distribuées. Installés en réseau sur l'ensemble d'un ouvrage en béton, les *multicapteurs à fibre optique* de déformation permettent de renseigner l'utilisateur sur les comportements localisés de certaines zones de cet ouvrage mais également sur son comportement global. Une même fibre optique peut constituer la totalité de ce réseau permettant ainsi un gain au niveau du câblage et l'utilisation d'un unique système d'interrogation et d'acquisition (ex. : multicapteurs à fibre optique à réseaux de Bragg). Les multicapteurs à fibre optique constituent un réel intérêt à travers le monde (ex. : Suisse, Canada), et sont pour la plupart encore à l'étude. Des expérimentations sur des prototypes sont d'ailleurs actuellement en cours mais il reste beaucoup de choses à faire dans ce domaine.

La tendance actuelle est à la maintenance des ouvrages de Génie Civil existants, ce qui implique un intérêt plus fort pour les capteurs fixés en surface de structure. Une étude réalisée dans un futur proche, dans la continuité de la présente Thèse, pourrait avoir pour objet un multicapteurs extensométrique (bases de mesure définies entre deux points d'ancrages) réalisant des mesures distribuées de déformation en surface d'enceintes de confinement en béton. Les résultats et les recommandations présentés sont bien évidemment à prendre en compte puisque de tels capteurs rentrent dans le cadre de la présente étude. La future étude pourrait se décomposer de la manière suivante :

* Analyse théorique du matériau et des dimensions les plus adéquates de la gaine mécanique en fonction des autres éléments (ancrages et béton) et aussi des conditions de fonctionnement (intempéries, milieu hautement sécurisé,…) ;
* Analyse à réaliser également pour les liaisons entre la gaine mécanique et les ancrages, les caractéristiques de ces derniers (géométrie, dimensions et matériau), et, les liaisons entre eux et la surface du béton ;
* Tests sur le collage entre la fibre optique et la gaine mécanique pouvant aussi être menés sur le court et le moyen terme ;
* Essais en laboratoire sur éprouvettes en béton 16/32 (sollicitées en compression et en traction) pour un capteur avec un seul point de mesure afin de valider le choix de ces différents éléments et caractéristiques ;

* Choix d'une correction thermique et d'une protection contre les agressions extérieures (humidité, neige,…) avec des essais comparatifs en laboratoire ;
* Autres essais en laboratoire afin de tester le multicapteurs, comprenant au moins trois points de mesure, sur une poutre en béton sollicitée en flexion à court et long terme ;
* Essais sur site en surface d'une enceinte de confinement à réaliser en parallèle des essais sur poutre.

D'autres axes de recherche sont possibles, le sujet étant riche d'applications, et notamment pour des multicapteurs avec une seule fibre optique sensible sur toute sa longueur réalisant des mesures intégrées. L'intégration dans les chaînes de mesure existantes de tels capteurs associés aux capteurs classiques, ainsi que l'élargissement au domaine de la télésurveillance, permettront aux capteurs à fibre optique de devenir des acteurs de premier ordre dans le domaine de la surveillance des ouvrages en béton de Génie Civil .

Références bibliographiques

ABE T., MITSUNAGA Y., KOGA H. (1989), *A Strain Sensor Using Twisted Optical Fibers*, Journal of Lightwave Technology – Volume 7 – N° 3, March, pp. 525-529

ACKER P., ADAM M., MAMILLAN M., SAULNIER J. (1986), *Caractères du béton*, Techniques de l'Ingénieur – Traité Construction – Volume C4 : *Structures : Béton hydraulique* – Référence C2240, 22 p.

ADAM M. (1990), *Durabilité et pathologie du béton*, Techniques de l'Ingénieur – Traité Construction – Volume C4 : *Structures : Béton hydraulique* – Référence C2250, 6 p.

ADAM M. et al. (10 coauteurs) (1984), *Variétés de bétons et constituants*, Techniques de l'Ingénieur – Traité Construction – Volume C3 : *Structures : Béton hydraulique* – Référence C2210, 18 p.

ANDERSON B.L., BROSIG J.A. (1995), *New approach to microbending fiber optic sensors : varying the spatial frequency*, Optical Engineering – Volume 34 – N° 1, pp. 208-213

ARDITTY A., BOURBIN Y., GRAINDORGE P., LEFEVRE H.C. (1982), *Les capteurs à fibre optique : principes et technologies*, Optoélectronique N° 13, Novembre, pp. 55-62

ASCH G. et al. (17 coauteurs) (1987), *Les capteurs en instrumentation industrielle*, Dunod – Bordas, Paris, ISBN 2-04-016948-2, 791 p.

ASTM C 469-94 (1994), *Standar Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*, July, American Society for Testing and Materials ASTM, pp. 238-241

ATTOLOU A., BELLOC A., TORRENTI J.M. (1989), *Méthodologie pour une nouvelle protection du béton vis-à-vis de la dessiccation*, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées – N° 164 – Référence 3443, Novembre-Décembre, pp. 85-86

BAEL91 (1992), *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé, suivant la méthode des états limites*, Eyrolles, Paris, ISBN 2-212-10011-6

BALTAZART V., RENAUDIN F., CAUSSIGNAC J.M., CHABERT A. (2000), *Application d'appui-peseur instrumenté par CFO au pesage dynamique de véhicules sur un ouvrage d'art*, Congrès HOLO3 : Méthodes et Techniques Optiques pour l'Industrie, 21-25 Novembre, Biarritz, 6 p.

BARDONNET P. (1992), *Résines époxydes EP : Composants et propriétés*, Techniques de l'Ingénieur – Traité Plastiques et composites – Volume AM3 : *Plastochimie : Matières thermodurcissables – Monographies* – Référence : A3465, 18 p.

BAROGHEL-BOUNY V. (1994), *Caractérisation des pâtes de ciment et des bétons – Méthodes, Analyse, Interprétations*, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, ISBN 2-7208-5030-1, 468 p.

BASTET M., RIMBŒUF M. (1986), *: Dispositions particulières : Ponts en béton précontraint – Ponts courants*, Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art – Deuxième partie – Fascicule 32 – Sous-fascicule 32.1, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 50 p.

BELLEVILLE C., DUPLAIN G. (1993), *White-light interferometric multimode fiber-optic strain sensor*, Optics letters – Volume 18 – N° 1, pp. 78-80

BESNIER P. (1992), *Les capteurs à fibres optiques*, Rapport pour le Ministère de l'Industrie et du Commerce extérieur, 58 p.

BOSTVIRONNOIS J.L., DE LARRARD F. (1991), *Les bétons à hautes performances aux fumées de silice perdent-ils de la résistance à long terme ?*, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics – N° 491 – Série : Béton 277, Février, pp. 27-41

BOUCHER M. (1987), *Mécanique des milieux continus*, Techniques de l'Ingénieur – Traité Sciences Fondamentales – Volume AF5 : *Mécanique : Mécanique* – Référence A249, 35 p.

BOULAY C., COLSON A. (1981), *Un extensomètre à béton éliminant l'influence des déformations transversales sur la mesure des déformations longitudinales*, Matériaux et Construction – Volume 14 – N° 79, pp. 35-38

BOULAY C., PATIES C. (1993), *Mesure des déformations du béton au jeune âge*, Materials and Structures – Volume 26, pp. 307-311

BOULAY C., LE MAOU F., RENWEZ S. (1999), *Quelques pièges à éviter lors de la détermination de la résistance et du module en compression sur cylindres de béton*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées – N° 220 – Référence 4262, Mars-Avril, pp. 63-74

BRUINSMA A.J.A., VAN ZUYLEN P., LAMBERTS C.W., DE KRIJGER A.J.T. (1984), *Fibre-optic strain measurement for structural integrity monitoring*, 2nd International Conference on Optical Fiber Sensors OFS'84, September 5–7, Stuttgart, pp. 399-402

CALERO J., WU S.P., POPE C., CHUANG S.L., MURTHA J.P. (1994), *Theory and Experiments on Birefringent Optical Fibers Embedded in Concrete Structures*, Journal of Lightwave Technology – Volume 12 – N° 6, June, pp. 1081-1091

CARON C. (1986), *Importance du module de rigidité du polymère dans les collages structuraux*, ISAP 86 – Adhesion between polymers and concrete : bonding, protection, repair – Section 9 : Glueing of steel to concrete, Chapman and Hall – Rilem, New-York, ISBN 0-412-29050-2, pp. 505-508

CAUSSIGNAC J.M., ROUGIER J.C. (1998), *Pesage en marche par fibres optiques*, 2ème Conférence sur Le pesage en marche des véhicules routiers, 14-16 Septembre, Lisbonne, pp. 447-452

CHAIMOWICZ J.C. (1992), *Introduction à l'optoélectronique : principes et mise en œuvre*, Dunod, Paris, ISBN 2-10-001292-4, 407 p.

CHATELAIN J. (1969), *L'extensométrie par jauges à fil résistant*, Supplément au Bulletin de liaison des laboratoires routiers N° 39, LCPC, Paris, 111 p.

CHEN J.Y., HOA S.V., JEN C.K., WANG H. (1997), *In-Situ Monitoring of Graphite/Epoxy Cure Using Optical Fiber and Ultrasonic Sensors*, 12th Annual Technical Conference American Society for Composites, October 6-8, Dearborn, 11 p.

CHOQUET P., JUNEAU F., DADOUIN F., (1999), *New generation of fiber-optic sensors for dam monitoring*, International Conference on Dam Safety and Monitoring, October 19-22, Yichang, 10 p.

CLARK T., SMITH H. (1995), *Microbend Fiber Optic Sensors*, Fiber Optic Smart Structures – Chapter 12, Udd – Wiley, New-York, ISBN 0-471-55448-0, pp. 319-360

CLEMENT J.L., LE MAOU F. (2000), *Etude de la répétabilité des essais de fluage sur éprouvette de béton*, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées – N° 228 – Référence 4329, Septembre-Octobre, pp. 59-69

COUVRAT P. (1990), *Le collage moderne*, Collection Technologies de Pointe, Hermès Éd., Paris, ISBN 2-86601-210-8, 64 p.

COZANNET A., MAITRE H., FLEURET J., ROUSSEAU M. (1981), *Optique et télécommunications : transmission et traitement optiques de l'information*, Collection technique et scientifique des télécommunications, Eyrolles – CENT-ENST, 491 p.

DAKIN J. (1992), *Distributed Optical Fiber Sensors*, Critical Reviews of Optical Science and Technology – Volume CR44, ISBN 0-8194-0980-4, pp. 162-199

DAVIS M.A., KERSEY A.D. (1997), *Fiber Bragg Grating Based Systems for Transportation Infrastructure Monitoring*, SPIE – Volume 2902, pp. 201-210

DE LARRARD F. (2000), *Structures granulaires et formulation des bétons*, Collection Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées – Série Ouvrages d'art – Référence OA 34, LCPC, Paris, ISBN 2-7208-2006-8, 414 p.

DESJARDINS M. (1975), *Les capteurs de mesure*, La Documentation française, Paris, AM 1139, 119 p.

DONLAGIC D., CULSHAW B. (1998), *Mode selective/filtering microbend sensor structure for use in distributed sensor systems*, SPIE – Volume 3330, pp. 180-191

DONLAGIC D., ZAVRSNIK M. (1997), *Fiber-optic microbend sensor structure*, Optics letters – Volume 22 – N° 11, pp. 837-839

DUGAT J., ROUX N., BERNIER G. (1995), *Etude 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 – Série : Béton 320, Mars-Avril, pp. 112-121

DUNPHY J.R., MELTZ G., MOREY W.W. (1995), *Optical Fiber Bragg Grating Sensors : A Candidate for Smart Structure Applications*, Fiber Optic Smart Structures – Chapter 10, Udd – Wiley, New-York, ISBN 0-471-55448-0, pp. 271-285

DUPLAIN G., BELLEVILLE C., BUSSIERE S., BELANGER P.A. (1997), *Absolute Fiber-Optic Linear Position and Displacement Sensor*, International Conference on Optical Fiber Sensors OFS'97, October 28–31, Williamsburg, 4 p.

FERDINAND P. (1992), *Capteurs à fibres optiques et réseaux associés*, Technique & Documentation – Lavoisier, Paris, ISBN 2-85206-781-1, 251 p.

FERDINAND P. (1993), *La surveillance des structures par fibres optiques*, Optoélectronique N°70, Janvier-Février, pp. 26-36

FERDINAND P. (1999), *Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg*, Techniques de l'Ingénieur – Traité Mesures et Contrôle – Volume R7 : *Optique : Optique* – Référence R6735, 28 p.

FERDINAND P. et al. (16 coauteurs) (1994), *Mine Operating Accurate STABILity Control with Optical Fiber Sensing and Bragg Grating Technology : the BRITE-EURAM STABILOS Project*, SPIE – Volume 2360, pp. 162-166

FERDINAND P. et al. (6 coauteurs) (1998), *Optical Fiber Sensors provide new means for measurement and monitoring within the Nuclear Industry*, International Nuclear Congress ENC'98 and World Exhibition, October 25-28, Nice, 8 p.

FERDINAND P., MAGNE S., DEWYNTER-MARTY V., ROUGEAULT S., BUGAUD M. (1999), *Optical fiber Bragg grating sensors make composite structures smart*, SAMPE Europe Conference '99 / JEC Exhibition, April, Paris, 12 p.

FERRETI M. (1996), *Capteurs à fibres optiques*, Techniques de l'Ingénieur – Traité Mesures et Contrôle – Volume R1 II : *Organisation, Méthodes et Techniques de mesure : Prise de mesure* – Référence R415, 41 p.

FLEURY P., MATHIEU J.P. (1959), *Physique générale et expérimentale : Mécanique Physique*, Scientifiques & Techniques – Eyrolles, Paris, N° 5615, 439 p.

FROGGAT M., MOORE J. (1998), *Distributed measurement of static strain in an optical fiber with multiple Bragg gratings at nominally equal wavelengths*, Applied Optics – Volume 37 – N° 10, April 1, pp. 1741-1746

GIECK K.R. (1990), *Formulaire technique*, 9ème édition revue et complétée, Gieck-Verlag, Germering, ISBN 3-920-379-18-7

GODART B. (1998), *Dispositions particulières : Auscultation – Surveillance renforcée – Haute surveillance – Mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde*, Instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art – Deuxième partie – Fascicule 03, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, 42 p.

GODART B., KITTEL G., FASSEU P. (1999), *Manuel d'identification des réactions de dégradation interne du béton dans les ouvrages d'art*, Techniques et méthodes des laboratoires des Ponts et Chaussées – Série Guide technique, LCPC, Paris, ISBN 2-7208-3840-1, 42 p.

GRANGER L. (1996), *Comportement différé du béton dans les enceintes de centrales nucléaires : analyse et modélisation*, Collection Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées – Série Ouvrages d'art – Référence OA 21, LCPC, Paris, ISBN 2-7208-2500-X, 381 p.

GUILLARD Y., MOREAU H. (1995), *Collage de fibres optiques en surface de structure*, Compte-rendu de synthèse interne du LRPC-Strasbourg, Référence 93-7-187-a HM/ij, 23 p. + annexes

HALOUI M., LIEURADE H.P., RIGOLOT A., BONNARD A. (1992), *Etude expérimentale et analyse élastoplastique du comportement de joints de colle sous sollicitation monotone et cyclique – Cas de tôles d'acier collées à simple recouvrement*, Matériaux & Techniques – N° 4-5, pp. 45-53

HARMER A.L. (1983), *Optical fibre sensor markets*, International Conference on Optical Fibre Sensors OFS'83, April 26-28, London, pp.53-56

HENRIKSSON A., SANDGREN S., ASSEH A. (1996), *Temperature insensivity of a fiber optic Bragg grating sensor*, SPIE – Volume 2839, pp. 20-33

HOLST A., HABEL W., LESSING R. (1992), *Fiber Optic Intensity Modulated Sensors for Continuous Observations of Concrete and Rock-Fill Dams*, SPIE – Volume 1777, pp. 223-226

HUIWEN W. et al. (5 coauteurs) (1996), *Strain measurement and cure monitoring in thin plates of composite materials by using twisted optical fibers*, SPIE – Volume 2895, pp. 355-360

HUMBERT P. (1989), *CESAR-LCPC : un code général de calcul par éléments finis*, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées – N° 160 – Référence 3389, Février-Mars, pp. 112-115

HUSTON D.R., FUHR P.L. (1995), *Fiber Optic Smart Civil Structures*, Fiber Optic Smart Structures – Chapter 23, Udd – Wiley, New-York, ISBN 0-471-55448-0, pp. 647-665

ICHINOSE N., KOBAYASHI T. (1990), *Guide pratique des capteurs*, Collection mesures physiques, Masson, Paris, ISBN 2-225-82030-9, 198 p.

INAUDI D. (1997), *Field Testing and Applications of Fiber Optic Displacement Sensors in Civil Structures*, International Conference on Optical Fiber Sensors OFS'97, October 28-31, Williamsburg, 4 p.

INAUDI D., VURPILLOT S. (1995), *SOFO : Surveillance d'ouvrages par senseurs à fibres optiques*, Ingénieurs et architectes suisses – N° 26, 6 Décembre, 8 p.

INAUDI D., VURPILLOT S., CASANOVA N., OSA-WYSER A. (1996), *Development and field test of deformation sensors for concrete embedding*, SPIE – Volume 2721, pp. 138-148

INAUDI D., CASANOVA N., KRONENBERG P., VURPILLOT S. (1997), *Railway bridge monitoring during construction and sliding*, SPIE – Volume 3043, pp. 58-64

JEANDRAU J.P. (1992), *Conception et élaboration d'assemblages collés dans l'industrie mécanique*, Matériaux & Techniques – N° 4-5, pp. 11-15

JEUNHOMME L.B., DESFORGES F.X. (1987), *Réseaux de capteurs tout ou rien pour applications industrielles*, Optoélectronique N°40, Septembre-Octobre, pp. 35-39

JOINDOT M., JOINDOT I. (1999), *Fibres optiques pour télécommunications*, Techniques de l'Ingénieur – Traité Télécoms – Volume TE3 : *Télécommunications : Techniques de base* – Référence E7110, 15 p.

JOINDOT I., JOINDOT M. et al. (12 coauteurs) (1996), *Les télécommunications par fibres optiques*, Collection technique et scientifique des télécommunications, Dunod – CENT-ENST, Paris, ISBN 2-10-002787-5, 737 p.

KERSEY A.D. (1995), *Fiber Optic Sensor Multiplexing Techniques*, Fiber Optic Smart Structures – Chapter 15, Udd – Wiley, New-York, ISBN 0-471-55448-0, pp. 409-444

KERSEY A.D. (1997), *Optical Fiber Sensors*, Optical Measurement Techniques and Applications – Chapter 8, Rastogi – Artech House, Norwood, ISBN 0-89006-516-0, pp. 217-254

KRONENBERG P., CASANOVA N., INAUDI D., VURPILLOT S. (1997), *Dam monitoring with fiber optics deformation sensors*, SPIE – Volume 3043, pp. 2-11

LAPLANTE P. (1993), *Propriétés mécaniques des bétons durcissants : analyse comparée des bétons classiques et à très hautes performances*, Collection Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées – Série Ouvrages d'art – Référence OA 13, LCPC, Paris, ISBN 2-7208-2300-3, 299 p.

LARIVE C. (1998), *Apports combinés de l'expérimentation et de la modélisation à la compréhension de l'alcali-réaction et de ses effets mécaniques*, Collection Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées – Série Ouvrages d'art – Référence OA 28, LCPC, Paris, ISBN 2-7208-2660-X, 404 p.

LARIVE C. et al. (9 coauteurs) (2000), *Structural Effects of ASR in France on Real and Laboratory Structures*, 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction ICAAR, June 11-16, Québec, pp. 979-988

LE GOËR J.L., AVRIL J. (1992), *Extensométrie*, Techniques de l'Ingénieur – Traité Mesures et Contrôle – Volume R7 : *Grandeurs mécaniques* – Référence R1850, 16 p.

LE NEINDRE B. (1991), *Coefficients d'élasticité*, Techniques de l'Ingénieur – Traité Constantes Physico-Chimiques – Volume K4 : *Constantes mécaniques* – Référence K486, 23 p.

LE ROY R. (1996), *Déformations instantanées et différées des bétons à hautes performances*, Collection Etudes et Recherches des Laboratoires des Ponts et Chaussées – Série Ouvrages d'art – Référence OA 22, LCPC, Paris, ISBN 2-7208-2520-4, 376 p.

LEE W. et al. (8 coauteurs) (1999), *Railroad bridge instrumentation with fiber-optic sensors*, Applied Optics – Volume 38 – N° 7, March 1, pp. 1110-1114

LEFRANC E., MATHIEU C. (2000), *Réseaux Optiques : l'Offre Globale d'Alcatel*, Optique et Photonique – Le journal de la SFO – N° 3, 11 Septembre, pp. 24-27

LEQUIME M. (1997), *Réseaux de capteurs à fibres optiques*, Techniques de l'Ingénieur – Traité Mesures et Contrôle – Volume R2 : *Organisation, Méthodes, Techniques de mesure : Support de la transmission* – Référence R460, 19 p.

LEVALLOIS E. et al. (8 coauteurs) (1994), *Télésurveillance des ouvrages d'art et des sites – Projet national ITELOS*, Kirk, Paris, ISBN 2-905-686-38-3, 442 p.

LIDE D.R. (1993), *Handbook of Chemistry and Physics*, CRC Press, Boca Raton, ISBN 0-8493-0474-1

LIU T. et al. (5 coauteurs) (1998), *Simultaneous strain and temperature measurement using an integrated fiber Bragg grating/extrinsic Fabry-Perot sensor*, SPIE – Volume 3330, pp. 324-331

MAASKANT R. et al. (5 coauteurs) (1997), *Fiber-optic Bragg Grating Sensors for Bridge Monitoring*, Cement and Concrete Composites – N° 19, pp. 21-33

MAGNE S., ROUGEAULT S., VILELA M., FERDINAND P. (1997), *Sate-of-strain evaluation using Fiber Bragg grating rosettes – Application to discrimination between strain and temperature effects in fiber sensors*, Applied Optics – Volume 36, December 20, pp. 9437-9447

MAHUT B., TIVERON M. (1998), *Etude en 3 dimensions par éléments finis d'un témoin sonore à corde vibrante (capteur de type C110 de la société TELEMAC)*, Compte-rendu de synthèse interne du LCPC-Paris, Sujet de recherche N° 2-43-075, 18 p. + annexes

MEASURES R.M., ALAVIE T., MAASKANT R., HUANG S., LE BLANC M. (1994), *Bragg grating Fiber Optic Sensing for bridges and other structures*, 2nd European Conference on Smart Structures and Materials, Glasgow, pp. 162-167

MENSI R., ACKER P., ATTOLOU A. (1988), *Séchage du béton : analyse et modélisation*, Materials and Structures – Volume 21, pp. 3-12

MESTAT P. (1997), *Maillage d'éléments finis pour les ouvrages de géotechnique – Conseils et recommandations*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées – N° 212 – Référence 4161, Novembre-Décembre, pp. 39-64

Méthode de Vérification Périodique (1992), *Bâtis de fluage*, Procédure d'application N° V-24.91, Document du LCPC, 9 p.

MILLER D.W. et al. (5 coauteurs) (1999), *Fiber Optic Sensors in Nuclear Power Plant Radiation Environments, Phase 1*, EPRI, Palo Alto, CA, Report TR-107326-V1

MOREAU M.R., BASTIN E., GRATIA G., MIQUEL J.C. (1982), *Essais et moyens d'essais au laboratoire et dans l'industrie*, Technique et Documentation – LAVOISIER, Paris, ISBN 2-85206-147-3, 730 p.

MORIN A., CARON S., VAN NESTE R., EDGECOMBE M.H. (1996), *Field monitoring of the ice load of an icebreaker propeller blade using fibre optic strain gauges*, SPIE – Volume 2718, pp. 427-438

MOUTON Y. et al. (7 coauteurs) (1996), *Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton*, Série Guide technique, LCPC-Setra, Paris, ISBN 2-7208-7050-1, 75 p.

NARENDRAN N., WEISS J.M. (1996), *Fiber-optic strain and temperature sensors for power plant applications*, SPIE – Volume 2594, pp. 149-158

NARUSE H. (1999), *Distributed fiber optic sensors using Brillouin scattering anf their application*, 5th Optical Fibre Measurement Conference OFMC'99, September 22-24, Nantes, pp. 100-105

NELLEN P.M., ANDEREGG P., BRÖNNIMANN R., SENNHAUSER U. (1997), *Application of fiber optical and resistance strain gauges for long-term surveillance of civil engineering structures*, SPIE – Volume 3043, pp. 77-86

NF C 93-800 (1991), *Composants électroniques – Spécification générique pour les capteurs à fibres optiques*, Septembre, Association Française de NORmalisation AFNOR

NF ENV 13005 (1999), *Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure*, Août, Association Française de NORmalisation AFNOR

NF P 18-101 (1983), *Granulats – Vocabulaire – Définitions – Classification*, Décembre, Association Française de NORmalisation AFNOR

NF P 18-304 (1973), *Granulométrie des granulats*, Décembre, Association Française de NORmalisation AFNOR

NF P 18-325 (1991), *Béton – Performances, production, mise en œuvre et critères de conformité*, Août, Association Française de NORmalisation AFNOR

NF P 18-400 (1981), *Bétons– Moules pour éprouvettes cylindriques et prismatiques*, Décembre, Association Française de NORmalisation AFNOR

NF P 18-403 (1969), *Bétons de construction – Détermination des caractéristiques mécaniques des bétons – Essais de recherche*, Février, Association Française de NORmalisation AFNOR

NF P 18-406 (1981), *Bétons– Essai de compression*, Décembre, Association Française de NORmalisation AFNOR

NF P 18-409 (1969), *Bétons de construction – Détermination des caractéristiques mécaniques des bétons – Essai de traction directe*, Février, Association Française de NORmalisation AFNOR

NF P 18-451 (1981), *Bétons– Essai d'affaissement*, Décembre, Association Française de NORmalisation AFNOR

NF T 76-001 (1981), *Adhésifs – Vocabulaire*, Février, Association Française de NORmalisation AFNOR

NF X 07-001 (1994), *Normes fondamentales – Vocabulaire international des termes fondamentaux et généraux de métrologie*, Décembre, Association Française de NORmalisation AFNOR

NF X 10-011 (1958), *Résistance des matériaux – Vocabulaire*, Mars, Association Française de NORmalisation AFNOR

NIAY P. et al. (6 coauteurs) (1998), *Les réseaux de Bragg photoinscrits dans les fibres optiques*, Optique et Photonique – Le journal de la SFO – N° 1, 5 Mai, pp. 30-37

OLE (July 2000), *Fibre Bragg grating win ground in telecommunications and sensors*, Opto & Laser Europe – Issue 76 – Market Report, pp. 43, 45 et 47

OLE (September 2000), *Fibre-optic sensing comes of age*, Opto & Laser Europe – Issue 77 – Market Report, pp. 73, 74 et 76

OLUOKUN F.A., BURDETTE E.G., DEATHERAGE J.H. (1991), *Elastic Modulus, Poisson's Ratio, and Compressive Strength Relationships at early Ages*, ACI Materials Journal – Volume 88 – N°1, January-February, pp. 3-10

PERREGAUX N., VURPILLOT S., TOSCO J.S., INAUDI D., BURDET O. (1998), *Vertical Displacement of Bridges Using the SOFO System : a Fiber Optic Monitoring Method for Structures*, 12th Engineering Mechanics Conference, May 17-20, La Jolla, pp. 791-794

POLICELLA H. (2000), *Jauges extensométriques : l'expérience au service de la qualité*, Technique & Documentation – GAMAC, Paris, ISBN 2-84107-444-7, 101 p.

PRAT M., BISCH P., MESTAT P., MILLARD A., PIJAUDIER-CABOT G. (1995), *La modélisation des ouvrages*, Collection AFPC – Emploi des éléments finis en Génie Civil, Hermès, Paris, ISBN 2-86601-480-4, 770 p.

PRAT M., BISCH P., MESTAT P., MILLARD A., PIJAUDIER-CABOT G. (1997), *Calcul des ouvrages généraux de construction*, Collection AFPC – Emploi des éléments finis en Génie Civil, Hermès, Paris, ISBN 2-86601-581-9, 767 p.

PRIEL M. (1999), *Incertitudes de mesure et tolérances*, Techniques de l'Ingénieur – Traité Mesures et Contrôle – Volume RAB : *Organisation, Méthodes, Techniques de mesure : Dépouillement et traitement des mesures – Eléments de statistique* – Référence R285, 15 p.

PUREUR D., BRILLAUD L. (2000), *La technologie des réseaux de Bragg pour les systèmes de télécommunications DWDM*, Optique et Photonique – Le journal de la SFO – N° 3, 11 Septembre, pp. 14-16

QUIRION M. (1999), *Contribution à l'instrumentation des ouvrages en béton : application des fibres optiques pour la mesure des déformations internes*, Thèse de Doctorat de l'Université de Sherbrooke (Canada), 4 Novembre, 221 p.

QUIRION M., BALLIVY G. (2000), *Application des capteurs à fibre optique Fabry-Pérot pour le suivi à long terme de structures en béton*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées – N° 225 – Référence 4296, Mars-Avril, pp. 75-88

RAOUS M., CANGEMI L., COCU M. (1997), *Un modèle couplant adhérence et frottement pour le contact entre deux solides déformables*, Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris – Fascicule Mécanique – Série : IIb – Volume 325, pp. 503-509

RICHARD P., CHEYREZY M. (1995), *Les bétons de poudres réactives*, Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics – N° 532 – Série : Béton 320, Mars-Avril, pp. 85-102

RIOUBLANC J. (1997), *Etude d'un système de stabilisation passive de la dérive en température de la longueur d'onde d'accord des réseaux de Bragg*, Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges (France), 6 Juin, 163 p.

ROSSI P., LE MAOU F. (1986), *Ouvrage d'art : le contrôle des fissurations*, La Revue des Laboratoires d'essais, Juin, pp. 25-27

SENNHAUSER U., BRONNIMANN R., MAURON P., NELLEN P.M. (1997), *Reliability and durability of grating sensors in structural monitoring applications*, SPIE – Volume 3099, pp. 317-326

Service du matériel du LCPC (1976), *Appareil de mesure du fluage en compression des bétons de ciment*, Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées – N° 84 – Référence 1859, Juillet-Août, pp. 181-183

SIMON H. (1994), *Assemblage par collage*, Techniques de l'Ingénieur – Traité Plastique et Composites – Volume AM4 : *Plasturgie : Finitions* – Référence A3758, 20 p.

SMITH J., BROWN A., DE MERCHANT M., BAO X. (1999), *Simultaneous distributed strain and temperature measurement*, Applied Optics – Volume 38 – N° 25, September 1, pp. 5372-5377

SUOPAJÄRVI P. et al. (8 coauteurs) (1998), *Fibre optic sensors for traffic monitoring applications*, SPIE – Volume 3325, pp. 222-229

TIMOSHENKO S. (1948), *Théorie de l'élasticité*, Librairie Polytechnique Ch. Béranger, Paris & Liège, 446 p.

TORRENTI J.M., DANTEC P., BOULAY C., SEMBLAT J.F. (1999), *Projet de processus d'essai pour la détermination du module de déformation longitudinale du béton*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées – N° 220 – Référence 4263, Mars-Avril, pp. 79-81

TOUTLEMONDE F. (1999), *Quelques réflexions sur la détermination du module d'élasticité du béton, en vue de l'élaboration d'un mode opératoire LPC*, Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées – N° 220 – Référence 4263, Mars-Avril, pp. 75-78

TOUX J. (1990), *Capteurs*, Techniques de l'Ingénieur – Traité Mesures et Contrôle – Volume R2 : *Organisation, Méthodes et Techniques de mesure : Prise de mesure* – Référence R410-R411, 29 p.

UDD E. (1992), *Fiber Optic Smart Structures*, Critical Reviews of Optical Science and Technology – Volume CR44, ISBN 0-8194-0980-4, pp. 246-270

VURPILLOT S., CASANOVA N., INAUDI D., KRONENBERG P. (1997), *Bridge spatial displacement monitoring with 100 fiber optic sensors deformations : sensors network and preliminary results*, SPIE – Volume 3043, pp. 51-57

WOLFF R., MIESSELER H.J. (1992), *Monitoring of prestressed concrete structures with optical fiber sensors*, SPIE – Volume 1777, pp. 23-29

ZELBSTEIN U. (1956), *Technique et utilisation des jauges de contrainte*, DUNOD, Paris, 255 p.

Annexe

Illustrations du Chapitre 4

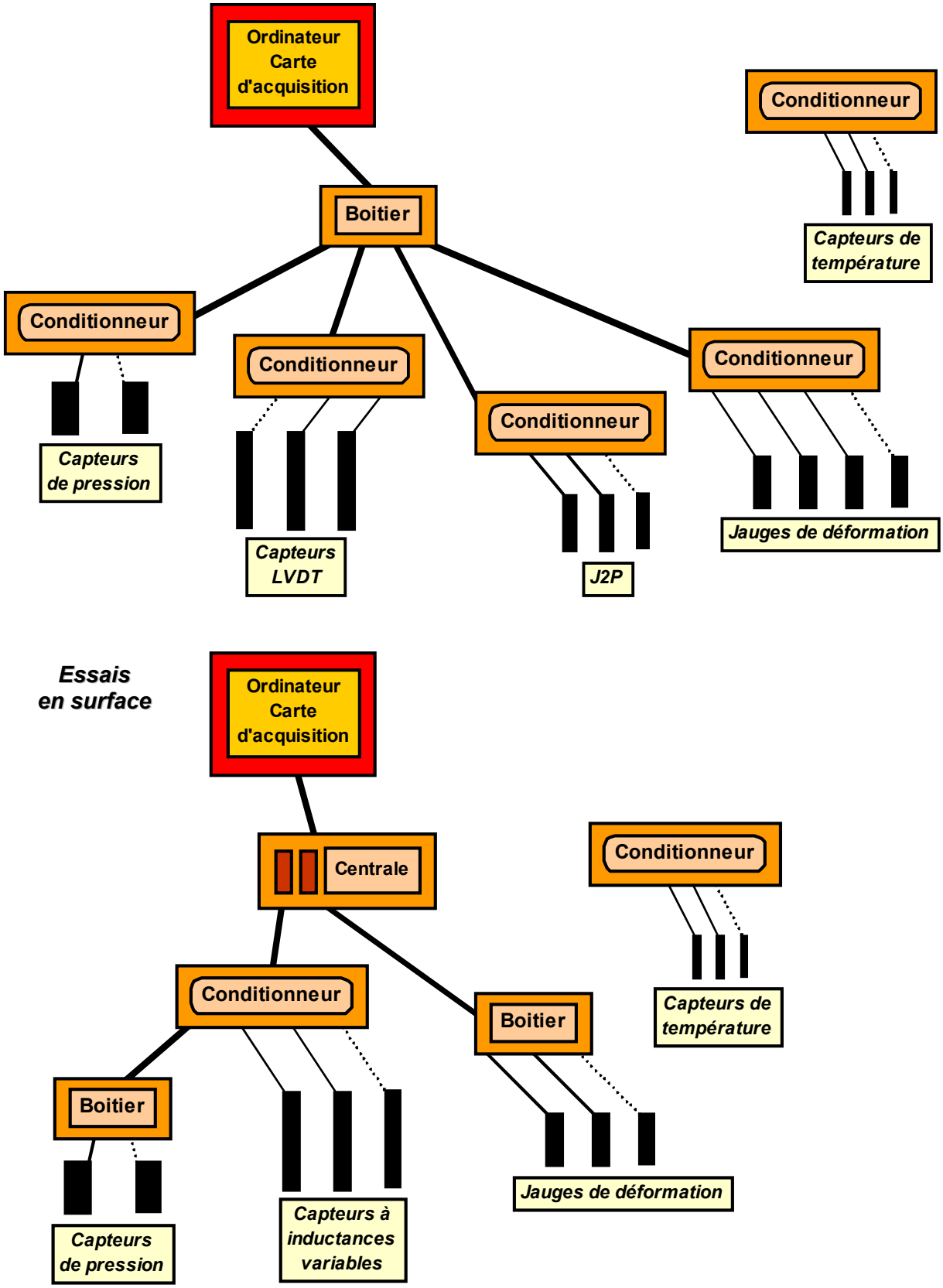
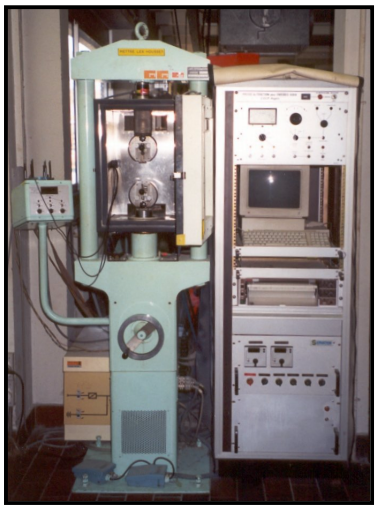


Figure A.1 Schémas des chaînes de mesure

Presse n°1

Presse n°2



Presse n°3

Presse n°4

MFL 5000 (Presse n°1)	
Effort maximum en compression	5000 kN
Effort maximum en traction	2500 kN
Course du vérin	± 75 mm
Groupe hydraulique	50 l.mn^{-1}
Pression servo-valve	300 bars
Alimentation freins de traverse	pompe auxiliaire
Alimentation vérins de manœuvre	groupe
Système de commande	MFL-ECS2 Numérique par clavier

Figure A.2 Presses du LCPC-Paris et du LRPC-Strasbourg

Presse n°1

16/32

détermination de R_c, E et ν

6 jauges
(3 longitudinales + 3 transversale)
+
J2P

Presse n°1

16/32

chargement/ déchargement par paliers

3 jauges
(longitudinales)
+
J2P
+
1 CFO n°2

Presse n°1

16/100

chargement/déchargement par paliers

6 jauges (longitudinales) + J2P
+
1 CFO n°2 + 1 CCV

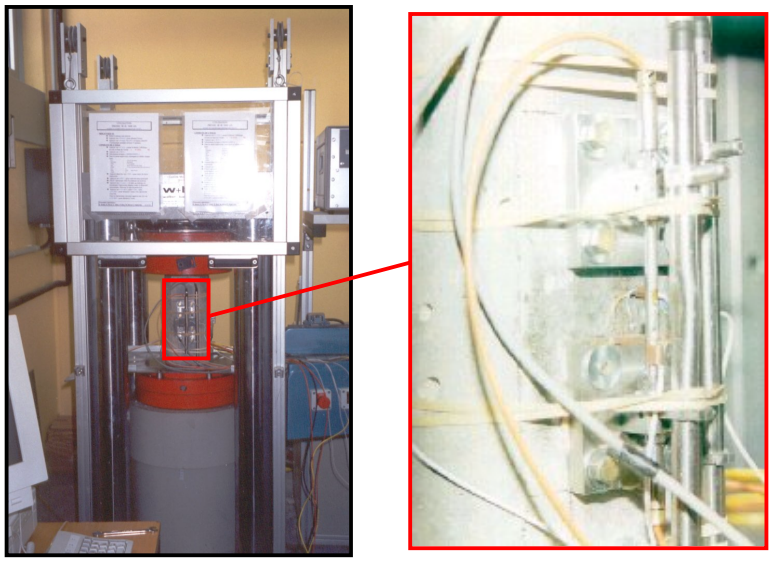
Bâtis de fluage

16/100 (3 en tout)

préparation de la mise en charge

jauges (longitudinales) + capteurs LVDT
+
CFO n°2 + CCV

Figure A.3 Essais en volume au LCPC-Paris

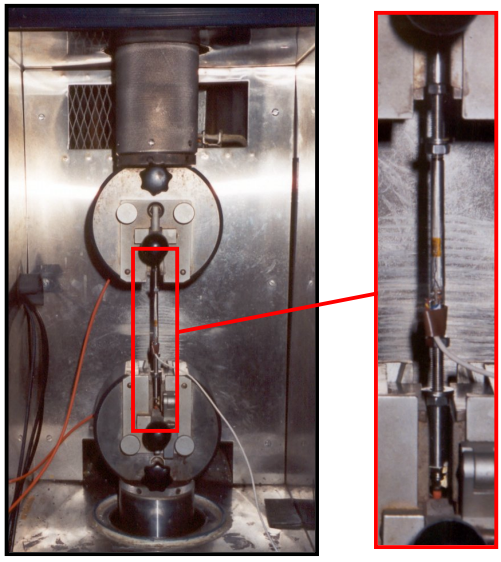


Presse n°2

16/32 « modifiée »

chargement/ déchargement par paliers

4 jauges
(2 éprouvette béton + 2 gaine mécanique des capteurs à fibre optique)
+
3 capteurs à inductances variables
(1 éprouvette béton + 2 têtes d'ancrages)
+
2 CFO n°3

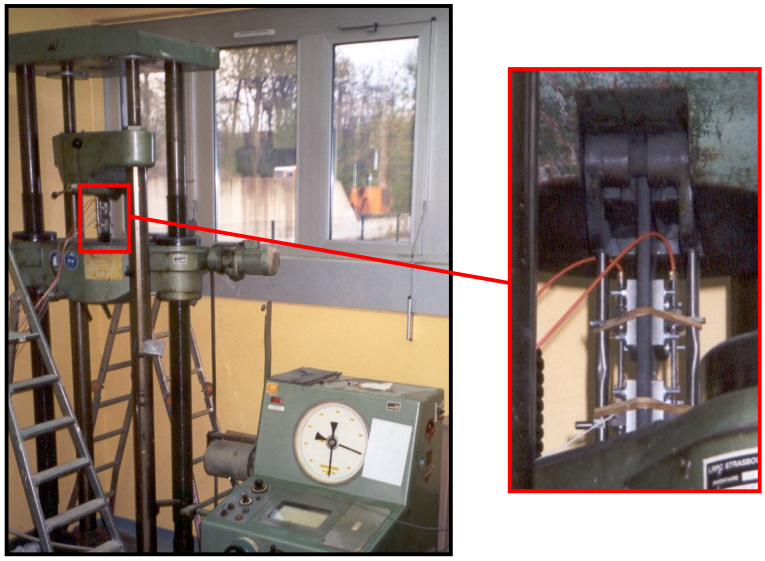


Presse n°3

Capteur à fibre optique seul

chargement/ déchargement par paliers

1 jauge
(gaine mécanique du capteur)
+
1 CFO n°3
(sans ancrages)



Presse n°4

Plaque acier

chargement/ déchargement par paliers

4 jauges
(2 plaque acier + 2 gaine mécanique des capteurs)
+
2 capteurs à inductances variables
(têtes d'ancrages)
+
2 CFO n°3

Figure A.4 Essais en surface au LRPC-Strasbourg