



HAL
open science

Durabilité des capteurs à fibre optique destinés aux mesures réparties de déformation dans les ouvrages en béton

Ismail Alj

► **To cite this version:**

Ismail Alj. Durabilité des capteurs à fibre optique destinés aux mesures réparties de déformation dans les ouvrages en béton. Optique / photonique. Université Paris-Est, 2020. Français. NNT : 2020PESC2036 . tel-03264027

HAL Id: tel-03264027

<https://theses.hal.science/tel-03264027v1>

Submitted on 17 Jun 2021

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.

Thèse présentée pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université Paris-Est

Spécialité : Génie Civil

par

Ismail ALJ

École Doctorale : Sciences, Ingénierie et Environnement

*Durabilité des capteurs à fibre optique destinés aux mesures
réparties de déformation dans les ouvrages en béton*

Soutenance prévue le 13 novembre 2020 devant le jury composé de :

Mme Myriam Carcassès	Professeur (Université Toulouse III)	<i>Rapporteur</i>
M. Joan Ramon Casas	Professeur (Universitat Politècnica de Catalunya)	<i>Rapporteur</i>
M. Franck Schoefs	Professeur (Université de Nantes)	<i>Examineur, Président du jury</i>
M. Jean Marie Hénault	Ingénieur de Recherche (EDF Lab)	<i>Examineur</i>
M. Marc Quiertant	Chercheur (Université Gustave Eiffel)	<i>Examineur, Co-encadrant</i>
M. Aghiad Khadour	Chercheur (Université Gustave Eiffel)	<i>Examineur, Co-encadrant</i>
M. Quentin Grando	Ingénieur (IRSN)	<i>Examineur, Co-encadrant</i>
M. Karim Benzarti	Directeur de Recherche (Université Gustave Eiffel)	<i>Directeur de thèse</i>

Résumé

La surveillance des structures de génie civil constitue un enjeu majeur et fait encore l'objet de nombreuses recherches. En particulier, les problématiques de coût, de durabilité des capteurs et de fiabilité des mesures restent des aspects fondamentaux à prendre en compte pour toute nouvelle solution d'instrumentation. Les capteurs à fibre optique (FO) rencontrent un intérêt croissant pour l'acquisition de mesures réparties de déformation/température dans les ouvrages en béton armé (BA) et pour le monitoring de structures en général, en raison des avantages offerts en termes de précision, de déport de la mesure sur de longues distances et d'une faible intrusivité par rapport aux capteurs traditionnels. Dans ces applications, des câbles à FO sont généralement collés en parement ou noyés à l'intérieur de la structure en béton. Selon la configuration, ils sont alors exposés aux conditions climatiques ou soumis à l'environnement alcalin de la matrice cimentaire, et leurs caractéristiques physiques/mécaniques peuvent alors évoluer dans le temps sous l'effet des vieillissements. La durabilité des capteurs et la fiabilité des mesures sur le long terme restent encore mal connues dans ces environnements de service complexes, et sont également peu documentées par les fabricants ou dans la littérature. Le travail mené dans cette thèse vise donc à mieux appréhender ces problématiques à travers une vaste étude expérimentale de durabilité en laboratoire, complétée par une étude de terrain sur des corps d'épreuves massifs instrumentés par capteurs à FO.

Le premier volet de la thèse propose un programme expérimental complet portant sur des éprouvettes de béton instrumentées par deux câbles à FO du commerce, qui sont exposées à des vieillissements accélérés représentatifs des applications considérées et à un vieillissement naturel sur site extérieur. Des caractérisations mécaniques, physico-chimiques et géométriques de ces échantillons sont alors réalisées à différentes échéances de temps au cours des vieillissements et permettent d'évaluer la durabilité de ces deux câbles à FO pour les deux configurations d'instrumentation possibles (câbles noyés / collés en parement). L'évolution du transfert d'effort du béton vers le cœur de la FO est ensuite évaluée numériquement en intégrant les résultats expérimentaux dans un modèle aux éléments finis simplifié.

En parallèle de cette étude de laboratoire, plusieurs blocs de béton du projet ODOBA de l'IRSN, destinés à subir des cycles de vieillissement accéléré pour déclencher les pathologies de gonflement du béton, ont été instrumentés au moyen de câbles à FO noyés et collés en parement. Ce second volet de la thèse vise à démontrer l'aptitude de cette technologie pour la détection et le suivi à long terme des pathologies de gonflement potentiellement rencontrées sur les enceintes de centrales nucléaires (réaction sulfatique interne : RSI, réaction alcali-granulat : RAG et couplage RAG/RSI). Les résultats obtenus contribueront à établir des critères objectifs permettant de choisir l'instrumentation des structures de centrales nucléaires ainsi que des méthodes facilitant l'interprétation des mesures sur le long terme.

Mots clés

Capteurs à fibre optique – pathologies des bétons – durabilité – vieillissement – mesures réparties de déformation – transfert d'effort

Abstract

Structural Health Monitoring is a crucial approach in the framework of maintenance and safety management plans of civil structures and still remains an active field of research and development. In particular, cost effectiveness, durability and measurement reliability remain fundamental issues to be considered for any emerging sensing solution. Optical fiber (OF) sensors have gained interest for collecting distributed strain and temperature measurements in reinforced concrete structures, given the benefits they offer in terms of accuracy, measurement range over long distances and low intrusiveness compared to conventional sensors. In these practical applications, OF cables are usually bonded to the concrete surface or embedded within the concrete medium. Depending on the configuration, OF sensors are thus exposed to weather conditions or subjected to the alkaline environment of the cement matrix, and their physical/mechanical properties may change over time. Under such complex environments, knowledge regarding the long-term durability and the reliability of OF sensors remains very limited, and this topic is only little documented by the manufacturers and in the literature. In this context, the present doctoral work aims to address these issues through a comprehensive durability study conducted in the lab, and through a complementary field investigation on massive concrete blocks instrumented with OF sensors.

The first part of this work involves an extensive experimental program on concrete specimens instrumented with two selected commercial OF cables, which are exposed to accelerated ageing conditions representative of actual field applications, and to natural outdoor ageing as well. Mechanical, physico-chemical and geometrical characterizations are then carried out on these specimens at different ageing times to assess the durability of the two OF cables for the two possible configurations (embedded/bonded). Changes occurring during ageing in the strain transfer process from the host concrete structure to the OF core, are finally investigated in a numerical approach based on a simple finite element model, where input parameters are identified from experimental data.

In parallel with this laboratory study, several massive concrete blocks of the ODOBA project led by IRSN, that will be subjected to accelerated ageing cycles in order to initiate concrete pathologies, were instrumented with embedded and bonded OF cables. This second part of the doctoral work aimed at demonstrating the effectiveness of this sensing technology to detect and monitor concrete pathologies potentially met on nuclear power plant (delayed ettringite formation: DEF, alkali-silica reaction: ASR and DEF/ASR coupling). Findings of this research will contribute to establish robust criteria for selecting monitoring systems suitable in structures of nuclear power-plants, as well as methods for interpreting in the long term strain measurements provided by OF sensors.

Key words

Optical fiber sensors - concrete pathologies - durability - ageing - distributed strain measurements – strain transfer process

Remerciements

Je tiens à remercier l'ensemble des membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail de thèse : M. Franck Schoefs pour avoir accepté de présider ce jury et d'examiner ce travail, Mme Myriam Carcassès et M. Joan Ramos Casas d'avoir accepté de rapporter ce travail et M. Jean-Marie Hénault pour son rôle d'examineur. Les contributions scientifiques de l'ensemble des membres du jury m'ont beaucoup aidé pour affiner mon programme d'étude et analyser mes résultats. Leurs remarques, leurs idées et leurs questions pertinentes ont permis d'enrichir davantage ce travail et de proposer des perspectives qui pourront être investiguées dans le futur.

Je voudrais remercier ensuite l'équipe encadrante avec laquelle j'ai eu le grand plaisir de travailler. Mon directeur de thèse M. Karim Benzarti pour sa grande implication, la grande aide qu'il m'a apportée sur les différents aspects techniques de ce sujet de thèse et particulièrement sur les aspects chimiques, et également ses qualités humaines qui m'ont permis de garder un esprit positif jusqu'à la fin. Un grand merci est ensuite adressé à mon tuteur référent M. Marc Quiertant. Je le remercie pour la confiance qu'il m'a accordée dès mes premiers jours. Marc et Moi avons des bureaux dans le même couloir et prenons les mêmes transports pour se rendre au travail. Nous avons donc eu beaucoup de discussions techniques et personnelles tout au long de ces 3 années. Cela m'a beaucoup aidé pour réussir ce travail de thèse et tenir le coup jusqu'à la fin. Je voudrais également remercier M. Aghiad Khadour pour son soutien technique et ses qualités humaines. Merci de m'avoir formé à utiliser l'OBR et à traiter les mesures et d'avoir demandé de mes nouvelles quotidiennement durant les périodes du confinement. Un grand merci à mon tuteur IRSN M. Quentin Grando, je le remercie pour les échanges scientifiques, les qualités humaines, le grand effort physique fourni pour m'aider lors des instrumentations sur ODOBA en plein soleil ou en plein froid et pour les sorties sur Aix-en-Provence en soirée.

Ce travail de thèse est le fruit de l'implication d'un grand nombre de personnes auxquelles je voudrais adresser mes remerciements : la direction de mon laboratoire d'affectation à l'université, Pierre Argoul, André Orcesi et Renaud-Pierre Martin ; L'assistante Minh Orcesi qui a fait l'impossible pour que je puisse m'installer paisiblement, réaliser mes missions et passer plusieurs dizaines de commandes ; Une équipe technique compétente dont le soutien m'a facilité la réalisation de la lourde campagne expérimentale, commençant par Benjamin Muller avec qui j'ai eu mes premières discussions techniques et finalement Jean-Claude Renaud avec qui j'ai publié mon premier article de journal. J'adresse mes remerciements à tout le reste de l'équipe technique (et les anciens membres également) : Damien, Amandine, Joël, Franck, Victor, Lénaïc, Khadija et Mirah ; Je voudrais remercier Lucas et Pierre avec lesquelles j'ai eu plusieurs échanges pour résoudre quelques problématiques scientifiques. J'adresse mes remerciements à d'autres collègues et amis en dehors de mon laboratoire qui ont participé directement ou indirectement à la réussite de ce travail : mon musicien préféré Jean-François pour son aide et pour les pauses musicales ; mon cher ami, collègue et compatriote Othman Omikrine-Metalssi pour nos discussions scientifiques et nos échanges personnelles.

Je ne voudrais surtout pas oublier la grande contribution de toute l'équipe de l'IRSN et leur chaleureux accueil lors de mes interventions à Cadarache. Merci Christophe et Benoît pour les échanges scientifiques sur ODOBA et merci à toute l'équipe de Cadarache.

Durant ces trois années de thèse, j'ai partagé un bureau avec Benjamin, à qui je voudrais adresser mes remerciements. C'est une personne avec un très bon fond et qui m'a énormément aidé surtout au démarrage de ma thèse. Je remercie Anne-Sophie pour l'organisation des sorties et les moments inoubliables que nous avons passés avec les autres collègues. Je n'oublie pas aussi l'aide de Robert lors de mes premiers jours au laboratoire pour la réalisation de quelques essais. Je remercie les chercheurs, ingénieurs, alternants, stagiaires, docteurs et doctorants avec qui j'ai passé des agréables moments et que je considère comme de bons amis (Mike, Badreddine, Sylvia, Mohamed, Guillaume, Raphael, DucTam, Bruno, Zaïnab, Hadji...) et tous les collègues que j'ai eu la chance de connaître.

Un grand merci aux personnes que j'ai rencontrées au travail, qui ne font plus partie de cette équipe mais qui sont toujours des amis proches : Nissrine qui était toujours présente pour m'aider, me remonter le moral du début jusqu'à la fin et que je ne pourrai jamais remercier comme il le faut ; Farah avec qui j'ai partagé énormément de souvenirs qui me sont précieux (conférence à l'international, voyages, les vendredis libanais...) ; Mohammed, le docteur sage, très poli et très généreux qui complète ce petit groupe d'arabes ; Agathe et Ludovic qui demandaient toujours de mes nouvelles.

Je voudrais également remercier mes amis que je connaissais avant la thèse et qui étaient toujours compréhensifs et supportaient mon humeur fluctuante durant ces trois années : Mehdi Tazi, le vrai ami sur qui je peux toujours compter ; Mehdi Sargeane avec qui j'ai passé les meilleurs souvenirs à l'EHTP ; Ayoub, une amitié de plus de 11 ans et que je garderai pour toujours ; Lamiae, que je connais depuis 20 ans ; Amal et Yasser, gentils et très serviables.

Finalement, un dernier grand merci à ma petite famille au Maroc : à ma mère et à mon père qui me manquent énormément et à qui je dois toutes les belles réalisations de ma vie. J'espère qu'ils sont enfin fiers de leurs fils ; à ma seule et unique sœur, que j'aime beaucoup et avec qui je partage tous mes secrets ; à ma petite nièce Rim et à mon beau-frère Amine.

Table des matières

Résumé.....	III
Abstract	V
Remerciements	VII
Table des matières	IX
Liste des figures	XV
Liste des tableaux.....	XXXI
Introduction générale.....	1
I. Généralités sur les capteurs à FO destinés à la surveillance des structures de génie civil : vers une utilisation pour la détection des pathologies de béton.....	7
I.1. La surveillance de la santé des structures de génie civil	9
I.2. Rappel de quelques notions de mécanique des matériaux	10
I.2.1. Loi de comportement d'un matériau	10
I.2.2. Rappel de quelques notions sur le comportement des interfaces.....	12
I.2.3. Rappel de quelques notions métrologiques de base.....	14
I.3. Généralités concernant les capteurs traditionnels	16
I.3.1. Principaux capteurs traditionnels destinés à la mesure de la température.....	16
I.3.2. Capteurs destinés à la mesure des déplacements / déformations	17
I.4. Généralités concernant les capteurs à FO	19
I.4.1. Avantages et inconvénients des capteurs à FO	19
I.4.2. Structure d'une FO	20
I.4.3. Les différents types de FOs	21
I.4.4. Quelques exemples de câbles à FO du commerce	23
I.4.5. Les systèmes de mesure par FO	24
I.5. Transfert d'effort de la structure hôte vers la fibre en silice et effet de l'interrogeur ...	34
I.5.1. Approches théoriques analytiques.....	35
I.5.2. Approches numériques (modélisations aux éléments finis)	39
I.5.3. Quelques exemples de validations expérimentales.....	40
I.5.4. Facteurs influençant le transfert des efforts mécaniques	41
I.5.5. Effets de l'interrogeur	42
I.6. Caractérisation du comportement mécanique des FOs	43
I.6.1. Introduction.....	43
I.6.2. Essai de traction uniaxiale d'une FO.....	43
I.6.3. Essai de fluage en flexion de FO par enroulement autour d'un mandrin.....	44
I.6.4. Essai de flexion 2 points mené sur une FO	45
I.6.5. Quelques lois de comportement d'une FO	45
I.7. Durabilité des capteurs à FO dans un environnement non spécifique au génie-civil	46
I.7.1. Introduction.....	46
I.7.2. Modélisation de la dégradation d'une FO en silice sollicitée en fluage.....	47
I.7.3. Estimation probabiliste de la durée de vie d'une FO	49

I.7.4. Exemples d'études expérimentales appliquant une approche probabiliste.....	50
I.8. Durabilité des capteurs à FO pour une utilisation en contrôle de santé des structures ..	54
I.8.1. Introduction.....	54
I.8.2. Influence de la température	54
I.8.3. Étude des attaques chimiques.....	55
I.8.4. Étude des effets mécaniques	56
I.8.5. Bilan des études de durabilité des capteurs à FO pour une utilisation en SHM.....	58
I.9. Bilan de la revue bibliographique sur les capteurs à FO pour une utilisation en SHM ..	60
I.10. Quelques généralités sur le béton et le BA	62
I.10.1. Le béton, généralités sur le matériau	62
I.10.2. Le BA	64
I.11. Les pathologies du béton.....	65
I.11.1. Lixiviation et attaques acides	66
I.11.2. La carbonatation du béton.....	67
I.11.3. La pénétration des chlorures.....	68
I.11.4. Cycles de gel-dégel	69
I.11.5. La RSI.....	70
I.11.6. La RAG.....	72
I.11.7. Couplage RAG / RSI.....	74
I.11.8. Conclusions de l'étude bibliographique relative aux pathologies du béton.....	75
I.12. Utilisation des capteurs à FO pour le suivi spécifique des pathologies des ouvrages en BA.....	76
I.12.1. Détection des fissures par capteur à FO	76
I.12.2. Suivi de la corrosion des armatures du BA.....	77
I.13. Conclusion générale du chapitre I	80
II. Protocoles expérimentaux et programme d'étude de la durabilité des câbles à FO	81
II.1. Introduction	83
II.2. Câbles à FO.....	83
II.2.1. Câble NEUBREX FN-SILL-3	83
II.2.2. Câble AFL DNS-5553	85
II.2.3. Comparaison des deux câbles	86
II.3. Eprouvettes de l'étude.....	86
II.3.1. Types d'éprouvettes de l'étude	86
II.3.2. Eprouvettes d'adhésif	88
II.3.3. Préparation des éprouvettes avec câbles noyés et collés en surface	89
II.3.4. Compositions des bétons de l'étude	91
II.3.5. Coulages des éprouvettes en béton	93
II.3.6. Traitement thermique appliqué aux éprouvettes ZA	95
II.4. Description des essais mécaniques de caractérisation.....	98
II.4.1. Caractérisation mécanique des bétons	98
II.4.2. Caractérisation mécanique des câbles à FO.....	100
II.4.3. Essais d'arrachement câble/béton	102
II.5. Essais de caractérisations physico-chimiques.....	107
II.5.1. Suivi dimensionnel des câbles à FO et des éprouvettes en béton	107
II.5.2. Suivi gravimétrique	110
II.5.3. Observations en microscopie optique	111
II.5.4. Observations en Microscopie électronique à balayage couplée à l'analyse élémentaire EDX	111

II.5.5. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF).....	112
II.5.6. Calorimétrie différentielle à balayage (DSC).....	113
II.6. Programme d'étude de durabilité des capteurs à FO.....	114
II.6.1. Programme de suivi des câbles noyés immergés en milieu alcalin	114
II.6.2. Programme de suivi des câbles collés soumis à un vieillissement accéléré.....	117
II.6.3. Programme des essais de fluage appliqué aux câbles à FO	121
II.6.4. Vieillissement sur site naturel	122
II.6.5. Récapitulatif des échéances de caractérisation associées aux différentes conditions de vieillissement.....	124
II.7. Synthèse du Chapitre II.....	125
III. Résultats de l'étude de durabilité sur les câbles à FO	127
III.1. Introduction	129
III.2. Caractérisations à l'état initial avant vieillissement	129
III.2.1. Caractérisation mécanique des bétons AA et ZA.....	129
III.2.2. Caractérisation mécanique des deux câbles à FO.....	130
III.2.3. Caractérisation de l'adhésif X120.....	132
III.2.4. Caractérisation mécanique de l'interface câble à FO/béton par essais d'arrachement	134
III.3. Caractérisations aux différentes échéances des vieillissements.....	139
III.3.1. Caractérisation des bétons AA et ZA vieillis	140
III.3.2. Caractérisation des câbles à FO vieillis.....	151
III.3.3. Caractérisation de l'adhésif X120 après vieillissement.....	165
III.3.4. Caractérisation mécanique par essais d'arrachement de l'interface câble à FO/béton vieillie	169
III.4. Modélisation du transfert d'effort mécanique entre la structure hôte en béton et les câbles à FO noyés ou collés en parement	184
III.4.1. Géométries simplifiées des câbles à FO	185
III.4.2. Hypothèses des modèles et conditions aux limites.....	186
III.4.3. Modélisation des essais d'arrachement	188
III.4.4. Courbes de transfert d'effort	192
III.4.5. Influence d'une ouverture de fissure dans le béton.....	193
III.4.6. Discussion sur le domaine de validité des paramètres des modèles numériques	193
III.4.7. Prise en compte des vieillissements dans les modèles numériques	195
III.5. Conclusion et perspectives du chapitre III.....	198
IV. Instrumentation par capteurs à FO des blocs en béton du projet ODOBA.....	203
IV.1. Introduction.....	205
IV.2. Présentation du projet ODOBA.....	205
IV.2.1. Contexte et objectifs du projet.....	205
IV.2.2. Démarche d'étude et dispositifs expérimentaux du projet ODOBA.....	206
IV.3. Plateforme ODE et blocs en béton du projet ODOBA.....	207
IV.3.1. Plateforme ODE	207
IV.3.2. Blocs de béton.....	207
IV.4. Instrumentation des blocs ODOBA par capteurs à FO.....	213
IV.4.1. Objectif de l'instrumentation	213
IV.4.2. Présentation des plans d'instrumentation des blocs ODOBA.....	214
IV.4.3. Instrumentation du bloc ZA.....	219
IV.4.4. Instrumentation du Bloc IB	223
IV.4.5. Instrumentation du Bloc IA.....	225

IV.4.6. Instrumentation du Bloc KB.....	226
IV.4.7. Réalisation des connexions optiques et prise des mesures de référence	228
IV.5. Premières mesures par capteurs à FO et validation de l'instrumentation des blocs...	231
IV.5.1. Historique des mesures de la température par capteurs à FO dans les blocs ODOBA	231
IV.5.2. Décorrélation température/déformation	232
IV.5.3. Premières mesures de déformation dans les blocs	237
IV.6. Conclusion et perspectives du chapitre IV	248
V. Approche expérimentale et numérique de l'effet de l'adhésif d'application d'une FO monomode en surface du béton sur sa réponse au droit d'une fissure.....	251
V.1. Introduction	253
V.2. Analyse théorique du transfert d'effort du béton vers la FO collée en surface	255
V.2.1. Schéma d'instrumentation par FO collée à la surface du béton	255
V.2.2. Approche numérique de l'étude du mécanisme de transfert d'effort.....	256
V.2.3. Modèles analytiques du transfert d'effort	257
V.2.4. Comparaison des approches numérique et analytiques	260
V.3. Approche expérimentale sur éprouvettes en béton instrumentées par FOs collées	262
V.3.1. Caractérisation mécanique préliminaire des adhésifs utilisés.....	263
V.3.2. Essai de compression sur cylindre de béton	264
V.3.3. Essai de flexion 3-points sur prisme entaillé en béton fibré.....	269
V.4. Modèle numérique généralisé du transfert d'effort incluant l'effet de l'ouverture des fissures.....	273
V.4.1. Géométrie du modèle aux éléments finis	273
V.4.2. Validation expérimentale du modèle numérique	274
V.4.3. Application du modèle à l'évaluation des ouvertures des fissures	276
V.5. Conclusion du Chapitre V	284
Conclusions et perspectives.....	285
Références	293
VI. Annexes.....	309
VI.1. Annexe A : Longueurs d'ancrage des deux câbles à FO noyés dans le béton.....	311
VI.1.1. Objectif de l'essai	311
VI.1.2. Déroulement et résultats de l'essai.....	311
VI.2. Annexe B : Essais préliminaires pour la détermination d'une longueur de contact câble/béton.....	313
VI.2.1. Objectif des essais	313
VI.2.2. Cas du câble Neubrex noyé.....	313
VI.2.3. Cas du câble AFL noyé	314
VI.2.4. Cas des câbles collés	316
VI.3. Annexe C : Résultats expérimentaux des essais mécaniques réalisés sur les éprouvettes cylindriques de béton à différentes échéances des vieillissements	319
VI.4. Annexe D : Profils de la déformation enregistrés au cours d'essais d'arrachement sur éprouvettes de béton comportant les câbles à FO noyés et collés	320
VI.4.1. Caractérisation avant vieillissement (T0)	320
VI.4.2. Caractérisation après 3 mois de vieillissement accéléré.....	323
VI.4.3. Caractérisation après 6 mois de vieillissement accéléré.....	326
VI.4.4. Caractérisation après 9 mois de vieillissement accéléré.....	328

VI.4.5. Caractérisation après 12 mois de vieillissement accéléré.....	330
VI.4.6. Caractérisation après 15 mois de vieillissement accéléré.....	332
VI.4.7. Caractérisation après 18 mois de vieillissement accéléré.....	334
VI.4.8. Caractérisation après 16 mois de vieillissement naturel (VN)	336
VI.5. Annexe E : Premier essai de flexion 3-points sur un prisme en béton fibré	337
VI.5.1. Protocole d'essai.....	337
VI.5.2. Analyse des profils de déformation des FOs	338
VI.5.3. Amélioration du protocole de l'essai de flexion.....	339
VI.6. Annexe F : Fiches techniques	340
VI.6.1. Fiche technique du câble Neubrex	340
VI.6.2. Fiche technique du câble AFL.....	341
VI.6.3. Fiches techniques des produits utilisés pour la fabrication du béton AA.....	342
VI.6.4. Fiches techniques des produits utilisés pour la fabrication du béton ZA	347
VI.6.5. Fiche technique de l'adhésif X120	351
VI.6.6. Fiche technique de l'adhésif A (2 ^e page uniquement)	352
VI.7. Première page de l'article publié dans la revue <i>Sensors</i>	353

Liste des figures

Figure I-1 : Viaduc de Millau (instrumenté à l'aide de différents capteurs durant la phase de construction, le lancement du tablier et la phase d'exploitation) [3].	9
Figure I-2 : Barre soumise à une contrainte normale [5].	10
Figure I-3 : Exemples de courbes d'évolution de la déformation en fonction de la contrainte appliquée lors d'essais de traction sur différents matériaux [4].	11
Figure I-4 : Représentation du tenseur des contraintes pour un élément de volume cubique.	11
Figure I-5 : Représentation d'un matériau sous contrainte de cisaillement.	12
Figure I-6 : Paramètres décrivant une interface bidimensionnelle [7].	13
Figure I-7 : (a) Configuration d'un essai d'arrachement d'une FO noyée dans un cylindre de résine pour la caractérisation de l'interface résine/revêtement primaire de la FO ; (b) Schéma de l'échantillon testé [8].	13
Figure I-8 : (a) Schéma d'un échantillon pour un essai d'arrachement ; (b) Courbe typique charge/déplacement d'un essai d'arrachement; (c) Courbes expérimentales d'arrachement FO/résine en relation avec l'essai de la Figure I-7 [8].	14
Figure I-9 : Les différents types d'erreurs [10].	15
Figure I-10 : Sonde à résistance de platine [13].	17
Figure I-11 : Schéma du principe de mesure d'un thermocouple [15].	17
Figure I-12 : Jauge de déformation [16].	18
Figure I-13 : Exemple d'extensomètre à corde vibrante [17].	18
Figure I-14 : Schéma de vue en coupe d'un LVDT [20].	19
Figure I-15 : Structure d'une FO standard.	20
Figure I-16 : Exemples de FOs à haute biréfringence [26].	23
Figure I-17 : Principe de l'interféromètre de Michelson [28].	25
Figure I-18 : Principe de l'interférométrie de Fabry-Perrot [28].	25
Figure I-19 : Principe d'un capteur à réseau de Bragg [31].	26
Figure I-20 : Spectre de rétrodiffusion de la silice [32].	27
Figure I-21 : Schéma des techniques de séparation des mesures de température et des déformations.	30
Figure I-22 : Découplage des effets de température et de déformation à partir des mesures Raman et Brillouin [43].	32
Figure I-23 : Installation mettant en œuvre des fibres à maintien de polarisation [46] pour mesurer la température et la déformation à partir de la rétrodiffusion Brillouin.	33
Figure I-24 : Schéma théorique du transfert d'effort dans le modèle analytique d'Ansari et Libo [47].	35

Figure I-25 : Schéma théorique du transfert d'effort pris en compte dans le modèle analytique de Li <i>et al.</i> [48].	36
Figure I-26 : Schéma du principe de transfert d'effort vers une fibre collée en surface considéré dans [53].	38
Figure I-27 : Comparaison entre les taux de transfert de déformation du modèle proposé par Li <i>et al.</i> [48] avec celui d'Ansari et Libo [47].	39
Figure I-28 : Exemple de maillage pour un capteur du fabricant NEUBREX collé en surface d'après Billon [57].	40
Figure I-29 : Exemples d'instrumentation d'un échantillon pour la validation expérimentale d'une FTM d'après [48].	40
Figure I-30 : (a) Effets de la longueur de la fibre sur la déformation normalisée [58] ; (b) Effets de la longueur de la fibre sur le taux du transfert de déformation [48].	41
Figure I-31 : (a) Taux de transfert en fonction de l'épaisseur de l'adhésif [58] ; (b) Moyenne du taux de transfert en fonction de l'épaisseur de l'adhésif et de sa rigidité [48].	41
Figure I-32 : Mesure attendue de l'interrogateur (ε_M) pour un profil de déformation (ε_T) dans la FO [42].	43
Figure I-33 : Méthodes courantes de fixation des extrémités d'une FO lors d'un essai de traction uniaxiale (a = utilisation de fixations cylindriques ; b = utilisation de poignées pneumatiques en caoutchouc ; c et d = FO collée sur des plaques) [59].	44
Figure I-34 : Fluage en flexion par mandrin [59].	44
Figure I-35 : Montage expérimental de l'essai de flexion 2 points [60].	45
Figure I-36 : Distribution du modèle de probabilité de Weibull pour cinq FOs différentes [71].	51
Figure I-37 : Durée de vie des échantillons en fonction de la contrainte appliquée à différentes valeurs de température [64].	52
Figure I-38 : valeurs mesurées de n en fonction de l'inverse de la température [64].	52
Figure I-39 : Durée de vie de FOs maintenues sous contrainte dans une solution de NaCl à 100 g/l et mise en évidence du phénomène de Knee [60].	53
Figure I-40 : Durée de vie des fibres soumises à une sollicitation de fluage et conservées dans l'eau à différentes températures [63].	53
Figure I-41 : Fissures dans le revêtement en acrylate d'une fibre noyée après 28 jours d'immersion en solution alcaline [74].	55
Figure I-42 : Comparaison des résultats des capteurs à FO à réseau de Bragg (FBG) avec ceux du modèle analytique (ANALYTICAL), du modèle aux éléments finis (FEA) et des jauges de déformation (ESG) [77].	57
Figure I-43 : Comparaison des mesures relevées par les différents capteurs, pour deux modes de chargement [78].	57
Figure I-44 : Corrélation entre les résultats théoriques et les mesures expérimentales par la FO collée au centre de la face inférieure du prisme (point B) [79].	58

Figure I-45: Représentation schématique de courbes d'essais en traction et compression pour l'acier et le béton [14].	64
Figure I-46 : Zones en compression et en traction dans une poutre fléchie [86].	65
Figure I-47 : Manifestations de la RSI (réseau de fissures) [110].	70
Figure I-48 : Mécanisme de gonflement de la RSI proposé par Brunetaud [111].	71
Figure I-49 : Béton affecté par la RAG [114].	72
Figure I-50 : Profils de déformations relevés par les capteurs à FO, faisant apparaître des pics qui correspondent à des débuts de fissuration dans les régions en traction d'une poutre en BA durant un essai de flexion 4-points [2].	77
Figure I-51 : Principe de bobinage proposé dans [135] pour la détection de la corrosion des armatures.	77
Figure I-52 : Évolution des déformations mesurées par les FOs enroulées autour de deux armatures durant leur corrosion [135].	78
Figure I-53 : Évolution des déformations dans la FO entourant un cylindre soumis à l'essai de corrosion accéléré et zoom sur le changement de vitesse d'évolution des déformations [137].	78
Figure II-1 : (a) Section du câble Neubrex FN-SILL-3 observée au microscope optique ; (b) Section de la partie centrale du câble, observée au microscope optique, montrant des vides au niveau de l'interface revêtement primaire de la FO/revêtement externe du câble (c) Section des deux FOs centrales ; (d) Reliefs au niveau de la surface externe du câble, avec une partie dénudée.	84
Figure II-2 : (a) Section du câble AFL DNS-5553 observée au microscope optique ; (b) Photographie du câble avec une partie dénudée de son revêtement externe.	85
Figure II-3 : Sections des deux câbles à FO observées à l'aide du microscope optique.	86
Figure II-4 : Schémas des différents types d'échantillons utilisés dans cette étude : (a) Échantillons d'adhésif (b) échantillons de câbles à FO, (c) cylindres de béton Ø 11 - 22 cm, (d) cylindres de béton Ø 11 - 22 cm avec câbles à FO noyés et (e) Prismes de béton 7 x 7 x 28 cm ³ avec câbles à FO collés dans des engravures sur les 4 faces latérales.	87
Figure II-5 : Schéma d'un cylindre de béton avec câble à FO noyé et utilisation d'une gaine en PVC pour maîtriser la longueur de contact câble/béton.	88
Figure II-6 : L'adhésif X120 d'HBM : (a) cartouche à deux composants et (b) applicateur et buse de mélange.	88
Figure II-7 : (a) Échantillons de X120 pour la caractérisation mécanique ; (b) Dispositif expérimental de traction (c) Géométrie des éprouvettes haltères de type 1B selon la norme EN ISO 527-2 [142].	89
Figure II-8 : Préparation des cylindres avec câbles AFL noyés : (a) préparation de la gaine en PVC destinée à isoler une partie du câble; (b) protection du câble à l'exception de la partie devant être en contact avec le béton ; (c) coulage des cylindres avec câbles noyés.	90
Figure II-9 : (a) Schéma d'instrumentation d'un prisme par câbles à FO collés ; Préparation des prismes avec câbles collés sur les 4 faces : (b) rainurage de l'éprouvette ; (c) Prismes instrumentés.	91

Figure II-10 : (a) Vue 3D du plan de la structure métallique ; (b) Structure métallique fabriquée à l'UGE pour le coulage des éprouvettes cylindriques avec câbles noyés.	94
Figure II-11 : (a) Malaxeur Couvrot utilisé pour le coulage du béton de formulation AA ; (b) Dispositif de mesure de consistance du béton à l'état frais (cône d'Abrams).	94
Figure II-12 : Photographies prises lors du premier coulage du béton ZA (30 août 2018).	95
Figure II-13 : Évolution de la température enregistrée par quelques thermocouples noyés dans le bloc ZA, durant le traitement thermique.	96
Figure II-14 : Consignes de température du traitement thermique appliqué aux éprouvettes ZA et comparaison avec les températures enregistrées par le thermocouple ZA_TT503 du bloc ZA au moment de son traitement thermique.	97
Figure II-15 : Presse de capacité 5000 kN utilisée pour la réalisation des essais de compression.	98
Figure II-16 : Éprouvette équipée de capteurs de déplacement pour la détermination du module d'Young et du coefficient de Poisson.	98
Figure II-17 : (a) Essai de flexion 3-points sur un prisme en béton; (b) Plaque support (7 x 7 cm ²) posée sur l'un des deux morceaux de béton issu de la rupture d'un prisme (7 x 7 x 28 cm ³) sous essai de flexion et (c) Essai de compression sur un morceau de béton.	99
Figure II-18 : (a) Préparation des échantillons pour la caractérisation mécanique des câbles à FO ; (b) Mors serrant une plaque support d'échantillon.	100
Figure II-19 : (a) Dispositif d'essai pour la caractérisation mécanique des câbles ; (b) Echantillon de renfort en acier du câble Neubrex marqué par deux points pour le suivi extensométrique par AVE ; (c) Essai d'arrachement gaine du câble Neubrex/renfort en acier et marquage de l'échantillon pour le suivi du déplacement différentiel à l'interface.	101
Figure II-20 : Courbe typique contrainte/déplacement différentiel d'un essai d'arrachement.	102
Figure II-21 : (a) Vue en 3D du plan de la structure métallique pour la fixation de l'éprouvette en béton lors des essais d'arrachement ; (b) Utilisation de la structure lors d'un essai d'arrachement câble noyé/cylindre de béton.	103
Figure II-22 : (a) Exemple d'essai d'arrachement câble Neubrex/béton; (b) Exemple d'essai d'arrachement câble AFL/béton.	104
Figure II-23: (a) Dispositif de l'essai d'arrachement et (b) méthode de caractérisation de l'interface câble/béton pour le cas du câble noyé dans le béton.	104
Figure II-24 : Méthode de caractérisation de l'interface câble/béton pour le cas du câble collé à la surface du béton.	106
Figure II-25 : (a) Barre étalon (b) Extensomètre à pointeaux.	108
Figure II-26 : (a) Disposition des bases de mesures sur une éprouvette Ø 11 - 22 cm pour le suivi dimensionnel et (b) photographie d'une éprouvette instrumentée.	109
Figure II-27 : (a) Disposition des bases de mesures sur une éprouvette 7 x 7 x 28 cm ³ pour le suivi dimensionnel et (b) photographie d'une éprouvette instrumentée.	110

Figure II-28 : (a) Échantillons d'adhésif X120 pour le suivi de masse; (b) Balance de précision Mettler-Toledo pour la prise de masse des échantillons de l'adhésif ; (c) Echantillons de l'adhésif en immersion.	110
Figure II-29 : (a) Microscope optique Zeiss AxioScope A1, et (b) exemple d'image de section transverse de câble AFL.	111
Figure II-30 : Equipement MEB-EDX utilisé dans le cadre de l'étude.	112
Figure II-31 : (a) Spectromètre IR-TF Nicolet iS50 équipé d'un dispositif ATR Diamant et (b) exemple de spectre IRTF-ATR obtenu pour la gaine externe du câble Neubrex à l'état non vieilli.	113
Figure II-32 : Discovery DSC 250 de TA Instruments et (b) exemple de thermogramme obtenu pour la gaine bi-couche AFL non vieillie.	114
Figure II-33 : (a) Bacs thermo-régulés destinés au vieillissement des éprouvettes en solution alcaline; (b) Stockage des éprouvettes dans un bac avant immersion et après mise en place d'une protection des sorties de câbles à l'aide d'une gaine en PVC.	116
Figure II-34 : (a) Positionnement des échantillons dans l'enceinte climatique ; (b) Courbes de température et d'HR enregistrées dans l'enceinte climatique durant un cycle gel/dégel.	118
Figure II-35 : (a) Mise en place des éprouvettes AA et ZA pour l'essai de vieillissement par cycles d'immersion /séchage ; (b) Evolution de l'HR pendant un cycle de séchage (moyenne sur les deux bacs AA et ZA).	120
Figure II-36 : Dispositif de sollicitation en fluage : (a) schéma, (b) vue globale, (c) fermeture d'une boucle de câble et (d) poulie de fixation du câble au plateau de chargement.	122
Figure II-37 : (a) Stockage des éprouvettes sur le site de vieillissement naturel ; (b) Situation géographique du site de l'UGE à Marne-la-Vallée ; (c) Courbes des données climatiques mesurées à proximité du site sur l'année 2019 (données publiques de météo France) [144].	123
Figure III-1 : Exemple de courbes expérimentales obtenues et testant (a) un renfort mécanique du câble Neubrex en traction et (b) l'interface gaine du câble AFL/FO en arrachement.	131
Figure III-2: Prise de masse en fonction du temps pour les échantillons d'adhésif X120 immergés dans l'eau à 20 °C.	133
Figure III-3 : Courbes contrainte/déformation en traction typiquement obtenues pour les échantillons d'adhésif X120 conservés 3 mois dans l'eau ou dans l'air à 20 °C.	133
Figure III-4: Profils de la déformation enregistrés au cours d'essais d'arrachement à l'échéance T0 sur éprouvettes de béton ZA comportant des câbles (a) Neubrex et (b) AFL noyés. Les profils sont donnés pour différents niveaux de charge appliquée et la déformation est normalisée par rapport à la charge. L'abscisse z correspond à la position du câble sur la hauteur de l'éprouvette ; (c) Schéma de l'éprouvette avec les différentes zones Z1, Z2 et Z3.	135
Figure III-5 : Profils de la déformation enregistrés au cours d'essais d'arrachement à l'échéance T0 sur éprouvettes de béton ZA comportant des câbles (a) Neubrex et (b) AFL collés en parement. Les profils sont donnés pour différents niveaux de charge appliquée et la déformation est normalisée par rapport à la charge. L'abscisse z correspond à la position du câble sur la hauteur de l'éprouvette ; (c) Schéma de l'éprouvette avec les différentes zones Z1, Z2 et Z3.	137

Figure III-6 : Exemple de courbe expérimentale du essai d'arrachement câble Neubrex collé/béton.....	138
Figure III-7 : Courbes d'expansion des cylindres de béton AA et ZA immergés en solution alcaline à 20 °C, 40 °C et 60 °C et exposés au vieillissement naturel (VN).....	140
Figure III-8 : Courbes d'expansion des prismes (P) de béton AA et ZA (AAP et ZAP) exposés aux cycles d'immersion/séchage (I/S), de gel/dégel (G/D) et au vieillissement naturel (VN).	141
Figure III-9 Suivi gravimétrique des cylindres de béton AA et ZA immergés en solution alcaline à 20 °C, 40 °C et 60 °C.....	143
Figure III-10 : Réseau de fissures à la surface d'une éprouvette ZA soumise à un vieillissement en solution alcaline à (a) 60 °C, 300 jours après le début du suivi des expansions et à (b) 20 °C après 500 jours de suivi des expansions.	144
Figure III-11 : (a) Analyses MEB-EDX du béton ZA après 1 an de vieillissement en solution alcaline à 60 °C : (a) mise en évidence du gel formé par la RAG, et (b) mise en évidence de l'ettringite formée par la RSI.	146
Figure III-12 : Evolutions de la résistance à la compression, du module d'Young et du coefficient de Poisson des cylindres de béton AA et ZA en fonction du temps de vieillissement en solution alcaline à 20 °C, à 40 °C et à 60 °C et sur site extérieur (VN).....	150
Figure III-13 : Evolutions des propriétés mécaniques des matériaux constitutifs et des interfaces internes, pour les deux câbles à FO exposés aux différentes conditions de vieillissements accélérés et naturel sur une durée totale de 18 mois.	153
Figure III-14 : Suivi dimensionnel des deux câbles à FO soumis aux différents vieillissements.	154
Figure III-15 : Micrographies optiques de la surface des deux câbles à FO « (a) Neubrex ; (b) AFL » à l'état initial (T0), et après 6 mois (T2), 12 mois (T4) et 18 mois (T6) de vieillissement en solution alcaline à 60 °C.....	155
Figure III-16 : Spectre IRTF-ATR de la gaine du câble Neubrex à l'état initial non vieilli (échéance T0) et spectre de la base de donnée ayant la meilleure correspondance.....	156
Figure III-17 : Spectres IRTF-ATR obtenus pour la gaine du câble Neubrex à l'état non vieilli (échéance T0) et après 12 mois de vieillissement (échéance T4) en solution alcaline à 40 °C et à 60 °C.....	157
Figure III-18 : Mécanisme d'hydrolyse des EVA, selon [161].....	158
Figure III-19 : Spectre IRTF-ATR de la gaine du câble AFL à l'état initial non vieilli (échéance T0) et spectre de la base de donnée offrant la meilleure correspondance.....	159
Figure III-20 : Mécanisme d'hydrolyse des PET, selon [162].....	160
Figure III-21 : Thermogramme DSC de la gaine Neubrex à l'état initial (échéance T0).....	161
Figure III-22 : Thermogrammes DSC de la gaine Neubrex à T0 et après 12 mois de vieillissement (échéance T4) en solution alcaline à différentes températures.....	162
Figure III-23 : Thermogrammes DSC de la gaine Neubrex à T0 et après 12 mois de vieillissement (T4) dans les autres conditions de vieillissements accélérés (cycles G/D et I/S, Fluage) et naturel (VN).....	162

Figure III-24 : Thermogramme DSC de la gaine AFL à l'état initial (échéance T0).....	164
Figure III-25 : Thermogrammes DSC de la gaine AFL à T0 et après 12 mois de vieillissement (échéance T4) en solution alcaline à différentes températures.....	165
Figure III-26 : Courbes des évolutions de la résistance à la traction et du module d'Young de l'adhésif X120 avant et après exposition aux cycles d'immersion/séchage (I/S) ou de gel/dégel (G/D) et au vieillissement naturel (V/N) pendant une période de 8 mois. Les valeurs à T0 sont indiquées pour les éprouvettes préalablement conservées 3 mois dans l'eau et dans l'air (sans eau).....	166
Figure III-27 : Spectre IRTF-ATR de l'adhésif X120 avant vieillissement, et spectre offrant la meilleure correspondance sur les bases de données.	166
Figure III-28 : Spectres IRTF-ATR des échantillons d'adhésif X120 à T0 et après 5 mois de vieillissements par cycles G/D et I/S.	167
Figure III-29 : Thermogrammes MDSC des échantillons d'adhésif X120 à T0, après 3 mois de conservation dans l'eau ou dans l'air : (a) signal réversible, et (b) signal non réversible.	168
Figure III-30 : Analyses MDSC des échantillons d'adhésif X120 après 8 mois de vieillissements par cycles G/D ou I/S et en vieillissement naturel (VN) : (a) valeurs de T_g , et (b) composante non réversible des thermogrammes.....	169
Figure III-31 : Profils de la déformation normalisée le long des deux câbles à FO noyés dans les cylindres ZA après 3 mois de vieillissement (T1) en solution alcaline à 60 °C. Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	170
Figure III-32 : Profils de la déformation normalisée le long des deux câbles à FO collés en parement des prismes ZA, après 3 mois de vieillissement (T1) en enceinte climatique (cycles de gel/dégel). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	171
Figure III-33 : Profils de la déformation normalisée le long des deux câbles à FO noyés dans les cylindres ZA après 6 mois de vieillissement (T2) en solution alcaline à différentes températures. Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	172
Figure III-34 : Profils de la déformation normalisée le long des deux câbles à FO collés en surface des prismes ZA après 6 mois de vieillissements (T2) par cycles de gel/dégel et d'immersion/séchage. Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	173
Figure III-35 : Profils de la déformation normalisée le long du câble Neubrex noyé dans un cylindre ZA après 9 mois de vieillissement (T3) en solution alcaline à 60 °C. Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	174
Figure III-36 : Etat de la surface externe du câble AFL arraché manuellement du cylindre de béton après 9 mois de vieillissement en solution alcaline à 60 °C.....	174
Figure III-37 : Profils de la déformation normalisée le long du câble Neubrex collé en parement d'un prisme ZA, après 9 mois de vieillissement (T3) par cycles d'immersion/séchage.....	175

Figure III-38 : Profils de la déformation normalisée le long du câble Neubrex noyé dans un cylindre ZA, après 12 mois de vieillissement (T4) en solution alcaline à 60 °C. Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	175
Figure III-39 : Etat de la surface externe du câble AFL arraché manuellement du cylindre après 12 mois de vieillissement en solution alcaline à 60 °C.	176
Figure III-40 : Profils de la déformation normalisée le long du câble AFL noyé dans un cylindre ZA, après 15 mois de vieillissement (T5) en solution alcaline à 40 °C. Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	177
Figure III-41 : Profils de la déformation normalisée le long des deux câbles à FO noyés dans les cylindres ZA après 16 mois de vieillissement naturel (VN). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	178
Figure III-42 : Profils de la déformation normalisée le long des deux câbles à FO collés en surface des primes ZA après 16 mois de vieillissement naturel (VN). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	179
Figure III-43 : Evolutions des caractéristiques mécaniques de l'interface câble/béton déterminées par essais d'arrachement sur cylindres de béton AA et ZA instrumentées par câbles noyés, après immersion en solution alcaline à différentes températures (20 °C, 40 °C et 60 °C) sur une durée totale de 18 mois (échéances T0 à T6), et après vieillissement naturel sur une période de 16 mois.	180
Figure III-44 : Evolutions des caractéristiques mécaniques de l'interface câble/adhésif déterminées par essais d'arrachement sur prismes de béton AA et ZA instrumentés par câbles collés en parement, après mois de vieillissements par cycles d'immersion/séchage (I/S) et de gel/dégel (G/D) sur une période totale de 18 mois (échéances T0 à T6), et après vieillissement naturel sur une période de 16 mois.	183
Figure III-45 : Géométries simplifiées des sections (a) du câble Neubrex et (b) du câble AFL adoptées pour les modélisations numériques.	185
Figure III-46 : Géométries adoptées pour les modélisations numériques : cas du câble Neubrex (a) noyé dans le béton et (b) collé en parement ; cas du câble AFL (c) noyé dans le béton et (d) collé en parement.	186
Figure III-47 : Schémas des différentes conditions aux limites considérées dans les modèles numériques : configurations (a) d'arrachement, (b) de transfert d'effort et (c) d'ouverture de fissure. Les flèches indiquent les surfaces d'application des efforts.	188
Figure III-48 : Profils de déformation le long des FO lors d'un essai d'arrachement câble noyé/béton (au premier palier de charge), simulés selon les deux approches relatives au choix des comportements d'interfaces et comparés au profil obtenu expérimentalement lors de l'essai d'arrachement.	189
Figure III-49 : Comparaison entre les profils de déformation expérimentaux (éprouvettes 1 et 2) et numériques (simulations selon l'approche 2) le long des FOs, lors des essais d'arrachement (au premier palier de charge) sur cylindres avec câbles Neubrex et AFL noyés sur des longueurs de 9 cm et 18,5 cm.	190

Figure III-50 : Comparaison entre les profils de déformation expérimentaux (éprouvettes 1 et 2) et numériques (simulations selon l'approche 2) le long des FO, lors des essais d'arrachement (au premier palier de charge) sur prismes avec câbles Neubrex et AFL collés sur des longueurs de 7 cm.....	191
Figure III-51 : Courbes de transfert d'effort le long des câbles à FO noyés ou collés à la surface du béton.....	192
Figure III-52 : Profils de déformation le long des FO au droit d'une fissure, pour les deux câbles à FO noyés ou collés en parement.....	193
Figure III-53 : Profils de la déformation normalisée le long des FOs du câble AFL noyé dans le béton, lors des essais d'arrachement au deuxième palier de 20 N. Calage du modèle numérique sur les résultats expérimentaux (a) et comparaison entre les profils théoriques aux paliers de charge de 10 et 20 N.....	194
Figure III-54 : Profils de déformation théorique le long de la FO du câble AFL noyé dans le béton, au droit d'une fissure, déterminés numériquement en utilisant les paramètres identifiés sur les résultats expérimentaux obtenus aux paliers de charge de 10 N et 20 N.	195
Figure III-55 : Profils de déformations théoriques le long des deux câbles à FO noyés dans le béton, correspondant au premier palier de charge lors d'un essai d'arrachement câble/béton, en considérant différentes valeurs du module d'élasticité E_r de la gaine externe des câbles.....	196
Figure III-56 : Calage des profils théoriques de déformation normalisée sur les données expérimentales obtenues par interrogation des FOs des deux câbles à FO noyés dans les cylindres de béton en solution alcaline à 60 °C, au premier palier de charge ($K2/4$: rigidité tangentielle de l'interface gaine du câble Neubrex/revêtement primaire FO ; K_s : rigidité tangentielle de l'interface câble AFL/béton.....	198
Figure IV-1 : (a) Plateforme ODE avant fabrication des blocs (10/11/2015) ; (b) Plan de localisation des blocs ; (c) Plateforme ODE au 27 mars 2019.....	207
Figure IV-2 : Photo d'un bloc ODOBA prise en novembre 2018.....	208
Figure IV-3 : (a) Structures porteuses des capteurs dans un bloc non ferrailé ; (b) Cordes vibrantes installées dans deux blocs (bas : un bloc armé et haut : un bloc non armé).	208
Figure IV-4 : Coordonnées des différents thermocouples dans un bloc de béton non armé pour une origine au centre de la face supérieure du bloc.	210
Figure IV-5 : Phases de fabrication de deux blocs : bloc EB armé (trois photos du haut) et Bloc IB non armé (trois photos du bas).	211
Figure IV-6 : Schéma et photographie du local d'étuvage utilisé pour la réalisation des traitements thermiques sur les blocs.....	212
Figure IV-7 : (a) Schéma du montage de la piscine d'imbibition des blocs ; (b) Piscine en fonctionnement.	213
Figure IV-8 : (a) Plan d'instrumentation d'un bloc en surface par capteurs à FO ; (b) Zone d'instrumentation par capteurs à FO collés : localisation des capteurs à FO en surface et vue en projection des capteurs à corde vibrante noyés.	215

Figure IV-9 : Plan d'instrumentation d'un bloc non armé par capteurs à FO noyé dans le béton.	216
Figure IV-10 : Vue en projection du plan d'instrumentation d'un bloc non armé par capteur à FO et des capteurs à corde vibrante noyés dans le béton.	217
Figure IV-11 : Plan d'instrumentation d'un bloc armé par capteur à FO noyé dans le béton.	218
Figure IV-12 : (a) Vue en projection du plan d'instrumentation par capteur à FO et capteurs à corde vibrante noyés dans un bloc en BA ; (b) Positionnement des armatures dans le bloc.	219
Figure IV-13 : Instrumentation en surface du Bloc ZA avec le câble AFL : parcours tracé, rainuré puis nettoyé.....	220
Figure IV-14 : Étapes finales de l'instrumentation en surface de la face est du Bloc ZA avec le câble AFL. Gauche : Câble introduit dans les rainures et tenu par le ruban adhésif. Droite : Câble collé par l'adhésif X120.....	221
Figure IV-15 : Principe d'insertion du câble Neubrex dans une rainure.	222
Figure IV-16 : Photos illustrant les étapes de l'instrumentation en surface de la face ouest du Bloc ZA avec le câble Neubrex : Parcours rainuré, préfixation du câble par ruban adhésif puis câble collé avec l'adhésif X120.	222
Figure IV-17 : Instrumentation du Bloc IB non armé avec le câble Neubrex noyé.	224
Figure IV-18 : Détachement d'une partie de l'instrumentation lors du coulage du Bloc IB. ...	225
Figure IV-19 : Instrumentation du Bloc IA par câble Neubrex noyé dans le béton.	226
Figure IV-20 : Instrumentation du Bloc KB par câble Neubrex noyé dans le béton.	227
Figure IV-21 : Instrumentation du Bloc KB en surface avec le câble Neubrex : parcours tracé, parcours rainuré et câble collé.	228
Figure IV-22 : Protection des sorties du câble Neubrex collé en surface du Bloc ZA à l'aide de gaines en PVC.....	229
Figure IV-23 : Réalisation et protections des connexions : (a) Protection du connecteur dans une boîte étanche ; (b) Soudeuse optique ; (c) Protection des soudures à l'aide des gaines thermorétractables ; (d) Fixation de la soudure et du connecteur sous la toiture d'un bloc. ..	230
Figure IV-24 : Photo prise lors d'une interrogation du câble Neubrex en surface du Bloc KB	230
Figure IV-25 : Historique des mesures de température au cœur des blocs ODOBA instrumentés (thermocouple 510).	232
Figure IV-26 : (a) Plan d'instrumentation du Bloc IA par câble Neubrex noyé et définition des points de repère sur le parcours du câble ; (b) Profil estimé de la variation de la température entre les échéances de mesures le long du câble.	237
Figure IV-27 : (a) Plan d'instrumentation du Bloc ZA par câble AFL collé et indication des points de repère sur le parcours du câble ; Profils de déformation mesurés par les câbles à FO comparés aux mesures des cordes vibrantes (CV) pour (b) le premier parcours et (c) le second parcours.	239

Figure IV-28 : (a) Plan d'instrumentation du Bloc ZA par câble Neubrex collé et indication des points de repère sur le parcours du câble ; Profils de déformation mesurés par les câbles à FO comparés aux mesures des cordes vibrantes (CV) pour (b) le premier parcours et (c) le second parcours.....	240
Figure IV-29 : (a) Plan d'instrumentation du Bloc IB par câble Neubrex noyé et indication des points de repère sur le parcours du câble ; (b) Profils de déformation mesurés par les câbles à FO comparés aux mesures des cordes vibrantes (CV).	241
Figure IV-30 : (a) Plan d'instrumentation du Bloc IA par câble Neubrex noyé et indication des points de repère sur le parcours du câble ; (b) Profils de déformation mesurés par les câbles à FO comparés aux mesures des cordes vibrantes (CV).	243
Figure IV-31 : (a) Plan d'instrumentation du Bloc KB par câble Neubrex noyé et indication des points de repère sur la longueur du parcours du câble ; (b) Profils de déformation mesurés par les câbles à FO comparés aux mesures des cordes vibrantes (CV).....	244
Figure IV-32 : (a) Plan d'instrumentation du Bloc KB par câble Neubrex collé et indication des points de repère sur le parcours du câble ; Profils de déformation mesurés par câbles à FO comparés aux mesures des cordes vibrantes (CV) pour (b) le premier parcours et (c) le second parcours.....	246
Figure IV-33 : Températures enregistrées par quelques thermocouples au sein du Bloc KB durant le traitement thermique (l'origine de l'axe z se situe au centre de la face supérieure du bloc).....	247
Figure V-1 : Schéma simplifié en 2D d'une FO collée dans une engravure en surface du béton.	255
Figure V-2 : Modèle simplifié en 3D pour l'étude par éléments finis du mécanisme de transfert d'effort et les conditions aux limites adoptées.....	256
Figure V-3 : Maillage par éléments finis de (a) la géométrie 3D et (b) vue en coupe transversale du système.	257
Figure V-4 : Schémas des modèles théoriques développés par Kim <i>et al.</i> [53] (gauche) et Her <i>et al.</i> [181] (droite).....	258
Figure V-5 : Courbes du transfert d'effort suivant les deux approches (théorique et numérique) et pour différentes valeurs du module élastique de l'adhésif.	261
Figure V-6 : Courbes du transfert d'effort suivant l'approche numérique pour différentes hauteurs d'adhésif (HA).....	262
Figure V-7 : (a) Echantillons utilisés pour la caractérisation mécanique des adhésifs ; (b) Essai de traction sur un échantillon d'adhésif.	263
Figure V-8 : Courbes expérimentales de contrainte/déformation recueillies pour des échantillons des différents adhésifs testés en traction.....	264
Figure V-9 : (a) Schéma de l'éprouvette instrumentée en surface pour l'essai de compression ; (b) Dispositif expérimental de l'essai de compression.	265
Figure V-10 : Évolutions de la charge appliquée et du déplacement de la traverse de la presse lors de l'essai de compression.....	265

Figure V-11 : Comparaison des mesures des jauges de déformation et des FOs.	266
Figure V-12 : Profils de déformation orthoradiale autour du cylindre de béton enregistrés le long des FOs collées à l'aide des trois adhésifs (A, B et C).	268
Figure V-13 : (a) Schéma de la configuration de l'essai de flexion ; (b) Vu de dessous de l'éprouvette prismatique montrant les supports des capteurs LVDT et les FOs collées avec les différents adhésifs.	269
Figure V-14 : (a) Dispositif expérimental de l'essai de flexion, (b) graphe illustrant les déplacements de la traverse de la presse et des capteurs LVDTs et la charge appliquée sur l'éprouvette durant l'essai de flexion.	270
Figure V-15 : Profils de déformation enregistrés par les 3 FOs engravées à la surface du prisme en béton à l'aide des 3 différents adhésifs, sur les 5 premiers paliers de déplacement de la traverse (longueur de jauge = 6 mm).	271
Figure V-16 : (a) Profils de déformation enregistrés par les 3 FOs aux 6 ^{ème} palier (sur la demi-longueur de l'éprouvette) ; (b) Apparition d'une fissure au niveau de l'entaille.	272
Figure V-17 : Géométrie du modèle aux éléments finis pour l'étude de l'ouverture de l'entaille.	273
Figure V-18 : Exemple de micrographie de la section d'éprouvette prismatique montrant une FO engravée en surface.	274
Figure V-19 : Graphes illustrant les courbes enregistrées par les capteurs à FO durant l'essai de flexion au 6 ^{ème} palier et les résultats des simulations numériques pour l'adhésif C, et les silicones 1 et 2 (en considérant les valeurs extrêmes du module d'Young de ces adhésifs- min et max).	275
Figure V-20 : Simulations numériques de la contrainte de cisaillement $\sigma_{xz}(x)$ à l'interface adhésif/FO ($z = -r_c$) en considérant des charges opposées (0,045 MPa) appliquées aux deux blocs de béton adjacents à la fissure.	276
Figure V-21 : Déformation maximale dans la FO (= amplitude du pic de déformation) prédite par le modèle numérique, versus ouverture de l'entaille (Ouv), pour différentes valeurs du module d'Young de l'adhésif.	278
Figure V-22 : Courbe d'évolution du paramètre k (à $x = x_f$) en fonction du module d'élasticité de l'adhésif E_a : simulation numérique (ligne continue) avec régression exponentielle (ligne pointillée) et résultats expérimentaux.	278
Figure V-23 : Courbes d'évolutions du paramètre k en fonction du module élastique de l'adhésif E_a pour différentes valeurs de l'ouverture initiale de fissure OI , déterminées à partir du modèle numérique (traits pleins) ou identifiées à partir de l'Equation V-10 (pointillés) ; En encart, évolution du paramètre B de l'Equation V-10 en fonction de OI (interpolation des valeurs au moyen d'une fonction polynomiale).	280
Figure V-24 : Courbes d'évolution du paramètre k en fonction du module élastique de l'adhésif, pour différentes valeurs de la hauteur de l'adhésif, déterminées à partir du modèle numérique (traits pleins) ou identifiées à partir de l'Equation V-10 (pointillés) ; En encart, évolution du paramètre A de l'Equation V-10 en fonction de HA (interpolation des valeurs au moyen d'une fonction polynomiale).	281

Figure V-25 : Profils de déformation le long de la FO simulés au moyen du modèle numérique, pour différentes valeurs du coefficient de Poisson (a) d'un adhésif de type élastomère et (b) d'un adhésif de type époxy.	282
Figure VI-1 : Schéma d'un cylindre de béton avec câble à FO noyé (longueur de contact câble/béton de 18,5 cm).	311
Figure VI-2 : Profils de la déformation enregistrés lors des essais d'arrachement réalisés sur les cylindres de béton avec les câbles Neubrex et AFL noyés (longueur de contact 18,5 cm). Les profils sont donnés pour deux niveaux de charge (15 N et 30 N).	312
Figure VI-3 : Courbes charge appliquée/déplacement différentiel correspondant aux trois essais d'arrachement avec trois longueurs de contact différentes.	314
Figure VI-4 : (a) Schéma de l'essai d'arrachement câble AFL noyé/béton ; (b) Profils de déformation obtenus par interrogation du câble durant l'essai à différentes valeurs de charge appliquée [14].	315
Figure VI-5 : (a) Eprouvette engravée ; (b) Eprouvette avec câbles préinstallés avant l'application de l'adhésif (suivant le protocole I) ; (c) Eprouvette avec câbles préinstallés sur une première couche d'adhésif et une deuxième couche appliquée (suivant le protocole II).	316
Figure VI-6 : Essai d'arrachement d'un câble collé en surface d'un cylindre de béton.	317
Figure VI-7 : Résultats des essais d'arrachement câble collé/béton pour différentes longueurs de collage (a) du câble Neubrex et (b) du câble AFL.	318
Figure VI-8 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans les cylindres de béton, avant vieillissement (T0). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	320
Figure VI-9 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL noyé dans les cylindres de béton, avant vieillissement (T0). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	321
Figure VI-10 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement des prismes en béton, avant vieillissement (T0). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	321
Figure VI-11 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement des prismes en béton, avant vieillissement (T0). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	322
Figure VI-12 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans les cylindres ZA après 3 mois de vieillissement (T1). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	323
Figure VI-13: Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL noyé dans les cylindres ZA après 3 mois de vieillissement (T1). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	324
Figure VI-14 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement des prismes ZA, après 3 mois de vieillissement (T1). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	325

Figure VI-15 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement des prismes ZA, après 3 mois de vieillissement (T1). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.....	325
Figure VI-16 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans les cylindres ZA après 6 mois de vieillissement (T2). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.....	326
Figure VI-17 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL noyé dans les cylindres ZA après 6 mois de vieillissement (T2). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	326
Figure VI-18 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement des prismes ZA, après 6 mois de vieillissement (T2). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	327
Figure VI-19: Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement des prismes ZA, après 6 mois de vieillissement (T2). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.....	327
Figure VI-20 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans les cylindres ZA après 9 mois de vieillissement (T3). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.....	328
Figure VI-21 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL noyé dans les cylindres ZA après 9 mois de vieillissement (T3). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	328
Figure VI-22: Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement des prismes ZA, après 9 mois de vieillissement (T3). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	329
Figure VI-23 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement des prismes ZA, après 9 mois de vieillissement (T3). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.....	329
Figure VI-24 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans les cylindres ZA après 12 mois de vieillissement (T4). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.....	330
Figure VI-25 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL noyé dans les cylindres ZA après 12 mois de vieillissement (T4). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.....	330
Figure VI-26: Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement des prismes ZA, après 12 mois de vieillissement (T4). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	331
Figure VI-27 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement des prismes ZA, après 12 mois de vieillissement (T4). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.....	331

Figure VI-28: Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans les cylindres ZA après 15 mois de vieillissement (T5). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.....	332
Figure VI-29 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL noyé dans les cylindres ZA après 15 mois de vieillissement (T5). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.....	332
Figure VI-30 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement des prismes ZA, après 15 mois de vieillissement (T5). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	333
Figure VI-31 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement des prismes ZA, après 15 mois de vieillissement (T5). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.....	333
Figure VI-32 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans les cylindres ZA après 18 mois de vieillissement (T6). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.....	334
Figure VI-33 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL noyé dans les cylindres ZA après 18 mois de vieillissement (T6). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.....	334
Figure VI-34 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement des prismes ZA, après 18 mois de vieillissement (T6). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	335
Figure VI-35 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement des prismes ZA, après 18 mois de vieillissement (T6). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.....	335
Figure VI-36 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans un cylindre ZA, après 16 mois en vieillissement naturel (VN). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	336
Figure VI-37 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement d'un prisme ZA, après 16 mois en vieillissement naturel (VN). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	336
Figure VI-38 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement d'un prisme ZA, après 16 mois en vieillissement naturel (VN). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.	336
Figure VI-39 : (a) Schéma de la configuration de l'essai de flexion ; (b) Vu de dessous de l'éprouvette prismatique montrant les supports des capteurs LVDT et les FOs collées avec les différents adhésifs.....	337
Figure VI-40 : (a) Dispositif expérimental de l'essai de flexion, (b) graphe illustrant les déplacements de la traverse de la presse et des capteurs LVDTs et la charge appliquée sur l'éprouvette durant l'essai de flexion.....	338

Figure VI-41 : Profils de déformation enregistrés par les 3 FOs engravées à la surface du prisme en béton à l'aide des 3 différents adhésifs, sur les 5 premiers paliers de déplacement de la traverse (longueur de jauge = 3 mm). 338

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Caractéristiques des différents types de FOs [25].	22
Tableau I-2 : Exemples de câbles à FO du commerce.	23
Tableau I-3 : Caractéristiques de chaque type d'interrogation.	29
Tableau I-4 : Coefficients de sensibilité à la température et à la déformation d'une FO standard pour les diffusions Rayleigh et Brillouin [38] [39].	29
Tableau I-5 : Tableau des incertitudes (F fréquence - P Puissance - B bande passante – rms : Root mean square) [45].	33
Tableau I-6 : Modèles non linéaires de la loi contrainte déformation d'une FO en silice.	46
Tableau I-7 : Types de revêtements étudiés dans Delobelle <i>et al.</i> [71].	51
Tableau I-8 : Récapitulatif de la durabilité des capteurs à FO pour le SHM.	59
Tableau I-9 : Familles de granulats suivant leurs dimensions (d = dimension inférieure du granulat ; D = dimension supérieur du granulats) [86].	63
Tableau II-1: Formulation du béton utilisé à l'IRSN pour le bloc ODOBA nommé AA.	91
Tableau II-2 : Formulation du béton utilisé à l'IRSN pour le bloc ODOBA nommé ZA.	92
Tableau II-3 : Formulation AA des éprouvettes de l'étude de durabilité (formulation du bloc AA modifiée).	93
Tableau II-4 : Formulation ZA des éprouvettes de l'étude de durabilité (formulation du bloc ZA modifiée).	93
Tableau II-5 : Composition chimique de la solution alcaline.	115
Tableau II-6 : Programme d'essais de la campagne de vieillissement accéléré par immersion en solution alcaline.	117
Tableau II-7 : Programme d'essais de la campagne de vieillissement accéléré par cycles gel/dégel.	119
Tableau II-8 : Programme d'essais de la campagne de vieillissement accéléré par cycles d'immersion/séchage.	121
Tableau II-9 : Programme d'essais de la campagne de vieillissement en site naturel.	124
Tableau II-10 : Synthèse des échéances de caractérisations associées aux différentes conditions de vieillissement de l'étude.	125
Tableau III-1 : Résultats des essais de caractérisation mécanique des bétons AA et ZA à 28 jours.	130
Tableau III-2 : Résultats des essais de caractérisation mécanique des deux câbles à FO à l'état initial avant vieillissement.	131
Tableau III-3 : Résultats des essais de traction sur les échantillons d'adhésif X120 après trois mois de conservation dans l'eau ou dans l'air à 20 °C (caractérisation à l'échéance T0).	134

Tableau III-4 : Propriétés mécaniques de l'interface câble/béton déterminées à partir des essais d'arrachement sur éprouvettes de béton AA et ZA instrumentées par câbles Neubrex et AFL noyés ou collés en surface.....	139
Tableau III-5 : Valeurs de Tg et du taux de cristallinité déterminées à partir des thermogrammes DSC réalisés sur la gaine du câble Neubrex à T0 et après 12 mois d'exposition (T4) dans les différentes conditions de vieillissements accélérés et naturel.....	163
Tableau III-6 : Valeurs des propriétés aux interfaces issues du calage des résultats numériques sur les données expérimentales.	192
Tableau IV-1 : Tableau récapitulatif des différentes échéances d'instrumentation et de mesure pour chaque bloc.....	231
Tableau IV-2 : Données de température des thermocouples sélectionnées pour les blocs instrumentés par câbles noyés (dates grisées correspondant à une période d'immersion du bloc en piscine).	235
Tableau IV-3 : Données de température des thermocouples sélectionnées pour les blocs instrumentés en surface (dates grisées correspondant à une période d'immersion du bloc en piscine).....	236
Tableau V-1 : Caractéristiques géométriques / mécaniques utilisées dans les modèles analytiques et numériques.....	260
Tableau V-2 : Caractéristiques des différents adhésifs polymères utilisés dans ce chapitre. ..	264
Tableau VI-1 : Résultats des essais de caractérisation mécanique des bétons AA aux différentes échéances du vieillissement en solution alcaline.	319
Tableau VI-2 : Résultats des essais de caractérisation mécanique des bétons ZA aux différentes échéances du vieillissement en solution alcaline.	319

Introduction générale

1. Contexte général

Qu'il s'agisse d'un ouvrage existant ou d'un ouvrage à construire, l'un des paramètres essentiels pour en optimiser la gestion est la maîtrise de sa durée de vie. L'exercice peut s'avérer particulièrement complexe car les ouvrages de génie civil sont destinés à rester en service plusieurs décennies, période pendant laquelle ils sont exposés à une multitude de risques pouvant être liés à l'environnement agressif, au développement de pathologies, à des événements accidentels ou bien à une surexploitation non contrôlée. Les gestionnaires d'ouvrages se doivent donc de planifier rigoureusement les opérations de maintenance afin d'en optimiser le coût et d'en garantir l'efficacité. Cette planification nécessite des outils d'analyse sophistiqués liés à une connaissance approfondie de l'évolution des matériaux constitutifs de l'ouvrage et de ses conditions d'exploitation. Cependant, une approche purement prédictive de la durée de vie d'une structure s'avère souvent défailante car elle se heurte à des réalités imprévisibles. La réalisation d'inspections régulières mais aussi le recours aux techniques de contrôle de santé des structures se révèlent donc indispensables pour assurer le maintien de l'aptitude au service et de la sécurité structurale de l'ouvrage sur l'intégralité de sa durée d'exploitation.

Les techniques de surveillance des structures font l'objet de multiples recherches dont l'objectif principal est généralement la proposition et la validation de nouveaux protocoles de diagnostic destinés à en évaluer l'état de santé global et détecter d'éventuelles anomalies. Ces protocoles, qui peuvent impliquer l'utilisation de capteurs innovants, permettent alors une gestion optimale des opérations de maintenance et une planification anticipée des travaux de réparation et de réhabilitation. La surveillance des structures permet par conséquent, lorsque les indications qu'elle livre sont convenablement interprétées et exploitées, d'assurer la sécurité de l'ouvrage sur l'ensemble de sa durée de service initialement prévue, mais peut aussi permettre, dans certains cas, de prolonger son exploitation.

Les systèmes de surveillance de santé structurale se fondent généralement sur des capteurs dits « traditionnels » (ou conventionnels) installés dans ou sur la structure et destinés à la mesure, en plusieurs points de l'ouvrage jugés sensibles ou représentatifs, de la température et/ou de la déformation. Le caractère ponctuel des capteurs est une difficulté qui ne peut être que partiellement contournée en multipliant leur nombre. De plus, des problèmes de coût lors d'une mesure sur une multitude de points, de fiabilité et de durabilité des capteurs ainsi que des dysfonctionnements de leur électronique sont souvent évoqués.

Vis-à-vis de ces difficultés, l'utilisation de systèmes de mesure par fibre optique (FO) a ouvert de nouvelles perspectives liées en premier lieu à leur capacité à fournir des mesures réparties de déformation et de température. Cette caractéristique, associée à d'autres avantages tels que leur faible intrusivité et l'insensibilité au champ électromagnétique de ce type de capteurs, a permis une avancée très rapide de cette nouvelle technologie. Il est actuellement possible d'utiliser la FO elle-même, ou un câble muni de FO, comme capteur. Dans la technique basée sur la rétrodiffusion Rayleigh, et qui est exploitée dans les travaux présentés dans ce manuscrit, il est nécessaire d'utiliser un appareil de mesure (appelé interrogateur) dont la fonction est de diffuser un signal lumineux dans la fibre et de mesurer, à l'instar d'un radar, le signal rétrodiffusé. L'analyse de ce dernier permet d'obtenir des profils de déformation et de température continus avec une résolution spatiale très fine et une portée pouvant atteindre

plusieurs kilomètres (sur toute la longueur de la fibre). Bien que le coût de l'interrogateur soit encore élevé, le prix abordable des fibres optiques (FOs) et la possibilité d'utiliser le même interrogateur pour la surveillance de plusieurs ouvrages permettent de rentabiliser le coût global de la chaîne de mesure et de le ramener au niveau de celui des techniques traditionnelles.

La technologie de capteurs à FO à mesure réparties, en développement continu, a déjà atteint un niveau de maturité considérable. Néanmoins, la diversité des technologies liées à son utilisation dans la surveillance des structures nécessite des investigations supplémentaires afin de garantir la qualité de son fonctionnement et sa durabilité. Le type d'ouvrage, l'environnement de ce dernier, les sollicitations auxquelles il est soumis et l'ordre de grandeur des mesurands attendus sont des informations qu'il est important de considérer dans la mise en œuvre d'une solution performante et pérenne d'instrumentation d'ouvrage et notamment dans le choix d'un capteur adéquat. Les nombreuses études menées pour faire progresser les systèmes de mesures par capteurs à FO concernent principalement trois aspects fondamentaux de la chaîne de mesure : i) le développement de nouveaux interrogateurs en affinant leur résolution spatiale, en augmentant leur portée de mesure et leur fréquence d'interrogation ii) la conception de câbles à FO bénéficiant d'une meilleure protection contre les agressions du milieu d'emploi, d'une facilité accrue de mise en place, d'une sensibilité améliorée du capteur et iii) l'amélioration des outils d'analyse et de traitement du signal permettant une interprétation précise des mesures. Les travaux menés dans cette thèse s'inscrivent plus particulièrement dans le deuxième aspect de ces recherches (durabilité des câbles à FO), mais ont été le cadre de développement théorique relatif au troisième aspect (interprétation de la mesure de la FO au droit d'une fissure).

2. Contexte et objectifs de la thèse

Les centrales nucléaires en service ont été conçues et construites pour fonctionner 40 ans au maximum. Cependant, du fait de certains progrès techniques mais aussi pour des raisons économiques, elles pourraient éventuellement voir leur autorisation d'exploitation prolongée. La connaissance précise des propriétés mécaniques et physico-chimiques du béton, et plus particulièrement de leurs évolutions lors du développement de pathologies, est cependant un prérequis nécessaire aux réflexions à mener concernant l'éventuelle prolongation de la durée de fonctionnement des ouvrages nucléaires. Dans cette optique, l'Institut de Radioprotection et de Sécurité Nucléaire (IRSN) a lancé en 2016 le projet ODOBA « Observatoire de la Durabilité des Ouvrages en Béton Armé » afin d'étudier principalement deux pathologies de gonflement interne susceptibles d'affecter les bétons des ouvrages nucléaires : la Réaction Sulfatique Interne (RSI) et la Réaction Alkali-Granulat (RAG). Plusieurs partenaires internationaux collaborent déjà au projet : Nuclear Regulatory Commission ; autorité de sûreté des États-Unis ; CNSC (Canadian Nuclear Safety Commission) ; Bel V (Technical safety organization (TSO) belge) ; VTT (Centre de recherche technique de Finlande).

Dans le cadre de ce projet, plusieurs formulations de bétons de centrales nucléaires font l'objet d'études sur des maquettes à grande échelle. Les deux pathologies de gonflement du béton y sont initiées, accélérées et suivies minutieusement. Les résultats de ces recherches permettront une meilleure compréhension des mécanismes de dégradation liés à ces pathologies et de leurs effets à grande échelle et contribueront ainsi à l'élaboration de méthodes prédictives

rationnelles du comportement des ouvrages nucléaires atteints de pathologies. Ils fourniront donc une aide notable à la prise de décision concernant la prolongation de durée d'exploitation de structures atteintes de pathologies de gonflement. Le travail de recherche présenté dans ce manuscrit participe à ces expérimentations en se focalisant sur une composante métrologique de ces essais examinant la faisabilité, les performances et la durabilité d'une instrumentation par capteur à FO.

La thèse s'organise autour de deux volets intimement liés.

Le premier volet se compose d'un travail expérimental/théorique mené sur des éprouvettes de petite échelle instrumentées par capteur à FO et se déroule principalement au laboratoire EMGCU de l'Université Gustave Eiffel (UGE) à Marne-la-Vallée. Il consiste en un programme d'essais de vieillissement, accéléré ou non, mené sur des éprouvettes en béton instrumentées par câbles à FO noyés ou collés en surface. L'étude s'appuie sur une sélection de câbles à FO disponibles dans le commerce. L'objectif est d'évaluer la durabilité de ces capteurs qui, lorsqu'ils sont noyés dans le béton, sont soumis à l'environnement alcalin de la matrice cimentaire et qui, lorsqu'ils sont collés en parement des structures, sont exposés à des conditions environnementales impliquant des variations de température et d'humidité. Le béton constitutif des éprouvettes, proche de celui des blocs ODOBA, est formulé de manière à être potentiellement réactif. Dans ces travaux, une attention particulière est portée à l'évolution, au cours des vieillissements, du mécanisme de transfert d'effort du béton vers le cœur de la FO.

Le second volet consiste en l'application du système d'instrumentation par capteurs à FO sur certaines des maquettes à échelle représentative d'ouvrages du projet ODOBA. Celles-ci sont constituées de blocs en béton massif ou béton armé (BA) fabriqués et suivis sur le site de l'IRSN installé à Cadarache (Bouches du Rhône). Ces corps d'épreuve ont été instrumentés au moyen des mêmes câbles à FO que ceux testés à l'UGE dans l'étude de durabilité. Les câbles ont, là encore, été mis en œuvre noyés dans le béton ou collés en parement. L'objectif principal de ces instrumentations est l'évaluation de l'aptitude des mesures réparties par capteurs à FO à la détection et le suivi des pathologies de gonflement dans ces maquettes. Les résultats des expérimentations menées à deux échelles, dans le cadre de cette thèse, permettront alors de proposer des critères objectifs de choix pour l'instrumentation des structures de centrales nucléaires ainsi que des méthodes d'interprétation dans le temps de ces mesures.

3. Organisation du manuscrit

Ce mémoire Ce mémoire est organisé en cinq chapitres :

- Le **premier chapitre** introduit le vocabulaire et les notions générales qui permettront de faciliter la lecture globale du manuscrit. C'est un exercice rendu nécessaire par le caractère multidisciplinaire du sujet de thèse qui se situe au carrefour de plusieurs domaines scientifiques et techniques : l'instrumentation des ouvrages en BA, les capteurs à FO ainsi que le matériaux béton et sa durabilité. Cette introduction est suivie d'une synthèse bibliographique traitant trois sujets. Dans la première partie de la bibliographie, les principales caractéristiques des mesures par capteurs à FO sont présentées et comparées aux techniques basées sur des capteurs traditionnels. Cette comparaison permet de souligner les avantages qu'offre la FO. La deuxième partie de la

bibliographie est consacrée au matériau béton et décrit les principales pathologies qui affectent le BA. Enfin, la dernière partie du chapitre introduit les principes de techniques innovantes d'utilisation des capteurs à FO pour la détection et le suivi des pathologies des ouvrages en BA ;

- Le **Chapitre II** précise l'ensemble du programme expérimental mis en œuvre dans le cadre de l'étude de la durabilité des capteurs à FO destinés aux mesures de déformation des ouvrages en BA. En premier lieu, les câbles à FO sélectionnés pour cette étude et les différentes formulations de béton destinées à recevoir ces capteurs sont présentés. Ensuite les protocoles expérimentaux suivis dans cette campagne de durabilité sont définis et clairement justifiés. Ces protocoles impliquent des essais de vieillissement, accéléré ou naturel, visant à évaluer la durabilité des capteurs à FO, ainsi que les essais de caractérisations mécanique, physico-chimique et géométrique des échantillons, réalisés à différentes échéances des vieillissements ;
- Le **Chapitre III** expose l'ensemble des résultats des essais de vieillissement, obtenus sur tous les types d'échantillons et pour tous les protocoles de vieillissement. Ce volet expérimental est ensuite complété par une première approche numérique qui permet une analyse fine des mécanismes de transfert d'effort dans les câbles à FO testés. À partir de ce travail de modélisation, il devient possible d'interpréter les mécanismes d'évolutions constatées expérimentalement et de mieux identifier les phénomènes à l'origine de ces évolutions ;
- Le **Chapitre IV** décrit le déroulement puis les résultats des interventions d'instrumentation et de prise de mesure effectuées à l'IRSN sur les blocs ODOBA du site de Cadarache. Le chapitre débute par la présentation du projet ODOBA dans son ensemble, de ses maquettes en béton puis des protocoles de vieillissements auxquels elles sont exposées. Vient ensuite un résumé du déroulement des interventions d'instrumentation des blocs avec les câbles à FO identiques à ceux sélectionnés pour l'étude de durabilité. Le chapitre se termine sur la présentation des premiers résultats de l'interrogation de ces câbles noyés dans les blocs de béton ou collés en surface ;
- Le **Chapitre V** constitue une partie indépendante du programme de durabilité et de l'instrumentation des blocs du projet ODOBA. Il présente les investigations numériques et expérimentales menées pour identifier les principaux paramètres affectant le signal de déformation acquis par une FO monomode collée en surface d'une structure en béton. Le cadre d'application visé est celui de l'évaluation de la santé structural à partir de mesures réparties des déformations et du contrôle de la fissuration. Une attention particulière est portée à l'influence de la rigidité (module d'Young) de l'adhésif polymère utilisé pour coller le capteur, ainsi qu'au processus de transfert d'effort entre la structure hôte en béton et le cœur en silice de la FO qui constitue l'élément sensible du capteur.

I. Généralités sur les capteurs à FO destinés à la surveillance des structures de génie civil : vers une utilisation pour la détection des pathologies de béton

I.1. La surveillance de la santé des structures de génie civil

Grâce au progrès que connaît le domaine des matériaux innovants et des techniques de construction, les nouveaux ouvrages de génie civil sont destinés à demeurer en service de nombreuses décennies. En appuis d'une conception fiable et de l'utilisation de matériaux performants, les gestionnaires d'ouvrages ont la possibilité de mettre en œuvre des systèmes de surveillance de la santé structurale pour assurer le bon fonctionnement de l'ouvrage tout au long de son utilisation [1]. Ainsi, que ce soit pour une optimisation du coût de maintenance, ou pour une meilleure sûreté et sécurité sur le long terme, la surveillance des grands ouvrages d'art (Figure I-1) ainsi que des ouvrages destinés aux utilisations de l'énergie nucléaire constitue un enjeu majeur qui fait encore l'objet de nombreuses recherches. Notamment, les problèmes de coût, de durabilité et de fiabilité des mesures sont toujours des questions clés lors d'une utilisation des capteurs traditionnels pour un suivi d'indicateurs pertinents dans les régions critiques d'une structure. Avec le développement de l'opto-électronique et plus particulièrement des techniques d'interrogation de la FO, la mesure de température et des déformations à l'aide des capteurs à FO est par exemple de plus en plus appliquée pour le suivi des structures en BA du fait des avantages qu'elle offre en termes de précision et de coût comparativement aux techniques traditionnelles [2].



Figure I-1 : Viaduc de Millau (instrumenté à l'aide de différents capteurs durant la phase de construction, le lancement du tablier et la phase d'exploitation) [3].

Ce premier chapitre se compose de trois grandes parties :

-Dans la première partie, quelques notions en mécanique des matériaux sont rappelées afin de faciliter la lecture globale du manuscrit. Ces notions concernent notamment les grandeurs mécaniques contrôlées dans les structures pour en surveiller l'état de santé. Quelques termes métrologiques sont ensuite définis avant d'introduire une présentation succincte des capteurs qui permet de confronter les caractéristiques des capteurs dits « traditionnels » à celles des capteurs à FO ;

-Dans la deuxième partie de ce chapitre, nous détaillerons les principales pathologies qui affectent les bétons des ouvrages de génie civil en nous intéressant plus particulièrement à deux pathologies susceptibles d'affecter les bétons des centrales nucléaires ;

-Dans la dernière partie, nous présenterons quelques exemples d'utilisation des capteurs à FO pour détecter des anomalies liées à l'apparition des pathologies du béton dans les ouvrages.

I.2. Rappel de quelques notions de mécanique des matériaux

I.2.1. Loi de comportement d'un matériau

L'objectif principal de l'étude de la mécanique d'un matériau est de connaître sa réponse face à une sollicitation. Les notions le plus souvent utilisées dans l'étude de cette réponse sont : la contrainte (σ) et la déformation (ε) [4].

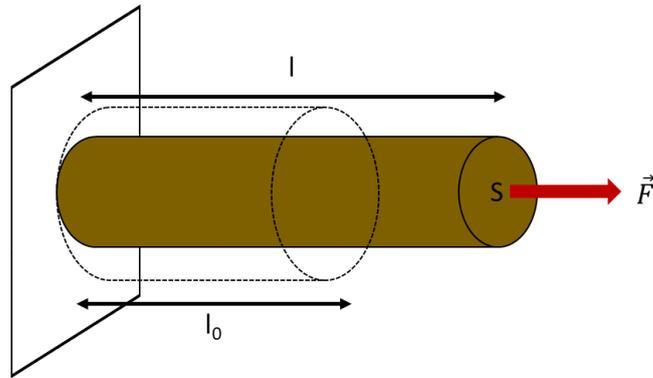


Figure I-2 : Barre soumise à une contrainte normale [5].

Pour illustrer simplement ces notions, considérons une barre de section S et de longueur initiale l_0 , faite d'un matériau parfaitement uniforme et isotrope, encastée à une extrémité et soumise à un effort \vec{F} à l'autre extrémité (l est la nouvelle longueur de la barre après l'application de la force), comme illustré dans la Figure I-2. La contrainte normale dans la barre est définie de la manière suivante :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{I-1})$$

La déformation de la barre correspond à l'allongement relatif sous l'effet de la contrainte normale σ :

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (\text{I-2})$$

Dans le cas d'un matériau isolé de toute sollicitation extérieure autre que des efforts mécaniques (pas de sollicitation thermique pas exemple) et de toute réaction chimique interne, la loi de comportement est une relation permettant de lier les contraintes internes dans ce matériau (générées par les efforts extérieurs) aux déformations qui résultent de ces contraintes. Les lois de comportement des matériaux sont déduites des essais mécaniques réalisés sur des échantillons généralement d'une taille normalisée. Il existe plusieurs exemples de lois de

comportement intégrant les différents phénomènes qui peuvent décrire le comportement des matériaux : élasticité, plasticité, fragilité, ductilité, endommagement...

La Figure I-3 présente des exemples de courbes contrainte/déformation illustrant des comportements mécaniques variés caractérisant quelques types de matériaux.

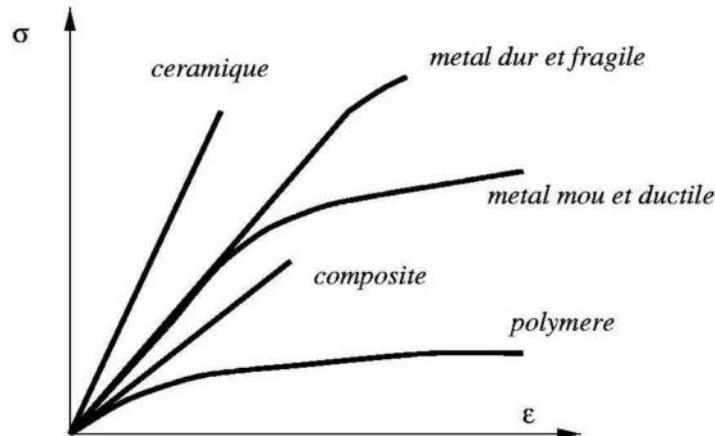


Figure I-3 : Exemples de courbes d'évolution de la déformation en fonction de la contrainte appliquée lors d'essais de traction sur différents matériaux [4].

Si nous supposons que le comportement de la barre de la Figure I-3 est élastique linéaire, le rapport entre la contrainte et la déformation est une constante appelée : module d'élasticité ou module d'Young, noté par la suite E . L'équation qui modélise ce comportement du matériau est appelée loi de Hooke, et s'écrit dans le cas unidimensionnel :

$$\sigma = E \times \varepsilon \tag{I-3}$$

Par ailleurs, quand on étire un matériau (effort de traction sur le matériau), ce dernier se contracte dans le plan perpendiculaire au plan de traction. Le rapport entre le rétrécissement transversal relatif (ε_t) et l'allongement longitudinal relatif (ε_l) est appelé coefficient de Poisson (ν).

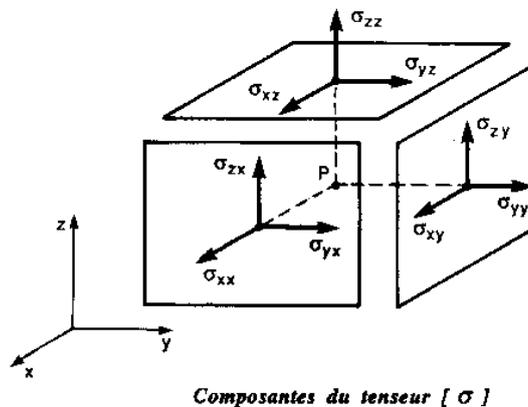


Figure I-4 : Représentation du tenseur des contraintes pour un élément de volume cubique.

Dans le cas général (tridimensionnel), les déformations et contraintes sont exprimées par des tenseurs notés ε_{ij} et σ_{ij} (voir la Figure I-4) et la loi de Hooke généralisée s'écrit pour un matériau isotrope suivant l'Equation I-4 :

$$\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left(\varepsilon_{ij} + \frac{\nu}{1-2\nu} \varepsilon_{kk} \delta_{ij} \right) \quad (\text{I-4})$$

δ_{ij} est le symbole de Kronecker (égal à 1 si $i = j$ et à 0 si $i \neq j$) et ε_{kk} est la trace du tenseur des déformations. Ce dernier inclut les déformations de la compression et de la traction (ε_{ij} , $i = j$) ainsi que les contraintes de cisaillement (ε_{ij} , $i \neq j$). Pour un élément de volume cubique (voir la Figure I-4) d'un matériau, les contraintes de cisaillement correspondent aux contraintes appliquées de manière tangentielle (ou parallèle) à une face de ce cube. En appliquant deux forces tangentielles opposées de même intensité F sur les faces opposées (de section S) d'un parallélépipède rectangle (voir la Figure I-5), la contrainte de cisaillement notée τ s'écrit suivant l'Equation I-5 :

$$\tau = \frac{F}{S} = \theta \times G \quad (\text{I-5})$$

θ est l'angle de déformation et G est le module de cisaillement et s'écrit suivant l'Equation I-6 :

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (\text{I-6})$$

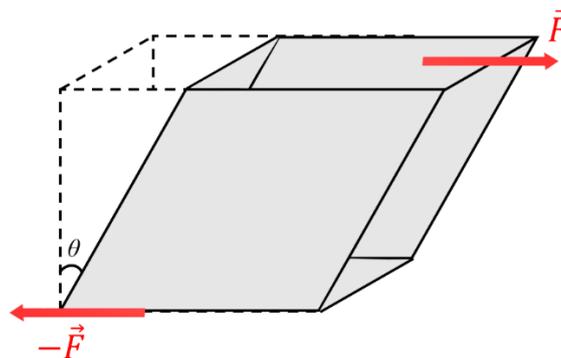


Figure I-5 : Représentation d'un matériau sous contrainte de cisaillement.

I.2.2. Rappel de quelques notions sur le comportement des interfaces

Afin de déterminer le comportement global d'un système sous l'effet d'une sollicitation mécanique, la connaissance des propriétés mécaniques des différents matériaux qui constituent ce système est nécessaire mais peut demeurer insuffisante lorsque ce système est constitué de différents matériaux liés entre eux. En effet, le comportement global du système dépend alors également des propriétés aux interfaces des différents constituants. Il est donc primordial de connaître les relations qui décrivent ces contacts.

Quand deux matériaux sont en contact, leur adhésion se définit par l'ensemble des phénomènes physico-chimiques se produisant et qui empêchent leur séparation. L'énergie nécessaire pour les séparer est appelée adhérence. Plusieurs phénomènes peuvent générer de l'adhésion entre deux matériaux, les deux plus courants étant [6] :

-L'ancrage mécanique qui se manifeste par un ancrage physique des revêtements par les aspérités présentes à la surface du substrat ;

-La formation de liaisons chimiques iono-covalentes suite à une réaction entre deux surfaces.

Il existe plusieurs modèles / lois de comportement pour décrire une interface séparant deux matériaux. Ces lois sont généralement formulées à partir des déplacements différentiels (déplacement normal et déplacement tangentiel) entre les deux surfaces en liaison, plutôt que des déformations de cisaillement (ε_{ij}) qui dépendent de l'épaisseur t de l'interface [7]. Quatre variables sont utilisées dans la modélisation bidimensionnelle du comportement linéaire d'une interface : τ : la contrainte de cisaillement (tangentielle à l'interface), σ_n : la contrainte normale (perpendiculaire à l'interface), u_t : déplacement différentiel tangentiel et u_n : déplacement différentiel normal (Figure I-6).

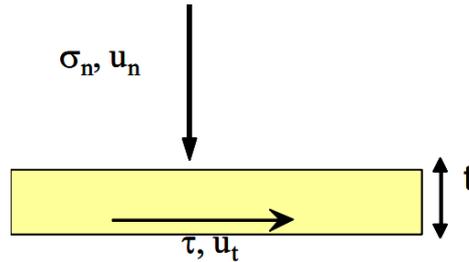


Figure I-6 : Paramètres décrivant une interface bidimensionnelle [7].

Le comportement élastique de l'interface est donc découpé dans les deux sens, normal et tangentiel, et s'écrit suivant l'Equation I-7 :

$$\begin{pmatrix} d\sigma_n \\ d\tau \end{pmatrix} = \bar{K} \begin{pmatrix} du_n \\ du_t \end{pmatrix} \quad (I-7)$$

Avec :

$$\bar{K} = \begin{pmatrix} K_n & 0 \\ 0 & K_t \end{pmatrix} \quad (I-8)$$

K_n et K_t sont respectivement la rigidité normale et la rigidité tangentielle et peuvent être déterminées expérimentalement par des essais d'arrachement qui consistent à séparer deux matériaux en liaison (voir la Figure I-7).

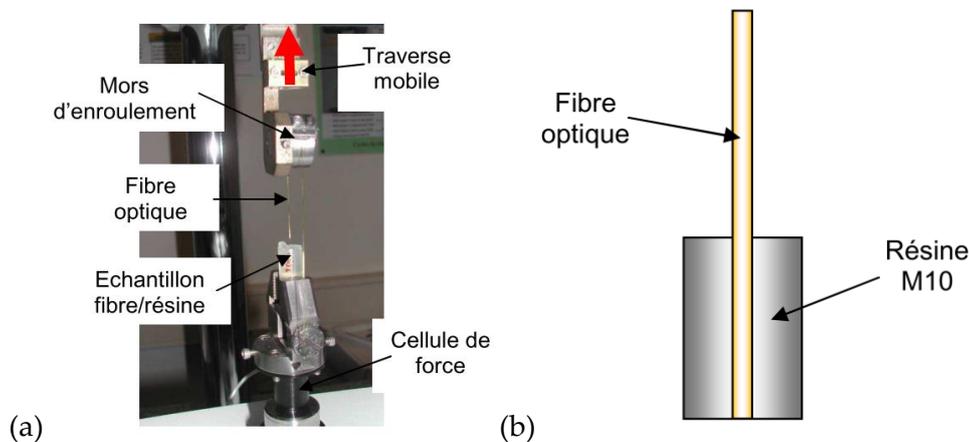


Figure I-7 : (a) Configuration d'un essai d'arrachement d'une FO noyée dans un cylindre de résine pour la caractérisation de l'interface résine/revêtement primaire de la FO ; (b) Schéma de l'échantillon testé [8].

Les courbes charge/déplacement différentiel des essais d'arrachement font généralement apparaître trois phases (comme illustré dans la Figure I-8-b) [8] :

1-Un comportement initial linéaire de l'interface : Cela permet de définir une rigidité tangentielle pour modéliser cette phase du comportement de l'interface ;

2-Une rupture progressive de l'adhésion : Cette phase vient à la suite de l'application d'une charge maximale F_{max} qui permet de calculer la contrainte d'adhérence τ_d [9] suivant l'Equation I-9 :

$$\tau_d = \frac{F_{max}}{Pl_e} \quad (I-9)$$

Où P est périmètre de contact et l_e la hauteur de ce contact entre les deux matériaux pour le cas schématisé Figure I-8-a ;

3-Un glissement à l'interface mobilisant plus ou moins de frottements.

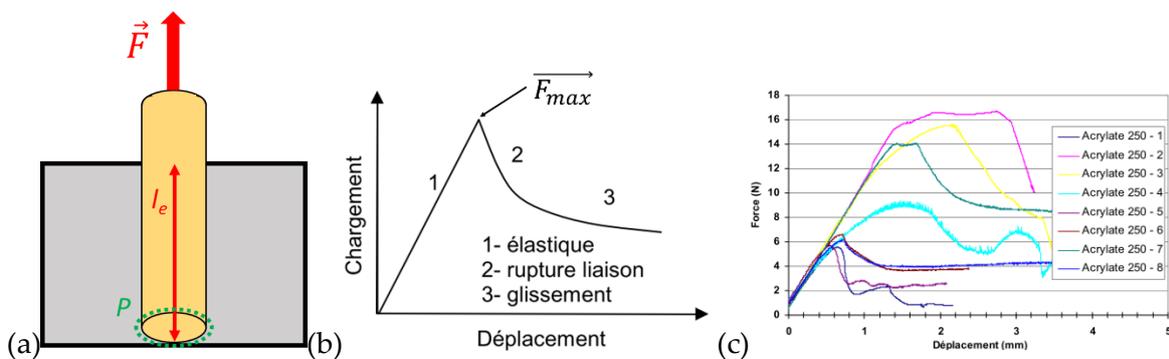


Figure I-8 : (a) Schéma d'un échantillon pour un essai d'arrachement ; (b) Courbe typique charge/déplacement d'un essai d'arrachement; (c) Courbes expérimentales d'arrachement FO/résine en relation avec l'essai de la Figure I-7 [8].

I.2.3. Rappel de quelques notions métrologiques de base

Une **grandeur physique** est un paramètre qui, dans certains cas, doit être contrôlé par la mesure. Mesurer une grandeur physique consiste à rechercher sa valeur en utilisant un équipement (un système de mesure) et une procédure de mesure [10]. Avant d'utiliser un système de mesure, il est nécessaire de connaître quelques notions de base de métrologie telles que définies dans [11], selon le « Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure » et le « Vocabulaire international de métrologie ».

-La grandeur physique qu'on mesure est appelée **mesurande**.

-L'ensemble des opérations effectuées afin de connaître la valeur du mesurande est appelé **mesure**.

-L'**incertitude** d'une mesure correspond à l'intervalle des valeurs probables du mesurande. Une mesure n'est jamais parfaite et les résultats sont présentés sous forme d'intervalle.

-Une **grandeur d'influence** est une grandeur, autre que le mesurande, pouvant affecter les résultats d'une mesure.

-L'**étalonnage** est l'opération permettant d'explicitier la relation entre la grandeur physique (le mesurande) et la valeur de sortie de l'appareil de mesure. Cette opération s'effectue à l'aide d'un appareil (étalon) en appliquant une valeur d'entrée connue et en vérifiant ensuite si la valeur de sortie est celle attendue.

-La **sensibilité** d'un appareil est l'influence d'un changement des données d'entrée sur les données de sortie. Si la sensibilité est une constante, l'appareil est dit **linéaire**.

-L'**étendue de mesure** d'un appareil est le domaine de variation possible du mesurande.

-Le **temps de réponse** d'un appareil est la durée comprise entre le moment de la variation du mesurande et la variation de la valeur de sortie.

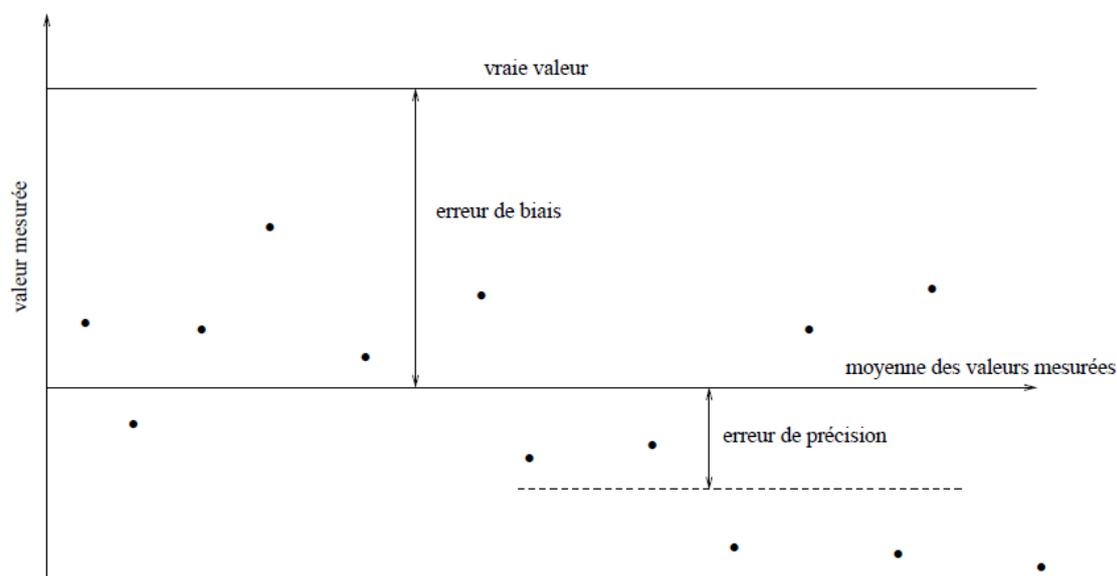


Figure I-9 : Les différents types d'erreurs [10].

-Si on note m le résultat de la mesure d'un mesurande de valeur M , l'écart $(m - M)$ est appelé **erreur de mesure**. On peut distinguer deux grands types d'erreur : erreur de biais (ou erreur systématique) et erreur de précision (ou erreur aléatoire). Les deux types d'erreur sont illustrés dans la Figure I-9.

-L'erreur de précision (aléatoire) dépend de la capacité de l'appareil de mesure à refournir la même valeur de sortie lorsqu'on lui introduit la même valeur d'entrée. L'écart type des mesures répétées de la même valeur réelle représente donc l'erreur de précision. Ces erreurs ne sont pas reproductibles et obéissent donc à des lois statistiques.

-La mesure n'étant jamais parfaite, l'erreur de biais (systématique) se définit par la différence entre la moyenne des valeurs mesurées et la vraie valeur M . Les erreurs systématiques peuvent être liées à leur cause par une loi physique. Elles sont dans ce cas reproductibles et peuvent être corrigées.

-L'aptitude d'un instrument de mesure à donner des valeurs de mesure très voisines, lors de la répétition des mêmes conditions de mesure d'une même valeur de mesurande, est appelée **fidélité** de l'instrument.

-Un système est dit **juste** si l'erreur systématique des mesures est faible.

-L'exactitude de mesure est le résultat d'une bonne justesse et une bonne fidélité de l'appareil de mesure.

I.3. Généralités concernant les capteurs traditionnels

Un capteur est un dispositif délivrant un signal dit « de sortie » (hauteur de mercure, intensité électrique, charge, courant, déviation d'une aiguille...) qui dépend du mesurande (grandeur physique « d'entrée »). On peut distinguer deux grandes familles de capteurs [12] :

- **Les capteurs actifs** : qui fonctionnent comme un générateur et convertissent une grandeur physique en un signal électrique. La sortie est alors une charge, une tension ou un courant. Ce type de capteur n'a donc pas besoin d'une alimentation pour effectuer cette conversion ;

- **Les capteurs passifs** : considérés comme une impédance et dont l'un des paramètres est sensible au mesurande. Un tel capteur a besoin d'être alimenté par un circuit électrique (conditionneur) pour convertir en énergie électrique le mesurande.

Ces deux types de capteurs sont généralement utilisés pour le contrôle de santé des ouvrages du génie civil afin de suivre particulièrement deux paramètres : les températures et les déformations (ou les déplacements). Ces derniers permettent une détection précoce des anomalies pouvant affecter une structure (incendie, fissuration, concentration de contrainte, flèche importante...). Nous présentons dans la suite les différents capteurs dits « traditionnels » liés à la mesure du déplacement, de la déformation et de la température et utilisés pour la surveillance des structures. La technologie de mesure des déformations et de la température par capteurs à FO sera ensuite abordée.

I.3.1. Principaux capteurs traditionnels destinés à la mesure de la température

-**Sondes à résistance de platine** : Le principe de mesure se base sur le fait que la résistance électrique du platine varie selon la température (Figure I-10). La plus courante des sondes à résistance de platine est appelée sonde Pt100 du fait de la configuration de ce type de capteur qui possède une résistance en platine de 100 Ω à 0 °C [13].

La gamme de mesure de ce type de capteur est très large (de -200 °C à 650 °C) pour un temps de réponse de quelques secondes [14].



Figure I-10 : Sonde à résistance de platine [13].

-Thermocouples : La mesure de la température à l'aide d'un thermocouple se base principalement sur l'effet Seebeck. Si on réunit à une extrémité deux fils métalliques de natures différentes et qu'on élève la température de cette extrémité, on observe l'apparition d'une tension électrique aux deux extrémités restées libres appelée force électromotrice (fém) (Figure I-11). La détermination de la température dans la partie chauffée est déduite de la mesure de cette tension.

La mesure de la température avec un thermocouple s'effectue de manière ponctuelle. Selon la nature des métaux utilisés, la plage de mesure d'un thermocouple varie. Il est ainsi possible de mesurer des température basses atteignant $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ mais aussi des très hautes températures avoisinant $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ [15]. Le temps de réponse de ce type de capteurs est de quelques secondes [14].

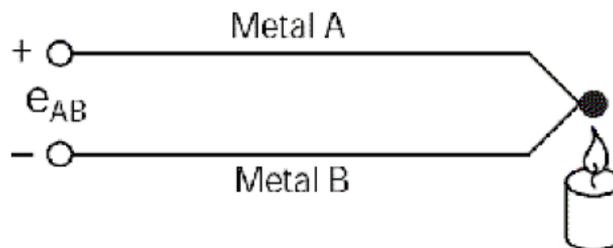


Figure I-11 : Schéma du principe de mesure d'un thermocouple [15].

I.3.2. Capteurs destinés à la mesure des déplacements / déformations

-Jauges extensométriques (de déformation) : Le type de jauges le plus utilisé est la jauge résistive. Une jauge est constituée d'une grille formée par un conducteur filiforme, fixée sur un support isolant comme illustré dans la Figure I-12, collée sur la structure, et protégée de l'environnement l'entourant [14]. Le principe de fonctionnement de la jauge repose sur la variation de la résistance électrique du conducteur filiforme en fonction de son allongement (et donc de la déformation du support).

Selon la longueur de la jauge, les mesures se font de manière ponctuelle sur une longueur plus ou moins courte (de quelques millimètres à quelques centimètres) avec une étendue de mesure pouvant atteindre $\pm 200\ 000\ \mu\epsilon$ [14].

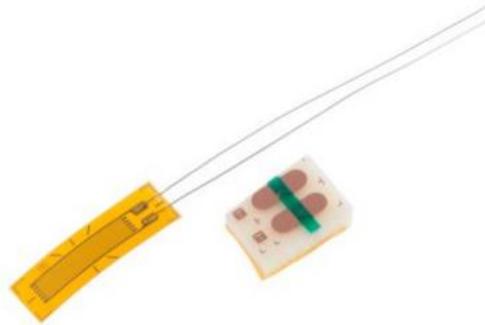


Figure I-12 : Jauge de déformation [16].

-Extensomètres à cordes vibrantes : Le principe de fonctionnement de ces capteurs repose sur la mesure de la variation de fréquence de vibration d'une corde tendue à l'intérieur du corps du capteur et fixée ponctuellement à ses deux extrémités au substrat dont on veut mesurer la déformation. Si ce dernier est comprimé, les extrémités se rapprochent et la fréquence propre de vibration mécanique de la corde diminue. De la même manière, lorsque le support est sollicité en traction, les deux extrémités s'éloignent et la fréquence de vibration augmente [17] [18] [19]. L'étendue de mesure de ce type de capteurs est de l'ordre de $4000\ \mu\epsilon$ [14]. Un exemple d'extensomètre à corde vibrante est montré dans la Figure I-13.

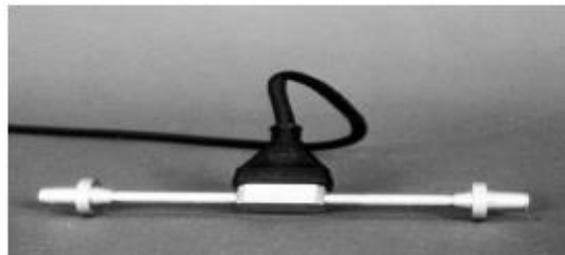


Figure I-13 : Exemple d'extensomètre à corde vibrante [17].

-Les capteurs LVDT (Linear Variable Differential Transformer soit transformateur différentiel linéaire variable) : Un capteur LVDT est un capteur inductif qui fournit une tension proportionnelle au déplacement d'un noyau ferromagnétique (cœur ferrite de la Figure I-14) qui coulisse dans l'axe du cylindre. Composé d'un bobinage primaire et de 2 bobinages secondaires, le mouvement du noyau à l'intérieur de ces bobines génère des tensions dans chaque bobinage secondaire (voir la Figure I-14). L'amplitude de ces deux tensions permettent de connaître la position du noyau. Suivant la taille du capteur, l'étendue de la mesure peut atteindre 400 mm [20].

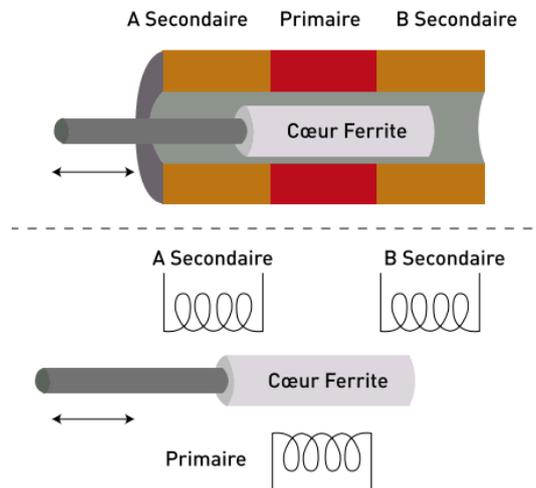


Figure I-14 : Schéma de vue en coupe d'un LVDT [20].

I.4. Généralités concernant les capteurs à FO

Un capteur à FO est un 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). Selon la norme NF EN 61757-1 [21], un capteur à FO est composé d'un détecteur optique alimenté par de l'énergie optique dans lequel l'information est créée par réaction du rayonnement lumineux au mesurande. Le détecteur peut être soit la fibre elle-même, soit un élément alimenté par de l'énergie optique inséré dans le chemin optique. Différemment d'une simple liaison optique où l'information est simplement transmise de l'émetteur au récepteur, dans un capteur à FO, des paramètres du rayonnement lumineux sont modifiés (un ou plusieurs) directement ou indirectement par la grandeur à mesurer dans une portion du chemin optique.

I.4.1. Avantages et inconvénients des capteurs à FO

La FO en silice sous sa forme actuelle a été inventée dans les années 70. En revanche, les premières technologies de capteurs par FO ne sont apparues qu'à partir des années 90. Beaucoup de recherches ont été menées pour optimiser l'utilisation de ces capteurs dans les structures du génie civil en raison des nombreux avantages qu'offre cette technologie [22], citons par exemple :

- Les petites dimensions des FOs, leur légèreté ainsi que leur souplesse permettent une grande facilité de mise en œuvre ainsi qu'une faible intrusivité ;
- La bonne résistance à la traction de la FO ;
- L'insensibilité de la FO à la présence d'un champ électromagnétique et de ses éventuelles variations ;
- La résistance aux hautes températures de la FO (suivant le matériau de revêtement : 375 °C pour un revêtement en polyimide par exemple) ;

- La grande sensibilité, la bonne précision ainsi qu'un temps de réponse très court des capteurs à FO, sous réserve d'une utilisation maîtrisée. Il est à noter que le temps de diffusion de la chaleur vers le cœur (schéma de la Figure I-15) de la fibre est à prendre en considération pour une mesure de température ;

-Les faibles coûts métriques à l'achat des câbles à FO utilisés comme capteurs.

Les capteurs à FO peuvent cependant présenter quelques inconvénients tels que :

-Des problèmes de fiabilité et de durabilité des matériaux qui constituent les câbles à FO, qui peuvent apparaître sous un environnement agressif. Cela constitue le sujet principal du présent travail de thèse. Ce point sera donc détaillé par la suite ;

-Le coût de l'ensemble de la chaîne de mesure qui peut devenir important selon le type d'interrogateur choisi, et qui peut rendre l'instrumentation par capteurs à FO moins compétitive que l'utilisation de capteurs traditionnels.

I.4.2. Structure d'une FO

Une FO est un guide d'onde diélectrique cylindrique qui permet de guider l'onde lumineuse le long de son axe central. La forme générale d'une FO est celle d'un fil long, de section circulaire et constitué de plusieurs couches, tel qu'illustré dans la Figure I-15.

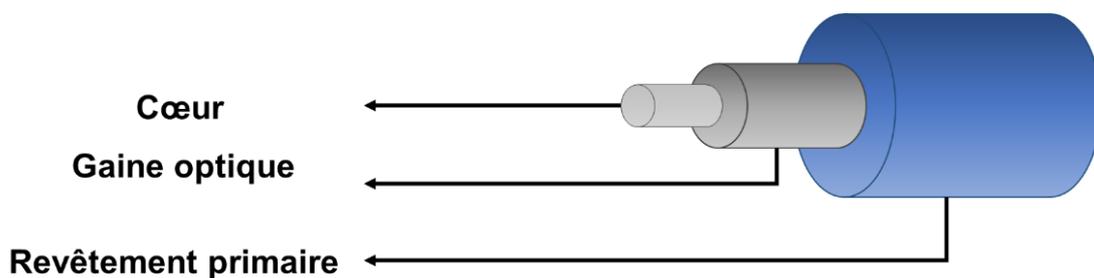


Figure I-15 : Structure d'une FO standard.

Une FO est constituée :

-**d'un cœur optique** : Le cœur optique possède un indice de réfraction n légèrement supérieur à celui de la gaine optique permettant d'assurer le guidage de l'onde électromagnétique (une différence d'indice de réfraction de l'ordre de 1 %). Le cœur le plus souvent en verre est généralement fabriqué en silice. Cependant, d'autres matériaux, tels que le fluorozirconate, le fluoroaluminat et les verres de chalcogénures, peuvent être utilisés pour les longueurs d'ondes infrarouges au-delà de $2 \mu\text{m}$. Les matériaux cristallins comme le saphir, sont également utilisés pour des applications spécialisées ;

La silice et les verres fluorés ont généralement des indices de réfraction d'environ 1,5. Certains matériaux tels que les chalcogénures peuvent présenter des indices élevés pouvant aller jusqu'à 3.

-**d'une gaine optique** : La gaine optique est fabriquée à partir du même matériau que le cœur mais est dopée différemment. Le dopage se fait généralement par ajout de certains ions

modificateurs de réseau (Al Aluminium, Ti Titane, Zr Zirconium, Ge Germanium, F Fluor...). Il est nécessaire que le matériau qui constitue la gaine présente des propriétés optiques comparables à celles du cœur en termes de pureté et de transparence [23] ;

On peut aussi retrouver dans le commerce des FOs avec un cœur et une gaine en plastique mais leur usage demeure limité : éclairage et liaison de très courte distance [16].

-d'un revêtement primaire : Le revêtement primaire assure une protection mécanique pour la partie optique très fragile (cœur et gaine) et protège la gaine optique des différentes agressions de l'environnement extérieur [14].

Le revêtement primaire est habituellement en acrylate pour des utilisations de télécommunication, mais peut être composé de polyimide ou d'autres types de matériaux comme les métaux, le carbone, les polyesters ou le nylon [24].

I.4.3. Les différents types de FOs

Selon le diamètre du cœur optique de la fibre et de l'utilisation envisagée, on peut distinguer deux principaux types de FOs :

-Les fibres monomodes : Le diamètre du cœur ne mesure que quelques μm et l'onde n'a qu'un seul mode de propagation possible qui se trouve dans l'axe de la fibre. Les pertes sont donc minimales et des utilisations à très hauts débits et/ou sur de très longues distances sont alors possibles.

-Les fibres multimodes : Le diamètre du cœur mesure quelques dizaines de μm à quelques millimètres. Par conséquent, l'onde lumineuse présente plusieurs modes de propagation, c'est-à-dire que l'onde lumineuse se propage à des vitesses de phase différentes et suivant des parcours différents. Elles sont utilisées principalement pour des bas débits ou de courtes distances.

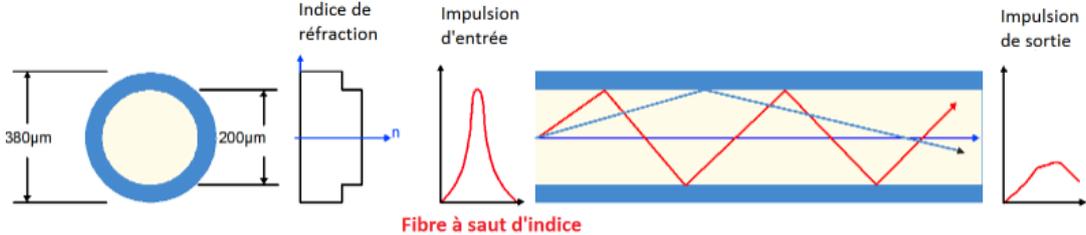
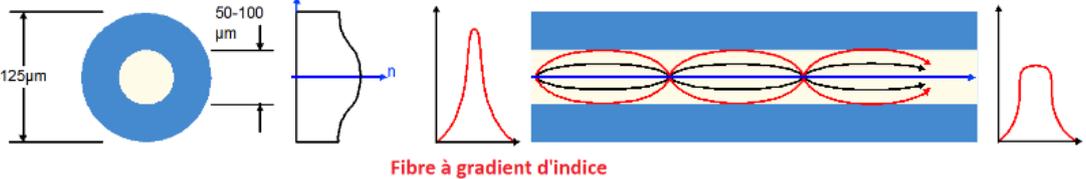
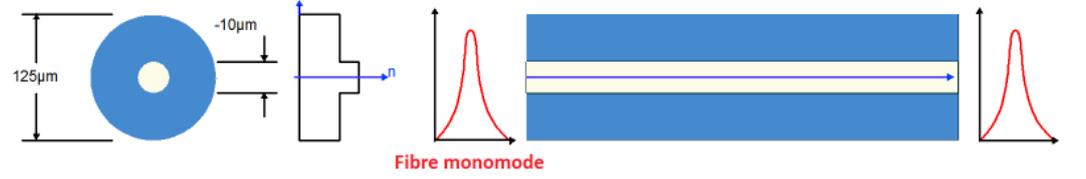
Les FOs multimodes peuvent être :

-A saut d'indice si l'indice de réfraction du cœur est constant en tout point. L'indice chute ainsi brutalement d'une valeur dans le cœur à une valeur moindre dans la gaine. La propagation de l'onde lumineuse s'effectue alors de manière rectiligne ;

- A gradient d'indice si l'indice de réfraction du cœur diminue progressivement du centre jusqu'à la périphérie. Les parcours caractéristiques des divers modes de propagation de l'onde lumineuse sont alors incurvés.

Le Tableau I-1 résume les caractéristiques des différents types de FOs.

Tableau I-1 : Caractéristiques des différents types de FOs [25].

Type de fibre	Caractéristiques
Multimode à saut d'indice	 <p style="text-align: center;">Fibre à saut d'indice</p> <p style="text-align: center;">Débit pour les télécommunications : environ 100 Mbit/s</p> <p style="text-align: center;">Pertes typiques à $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$: 10 dB/Km ; Portée maximale : 2 Km</p>
Multimode à gradient d'indice	 <p style="text-align: center;">Fibre à gradient d'indice</p> <p style="text-align: center;">Débit pour les télécommunications : environ 1 Gbit/s</p> <p style="text-align: center;">Pertes typiques à $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$: 10 dB/Km ; Portée maximale : 2 Km</p>
Monomode	 <p style="text-align: center;">Fibre monomode</p> <p style="text-align: center;">Débit pour les télécommunications : environ 100 Gbit/s</p> <p style="text-align: center;">Pertes typiques à $\lambda = 1,5 \mu\text{m}$: 0,5 dB/Km ; Portée maximale : 100 Km</p>

Il existe d'autres types de FOs non classiques souvent qualifiés « d'exotiques ». Nous citons ci-dessous quelques exemples de ces fibres spéciales [22] :

- FOs à deux cœurs ;
- FOs à cristaux photoniques ;
- FOs à maintien de polarisation : à gaine elliptique, Bow-tie, PANDA... (voir la Figure I-16).

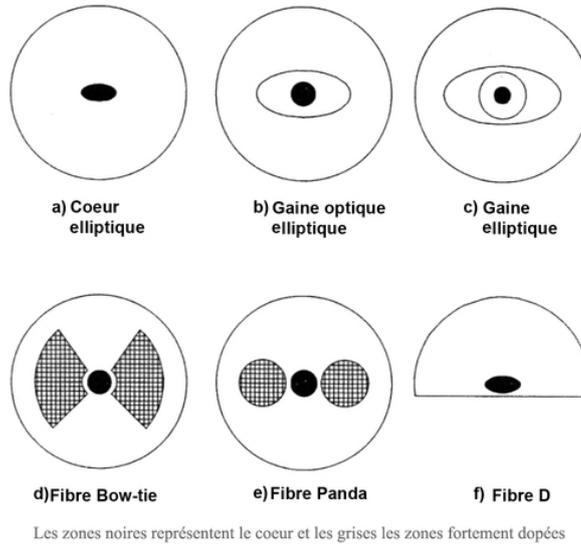
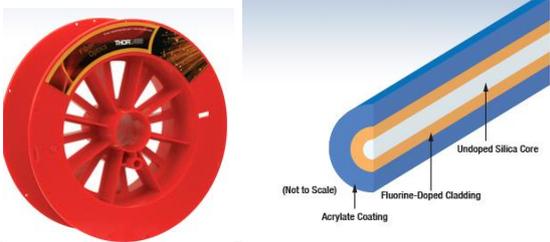
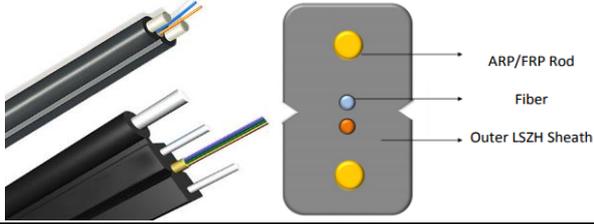
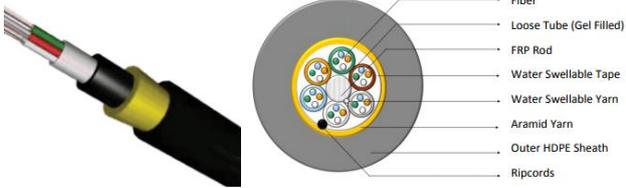


Figure I-16 : Exemples de FOs à haute biréfringence [26].

I.4.4. Quelques exemples de câbles à FO du commerce

Il existe dans le commerce une grande variété des câbles à FO contenant une ou plusieurs FOs et sont munis d'une ou plusieurs couches de revêtement. Nous présentons quelques exemples dans le Tableau I-2.

Tableau I-2 : Exemples de câbles à FO du commerce.

Câble à FO	Détails
<p>FG010LDA</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Fabricant : Thorlabs. -Noyau de silice pur entouré d'une gaine dopée au fluor. - Double revêtement d'acrylate. - Fibre multimode.
<p>FTTx</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Fabricant : Hfcl. -FOs noyées dans une gaine. -Barres de chaque côté fournissant une résistance longitudinale. -Disponible en monomode et en multimode.
<p>ADSS</p> 	<ul style="list-style-type: none"> -Fabricant : Hfcl. -FOs placées à l'intérieur de tubes tampons contenant du gel. -Fils d'aramide et fibres entourés d'une gaine. -Disponible en monomode et en multimode.

I.4.5. Les systèmes de mesure par FO

Il existe différents types de systèmes de mesure par FO basés sur des phénomènes physiques différents. Lors de l'instrumentation par capteurs à FO d'un ouvrage de génie civil, le choix du type de système de mesure adéquat s'effectue en fonction des critères suivants :

- Mesures ponctuelles ou continues ;
- Mesure des déformations, de température, des deux simultanément ou d'un autre mesurande ;
- Fréquence des mesures (notamment mesure statique ou dynamique).

Comme il l'a été mentionné, les systèmes de mesures peuvent être classés selon deux grandes familles : les systèmes de mesure **ponctuelle** et les systèmes de mesures **quasi-réparties** (permettant la mesure en plusieurs points) ou **réparties** (permettant la mesure en un grand nombre de points, de telle manière que la mesure est considérée comme quasi-continue). Nous détaillons par la suite ces deux concepts.

I.4.5.1. Les systèmes de mesure ponctuelle

Dans un système de mesure ponctuelle, la mesure se fait en un point de la structure où le capteur est installé. Multiplier le nombre des capteurs permet d'augmenter le nombre de points de mesure. Toutefois, chaque capteur doit contenir son propre système d'acquisition. Les systèmes de mesure ponctuelle peuvent être classés selon deux grandes catégories : des capteurs à réseau et des capteurs interférométriques.

Nous présentons quelques exemples des deux catégories dans ce qui suit :

-Les extensomètres à interférométrie de Michelson : Un rayonnement infrarouge est envoyé dans une FO monomode puis se divise après passage dans un coupleur pour circuler dans deux fibres parallèles installées dans le même capteur. L'une des fibres, dite fibre de mesure, est liée à des ancrages et l'autre, dite fibre de référence, est libre dans le capteur. Le principe de mesure se base sur l'interférence par division d'amplitude de Michelson (dont le schéma est présenté dans la Figure I-17) des signaux lumineux des deux bras parallèles de la FO terminés par des miroirs. La lumière réfléchiée par les miroirs des deux fibres est ensuite dirigée vers l'interféromètre de Michelson. Ce capteur permet en conséquence d'effectuer une mesure de déplacements micrométriques relatifs. L'appareil incorporant une fibre de référence permet de fournir des mesures auto-compensées en température [27] ;

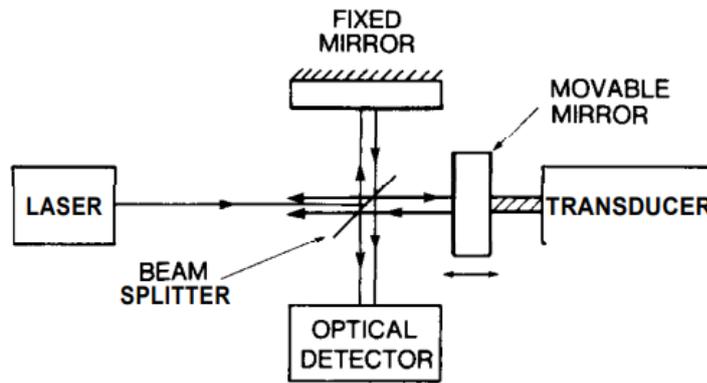


Figure I-17 : Principe de l'interféromètre de Michelson [28].

-Les capteurs interférométriques de type Fabry-Perrot : Deux FOs sont utilisées dans ce type de capteurs, leurs extrémités sont munies d'une couche semi réfléchissante (miroir) constituée de silice fondue avec un espacement entre les deux miroirs (le principe d'interférence est illustré dans le schéma de la Figure I-18). La variation de cet espacement modifie le spectre d'interférence de la lumière réfléchi par ces deux miroirs. Il est donc possible de remonter à la grandeur physique ayant induit la variation de l'espacement [29] ;

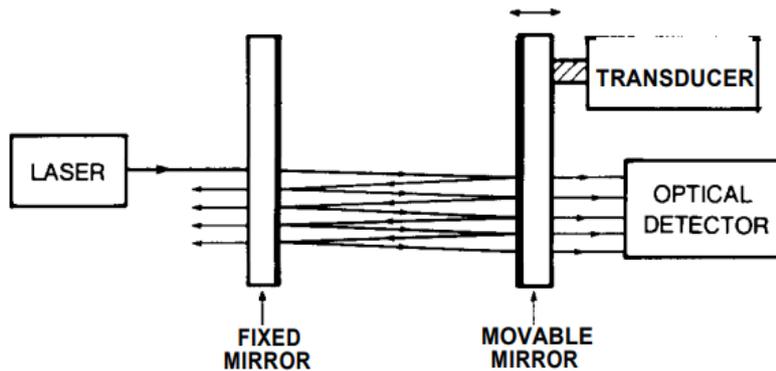


Figure I-18 : Principe de l'interférométrie de Fabry-Perrot [28].

-Capteurs à réseau de Bragg : La technologie des capteurs à réseau de Bragg est apparue dans les années 1990. Elle se base sur une modulation périodique et longitudinale de l'indice de réfraction du cœur de la FO par photo-inscription [30]. Le réseau ainsi créé réfléchit alors la lumière à une longueur d'onde de Bragg qui s'écrit suivant l'Equation I-10 :

$$\lambda_B = 2n_e \Lambda \quad (\text{I-10})$$

Avec n_e l'indice effectif de la fibre, λ_B la longueur d'onde du réseau de Bragg et Λ la période spatiale du réseau.

Lorsque le réseau est sollicité thermiquement (et générant ΔT) ou mécaniquement (générant ε), la variation de la longueur d'onde du réseau est :

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = a \cdot \Delta T + b \cdot \varepsilon \quad (\text{I-11})$$

a et b sont des coefficients de calibration (a est de l'ordre de $7,8 \cdot 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ et b de l'ordre de 0,78) [1] [14].

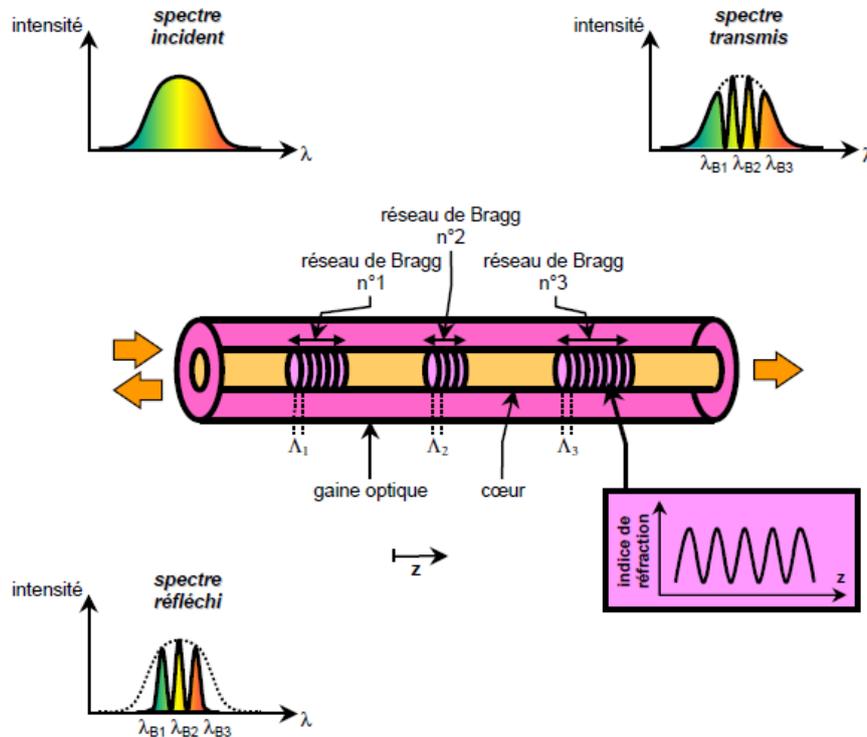


Figure I-19 : Principe d'un capteur à réseau de Bragg [31].

Un réseau de Bragg étant lié à une longueur d'onde particulière, l'inscription de plusieurs réseaux de Bragg de longueurs d'onde différentes sur une même FO permet d'effectuer des mesures sur plusieurs points de la même fibre. Cette technique de **multiplexage** est illustrée dans le schéma de la Figure I-19 et permet d'obtenir une mesure **quasi-répartie** à l'aide de plusieurs capteurs ponctuels [31].

I.4.5.2. Les systèmes de mesures réparties

a. Interrogation d'une FO par rétrodiffusion

Les systèmes de mesures réparties par FO permettent d'obtenir des informations locales et globales par rétrodiffusion de l'onde lumineuse. La rétrodiffusion peut être définie comme l'interaction entre la lumière et un support optique. Un système de mesure répartie par FO est alors composé d'un interrogateur connecté à une FO. En définissant un pas de mesure (résolution spatiale), la mesure s'effectue tout au long de la FO de manière continue.

Le spectre de rétrodiffusion d'une FO est illustré dans la Figure I-20 et fait apparaître trois phénomènes de rétrodiffusion pour une onde optique incidente à une longueur d'onde λ_0 . La rétrodiffusion **Rayleigh** (sensible à la déformation et à la température) à la même longueur

d'onde λ_0 , la rétrodiffusion **Brillouin** (sensible à la déformation et à la température) et la rétrodiffusion **Raman** (sensible à la température).

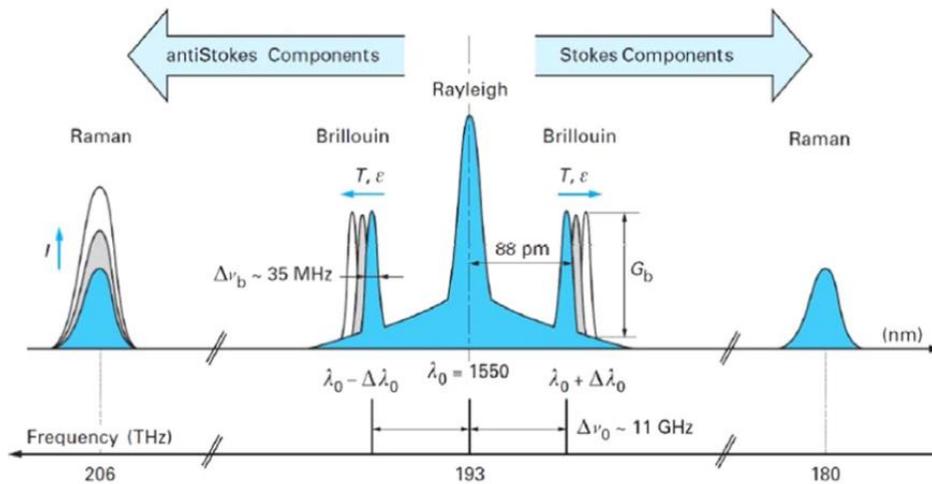


Figure I-20 : Spectre de rétrodiffusion de la silice [32].

-Interrogation Raman : La rétrodiffusion Raman est le résultat des vibrations thermiques moléculaires. Elle provient de l'interaction des photons d'une source de lumière avec les molécules du matériau de propagation de l'onde lumineuse. Il en résulte l'émission et l'absorption de phonons optiques, de fréquences égales aux fréquences des vibrations des molécules dans le matériau. L'onde rétrodiffusée subit alors soit une perte d'énergie (onde Stokes indifférente à la température), soit un gain d'énergie (onde anti-Stokes qui dépend beaucoup de la température). Les techniques de mesure s'appuyant sur un interrogateur Raman permettent un pas de mesure minimum de 1 cm pour une mesure sur 1 km de longueur et une portée maximale pouvant atteindre 30 km pour une résolution spatiale de plusieurs mètres [33].

-Interrogation Brillouin : Le principe de mesure se base sur l'interaction de la lumière avec les ondes acoustiques qui se propagent dans la fibre. La mesure à l'aide d'interrogateur OTDR (voir le paragraphe I.4.5.2.b) permet d'obtenir le spectre de rétrodiffusion. Le pic de ce spectre est nommé fréquence Brillouin ν_B et s'écrit suivant l'Equation I-12 :

$$\nu_B = \frac{2nV_a}{\lambda_0} \quad (\text{I-12})$$

avec :

n : Indice de réfraction de la fibre ;

V_a : Vitesse des ondes acoustiques (~ 5900 m/s pour la silice) ;

λ_0 : Longueur d'onde de la lumière incidente.

On soustrayant deux profils de mesures à deux états différents, on déduit un décalage spectral qui dépend linéairement de la température ainsi que de la déformation [34] selon l'Equation I-13 :

$$\Delta\nu_B = C_T\Delta T + C_\varepsilon\varepsilon \quad (\text{I-13})$$

avec :

C_T : Coefficient de sensibilité à la température ;

C_ε : Coefficient de sensibilité à la déformation.

La résolution spatiale des interrogateurs Brillouin peut atteindre quelques centimètres pour une configuration par rétrodiffusion Brillouin stimulée [33].

-Interrogation Rayleigh : La rétrodiffusion Rayleigh provient de l'interaction entre le champ électromagnétique se propageant dans la FO et les impuretés présentes dans la silice. Le profil de rétrodiffusion Rayleigh d'une FO, obtenu avec un interrogateur OFDR (voir le paragraphe I.4.5.2.b), résulte de son indice de réflexion hétérogène qui est réparti de manière aléatoire sur toute la longueur de la fibre. Ce profil représente une empreinte spécifique à chaque FO et est le résultat de son processus de fabrication. Lorsque une FO est soumise à un stimulus externe (comme une variation de contrainte ou une variation de la température), le motif de rétrodiffusion présente un décalage spectral $\Delta\nu_R$ qui est ensuite utilisé pour calculer les variations de déformation et de la température sur la longueur de la fibre en la comparant à l'état de référence [34] suivant l'Equation I-14 :

$$\Delta\nu_R = C_\varepsilon\Delta\varepsilon + C_T\Delta T \quad (\text{I-14})$$

C_ε et C_T sont des coefficients de calibration dépendant du guide d'onde et de la longueur d'onde du signal optique [14].

La résolution spatiale des interrogateurs Rayleigh peut atteindre 1 mm pour une mesure sur 30 m de longueur et la portée peut atteindre 2 km environs pour une résolution de mesure centimétrique [14].

b. Principe de réflectométrie

La reconstitution du profil de déformation (ou de température) en utilisant un système de mesure répartie par rétrodiffusion nécessite une distribution spatiale des valeurs de déformations (ou de température) selon leurs positions dans la FO par rapport à la source lumineuse de l'interrogateur. Le **principe de réflectométrie** (méthode de diagnostic se basant sur le principe du radar) est adopté pour la reconstitution de la distribution spatiale du mesurande. On distingue deux techniques de réflectométrie : la réflectométrie temporelle OTDR (Optical Time Domain Reflectometry) et la réflectométrie fréquentielle OFDR (Optical Frequency Domain Reflectometry) [35].

En réflectométrie temporelle, des impulsions optiques sont injectées dans la FO à une longueur d'onde donnée. La détermination de la distance se fait par analyse du temps qui sépare l'émission d'une impulsion du retour d'un premier échos (réflexion due à la présence d'un défaut dans la FO par exemple) [14] [35]. La résolution spatiale des systèmes de mesure OTDR est relativement grande, ce qui limite le nombre d'applications possible pour ces systèmes dans la surveillance des structures de génie civil [33].

En réflectométrie fréquentielle, le signal modulé en intensité est émis avec une fréquence qui varie dans une certaine gamme, par rampes ou de manière continue [36]. Le signal rétrodiffusé est détecté et traité en fonction de la fréquence. La transformée de Fourier de la réponse en fréquence donne alors la réponse impulsionnelle dans le domaine temporel à condition que la plage de fréquences balayée soit suffisamment grande [36]. Cela permet donc de remonter à la position dans la fibre et obtenir le profil de mesure [35].

c. Comparatif des trois types d'interrogation

Les principales caractéristiques de chaque type d'interrogation sont répertoriées dans le Tableau I-3 [33] [34] [37] :

Tableau I-3 : Caractéristiques de chaque type d'interrogation.

	Rayleigh	Brillouin	Raman
Résolution spatiale	1 mm / 10 cm	2 cm / 2 m	1 cm / 17 m
Portée	70 m / 2 km	2 km / 150 km	1 km / 30 km
Principales mesures	-Température -Déformation	-Température -Déformation	-Température
Incertitude	0,1 °C 1 µm/m	1 °C 3 µm/m	0,1 °C

Pour une fibre standard monomode et à une longueur d'onde de 1550 nm, les coefficients de sensibilité à la température et à la déformation pour les diffusions Rayleigh et Brillouin sont regroupés dans le Tableau I-4 [14] [37].

Tableau I-4 : Coefficients de sensibilité à la température et à la déformation d'une FO standard pour les diffusions Rayleigh et Brillouin [38] [39].

	Rayleigh	Brillouin
Sensibilité à la température (C_T)	-1,25 GHz/°C	1,26 MHz/°C
Sensibilité à la déformation (C_ϵ)	-0,15 GHz/(µm/m)	0,06 MHz/(µm/m)
C_T/C_ϵ	8,33	21

Selon les données du Tableau I-4, le rapport C_T/C_ϵ est plus grand lors d'une interrogation avec rétrodiffusion Brillouin. Par conséquent, lors d'une mesure répartie des déformations par capteurs à FO, si les variations des déformations mécaniques ne sont pas très importantes, la prise en compte de l'effet de la température s'avère indispensable notamment lors de l'utilisation d'un interrogateur Brillouin.

I.4.5.3. Décorrélation des effets de la température et de la déformation

Lors d'une mesure ponctuelle ou répartie par capteurs à FO dans le cadre de la surveillance des structures de génie civil, la sollicitation du capteur peut être mécanique, thermique ou thermomécanique. Il en résulte une problématique liée à la séparation des deux effets (thermiques et mécaniques) afin de déduire les déformations et la température séparément à partir du décalage spectral fourni par l'interrogateur de mesure [40].

Plusieurs solutions permettant le découplage des deux effets sont proposées dans la littérature. Le schéma de la Figure I-21 présente ces techniques et des exemples sont détaillés dans ce qui suit.

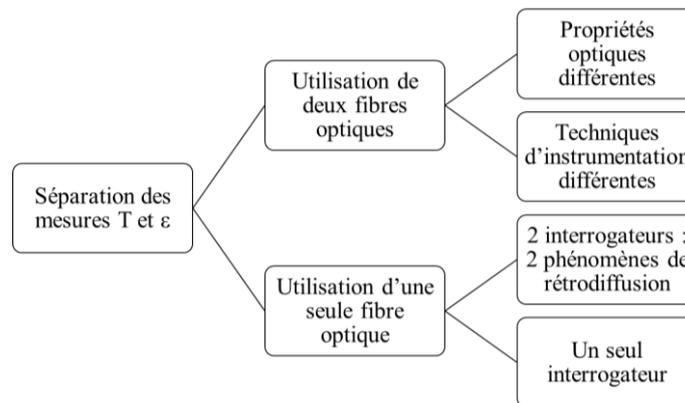


Figure I-21 : Schéma des techniques de séparation des mesures de température et des déformations.

Utilisation de deux FOs

Une fibre libre et une autre solidaire au béton : Le principe de décorrélation se base ici sur l'utilisation d'une fibre découplée des effets mécaniques car insérée librement (c'est-à-dire sans liaison avec la structure instrumentée) dans une gaine appelée « **loose tube** ».

Cette technique a été appliquée dans [41], non pas pour découpler les effets de la température et de la déformation, mais plutôt pour ne mesurer que la température par le capteur à FO. Cette dernière est fixée à une extrémité à l'intérieur d'un tube métallique de diamètre 2,5 mm, et est libre à l'autre extrémité. Le capteur est alors inséré et est utilisé pour mesurer le gradient de température.

Cette technique de séparation déformation/température est aussi adoptée dans [42] où deux types de câbles à FO ont été utilisés. Là encore l'un des câbles est placé de manière lâche dans un tube. La contrainte externe sur le tube n'est alors pas transférée à la FO. Le deuxième type de câble est muni d'un tampon en plastique qui relie le tube à la FO. La contrainte appliquée sur le tube est donc transférée au cœur de la fibre et ce second capteur est ainsi sensible à la déformation.

De façon générale, les résultats de cette technique de séparation sont jugées satisfaisantes par les auteurs [41] et [42], cependant plusieurs questions sont posées concernant la qualité des mesures et l'existence d'une petite sensibilité de la fibre lâche aux effets mécaniques.

Méthode proposée par S. Mamdem [34] : S. Mamdem a proposé une méthode de séparation de la mesure de la température et de la déformation en utilisant deux FOs et un seul interrogateur du signal rétrodiffusé Brillouin. L'idée ici se base sur la résolution d'un système en s'assurant que les deux fibres sont soumises aux mêmes effets thermomécaniques. Le système à résoudre est composé des deux équations relatives aux variations du décalage spectral pour les deux fibres utilisées sous l'effet d'une variation de température et de déformation. Chaque équation fait apparaître les coefficients de calibration correspondant à l'une des deux fibres :

$$\begin{pmatrix} \Delta\nu_1 \\ \Delta\nu_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{T_1} & C_{\varepsilon_1} \\ C_{T_2} & C_{\varepsilon_2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{pmatrix} \quad (\text{I-15})$$

Il est alors possible de déduire séparément la variation de la température ainsi que la déformation suivant :

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta\varepsilon \end{pmatrix} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} C_{\varepsilon_2} & -C_{\varepsilon_1} \\ -C_{T_2} & C_{T_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\nu_1 \\ \Delta\nu_2 \end{pmatrix} \quad (\text{I-16})$$

D est le déterminant de la matrice et vaut donc :

$$D = C_{T_1} C_{\varepsilon_2} - C_{T_2} C_{\varepsilon_1} \quad (\text{I-17})$$

Pour découpler les deux effets avec une grande précision, le déterminant D ne doit pas être faible. Il est alors nécessaire d'utiliser deux fibres avec des rapports de sensibilité à la température et à la déformation différents (les rapports $C_{\varepsilon_i}/C_{T_i}$ pour les deux fibres ne doivent pas être voisins). Un facteur de 2 entre ces deux rapports est suffisant pour assurer une bonne précision des mesurandes. Par contre, la difficulté qui se pose en adoptant cette technique consiste à trouver des fibres dans le commerce avec les rapports de sensibilité souhaités.

Utilisation d'une seule FO

Interrogation couplée de la FO à partir des rétrodiffusions Raman et Brillouin ou Raman et Rayleigh : Comme illustré dans le spectre de diffusion de la silice de la Figure I-20, la diffusion Raman n'est sensible qu'à la température. En revanche, les diffusions Brillouin et Rayleigh sont sensibles à la fois à la déformation et la température. Il est donc possible d'interroger une seule FO dont on traitera le signal rétrodiffusé Raman pour la détermination de la température, puis le signal rétrodiffusé Brillouin ou Rayleigh pour mesurer la déformation en retranchant l'effet de la température déjà calculé. Cette technique de séparation a été mise en œuvre dans l'étude de Alahbabi et al. [43] en utilisant les diffusions Raman et Brillouin (voir la Figure I-21).

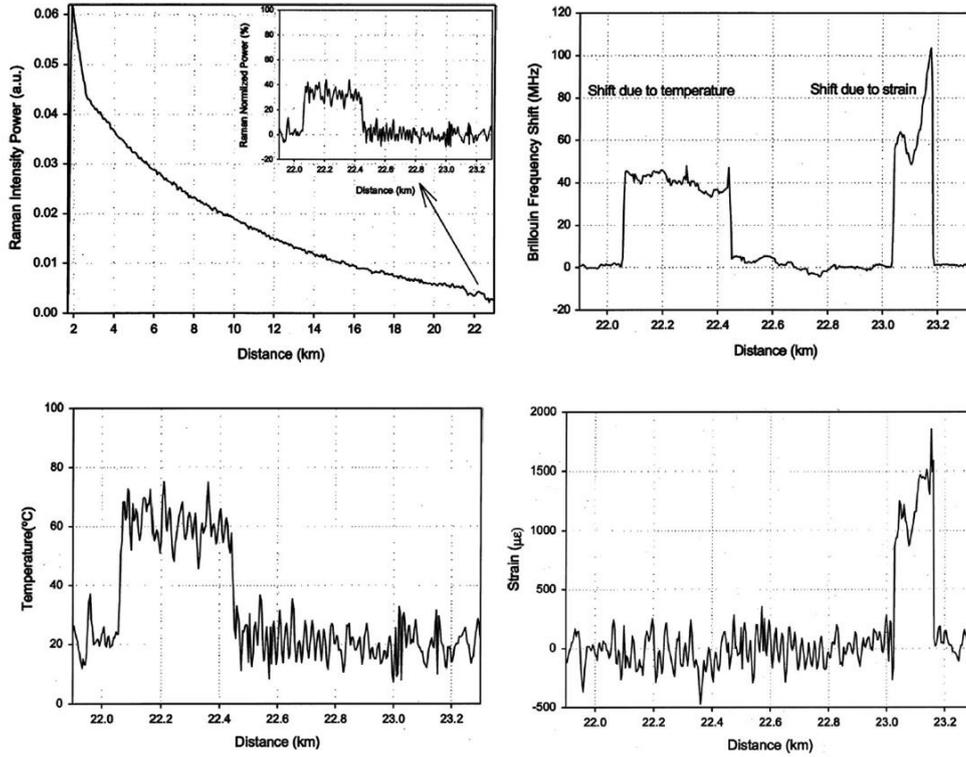


Figure I-22 : Découplage des effets de température et de déformation à partir des mesures Raman et Brillouin [43].

Cette méthode ne semble pas présenter de difficulté particulière outre celle de disposer de deux interrogateurs dont les prix sont assez élevés.

Interrogation couplée de la FO à partir des rétrodiffusions Rayleigh et Brillouin : Il est possible de découpler les mesures thermomécaniques en utilisant une seule fibre et deux interrogateurs l'un lié à la rétrodiffusion Rayleigh et l'autre à la rétrodiffusion Brillouin. Par analogie au système d'équation auparavant proposé (Equation I-15), le nouveau système à résoudre inclut les décalages spectraux Brillouin $\Delta\nu_B$ et Rayleigh $\Delta\nu_R$:

$$\begin{pmatrix} \Delta T \\ \Delta \varepsilon \end{pmatrix} = \frac{1}{D} \begin{pmatrix} -C_\varepsilon^R & C_\varepsilon^B \\ C_T^R & -C_T^B \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\nu_B \\ \Delta\nu_R \end{pmatrix} \quad (\text{I-18})$$

Tel que :

$$D = C_T^B C_\varepsilon^R - C_T^R C_\varepsilon^B \quad (\text{I-19})$$

C_T^B et C_ε^B sont, respectivement, les coefficients de calibration de température et de déformation pour la rétrodiffusion Brillouin et C_T^R et C_ε^R sont, respectivement, les coefficients de calibration de température et de déformation pour la rétrodiffusion Rayleigh pour la longueur d'onde considérée.

On peut alors déduire la température ainsi que la déformation avec une résolution spatiale qui dépend de l'interrogateur Rayleigh. Cette technique est toutefois limitée à la portée de l'interrogateur Rayleigh [34]. Il convient de noter qu'il existe des interrogateurs hybrides à rétrodiffusion Brillouin et Rayleigh permettant la séparation des mesures avec le même appareil [44].

Décorrélation à partir de la rétrodiffusion Brillouin : En théorie, la mesure séparée de la température et de la déformation est possible en utilisant une seule FO et un seul interrogateur de détection du signal rétrodiffusé Brillouin (schéma proposé dans la Figure I-23). Cette technique se base sur la mesure de deux paramètres, notamment gain / décalage Brillouin ou encore, décalage Brillouin / largeur du spectre, ou même les décalages Brillouin de deux pics du spectre. L'inconvénient de cette technique est le manque de précision et la grande marge d'erreur relevée (voir le Tableau I-5 qui regroupe les incertitudes induites lors de l'utilisation de cette technique).

Pour remédier à ce problème de précision, Bao *et al.* [45] ainsi que Yu *et al.* [46] se sont concentrés sur des améliorations de cette technique en utilisant des fibres à maintien de polarisation (voir la Figure I-16). Ce maintien de polarisation permet une meilleure précision car les intensités des signaux rétrodiffusés Brillouin restent maximales en absence de variation de la polarisation [46].

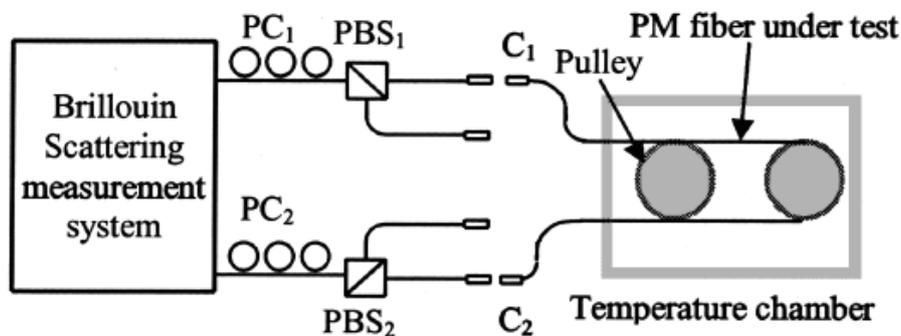


Figure I-23 : Installation mettant en œuvre des fibres à maintien de polarisation [46] pour mesurer la température et la déformation à partir de la rétrodiffusion Brillouin.

Tableau I-5 : Tableau des incertitudes (F fréquence - P Puissance - B bande passante – rms : Root mean square) [45].

Property	PANDA			Bow Tie			Tiger
	F-P	F-B	P-B	F-P	F-B	P-B	F-P
Uncertainty of temperature (°C)	8	2	38	4	3	38	16
Uncertainty of strain ($\mu\epsilon$)	153	39	135	237	126	195	598
Maximum error of ΔT (°C)	10	4	58	12	7	137	78
Maximum error of $\Delta\epsilon$ ($\mu\epsilon$)	331	82	249	741	490	1096	1308
rms (ΔT) (°C)	2	2	40	8	4	73	38
rms ($\Delta\epsilon$) ($\mu\epsilon$)	221	43	149	414	152	567	926

I.4.5.4. Discussion

Lors de l'instrumentation d'un ouvrage par capteurs à FO, deux éléments prépondérants sont à prendre en considération. Le premier élément est la précision de la mesure recherchée et donc la marge d'erreur tolérée. Ces caractéristiques de la mesure dépendent de la portée de la mesure ainsi que de l'ordre de grandeur du mesurande (petites ou grandes déformations, petites ou grandes variations de la température). Le coût de l'instrumentation (lié principalement à la difficulté de mise en œuvre et au prix de l'interrogateur) constitue le deuxième élément à évaluer. Il est à noter que malgré le faible coût de la FO, certains interrogateurs coûtent très cher

(un interrogateur basé sur l'interprétation de la rétrodiffusion Rayleigh pour mesurer la déformation et la température coûte actuellement autour 100 keuros). De plus, une technique de séparation des effets de température et de déformation utilisant plus qu'un interrogateur augmente alors notablement le coût de l'instrumentation, ce qui élimine dans certaines situations l'intérêt de remplacer les méthodes traditionnelles par la technologie des capteurs à FO.

I.5. Transfert d'effort de la structure hôte vers la fibre en silice et effet de l'interrogateur

L'instrumentation à grande échelle d'un ouvrage en BA ne peut être effectuée par une fibre uniquement couverte de son revêtement primaire car celui-ci ne permet pas de protéger efficacement la fibre des agents agressifs (milieu cimentaire fortement basique ou environnement extérieur) sur le long terme, ni des endommagements mécaniques potentiellement induits par les manipulations liées à la mise en place ou à une déformation trop importante de la structure hôte. Par conséquent, l'instrumentation est généralement réalisée avec des câbles à FO munis de gaines de protection chimique et de renforcements.

Cependant, la détermination des contraintes et des déformations agissant sur une structure à partir des mesures effectuées par une FO, implique d'analyser précisément comment et pourquoi le lieu de la mesure, c'est-à-dire le cœur de silice, se déforme. En effet, les différentes parties qui constituent un câble à FO, influencent le transfert d'effort de la structure vers le cœur de la fibre. On parle alors de la fonction de transfert mécanique (FTM) structure/fibre. La connaissance de cette FTM est d'un intérêt crucial dans la mesure puisque le lieu de la mesure n'est pas le lieu exact où se situe le mesurande (c'est bien la déformation de la structure qui, in fine, doit être évaluée et non la déformation de la FO).

L'objet des paragraphes suivants est donc de présenter un état de l'art sur le transfert d'effort de la structure hôte vers la fibre en silice du capteur, noyé dans le béton ou collé sur sa surface. On s'intéressera particulièrement à l'évaluation de la réponse de la FO lors de l'apparition d'une fissure dans la structure hôte et qui traverse le parcours du capteur.

Les premières publications sur la FTM des câbles à FO s'intéressaient à l'établissement d'une formule analytique permettant de lier les contraintes et les déformations dans la fibre à celles présentes dans la structure hôte. Des modèles aux éléments finis ont de plus été développés dans ces études afin de modéliser les différents cas d'instrumentation avec plus de précision et valider les modèles théoriques. Dans la majorité des publications, l'étape finale consiste à confirmer expérimentalement la pertinence des modèles analytiques et numériques et mettre en évidence les facteurs influençant le transfert d'effort de la structure vers le cœur de la FO.

À la suite de cette revue bibliographique sur la FTM, un paragraphe traitera l'influence des paramètres intrinsèques de l'interrogateur sur l'interprétation de la mesure.

I.5.1. Approches théoriques analytiques

I.5.1.1. Cas de la FO noyée dans le béton

Dans [47], Ansari et Libo ont proposé un premier modèle analytique du transfert d'effort d'une FO noyée dans un matériau hôte en se basant sur le schéma de la Figure I-24 et en considérant les hypothèses idéalisées suivantes :

- Tous les matériaux présentent un comportement élastique linéaire ;
- L'adhérence est parfaite aux différentes interfaces ;
- Les propriétés mécaniques du cœur et de la gaine optique sont les mêmes et, pour simplifier, on les appelle collectivement « le noyau ».

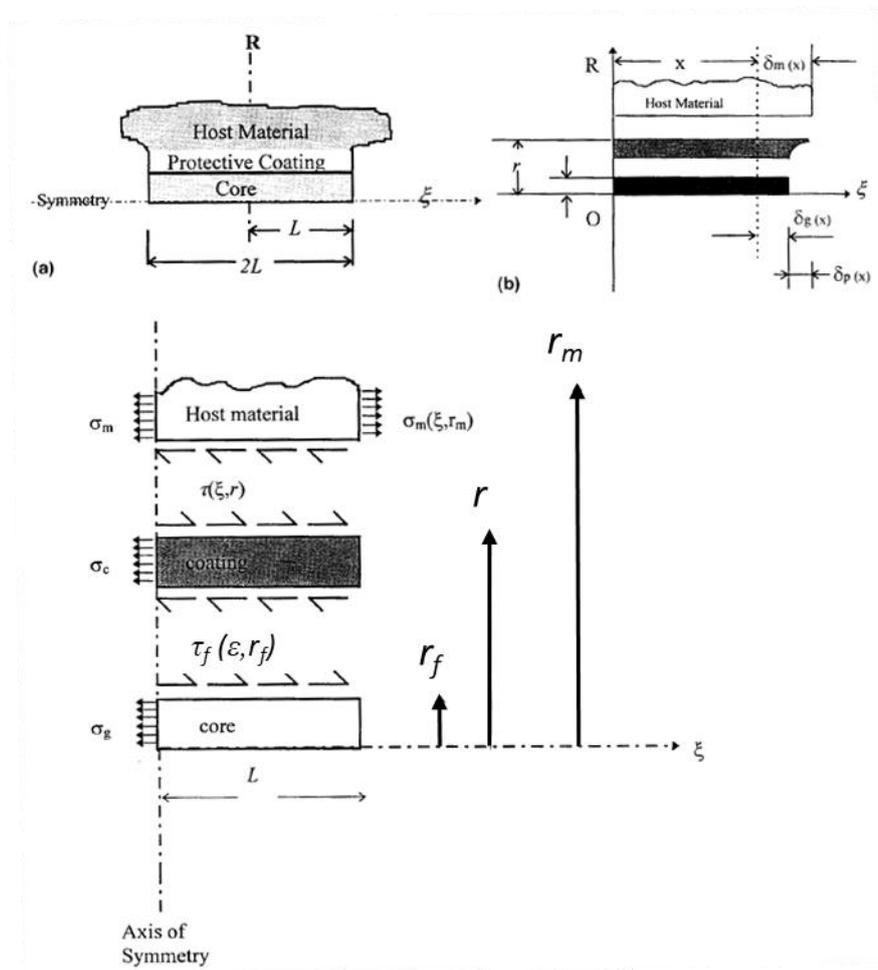


Figure I-24 : Schéma théorique du transfert d'effort dans le modèle analytique d'Ansari et Libo [47].

A partir du schéma de la Figure I-24, il est possible de déduire la relation déduite qui lie la déformation du noyau de la fibre (ε_f) à celle du matériau hôte (ε_m), soit :

$$\varepsilon_f(x) = \varepsilon_m \left[1 - \frac{\sinh(kx)}{\sinh(kL)} \right] \quad (\text{I-20})$$

\sinh est le sinus hyperbolique et le paramètre k est appelé « **strain-lag parameter** », il dépend des propriétés mécaniques des matériaux qui constituent la fibre tel que :

$$k^2 = \frac{2G_p}{r_f^2 E_f \ln\left(\frac{r_m}{r_f}\right)} \quad (\text{I-21})$$

où

r_m et r_f sont, respectivement, le rayon du noyau de la fibre et le rayon du matériau hôte environnant ;

E_f et G_p sont respectivement le module d'élasticité du noyau de la fibre et module de compression du revêtement primaire ;

L est la demi-longueur de la fibre et x la position considérée le long de l'axe de la fibre, qui varie alors de 0 à L .

Dans [48], Li *et al.* ont proposé une amélioration du modèle de transfert d'effort en intégrant dans les hypothèses de calcul l'effet de la présence de la FO sur le comportement du matériau hôte. Selon la troisième loi de Newton, la fibre réagit à l'effort transmit par le matériau hôte et applique en réaction un effort sur le volume qui l'entoure. Par conséquent, l'effort total subit par le matériau hôte situé autour de la fibre est légèrement inférieur à l'effort que subirait ce dernier sans la présence de la FO, du fait de la déformation opposée causée par la fibre. Dans cette modélisation, les paramètres mécaniques du matériau hôte doivent être pris en considération. Le schéma du modèle analytique est illustré dans la Figure I-25.

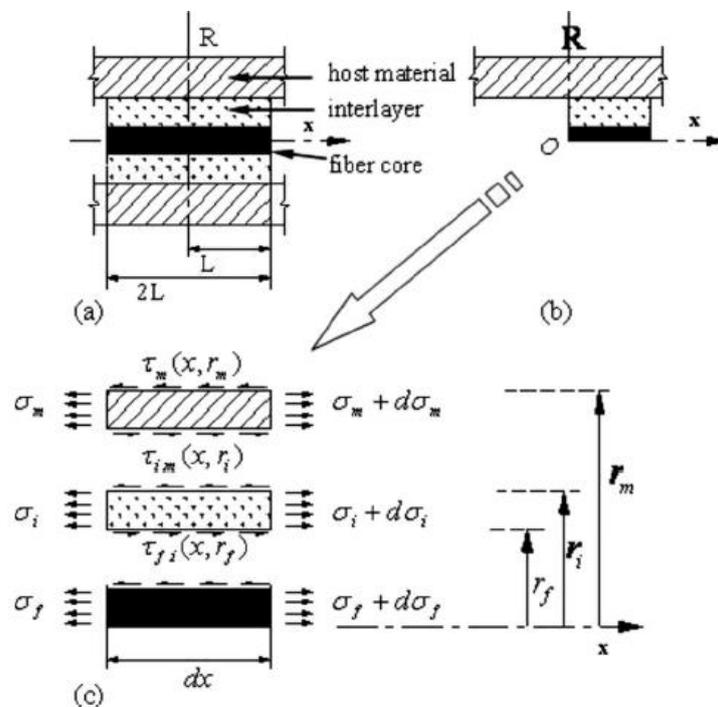


Figure I-25 : Schéma théorique du transfert d'effort pris en compte dans le modèle analytique de Li *et al.* [48].

Sous ces nouvelles hypothèses, l'Equation I-20 devient :

$$\varepsilon_f(x) = \varepsilon_m \left[1 - \frac{\cosh(kx)}{\cosh(kL)} \right] \quad (\text{I-22})$$

\cosh est le cosinus hyperbolique et k s'écrit suivant l'Equation I-23 :

$$k^2 = \frac{1}{\frac{1}{2} r_f^2 E_f \left\{ \frac{1}{G_i} \ln \left(\frac{r_i}{r_f} \right) + \frac{1}{G_m} \left[\frac{r_m^2}{r_m^2 - r_i^2} \ln \left(\frac{r_m}{r_i} \right) - \frac{1}{2} \right] \right\}} \quad (\text{I-23})$$

r_i est le rayon externe de la FO (noyau + revêtement primaire).

Dans le cas où le câble serait constitué de plusieurs couches de revêtements, les mêmes auteurs ont développé une expression du paramètre k qui tient explicitement compte des propriétés mécaniques des différentes couches, selon :

$$k^2 = \frac{1}{\frac{1}{2} r_f^2 E_f \left\{ \frac{1}{G_1} \ln \left(\frac{r_1}{r_f} \right) + \sum_{j=2}^n \frac{1}{G_j} \ln \left(\frac{r_j}{r_{j-1}} \right) + \frac{1}{G_m} \left[\frac{r_m^2}{r_m^2 - r_n^2} \ln \left(\frac{r_m}{r_n} \right) - \frac{1}{2} \right] \right\}} \quad (\text{I-24})$$

Les indices f et m sont liés respectivement, au noyau de la fibre et au matériau hôte.

r_1 est le rayon de la première couche de revêtement de la fibre et r_j (pour j variant de 2 à n) celui de la j^{eme} couche de revêtement de la FO.

D'autres modèles ont ensuite été développés par différents auteurs pour décrire le transfert d'effort du matériau hôte vers la fibre en silice. On peut citer par exemple le modèle proposé par Wang et Zhou dans [49] issu du modèle Li *et al.* [48] et propose la relation suivante :

$$\varepsilon_f(x) = \varepsilon_m \lambda_1 \left[1 - \frac{\cosh(\lambda_2 x)}{\cosh(\lambda_2 L)} \right] \quad (\text{I-25})$$

dans laquelle les deux paramètres λ_1 et λ_2 sont relativement compliqués à calculer. Ils s'expriment en fonction des coefficients d'adhérence des interfaces tout en intégrant l'hypothèse de Goodman [50] pour décrire l'état de contact entre les différentes couches tel que schématisé sur la Figure I-25.

Dans [49] Wang et Z. Zhou ont dressé un bilan des modèles de la littérature dont l'équation de transfert inclut des fonctions exponentielles plutôt que des fonctions hyperboliques, notamment le modèle de LeBlanc [51] et celui de Feng *et al.* [52]. Les différences entre ces modèles proviennent généralement des hypothèses relatives au comportement des matériaux et des interfaces ainsi qu'aux conditions aux limites.

I.5.1.2. Cas de la FO collée en surface

Dans le cas d'une fibre collée en surface (voir par exemple le schéma de la Figure I-26), le nombre de symétries diminue et le calcul analytique devient plus compliqué. Dans [53], Kim *et al.* ont cependant réussi à développer une formule de transfert d'effort pour une FO collée. Toutefois, la complexité de cette dernière nécessite un calculateur numérique pour être exploitée.

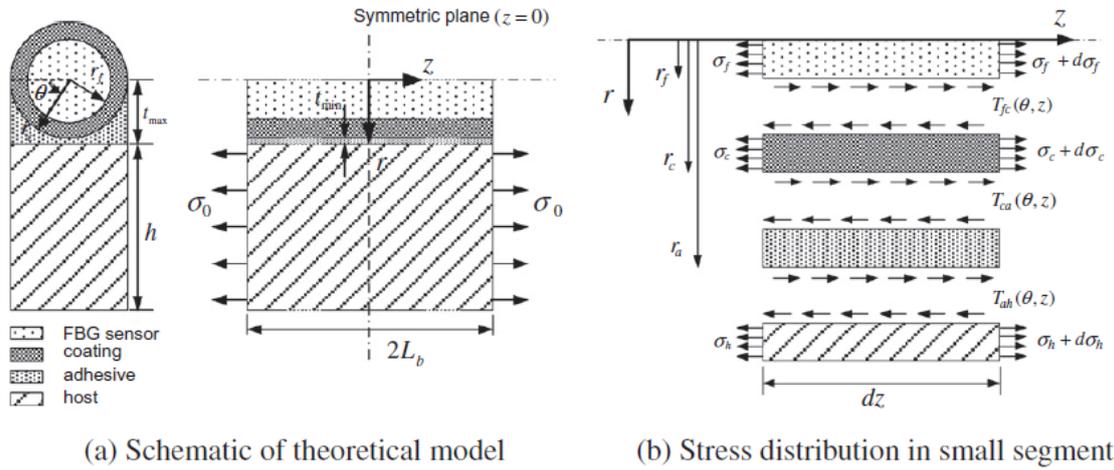


Figure I-26 : Schéma du principe de transfert d’effort vers une fibre collée en surface considéré dans [53].

I.5.1.3. Cas de la FO située au droit d’une fissure

En complément de la mesure des déformations de la surface ou du volume instrumenté, les capteurs à FO permettent la détection des fissures du matériau hôte avant même qu’elles ne soient visibles à l’œil nu (voir le paragraphe I.12.1). Une fissure dans le béton, qui constitue une discontinuité de la matière, se présente dans la modélisation comme une fonction de Dirac qui génère un pic de déformation dans la fibre, précisément au droit de la fissure. Une méthode de détermination de la FTM liant, de manière analytique, les déformations dans la fibre à l’ouverture de la fissure est alors nécessaire pour connaître l’amplitude de l’ouverture de celle-ci. Une approche analytique a par exemple été adoptée dans les travaux d’Ansari et Libo [47] pour le cas d’une FO collée en surface du matériau hôte. Hénault [14] s’est basé sur cette étude pour proposer un modèle analytique de la FTM suivant l’Equation I-26 :

$$\varepsilon = ke^{-k|x|} \tag{I-26}$$

Le paramètre k correspond au « strain-lag parameter » présenté précédemment, il s’exprime en fonction des paramètres mécaniques et géométriques des différents constituants de la FO et du béton ainsi que des propriétés des différentes interfaces.

Par cette approche, Hénault [14] et Bassil [54] ont pu corréliser l’aire de la FTM à l’ouverture de la fissure. La même forme de fonction est utilisée dans les travaux de Billon *et al.* [55] pour déterminer le paramètre k d’un câble à FO ainsi que la longueur d’ancrage $L\tau$ qui correspond dans les travaux de ces auteurs à la longueur permettant le transfert de 97 % de contraintes du béton vers la FO en silice.

I.5.1.4. Exploitation des modélisations analytiques

Pour mettre en évidence le transfert des déformations du béton vers la fibre en silice sans prendre en considération la variation de la déformation tout au long du matériau hôte, différents auteurs [47] [48] [56] ont utilisé un facteur nommé taux de transfert de déformation noté α pour définir le pourcentage de l’effort transmis dans chaque région de la fibre. Ce facteur s’écrit suivant l’Equation I-27.

$$\alpha(x) = \frac{\varepsilon_f(x)}{\varepsilon_m(x)} \quad (\text{I-27})$$

A partir des Equations I-20, I-22 et I-25, on peut conclure que le taux de transfert α est maximal au milieu de la FO, noyée ou collée (voir l'exemple présenté dans la Figure I-27).

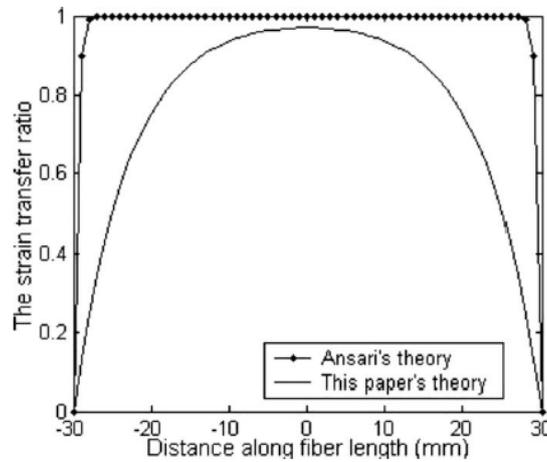


Figure I-27 : Comparaison entre les taux de transfert de déformation du modèle proposé par Li *et al.* [48] avec celui d'Ansari et Libo [47].

I.5.2. Approches numériques (modélisations aux éléments finis)

Avec la variété des géométries des câbles à FO disponibles dans le commerce et disposants pour certains de peu de symétries, notamment du fait de la technique de mise en œuvre (cas d'un câble collé en parement par exemple), il est délicat de déterminer la FTM au câble en place en adoptant une approche analytique. De plus, l'utilisation des modèles déjà cités, du fait de l'adoption de certaines hypothèses simplificatrices lors de leur formulation, peut entraîner des erreurs dont l'importance dépend le plus souvent de l'ordre de grandeur des variations du mesurande.

Pour remédier à ces problèmes, une solution pragmatique consiste à utiliser un logiciel de calcul aux éléments finis (ABAQUS, Cast3m, Comsol, ANSYS...) pour générer un modèle du problème étudié. Ces logiciels permettent en effet de modéliser simplement les géométries relatives aux différentes techniques d'instrumentation impliquant le type de liaison du câble avec la structure et les différents types de capteurs à FO, eux-mêmes de différentes formes, fabriqués avec une variété de matériaux et du nombre de couches de protection. Un exemple de maillage d'un câble à FO collé en surface du béton [57] est illustré dans la Figure I-28.

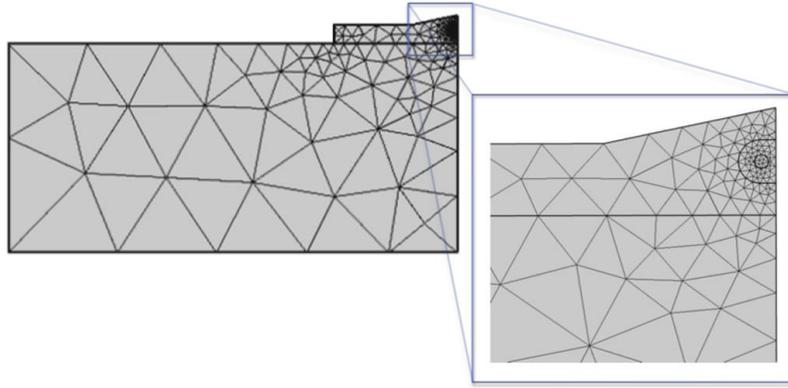


Figure I-28 : Exemple de maillage pour un capteur du fabricant NEUBREX collé en surface d'après Billon [57].

I.5.3. Quelques exemples de validations expérimentales

Pour tout type de fibre (ou de câble à FO) et pour toute technique de mise en œuvre de la mesure par FO, le développement spécifique d'une FTM, par approche analytique et/ou numérique, nécessite une validation expérimentale. De façon générale, le protocole d'essai lié à cette validation consiste à installer le capteur à FO ainsi qu'une mesure de référence (généralement des jauges de déformation) dans le matériau hôte (ou à sa surface), et à comparer les mesures effectuées par ces différents capteurs. Dans l'exemple présenté dans la Figure I-29, les jauges de déformation mesurent directement la déformation du matériau hôte (acier pour le premier essai et verre organique pour le deuxième essai), du moins si on admet l'hypothèse d'un contact parfait entre la jauge et le support (hypothèse généralement acceptée car la jauge est collée avec une colle rigide dont l'épaisseur est très faible). Par contre, les capteurs à FO mesurent les déformations dans la fibre en silice dont le contact avec la structure instrumentée est moins intime du fait des différentes couches de protection de la fibre. La comparaison des mesures de jauge avec celles obtenues par les capteurs à FO permet de calculer le coefficient de transfert des efforts tout au long de la FO, d'améliorer puis éventuellement de valider le modèle numérique ou analytique proposé lorsque les différents résultats coïncident.

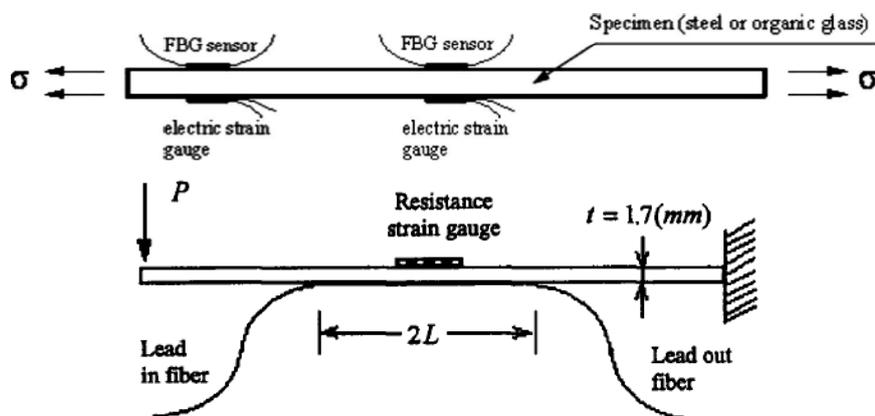


Figure I-29 : Exemples d'instrumentation d'un échantillon pour la validation expérimentale d'une FTM d'après [48].

I.5.4. Facteurs influençant le transfert des efforts mécaniques

Lorsque le modèle analytique ou numérique a été validé expérimentalement, il devient possible de l'appliquer à un cas test d'instrumentation tout en faisant varier la valeur numérique de quelques paramètres d'entrée du modèle (longueur de contact fibre/matériau hôte, propriétés mécaniques et géométriques des matériaux intermédiaires, propriétés aux interfaces...). Une telle étude paramétrique permet alors de dévoiler l'effet de la variation de chaque paramètre sur le mécanisme de transfert d'effort et d'identifier les paramètres se révélant les plus influents dans le résultat du calcul. Ces paramètres nécessiteront une attention particulière lors de la détermination expérimentale de leur valeur. On cite quelques exemples d'effets de la variation de quelques paramètres :

-L'augmentation de **la longueur de la fibre L** affecte positivement le transfert d'effort vers le cœur de la fibre. Cela apparaît dans les résultats des graphes de la Figure I-30 ;

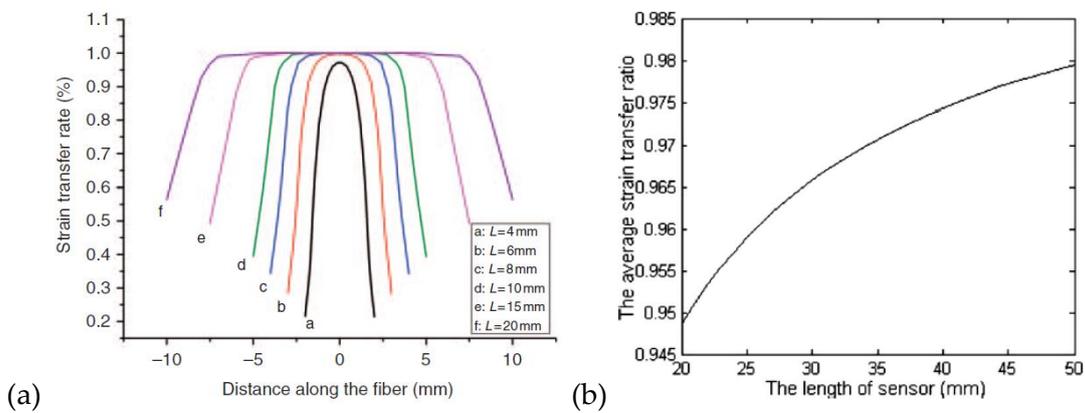


Figure I-30 : (a) Effets de la longueur de la fibre sur la déformation normalisée [58] ; (b) Effets de la longueur de la fibre sur le taux du transfert de déformation [48].

-L'augmentation des **épaisseurs des couches de revêtements ou de l'adhésif** affecte négativement le transfert d'effort. L'influence de l'épaisseur de l'adhésif est par exemple démontrée dans les graphes de la Figure I-31 ;

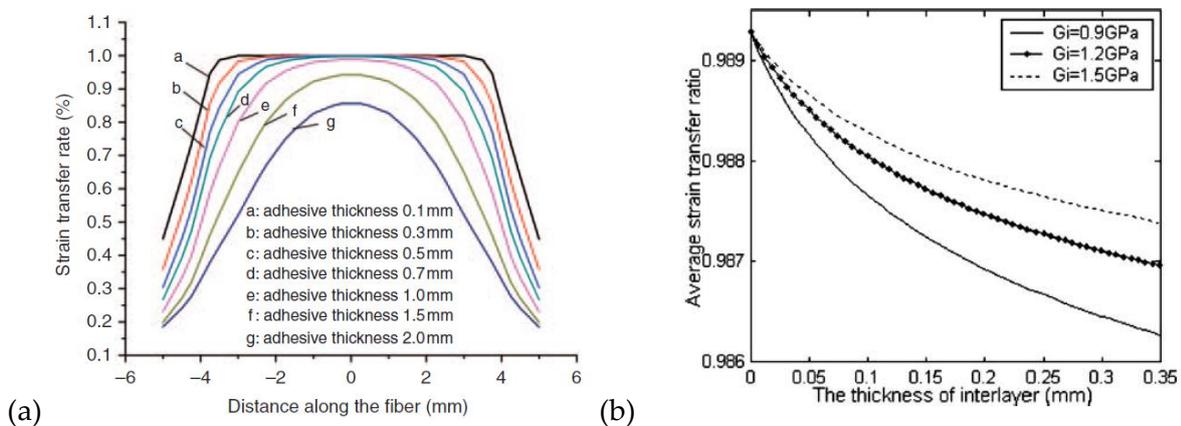


Figure I-31 : (a) Taux de transfert en fonction de l'épaisseur de l'adhésif [58] ; (b) Moyenne du taux de transfert en fonction de l'épaisseur de l'adhésif et de sa rigidité [48].

-L'augmentation du **module d'Young** des différentes couches du câble à FO ou de la couche de colle (voir Figure I-31-b) ainsi que les **modules de cisaillement** (y compris celui du matériau hôte) affecte positivement le transfert de l'effort [48] [58]. Par contre, une augmentation du coefficient de Poisson des couches des revêtements affecte négativement le transfert de l'effort [58].

I.5.5. Effets de l'interrogateur

D'après la synthèse bibliographique proposée précédemment, la déformation au sein de la FO est différente de celle du matériau hôte présent au voisinage immédiat de la fibre. Ainsi, la caractérisation du transfert d'effort mécanique est indispensable pour suivre l'évolution des déformations dans la structure. Dans toutes les situations déjà détaillées, on suppose que le profil de déformation fourni par l'interrogateur correspond exactement au profil de déformation de la fibre en silice, ce qui n'est pas toujours vrai. En effet, l'interrogateur dispose de propriétés intrinsèques qui influencent les mesures.

Il convient donc d'écrire la relation entre les différentes déformations suivant [14] :

$$\varepsilon_{mesuré} = \varepsilon_{matériau} \otimes FTM \otimes FI \quad (I-28)$$

La fonction de l'interrogateur (FI) dépend généralement du pas de mesure ainsi que de la nature du profil de déformation dans le matériau hôte. Deux cas sont alors à considérer :

-Si i) la longueur d'ancrage (la distance à partir de laquelle la contrainte de cisaillement entre la fibre et le matériau devient négligeable) de la fibre est très grande par rapport au pas de mesure de l'interrogateur, et si ii) la variation de la déformation sur une longueur égale au pas de mesure est très petite, alors l'effet de l'interrogateur est négligeable, et la relation précédente devient :

$$\varepsilon_{mesuré} = \varepsilon_{fibre} = \varepsilon_{matériau} \otimes FTM \quad (I-29)$$

Ce cas concerne les interrogateurs dotés d'un petit pas de mesure, de l'ordre du centimètre ou du millimètre (interrogation par diffusion Rayleigh par exemple) ;

-Par contre, si le pas de mesure de l'interrogateur est du même ordre de grandeur que la longueur d'ancrage de la fibre, et que l'on mesure des phénomènes de concentration de contraintes (grand gradient de déformation sur une petite longueur) ou des discontinuités (ouverture des fissures...), le profil des déformations dans la fibre est supposé similaire à celui dans le béton (la contrainte subie dans le matériau a été entièrement diffusée sur la longueur de fibre utilisée dans un pas de mesure). Le profil des mesures fourni par l'interrogateur est le résultat de la convolution des déformations dans le matériau hôte par une fonction de l'interrogateur. Il vient alors :

$$\varepsilon_{mesuré} = \varepsilon_{matériau} \otimes FI \quad (I-30)$$

Plusieurs théories visant à approcher la fonction de l'interrogateur sont présentées par Iten dans [42]. La connaissance de la fonction de l'interrogateur permet de revenir au profil original de la structure par déconvolution. La Figure I-32 présente le profil de déformation mesuré attendu

(ε_M) pour un profil de déformation dans la FO (ε_T) sous forme d'une fonction Heaviside (H), mettant en valeur l'effet de l'interrogateur.

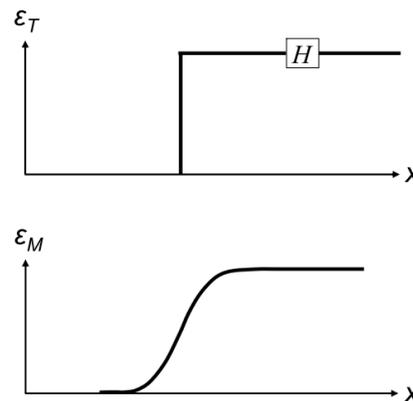


Figure I-32 : Mesure attendue de l'interrogateur (ε_M) pour un profil de déformation (ε_T) dans la FO [42].

I.6. Caractérisation du comportement mécanique des FOs

I.6.1. Introduction

Les FOs standards disponibles dans le commerce sont constituées d'un noyau (cœur + gaine) en silice protégé par un revêtement primaire. Le module élastique du revêtement étant très inférieur à celui de la silice, c'est le noyau de silice qui reprend l'essentiel de l'effort lorsque la FO est sollicitée mécaniquement. Pour assurer la durabilité et la fiabilité des mesures d'une FO, il est nécessaire de connaître sa résistance aux diverses sollicitations et de comprendre finement les mécanismes de dégradation qu'induisent ces sollicitations. Pour ce faire, il existe plusieurs techniques expérimentales permettant d'évaluer la résistance d'une FO. Les paragraphes suivants proposent une description sommaire des principaux essais pratiqués, en débutant par des essais purement mécaniques (traction, flexion par enroulement, flexion 2 points). Les résultats de ces essais permettent de proposer des lois de comportement non linéaire des FOs.

I.6.2. Essai de traction uniaxiale d'une FO

Les FOs sont généralement mises en place sur l'ouvrage de telle façon qu'elles fonctionnent en traction. Pour juger de leur performance vis-à-vis d'une telle sollicitation, les FOs peuvent être soumises à un essai de traction uniaxiale. Cet essai est largement utilisé car simple à concevoir et jugé représentatif du fonctionnement mécanique du capteur sur ouvrage. Il consiste à fixer les deux extrémités d'un échantillon de FO dans les mors de la presse et à tirer sur l'une de ses extrémités alors que l'autre est bloquée. La fibre sous traction uniaxiale subit un état de contrainte uniforme dans sa partie courante (c'est-à-dire loin des extrémités pincées par les mors de la presse). Pour fixer des échantillons courts de fibres aux extrémités et éviter une défaillance préférentielle à la sortie des mors, plusieurs méthodes sont proposées par Matthewson dans [59] (voir aussi la Figure I-33).

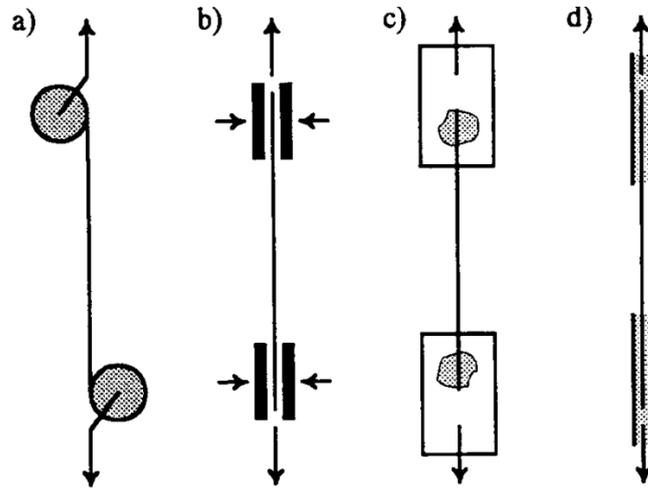


Figure I-33 : Méthodes courantes de fixation des extrémités d'une FO lors d'un essai de traction uniaxiale (a = utilisation de fixations cylindriques ; b = utilisation de poignées pneumatiques en caoutchouc ; c et d = FO collée sur des plaques) [59].

I.6.3. Essai de fluage en flexion de FO par enroulement autour d'un mandrin

L'essai de flexion uniforme d'une FO en utilisant un mandrin est illustré sur la Figure I-34. Il consiste à enrouler la fibre autour du mandrin, soumettant ainsi la FO à une courbure uniforme. La contrainte de traction maximale (σ) dans la fibre est donnée par :

$$\sigma = E \frac{d_f}{d_m + d_c} \quad (\text{I-31})$$

E : module d'Young de la fibre.

d_f : diamètre du mandrin.

d_m : diamètre de la fibre sans revêtement.

d_c : diamètre de la fibre avec revêtement.

Le maintien de cette contrainte, sur une longue durée, permet de réaliser un essai simple de fluage en flexion.

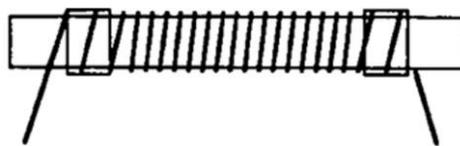


Figure I-34 : Fluage en flexion par mandrin [59].

I.6.4. Essai de flexion 2 points mené sur une FO

L'essai de flexion 2 points sur des échantillons de FOs a été utilisé par Evano *et al.* [60] pour mesurer la résistance à la flexion de ces dernières. Le schéma de l'essai est présenté dans la Figure I-35.

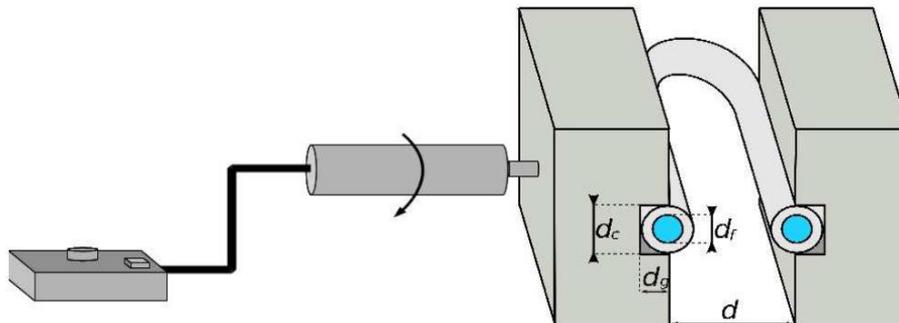


Figure I-35 : Montage expérimental de l'essai de flexion 2 points [60].

Le montage expérimental utilise une plaque fixe et une plaque mobile avec des rainures pour la fixation de la fibre. La distance entre les plaques est ensuite réduite progressivement jusqu'à la rupture de l'échantillon. La valeur de la résistance en flexion est alors calculée suivant l'Equation I-32 :

$$\sigma = 1,198 \left(\frac{E \cdot d_f}{d - d_c + 2d_g} \right) \quad (\text{I-32})$$

E : module d'Young de la fibre.

d : distance entre les plaques.

d_c : diamètre de la fibre avec revêtement.

d_g : profondeur totale des deux rainures.

d_f : diamètre de la fibre en verre.

I.6.5. Quelques lois de comportement d'une FO

Lors d'un essai de traction, un chargement est appliqué sur l'échantillon de fibre. Quand l'échantillon rompt, on déduit directement la valeur de la résistance à la rupture de la fibre à partir de la force imposée par l'appareil et le diamètre de la fibre. Cependant, durant l'essai de traction et bien avant la rupture, il est possible de suivre la déformation dans la fibre en fonction de la charge appliquée et de déduire donc une loi de comportement de la fibre, faisant intervenir le module d'Young de la silice à déformation nulle E_0 . La relation contrainte/déformation étant non linéaire, plusieurs auteurs ont proposé des modèles de comportement adaptés dont on cite quelques exemples dans Tableau I-6.

Tableau I-6 : Modèles non linéaires de la loi contrainte déformation d'une FO en silice.

Auteurs	Modèle	Valeurs des constantes
-Mallinder et Proctor 1964 [61]	$\sigma = E_0 \varepsilon \left(1 + \frac{\alpha' \varepsilon}{2}\right)$	$E_0 = 72$ GPa module d'Young de la silice $\alpha' = 0,75\alpha$ $\alpha = 6$
-Krause <i>et al.</i> 1979 [62]	$\sigma = E_0 (1 + \alpha\varepsilon + \beta\varepsilon^2)$	$E_0 = 72$ GPa module d'Young de la silice $\alpha = 3,2$ et $\beta = 8,48$ en dessous de 6 % de déformation
-El Abdi <i>et al.</i> 2010 [63]	$\sigma = E_0 \varepsilon \left(1 + \frac{\alpha'' \varepsilon}{2}\right)$	$E_0 = 72$ GPa module d'Young de la silice $\alpha'' = 0,75\alpha + 0,25$ $\alpha = 6$

I.7. Durabilité des capteurs à FO dans un environnement non spécifique au génie-civil

I.7.1. Introduction

La durée de vie d'une fibre est liée à la nature et à l'intensité des sollicitations subies par le capteur et à sa résistance vis-à-vis de ces sollicitations. Ces deux facteurs sont d'une grande importance dans la conception d'une stratégie de mesure voulue pérenne.

Dans une première partie de ce paragraphe, nous présentons une approche d'étude apparue dans les années 80, incluant des travaux expérimentaux et des analyses théoriques, et qui s'intéresse à la durabilité des FOs standards pouvant être utilisées dans le domaine des télécommunications ou en tant que capteurs. Nous parcourons donc quelques modèles de dégradation mécanique de la fibre en silice dont certains prennent en compte le rôle de la température et la présence d'humidité, permettant ainsi une première évaluation de la durée de vie des FOs soumises à certaines sollicitations couplées.

Dans la deuxième partie de ce paragraphe, nous détaillons la méthode d'estimation de la durée de vie des FOs par approche probabiliste qui se base sur les modèles de dégradations présentés dans la première partie. Nous présentons également quelques exemples d'études expérimentales utilisant cette approche.

I.7.2. Modélisation de la dégradation d'une FO en silice sollicitée en fluage

Lors d'un essai mécanique destructif mené sur un échantillon de FO, en flexion ou en traction par exemple, la rupture de la fibre se produit au niveau d'une unique fissure alors que plusieurs autres fissures ont été générées pendant l'essai [64]. Pour estimer la durée de vie d'une FO, il est primordial d'étudier l'apparition et l'évolution de ces fissures durant le chargement. Dans cette optique, plusieurs auteurs ont proposé des modèles analytiques. Nous citons dans ce qui suit les modèles les plus utilisés dans la littérature.

I.7.2.1. Modèle de dégradation basé sur une loi de puissance

Dans plusieurs études (par exemple [64] [65]), les auteurs ont utilisé une loi de puissance pour décrire la cinétique de croissance des fissures dans la fibre en silice soumise à une sollicitation mécanique. Cette loi s'écrit suivant l'Equation I-33 :

$$\frac{da}{dt} = AK_I^n \quad (\text{I-33})$$

Avec :

$$K_I = Y\sigma a^{1/2} \quad (\text{I-34})$$

$\frac{da}{dt}$: vitesse de propagation de la fissure de longueur $a(t)$;

K_I : facteur d'intensité de contrainte ;

n : paramètre de fatigue ;

A : paramètre d'ajustement ;

Y : paramètre sans unité décrivant la forme de la fissure ;

σ : contrainte appliquée ;

K_I est une mesure de l'intensité du champ de contrainte à l'extrémité de la fissure. Quand elle dépasse une valeur critique K_{IC} , la résistance intrinsèque du matériau est dépassée et une défaillance se produit dans la fibre en silice [64].

Pour un essai statique sous contrainte σ maintenue constante (fluage), la durée de vie t_f d'un échantillon de fibre s'écrit sous la forme suivante (pour des valeurs de n supérieures à 10, ce qui est généralement trouvé expérimentalement [66]) :

$$\ln(t_f) = -n \cdot \ln \sigma + \ln(BS_i^{n-2}) \quad (\text{I-35})$$

S_i est la résistance initiale de la FO avant l'essai et le paramètre B est exprimé suivant l'Equation suivante :

$$B = \frac{2 \cdot K_{IC}^{2-n}}{A \cdot Y^2(n-2)} \quad (\text{I-36})$$

L'expression de t_f change dans le cas d'un essai dynamique.

I.7.2.2. Modèle de dégradation basé sur une loi exponentielle

Muraoka et Abe dans [67], proposent de modifier le modèle précédent (loi de puissance) en faisant varier la valeur du paramètre de fatigue n en fonction de la vitesse de croissance des fissures ($\frac{da}{dt}$). Ainsi :

$$n = 20,3 \text{ si } 10^{-13} < \frac{da}{dt} < 10^{-10},$$

$$\text{et } n = 39,7 \text{ si } 10^{-8} < \frac{da}{dt} < 10^{-5}.$$

De plus, ces auteurs indiquent que la valeur du paramètre n dépend aussi de la dimension des fissures.

Afin de mieux décrire la vitesse de croissance des fissures Muraoka et Abe [67] ainsi que Michalske *et al.* [68] ont opté pour un modèle basé sur une loi exponentielle qui s'exprime selon l'Equation I-37 :

$$\frac{da}{dt} = V_0 \exp(bK_I) \quad (\text{I-37})$$

dans lequel V_0 et b sont des paramètres d'ajustement.

I.7.2.3. Modèle de dégradation prenant en compte le rôle de la température et la présence d'humidité

Si les revêtements des FO permettent généralement de protéger efficacement le noyau en silice d'un point de vue mécanique et thermique, ils sont bien souvent perméables à l'eau. Par conséquent, lorsque des molécules d'eau sont présentes dans le milieu environnant la FO, elles s'infiltreront dans le revêtement et réagissent avec les Si-O [64]. Ainsi, Wiederhorn et Bolz [69], ont testé plusieurs types de verres, et ont conclu que la vitesse de croissance des fissures (\dot{a}) au niveau de la surface des fibres de verre est liée à l'énergie d'activation de la rupture des liaisons du verre (et donc à l'humidité du milieu environnant la fibre) suivant l'Equation I-38 :

$$\dot{a} = \frac{da}{dt} = \dot{a}_0 \exp\left(\frac{-Q}{RT}\right) \quad (\text{I-38})$$

Avec :

Q : énergie d'activation apparente ;

R : constante des gaz parfaits ($R = 8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) ;

T : la température ;

et a_0 : constante.

Dans [70], Shiue et Matthewson ont aussi utilisé l'Equation I-38 et ont déduit que l'énergie d'activation dépend également de la contrainte (σ) appliquée sur la fibre. Evano *et al.* [64] se sont basés sur les Equations I-37 et I-38 pour calculer l'énergie d'activation ainsi que la durée de vie de la fibre en fonction de la température de fonctionnement et de la contrainte appliquée.

$$Q = Q^* - \beta \cdot \sigma \quad (\text{I-39})$$

$$t_f = C_1 \exp\left(\frac{Q^* + (\gamma T - \beta) \cdot \sigma}{RT}\right) \quad (\text{I-40})$$

Q^* : énergie d'activation.

$\beta \cdot \sigma$: effet de la contrainte sur l'énergie d'activation.

C_1 et γ : constantes.

I.7.2.4. Conclusion

Les études présentées dans cette partie ont démontré que la rupture d'une FO se produit quand la vitesse de la croissance des fissures atteint un niveau critique. Plusieurs modèles ont donc été proposés pour décrire la vitesse de croissance des fissures : notamment une première famille de modèles basés sur une loi de puissance (par exemple [64] [65]) et une deuxième famille basée sur une loi exponentielle (par exemple [67]) pouvant rendre compte du rôle de la température et de l'humidité dans le processus de dégradation mécanique. En effet, dans ces derniers modèles, pour des situations où la FO est en contact avec l'eau, une approche pragmatique est proposée afin de relier la vitesse de la croissance des fissures à l'énergie d'activation de la rupture des liaisons Si-O par les molécules d'eau.

I.7.3. Estimation probabiliste de la durée de vie d'une FO

I.7.3.1. Calcul de la probabilité de rupture F par la loi de Weibull

La rupture d'une FO est liée aux défauts existant initialement à la surface du noyau en silice. Elle se produit lorsque la largeur d'une fissure atteint une valeur critique. Cette approche, si elle contribue à mieux comprendre les phénomènes entraînant la rupture de la FO, ne permet cependant pas de déterminer directement sa résistance ou sa durée de vie. De plus, la distribution initiale des fissures dans une même fibre en silice diffère d'une région de la fibre à l'autre, ce qui fait varier la résistance et la durée de vie mesurées expérimentalement sur les différents échantillons provenant d'une même fibre. Pour remédier à cette difficulté, il convient d'avoir recours aux lois de probabilité. Parmi celles-ci, la loi de Weibull est considérée comme la plus fiable pour décrire la distribution de la probabilité de rupture F d'une fibre [71] suivant l'Equation suivante :

$$\ln \left[\frac{1}{L} \left(\ln \frac{1}{1 - F(\sigma)} \right) \right] = m(\ln(\sigma) - \ln(\sigma_0)) \quad (\text{I-41})$$

avec

L : longueur de la fibre testée ;

σ : contrainte appliquée ;

et m et σ_0 : paramètres statistiques de Weibull déterminés à partir des courbes de probabilités.

I.7.3.2. Calcul des paramètres de la loi de Weibull

Le calcul des paramètres de la loi de Weibull se fait généralement suivant deux méthodes : la méthode de régression linéaire et celle du maximum de probabilité [72]. Dans la majorité des études, la méthode adoptée pour le calcul de la probabilité de rupture F est celle de la régression linéaire. Cette méthode consiste à effectuer des essais de rupture sur z échantillons de fibre, classer les résistances (σ) mesurées expérimentalement en ordre croissant ($\sigma_1 \leq \sigma_2 \leq \sigma_z$) et calculer finalement les probabilités selon l'une des expressions suivantes :

$$F(\sigma_k) = \frac{k}{z+1} \text{ ou } F(\sigma_k) = \frac{k-0.5}{z} \text{ ou } F(\sigma_k) = \frac{k-0.3}{z+0.4} \quad (\text{I-42})$$

Tel que :

$$\sigma_1 < \sigma_2 < \dots < \sigma_k < \dots < \sigma_n$$

Le paramètre m peut être calculé à partir de la loi Weibull exprimée par l'Equation I-41. En traçant $\ln \left[\frac{1}{L} \left(\ln \frac{1}{1-F(\sigma)} \right) \right]$ en fonction de $\ln(\sigma)$, m correspond à la pente de la courbe. Ce paramètre caractérise la dispersion des défauts. Une petite valeur de m , indique une grande variation de la largeur des défauts à la surface de la fibre en verre et donc une grande variation des contraintes de rupture obtenues pour les échantillons de la FO testée [71].

I.7.4. Exemples d'études expérimentales appliquant une approche probabiliste

I.7.4.1. Influence du revêtement primaire d'une FO

Afin de protéger la fibre en silice de l'environnement agressif, le matériau et l'épaisseur de son revêtement sont choisis selon les types de sollicitations auxquels la fibre est exposée. Toutefois, les résultats de l'étude menée par Delobelle *et al.* [71] montrent que lorsque la fibre est soumise à un effort de traction uniaxiale, sa résistance ne dépend pas du type de revêtement. Pour les revêtements utilisés dans l'étude (répertoriés dans le Tableau I-7), la contrainte à la rupture pour une probabilité $F = 66\%$ demeure autour de 5 GPa (voir la Figure I-36 où $\exp(\ln(\sigma)) \approx 5$ GPa).

Tableau I-7 : Types de revêtements étudiés dans Delobelle *et al.* [71].

Optical Fibre	Type of fibre	Core (µm)	Cladding (µm)	Coating (µm)	Type of coating
SMF28e	monomode	8	125	250	acrylate
SMT-A1310H	monomode	5.8	125	155	polyimide
TCG-MA100H	multimode	100	110	140	polyimide
TCG-MA200H	multimode	200	220	250	polyimide
HCP-M0125T	multimode	125	140	250	ETFE

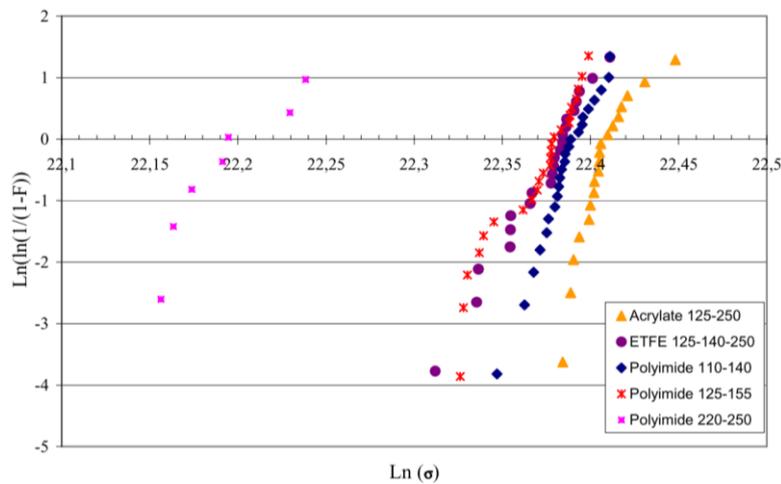


Figure I-36 : Distribution du modèle de probabilité de Weibull pour cinq FOs différentes [71].

I.7.4.2. Influence de la température

En menant des essais à différentes températures et en ajustant les modèles précédents aux résultats expérimentaux, il est possible d'introduire les effets de la température dans les modèles de distribution probabiliste de rupture de la fibre.

Dans [64], Evano *et al.* ont ainsi étudié l'influence de la température en conservant dans l'eau des échantillons de fibres enroulées autour d'un mandrin sous charge de fluage à différentes températures. En ayant recours aux différentes approches théoriques de la vitesse de la croissance des fissures, les auteurs ont conclu que :

-la durée de vie de la fibre diminue lorsque la température ou la contrainte augmente. Mais lorsque la contrainte appliquée devient supérieure à une valeur critique, une augmentation de la température conduit à une augmentation de la résistance des fibres, cela apparaît dans les résultats de la Figure I-37 ;

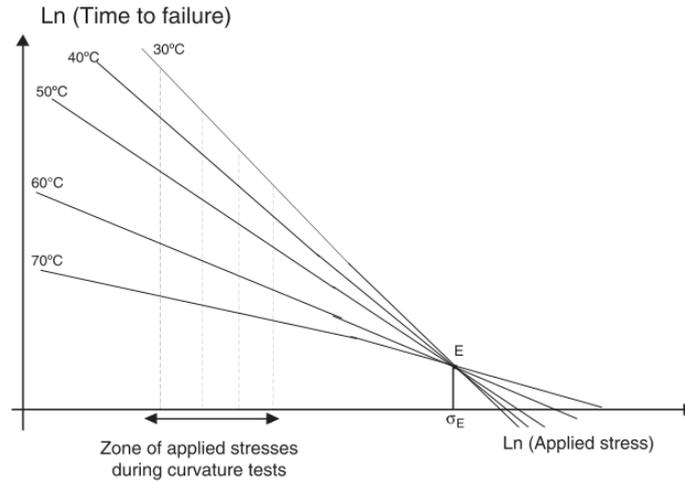


Figure I-37 : Durée de vie des échantillons en fonction de la contrainte appliquée à différentes valeurs de température [64].

- Le paramètre de fatigue n est alors une fonction linéaire de l'inverse de la température (voir la Figure I-38).

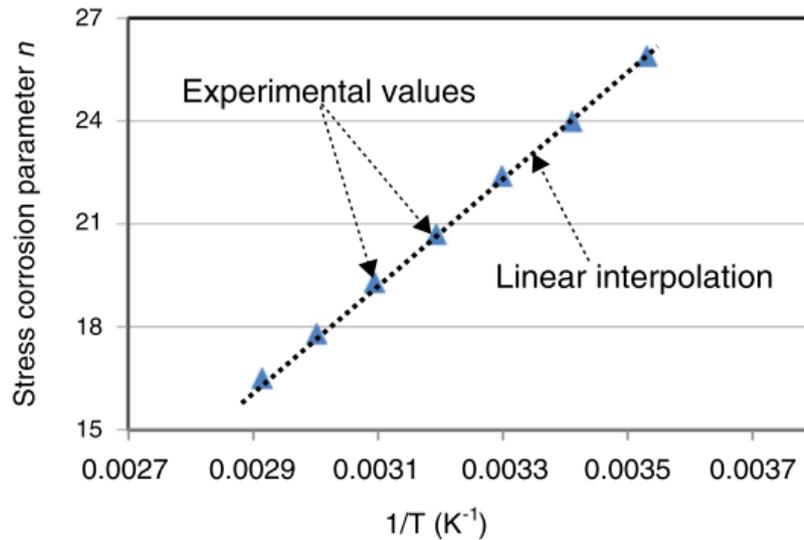


Figure I-38 : valeurs mesurées de n en fonction de l'inverse de la température [64].

I.7.4.3. Le phénomène du « Knee »

Pour une conservation de la FO à haute température (90 °C) et un pH supérieur à 11 [70], ou lors de conservation dans une solution de $NaCl$ [60], les courbes illustrant la contrainte de rupture de la FO (déterminée à l'aide de l'essai présenté dans I.6.4) en fonction de la durée d'exposition font apparaître une transition connue par le nom « Knee » (voir la Figure I-39). Ce phénomène a été observé par plusieurs auteurs [73] mais demeure toujours difficile à expliquer [70].

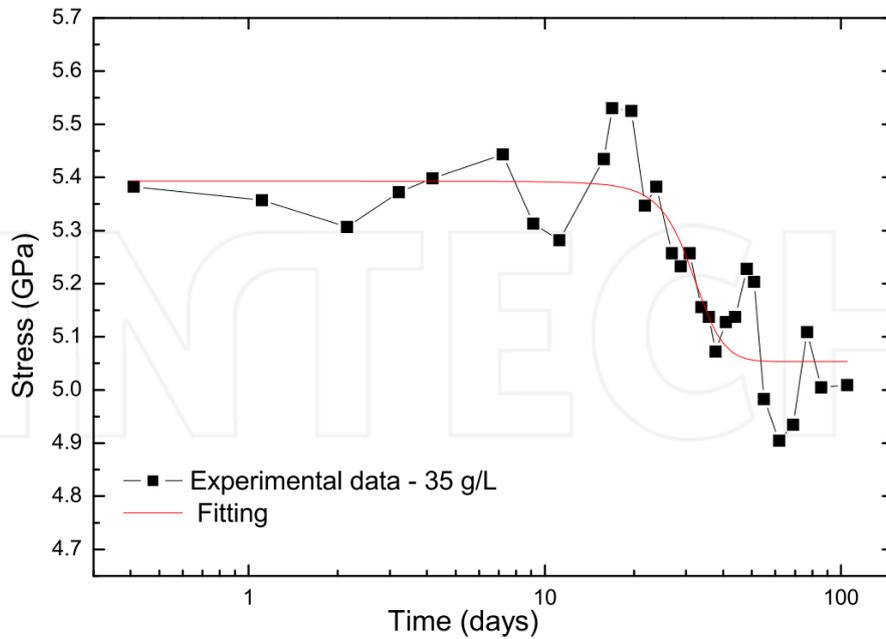


Figure I-39 : Durée de vie de FOs maintenues sous contrainte dans une solution de NaCl à 100 g/l et mise en évidence du phénomène de Knee [60].

I.7.4.4. Évolution cyclique de la durée de vie de la fibre sous sollicitation couplée

Lors de l'étude menée par El Abdi *et al.* [63], la conservation des échantillons de fibres soumis à une sollicitation de fluage et conservés dans l'eau à différentes températures (65 °C et 85 °C) a révélé une évolution cyclique de la durée de tenue de la fibre avant rupture (Figure I-40).

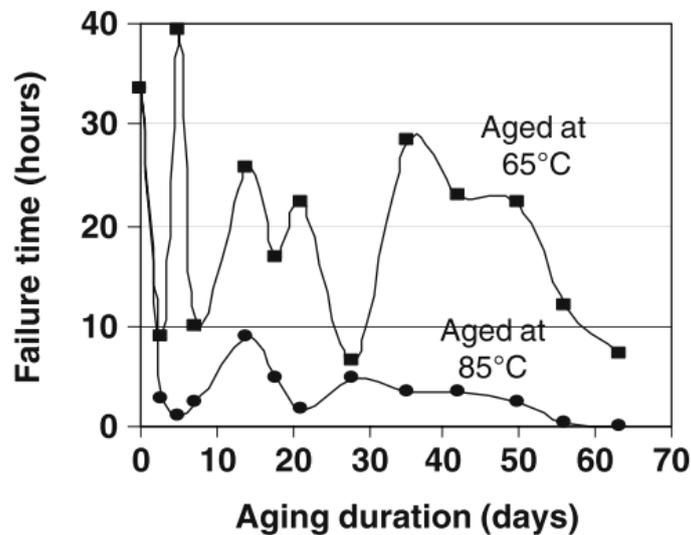


Figure I-40 : Durée de vie des fibres soumises à une sollicitation de fluage et conservées dans l'eau à différentes températures [63].

Le « lissage » des microfissures sous l'effet de la formation d'une couche solide de silice hydratée entraîne une diminution du facteur d'intensité de contrainte en pointe de fissure et donc une augmentation de la durée de vie de la fibre dans l'environnement imposé. Mais ce phénomène ne peut pas expliquer l'évolution cyclique observée de cette durée. Une explication

du déroulement des étapes liées au comportement de la fibre soumise aux sollicitations couplées (mécaniques, hydriques et thermiques) est cependant proposée par El Abdi *et al.* dans [63] : au début de l'essai, lorsque la fibre vieillit dans l'eau, une couche de silice hydratée est formée sur l'interface du polymère/verre. Cette couche retarde la diffusion de l'eau vers la surface du verre et ralentit la croissance des fissures. Ainsi, la fibre est renforcée vis-à-vis des contraintes maintenues. Cependant, lorsque la couche de silice hydratée atteint une épaisseur critique, la diffusion par le revêtement en polymère tend à réduire l'épaisseur de la couche à une valeur minimale, accélérant ainsi la relaxation de la structure de la fibre sous fluage accompagnée d'une déformation de cette dernière ainsi que la diminution de sa résistance.

I.8. Durabilité des capteurs à FO pour une utilisation en contrôle de santé des structures

I.8.1. Introduction

Dans le paragraphe précédent (I.7), nous avons présenté les principaux modèles de dégradation des FOs utilisées en télécommunication ou en tant que capteur. Ces modèles s'appuient sur une évaluation de la cinétique de croissance des fissures et peuvent prendre en compte le rôle de la température et de l'humidité au travers de l'énergie d'activation de la rupture des liaisons. Dans cette partie, nous nous intéressons plus spécifiquement à certaines études de durabilité des capteurs à FO destinés à la mesure des déformations et de la température pour une utilisation en contrôle de santé des structures en BA ; ces capteurs pouvant être noyés dans le béton durant la construction de l'ouvrage, ou collés en parement des structures existantes.

Ce type d'usage des FOs présente des particularités vis-à-vis des problématiques de durabilité des FOs. Le béton étant sensible à son environnement, sa durabilité dépend de la charge qu'il supporte ainsi que de son milieu de conservation (température, humidité, polluants divers). Le capteur étant collé en surface ou noyé dans le béton, il est également soumis à ces mêmes effets. Par conséquent, l'étude de sa durabilité face aux agents environnementaux agressifs devient primordiale. L'objectif de cette partie est de dresser un bilan du comportement des constituants du câble à FO (matériaux de revêtement, couches de protection...) face aux principaux facteurs susceptibles d'influencer la durabilité du capteur ou la fiabilité des mesures relevées. Ces facteurs peuvent être classés selon trois grandes catégories : thermiques, chimiques et mécaniques.

I.8.2. Influence de la température

Dans une structure en BA, une variation de la température du béton peut être d'origine naturelle et liée à l'environnement de l'ouvrage (température de l'air et ensoleillement), industrielle lors d'un traitement thermique du béton au jeune âge ou lié au fonctionnement de service de l'ouvrage (présence d'un dispositif produisant sa propre chaleur) ou encore accidentelle suite au déclenchement d'un incendie. La variation de la température du béton peut aussi être liée directement à la chaleur produite lors du processus de son hydratation.

Afin de développer des FOs pouvant être utilisées pour le SHM « Structural Health Monitoring » des structures en béton et qui donc résistent aux effets thermiques, plusieurs auteurs se sont concentrés sur l'étude du comportement à haute température des différents matériaux de revêtement primaire des FOs. Nagata [24] a évalué la température de transition vitreuse de plusieurs matériaux utilisés pour fabriquer ces revêtements : Nylon, polyester et acrylate durcie par l'ultraviolet (UV). Ses essais consistaient à exposer les fibres à de hautes températures maintenues constantes (entre 40 et 120 °C) ou à des cycles de température (entre -20 et 70 °C) à différentes valeurs d'humidité relative (HR). Suite à ces essais de vieillissement, il a été possible de conclure que l'acrylate durcie aux UV était le matériau le plus stable du point de vue des transformations chimiques et mécaniques observées aux températures modérées (la température de transition vitreuse n'ayant presque pas varié).

Toujours dans une démarche de surveillance des ouvrages, Torres *et al.* [41] ont démontré la possibilité d'utiliser des capteurs à FO à réseau de Bragg modifiés pour la surveillance de la température dans des structures en BA en début d'incendies. Les capteurs à réseau de Bragg standards, souffrant d'une limitation sérieuse pour les mesures à haute température, ont été chargés d'hydrogène à température ambiante avant d'inscrire le réseau de Bragg avec le laser. Les résultats d'un premier essai utilisant ces nouveaux capteurs noyés dans une poutre ont démontré une bonne concordance des mesures relevées par ces derniers avec celles des thermocouples.

I.8.3. Étude des attaques chimiques

I.8.3.1. Alcalinité du milieu cimentaire

Une fibre noyée dans le béton peut être affectée par l'alcalinité de la solution interstitielle du béton pouvant réagir de manière très significative avec le revêtement primaire de la fibre, puis le noyau en silice. On trouve donc dans la littérature de nombreuses études visant à évaluer l'effet de la solution présente dans les pores du béton (ou du mortier) sur les FOs standards. Ces études se fondent généralement sur la réalisation d'essais de vieillissement accéléré. Parmi celles-ci, l'étude menée par Habel et Polster [74] s'est intéressée aux transformations de divers revêtements des FOs (polyimide, fluor-thermoplastique et acrylate) soumis à une exposition aux milieux alcalins ($pH = 11, 12,4$ et 14). Il apparaît que dans les conditions de cette étude, après 28 jours d'exposition, tous les revêtements des fibres noyées ont subi des changements de leurs propriétés mécaniques relatives à l'apparition de fissures (voir, à titre d'exemple, le schéma de la Figure I-41).

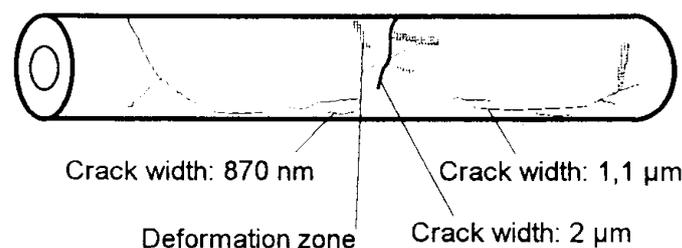


Figure I-41 : Fissures dans le revêtement en acrylate d'une fibre noyée après 28 jours d'immersion en solution alcaline [74].

Les auteurs indiquent qu'une protection face à l'attaque des alcalins peut être assurée par des revêtements en aluminium mais rappellent que de tels revêtements sont problématiques dans les structures en BA en raison d'une éventuelle corrosion par contact de l'aluminium avec l'acier [74].

Afin de remédier à ces problèmes de durabilité, il existe des matériaux et méthodes de traitement de surface qui peuvent améliorer la résistance des FOs face aux environnements agressifs. Des observations au microscope électronique à balayage réalisées sur des échantillons de FOs munies de revêtements en thermoplastiques fluorés et immergées 21 jours dans une solution alcaline n'ont, par exemple, relevé aucune dégradation du revêtement. En revanche, des microfissurations ont été observées à la surface de FOs munies de revêtement en polyimide et en acrylate. [75]

I.8.3.2. Attaque des chlorures

En présence de chlorures, de manière similaire aux armatures en acier du béton, les capteurs à FO avec revêtements métalliques sont exposés au risque de corrosion dès que la teneur en chlorures au niveau de la FO atteint le seuil de dépassivation. Une fois le revêtement sévèrement corrodé, la fibre en verre n'est plus protégée. Toutefois, la cinétique de dégradation du revêtement en fer d'une FO par corrosion dans un environnement passivant et à la température atmosphérique normale permet une durée de vie de la FO comparable à la durée de vie d'une structure en BA standard, qui est d'environ 50 à 70 ans [76].

I.8.4. Étude des effets mécaniques

L'évaluation de la durabilité d'un capteur à FO soumis à des sollicitations mécaniques répétées ou maintenues se base sur deux critères relatifs i) à la précision et la fiabilité des mesures relevées ainsi que ii) la durabilité du système de mesure lui-même lié à la structure du capteur et à sa technique de mise en œuvre.

Pour évaluer cette durabilité, ce sont principalement deux types d'essais qui sont pratiqués en laboratoires :

-Des essais de fluage mécanique : une contrainte constante est appliquée directement sur le capteur (FO testée en traction uniaxiale voir I.6.2, ou enroulée autour d'un mandrin voir I.6.3) ou sur une éprouvette instrumentée par capteurs à FO ;

-Des essais de fatigue mécanique : une sollicitation (contrainte ou déformation) est appliquée de manière cyclique généralement sur un échantillon instrumenté par capteurs à FO. La durabilité du capteur et la fiabilité de ses mesures sont évaluées dans le temps.

Plusieurs études décrites dans la littérature ont relevé la capacité des capteurs à FO collés en surface à enregistrer de manière fiable les déformations d'éprouvettes soumises à des essais de fatigue.

Dans Loutas *et al.* [77], des FOs munies d'un revêtement en polyimide ont été placées à l'intérieur de bandes de ruban collées en surface d'échantillons en matériau composite sur

lesquels ont été réalisés des essais cycliques de flexion 3-points. Les mesures des capteurs à FO ont été comparées avec celles des jauges de déformation ainsi qu'aux résultats d'un modèle aux éléments finis et d'un calcul analytique. Les divers résultats sont présentés sur la Figure I-42. Les capteurs à FO ont fourni des mesures de déformation précises et plus fiables que les mesures des jauges électriques traditionnelles qui se sont détachées de la surface de la structure après un certain nombre de cycles. A contrario, les résultats fournis par les capteurs à FO demeurent proches des résultats théoriques et de ceux du modèle aux éléments finis, même après 10^6 cycles.

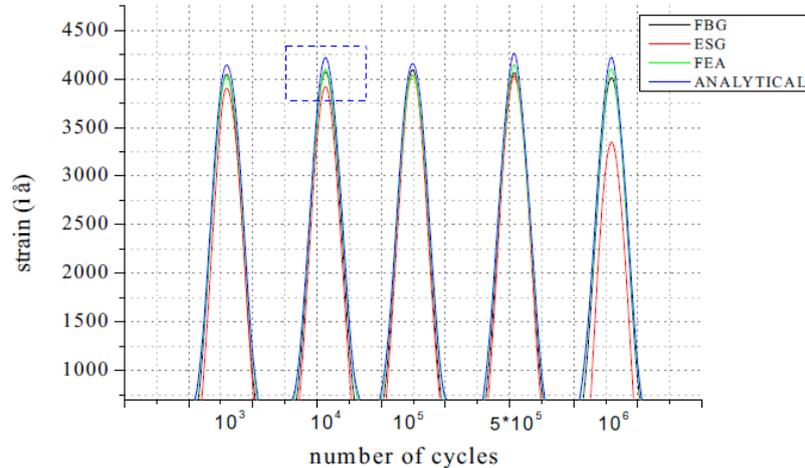


Figure I-42 : Comparaison des résultats des capteurs à FO à réseau de Bragg (FBG) avec ceux du modèle analytique (ANALYTICAL), du modèle aux éléments finis (FEA) et des jauges de déformation (ESG) [77].

Dans [78], Davis *et al.* ont comparé les mesures de déformation des capteurs à FO (mesures ponctuelles à l'aide des capteurs à réseau de Bragg FBG et mesure répartie par rétrodiffusion de Rayleigh à haute résolution et à résolution standard) à celles de jauges de déformation (FSG). Les FOs ont été collées sur une surface métallique à l'aide d'un photopolymère liquide durcissable aux UV et plusieurs cycles de chargements de flexion ont été appliqués aux éprouvettes métalliques. Les différents capteurs ont alors fourni des résultats identiques (voir la Figure I-43 pour un exemple de chargement).

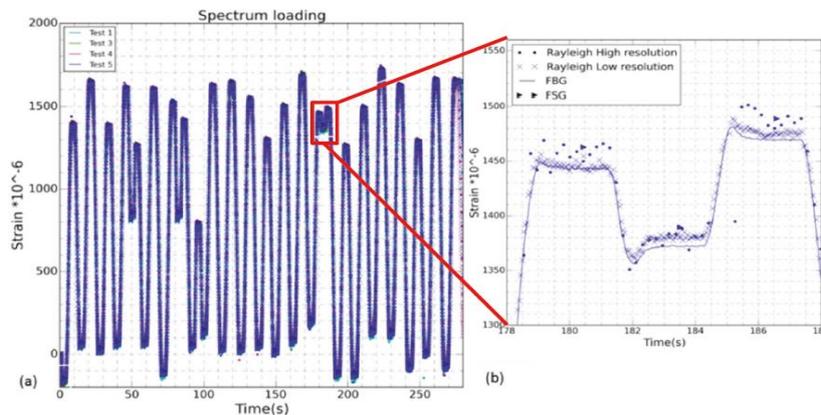


Figure I-43 : Comparaison des mesures relevées par les différents capteurs, pour deux modes de chargement [78].

Par ailleurs, dans [79], des FOs revêtues d'acrylate ont été collées sur la surface d'un prisme en béton soumis à un essai de chargement monotone croissant et chargement cyclique en flexion 4-points. Une très bonne corrélation a été relevée lors de la comparaison entre les mesures par FOs et les résultats du calcul théorique (voir la Figure I-44).

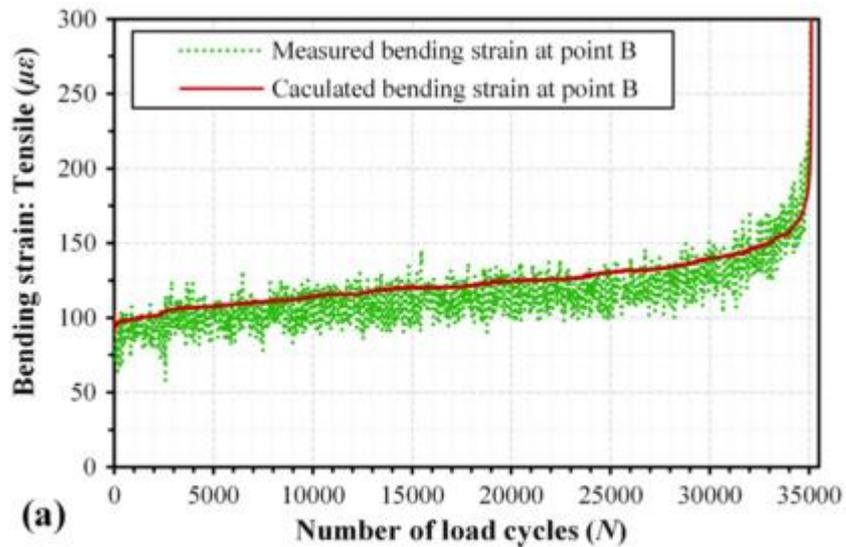


Figure I-44 : Corrélation entre les résultats théoriques et les mesures expérimentales par la FO collée au centre de la face inférieure du prisme (point B) [79].

I.8.5. Bilan des études de durabilité des capteurs à FO pour une utilisation en SHM

A partir d'une revue bibliographique principalement basée sur les différentes études présentées précédemment, il a été possible de dresser le tableau suivant (Tableau I-8) qui regroupe les propriétés de durabilité des principaux matériaux de revêtement des FOs, face à une sollicitation de nature thermique, chimique ou mécanique.

Tableau I-8 : Récapitulatif de la durabilité des capteurs à FO pour le SHM.

Revêtement de la FO (revêtement primaire ou couche adhésive pour la mise en œuvre)	Caractéristiques de durabilité
Revêtement primaire en acrylate	<p>-Très affecté par le milieu alcalin [74].</p> <p>-Durable et fiable sous chargements mécaniques [79].</p> <p>-Stable aux hautes températures (après durcissement au UV) [24].</p>
Revêtement primaire en étain	<p>-Relativement durable en présence de chlorures [76].</p> <p>-Durable pour des chargements mécaniques statiques et dynamiques [80].</p> <p>-Comportement élastoplastique et contraintes résiduelles [80].</p>
Revêtement primaire en aluminium	<p>-Durable en milieu alcalin [74].</p> <p>-Risque de corrosion par contact avec les armatures du BA [74].</p>
Revêtement primaire en polyimide	<p>-Durable pour des chargements mécaniques statiques et dynamiques [77].</p> <p>-Très affecté par le milieu alcalin [75].</p>
Revêtement primaire en Fluoropolymère (Téflon)	<p>-Durable pour des chargements mécaniques statiques et dynamiques [81].</p> <p>-Meilleure stabilité en milieu alcalin (dépôt par plasma) par rapport aux revêtements usuels en acrylate et en polyimide [82].</p>
Adhésif en photopolymère pour l'application des FOs en surface	<p>-Durable mécaniquement pour une utilisation comme colle durcissable aux UV [78].</p>

I.9. Bilan de la revue bibliographique sur les capteurs à FO pour une utilisation en SHM

Comme cela a été précisé tout au long de ce chapitre, les capteurs à FO présentent plusieurs avantages par rapport aux capteurs traditionnels, ce qui justifie la tendance vers l'utilisation croissante de cette technique pour le SHM des ouvrages de génie civil. Dans ce type d'instrumentation, la FO constitue la partie sensible dont la variation de l'une des propriétés physiques dépend de la variation du mesurande (ce mesurande étant généralement la déformation et/ou de la température du matériau qui entoure la FO). On trouve donc dans le commerce des FOs et des câbles à FO présentant différentes structures, constitués de différents matériaux de revêtement et offrant différentes solutions de protection mécanique, thermique et chimique.

Parmi les solutions technologiques existantes, les mesures ponctuelles par capteurs à réseau de Bragg ont connu une importante utilisation. Grâce au principe du multiplexage, il est possible d'inscrire plusieurs réseaux de Bragg dans une même FO, ce qui permet de mesurer un profil constitué de plusieurs points de mesure. La technologie des mesures réparties par capteurs à FO est apparue ensuite en offrant de nouvelles possibilités de mesures continues à haute définition et à très grande portée. Cette technologie se base sur les phénomènes de rétrodiffusion de la lumière : Raman, Brillouin et Rayleigh. Le signal rétrodiffusé est alors en lien direct avec les sollicitations thermiques ou mécaniques subies par la FO. Dans une situation où la sollicitation externe inclut des variations de la température et des déformations, une décorrélation des deux effets est nécessaire. De telles techniques de décorrélation peuvent être mises en œuvre en utilisant un ou deux interrogateurs avec une ou deux FOs.

Que ce soit pour un capteur à FO noyé dans le béton, ou collé en parement de la structure, un minimum de protection du guide optique (fibre en verre) doit être assuré afin de garantir une durabilité et une fiabilité des mesures enregistrées. Toutefois, une partie des efforts transmis de la structure vers la fibre en verre est alors absorbée par les différentes couches de protection (couches de revêtement, adhésif d'application du capteur en surface). Par conséquent, une étude de transfert d'effort du milieu hôte vers le cœur de la fibre doit être menée pour déduire l'effort subit par la structure à partir des mesures relevées par le capteur, ces dernières étant en premier lieu induites par l'effort subit par la fibre en verre. Cette étude de transfert d'effort peut être réalisée suivant une approche analytique. Cependant, le calcul analytique devient compliqué pour certaines structures et géométries complexes de câbles à FO et pour certaines techniques d'installation des capteurs (collage d'un câble à FO dans une rainure par exemple). Un modèle par éléments finis de la FO dans son environnement hôte permet alors dans ces situations d'analyser finement le mécanisme du transfert d'effort.

Par ailleurs, quand le pas de variation du mesurande est comparable ou inférieur au pas de mesure de l'interrogateur, notamment lors de l'utilisation d'un interrogateur avec un grand pas de mesure ou lors de la mesure de phénomènes très locaux (concentration de contraintes ou apparition des fissures), des effets supplémentaires liés aux paramètres intrinsèques de l'interrogateur peuvent être contenus dans les résultats de l'interrogation. Une connaissance maîtrisée des effets de l'interrogateur permet cependant une interprétation pertinente du profil

fourni par celui-ci et donc de revenir à un profil de déformation (ou de température) représentant fidèlement celui de la fibre.

L'environnement plus ou moins agressif peut aussi influencer la mesure en modifiant les caractéristiques du capteur. Par exemple, quand un capteur est noyé dans le béton, la solution basique présente dans les pores conduit à une dégradation précoce de la FO qui peut être accentuée par une sollicitation mécanique répétée ou soutenue dégradant elle aussi le capteur. Pour le cas d'un capteur collé en parement, l'environnement extérieur (pluie, neige, vent, soleil, température...) peut induire un vieillissement rapide des matériaux constituant le capteur. Des essais de durabilité sont souvent nécessaires pour juger de la durabilité du capteur vis-à-vis des conditions réelles d'exposition de l'instrumentation. Ces essais de durabilité sont généralement menés de manière accélérée visent à tester en premier lieu le comportement des matériaux des revêtements. Il a été notamment démontré que le revêtement primaire seul ne permet pas de protéger la fibre dans le long terme contre la solution interstitielle alcaline du béton. Il convient donc d'utiliser un câble à FO pour réaliser une instrumentation durable.

L'instrumentation d'une structure en BA vise le plus souvent à traquer l'apparition, puis le développement des fissures dans les zones critiques ou dans les zones atteintes de pathologies. Dans ces situations, il est clair que le revêtement primaire de la FO ne permet pas seul d'assurer la protection mécanique de l'instrumentation. Là encore, ce sont des câbles à FO qui sont alors utilisés. Ces câbles contiennent une ou plusieurs FOs standards, ainsi que diverses couches de revêtements et sont munis de renforcements mécaniques. Toutes ces couches et protections, bien qu'indispensables, influencent la FTM du câble et compliquent l'interprétation de la mesure.

Il a donc été établi que les protections de la FO par les différentes couches qui constituent le câble, sont nécessaires pour la protéger vis-à-vis des attaques physico-chimiques et mécaniques. L'objectif principal de cette thèse est alors d'étudier la durabilité des capteurs par câbles à FO pour les deux cas d'implantation (câble noyé et câble collé en surface) et d'évaluer le transfert d'effort du matériau hôte vers le cœur de la FO pour ces deux configurations.

Les résultats de cette étude de durabilité seront exploités dans le cadre de l'instrumentation de blocs de BA ou non, de taille représentative et atteints de diverses pathologies. Ces travaux sont réalisés dans le cadre d'un projet piloté par l'institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN). Avant de présenter ultérieurement le contexte du projet, un état de l'art sur les pathologies des bétons est proposé dans les sections suivantes.

I.10. Quelques généralités sur le béton et le BA

I.10.1. Le béton, généralités sur le matériau

Le béton est un matériau composite. Il se compose de granulats durs de différentes tailles (sable et graviers) collés entre eux par un liant nommé ciment. Nous rappelons dans ce qui suit les principales caractéristiques des constituants du béton ainsi que quelques notions indispensables à la compréhension des chapitres à venir.

I.10.1.1. Le ciment

Le ciment est produit principalement par mélange de chaux et d'argile. Ce mélange est très ancien et a été utilisé par les égyptiens depuis 2600 ans av. J.-C. Ce liant a été perfectionné vers le premier siècle par les Romains et le panthéon de Rome est l'un des premiers grands ouvrages construits en béton. [83]

Actuellement, la production industrielle du ciment est réalisée dans un four rotatif. La production du clinker se fait en premier lieu par broyage de pierre calcaire (qui fournit la chaux) et d'argile (qui fournit la silice et l'alumine). En ajoutant une faible quantité de gypse et d'autres ajouts tels que les fillers, les cendres volantes, les laitiers, les pouzzolanes et la fumée de silice, on obtient le ciment (appelé Portland en raison de la ressemblance de sa couleur et de sa dureté à la pierre de Portland située au sud de l'Angleterre) [84].

Le dosage en ciment influence la résistance mécanique du béton formulé. Ce dosage est donc déterminé selon la résistance requise du béton, la nature de l'ouvrage à construire et l'environnement auquel le béton sera soumis [85].

I.10.1.2. L'eau

L'eau est nécessaire à l'hydratation du ciment et assure aussi la maniabilité du béton lors de sa mise en place dans les coffrages. Un dosage en excès peut affecter négativement les propriétés mécaniques du béton. Le rapport eau/ciment (E/C) est un paramètre essentiel de la maniabilité du béton, de ses propriétés mécaniques et de sa durabilité [85].

I.10.1.3. Les granulats

Ce sont des grains minéraux dont l'appellation dépend de la taille (voir le Tableau I-9).

Tableau I-9 : Familles de granulats suivant leurs dimensions (d = dimension inférieure du granulat ; D = dimension supérieur du granulats) [86].

Familles	Dimensions	Caractéristiques
<i>Fillers</i>	0/D	$D < 2$ mm avec au moins 85 % de passant à 1,25 mm et 70 % de passant à 0,063 mm
<i>Sables</i>	0/D	$d = 0$ et $D \leq 4$ mm
<i>Graves</i>	0/D	$D \geq 6,3$ mm
<i>Gravillons</i>	d/D	$d \geq 2$ mm et $D \leq 63$ mm
<i>Ballasts</i>	d/D	$d = 31,5$ mm et $D = 50$ ou 63 mm

L'ajout des granulats permet d'assurer de bonnes propriétés mécaniques et une meilleure durabilité du béton produit tout en permettant d'en diminuer avec le coût. La texture, la résistance mécanique, la porosité et la masse volumique des granulats utilisés affectent directement la maniabilité du béton formulé [84].

Les granulats peuvent être d'origine :

- Naturelle : issus de roches minérales, ayant subi des transformations mécaniques (concassage, lavage...) mais n'ayant subi aucune autre transformation ;
- Artificielle : issus de roches minérales mais ayant subi des transformations industrielles (thermiques ou autres) ;
- Recyclée : issus du traitement d'une matière inorganique utilisée dans la construction (béton de démolition de bâtiments par exemple) [86].

I.10.1.4. Adjuvants chimiques :

Les adjuvants sont des produits organiques ou non, ajoutés en petite quantité dans le béton, pour en modifier certaines propriétés. Il est habituel de distinguer deux grandes catégories d'adjuvants :

- Les entraîneurs d'air : leur ajout permet d'entraîner des bulles d'air dans le volume de béton de manière homogène. Quand le béton durci est soumis à des températures négatives, l'eau en gelant dans le béton crée une pression qui peut induire son éclatement. Les bulles d'air créées présentent alors un volume libre dans lequel peut se former le gel sans exercer de pression excessive à l'intérieur du béton ;
- Les réducteurs d'eau : ils sont utilisés pour réduire l'eau de gâchage tout en maintenant une bonne maniabilité du béton. Les superplastifiants font partie de cette catégorie, ce sont des adjuvants réducteurs d'eau de haute efficacité [84].

I.10.1.5. Quelques grandes familles de béton

Il existe plusieurs types de bétons dont les propriétés mécaniques et physiques sont adaptées au type d'ouvrages et d'environnement auquel ils sont soumis.

-Les bétons légers : En modifiant la composition ou en utilisant des granulats légers (billes d'argile expansée par exemple), la masse volumique des bétons légers est inférieure à celle d'un béton normal et permet un gain en poids propre de l'ouvrage.

-Les béton haute performance (BHP) : Ce sont les bétons dont la résistance atteint ou dépasse les 100 MPa. Cette montée en résistance est due à l'utilisation de fines (fumée de silice) et du superplastifiant afin de réduire l'eau de gâchage et d'augmenter ainsi la compacité du béton durci.

-Les bétons autoplaçants : ce sont des bétons très maniabiles qui s'écoulent et se mettent en place dans le coffrage sous l'effet de la gravité.

-Les bétons fibrés : ce sont des bétons dans lesquels sont incorporées des fibres de manière homogène dans tout le volume du béton. Ces fibres peuvent être de nature métallique, organique ou minérale. Leur ajout a généralement pour objectif d'améliorer les propriétés mécaniques du béton, notamment en participant à maîtriser la fissuration des parties tendues [85] [84] mais permet aussi d'améliorer la tenue au feu du béton en incorporant des fibres polypropylène.

I.10.2. Le BA

I.10.2.1. Principe de fonctionnement mécanique du BA

Les ouvrages construits avec du béton sont généralement des ouvrages en BA, c'est-à-dire en béton renforcé d'armatures en acier. En effet, si le béton est un matériau qui présente des résistances à la compression assez élevées et adaptées aux constructions modernes, en revanche, sa résistance à la traction est très faible et ne représente environ que le dixième de sa résistance en compression [87].

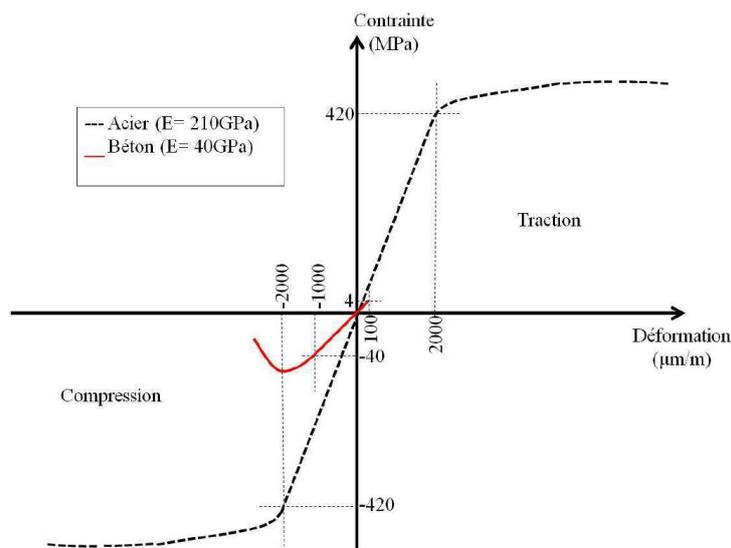


Figure I-45: Représentation schématique de courbes d'essais en traction et compression pour l'acier et le béton [14].

L'acier par contre est un matériau qui présente une très bonne résistance à la compression ainsi qu'à la traction (500 MPa environ) (Figure I-45). L'ajout d'armatures en acier dans le béton, notamment aux endroits soumis à des efforts de traction permet donc d'améliorer la résistance de l'ensemble de la structure. À titre d'exemple de comportement structurel induisant des contraintes de traction et de compression, la Figure I-46 présente sommairement les zones comprimées et tendues d'une poutre en flexion. À partir des caractéristiques de résistance du béton discutées précédemment, il apparaît alors qu'une telle poutre en BA disposerait d'armatures en partie basse.

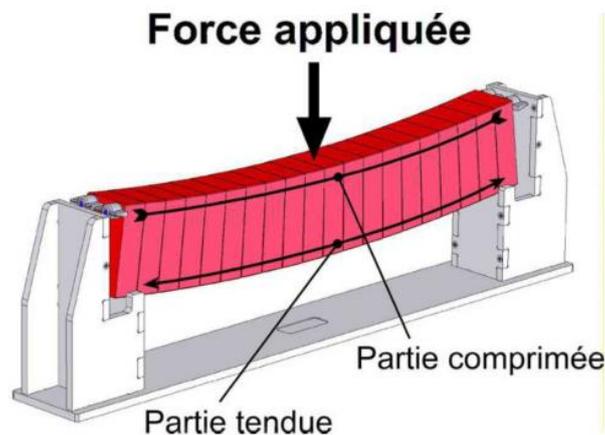


Figure I-46 : Zones en compression et en traction dans une poutre fléchie [86].

I.10.2.2. Principaux avantages et inconvénients du BA

Outre la complémentarité mécanique des deux matériaux précédemment discutée, le BA offre de nombreux avantages, dont un prix de construction concurrentiel et une grande facilité de mise en œuvre, due à la maniabilité du béton à l'état frais qui permet de réaliser des constructions de formes très variées [88]. Il n'en reste pas moins que la construction d'un ouvrage en BA présente quelques inconvénients. Par exemple, la masse volumique du BA est importante et entraîne donc un poids propre de la structure lui-même important. De plus, les deux matériaux sont sujets à des pathologies dont la plus connue (et la plus répandue) est la corrosion des armatures qui peut, lorsqu'elle est avancée, mettre la structure en péril [86]. Bien que moins fréquentes, les pathologies du béton peuvent aussi avoir de graves conséquences. Ces pathologies sont discutées par la suite.

I.11. Les pathologies du béton

Bien que le BA soit une solution technologique adaptée à la construction d'ouvrages modernes voulus durables, la porosité élevée du béton, sa pâte de ciment basique contenant la portlandite ($Ca(OH)_2$) et sa solution interstitielle riche en alcalins (K^+ et Na^+) sont cependant à l'origine de plusieurs pathologies.

L'objectif de cette partie est de décrire les différentes pathologies qui attaquent les matériaux cimentaires induisant dans certains cas une dégradation sévère des ouvrages de génie civil. Une meilleure connaissance de ces pathologies, de leurs causes et surtout de leurs effets, de l'échelle du matériau à celle de la structure, permettra d'introduire les problématiques liées à l'utilisation

des capteurs à FO pour détecter et suivre l'évolution de ces pathologies, notamment dans le cadre du projet ODOBA (voir le chapitre IV) dans lequel s'inscrit cette thèse. Ainsi, les pathologies du béton présentées par la suite sont classées selon deux catégories :

-Les pathologies « génériques » du BA, susceptibles d'apparaître dans les corps d'épreuve du projet ODOBA mais qui ne sont pas volontairement déclenchées. En effet, les protocoles expérimentaux de vieillissement accéléré ainsi que les conditions environnementales de la région peuvent favoriser l'apparition de pathologies autres que celles visées ;

-Les pathologies que l'on souhaite déclencher, développer de manière accélérée et étudier dans les corps d'épreuve du projet ODOBA. Ces pathologies sont la RSI et la RAG ainsi que leur couplage.

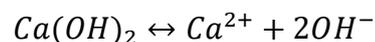
I.11.1. Lixiviation et attaques acides

I.11.1.1. Description du phénomène

La lixiviation du béton ou « lessivage » concerne les ouvrages immergés dans l'eau. Elle est causée par le fort gradient de concentration entre la solution interstitielle du béton basique chargée en ions calcium et en alcalins, et l'eau dans laquelle est immergé l'ouvrage. Ce gradient entraîne une diffusion du calcium vers l'extérieur du béton. Cette diffusion engendre une dissolution des hydrates présents à l'intérieur du béton. La diffusion du calcium (vers l'extérieur) peut être couplée avec une pénétration des ions sulfates, magnésium, chlorures... à l'intérieur du béton. Ces échanges peuvent induire une dégradation du milieu cimentaire [89] qui se traduit par une diminution du pH et des propriétés mécaniques accompagnée d'une augmentation de la porosité.

La lixiviation du béton a généralement lieu dans des milieux où les eaux, en contact avec le béton, sont faiblement minéralisées en calcium et neutres ou acides ($pH \leq 7$). Les ions calcium Ca^{2+} et hydroxyde OH^- sont habituellement les espèces lixiviées [90] à partir du processus chimique suivant :

$$[OH^-] = 10^{-14+pH}$$



La solution interstitielle n'étant pas saturée en ions calcium et hydroxyde, les composés solides du béton contenant ces espèces se dissolvent. La portlandite est alors dissolue et les silicates de calcium hydratés (C-S-H) sont décalcifiés. Ainsi, la porosité du milieu et donc son coefficient de diffusion augmentent accélérant ainsi le processus [91].

La lixiviation affecte la durabilité du béton et par la même l'intégralité de la structure sur le long terme. Cette pathologie engendre en effet une augmentation de la porosité ainsi qu'une baisse du pH de la solution interstitielle, ce qui facilite l'infiltration des agents agressifs et permet d'initier la corrosion des armatures en acier. De plus, la lixiviation du béton libère des éléments basiques qui peuvent altérer le sous-sol argileux. Aussi, la lixiviation peut être couplée

à la pénétration de sulfates, qui est à l'origine de réactions expansives [92] qui apparaissent dans le béton des ouvrages de génie civil après plusieurs années de service.

La cinétique de lixiviation est généralement lente. Toutefois, pour les structures de stockage des déchets radioactifs ou pour les ouvrages d'art visant une durée de vie importante, l'effet de cette pathologie peut se révéler considérable.

I.11.1.2. Quelques paramètres influençant la lixiviation

Une **compacité** importante du béton, obtenue avec un faible rapport E/C lors de la formulation, permet de limiter la lixiviation du squelette cimentaire. **La nature du liant** peut aussi influencer notablement la cinétique de lixiviation. Par exemple, les liants pauvres en CaO affectent le mécanisme de la lixiviation en ne générant qu'une faible quantité de portlandite dont la consommation contribue à l'augmentation de la porosité [93].

I.11.1.3. Essais de lixiviation accélérée

Pour étudier expérimentalement la lixiviation des matériaux cimentaires, il existe plusieurs méthodes expérimentales dont :

- **L'essai de lixiviation au nitrate d'ammonium** qui consiste à dégrader un échantillon de béton en l'immergeant dans une solution de nitrate d'ammonium sur une durée importante (par exemple 60 jours dans [94]). Les ions ammonium réagissent alors avec les ions hydroxyde issus de la dissolution de la portlandite. Cela induit une formation d'eau et un dégagement d'ammoniac sous forme gazeuse. Le pH de la solution augmentant du fait des réactions, il est contrôlé en permanence, et la solution est renouvelée quand le pH atteint une valeur seuil (8,3 dans [94]). La concentration en calcium dans la solution est déterminée par spectroscopie d'absorption atomique. Après 60 jours, l'échantillon est retiré de la solution afin de déterminer l'épaisseur dégradée.

- **L'essai de lixiviation à pH constant** qui nécessite d'immerger un échantillon de béton dans une solution à $pH = 5,0$ régulée par une solution d'acide nitrique pour une durée de 60 jours. Pour éviter la carbonatation (voir le paragraphe I.11.2), un bullage d'azote dans la solution est utilisé [95]. Pour évaluer la lixiviation, la quantité d'acide ajoutée permet de fixer le pH à 5 et connaître la quantité d'ions hydroxyde lixiviés. Ensuite, une solution de phénolphthaléine est pulvérisée sur une fracture fraîche longitudinale de l'échantillon pour évaluation de la zone dégradée.

I.11.2. La carbonatation du béton

I.11.2.1. Description du phénomène

La carbonatation est l'action du dioxyde de carbone présent dans l'atmosphère sur le béton. Elle ne constitue pas une pathologie du béton au sens strict (les expansions des produits formés étant majoritairement absorbées par la porosité), mais peut entraîner la corrosion des

armatures, qui elle est la première pathologie des ouvrages en BA. Il convient donc de rappeler ici les principales caractéristiques de cette pathologie.

Le dioxyde de carbone pénètre dans le béton à travers sa porosité et ses fissures, puis se dissout dans la solution interstitielle du réseau poreux du matériau. Il réagit alors avec la portlandite ($Ca(OH)_2$) et les silicates de calcium hydratés ($C-S-H$) pour former du carbonate de calcium $CaCO_3$. Les produits de la réaction sont plus volumineux que les réactifs, ce qui induit des expansions qui font diminuer la porosité. De plus, la réaction provoque une diminution du pH de la solution interstitielle, ce qui favorise la corrosion des armatures en présence de l'oxygène [96].

I.11.2.2. Principaux paramètres influençant la carbonatation

Comme pour toutes les pathologies liées au transfert des réactifs dans le béton, **la compacité du matériau** offre une protection contre la carbonatation. De plus, la littérature indique que le niveau d'HR semble affecter la cinétique de la carbonatation de manière complexe. Par exemple, d'après les résultats expérimentaux de Roy *et al.* [97], la profondeur de carbonatation a tendance à augmenter pour une HR située entre 52 et 75 %, et à diminuer après 75 % avant d'augmenter de nouveau pour une valeur d'HR aux alentours de 95 %.

I.11.2.3. Essais de carbonatation accélérée

La carbonatation est un phénomène lent caractérisé par l'apparition des taches de rouille sur la surface de l'ouvrage ou l'éclatement du béton d'enrobage dû à la corrosion. Ces premiers signes apparaissent généralement au bout de plusieurs dizaines d'années. Par conséquent, pour mener des études expérimentales, il est nécessaire de définir un essai de vieillissement accéléré et une méthodologie permettant de décrire la cinétique de la pathologie.

L'accélération de la carbonatation consiste à conditionner préalablement les échantillons, c'est-à-dire à les saturer en eau puis les conserver en étuve (pour une durée de 48 heures à 40 °C [96]). Les échantillons sont ensuite placés dans une enceinte alimentée par un mélange contenant 50 % d'air et 50 % de CO_2 . L'HR est contrôlée et maintenue aux alentours de 65 %. Une solution de phénolphthaléine est utilisée pour déterminer la profondeur de l'échantillon carbonaté.

I.11.3. La pénétration des chlorures

I.11.3.1. Mécanismes de pénétration des chlorures

L'exposition du béton aux chlorures est liée à deux origines principales : l'eau de mer et les sels de déverglaçage [96]. La pénétration de ces chlorures dans le BA conduit à une corrosion des armatures. Là encore, il s'agit plus d'une pathologie du BA que du matériau béton. Il existe deux mécanismes principaux pour décrire la pénétration des chlorures dans le béton :

- **La diffusion** : Dans un milieu saturé, la diffusion des chlorures résulte du gradient de concentration de ces derniers existant entre la solution dans les pores en surface et la solution dans les pores au cœur du béton [96] ;

- **La convection** : Pour un béton sec ou partiellement saturé, notamment dans le cas des cycles d'humidification et séchage, la pénétration des chlorures se fait par absorption capillaire ou migration dans la solution [96].

Parmi les différents paramètres influençant la cinétique de pénétration des chlorures dans le béton, **la composition chimique** du liant est considérée comme le plus important [98]. Lors d'un essai accéléré de diffusion des chlorures dans des échantillons de béton, une faible valeur de cette diffusivité est remarquée pour des bétons avec des ajouts minéraux. Cela est relié à l'aptitude de ces ajouts à réduire la porosité interne du béton [98] [99] [100]. Par ailleurs, la **température** est également un paramètre d'influence et favorise le processus de diffusion des chlorures dans le béton [101].

I.11.3.2. Essais accélérés de migration des chlorures

L'essai de migration des chlorures a pour objectif principal de déterminer le coefficient de diffusion effectif (D_{eff}) en régime permanent. Pour cela, un échantillon de béton est immergé entre une solution salée et une deuxième non salée. La migration des chlorures est déclenchée sous l'effet d'une différence de potentiel électrique et le calcul de coefficient de diffusion effectif D_{eff} se fait en régime permanent (quand les chlorures pénètrent dans l'échantillon de béton et le traversent).

I.11.4. Cycles de gel-dégel

I.11.4.1. Mécanismes d'endommagement au gel/dégel

La détérioration des ouvrages causée par le gel se produit généralement dans les régions humides subissant un hiver sévère, ainsi que dans les régions où l'utilisation des sels de déverglaçage est importante. La dégradation de la structure en BA peut se manifester suivant deux mécanismes :

- **La dégradation volumique** : Dans le cas où le béton est saturé en eau, la transformation de la phase liquide en glace induit une augmentation de son volume de l'ordre de 9 %. Des cristaux de glace se forment dans les pores capillaires les plus volumineux créant ainsi un déséquilibre thermodynamique. L'eau non gelée située dans les pores moins volumineux migre vers ces régions gelées en engendrant des pressions hydrauliques. A ces pressions s'ajoutent les pressions osmotiques, ces pressions sont liées aux mouvements d'eau dus à l'augmentation du gradient de concentration ionique suite la formation de la glace [102]. Après un nombre important de cycles, ces deux pressions peuvent fissurer la pâte de ciment [103].

- **La dégradation de surface** : La surface du béton sous l'effet des rayonnements solaires subit généralement un nombre plus important de cycles gel/dégel avec un intervalle de variation de température plus large, ce qui conduit à un écaillage du béton de surface. Par ailleurs, le dépôt

des sels de déverglaçage après la formation de glace sur la surface du béton induit une baisse très rapide de la température due à l'absorption de chaleur lors de la fonte de la glace, ce qui génère des contraintes thermiques conduisant à l'écaillage du béton [103].

I.11.4.2. Facteurs influençant la dégradation au gel/dégel

Comme expliqué précédemment, l'endommagement au gel/dégel est lié aux **conditions environnementales** (nombre, intensité et durée des cycles de gel/dégel, HR de l'air) ainsi qu'à l'utilisation **des sels de déverglaçage** [103]. Cependant la résistance au gel dépend aussi des **propriétés mécaniques du béton** (résistance à la traction [104], bien que cette corrélation ne soit pas toujours confirmée expérimentalement [105]) à **l'état de la surface de l'ouvrage** (l'écaillage se produisant préférentiellement au voisinage des défauts de surface) et aux **caractéristiques du réseau poreux** (taille et nombre de pores [104]).

Pour évaluer la dégradation au gel/dégel d'un béton, il existe deux essais normalisés reproduisant en laboratoire les cycles de gel/dégel :

- pour le gel sévère, le gel et le dégel sont effectués dans l'eau (norme NF P18-424 [106]) ;
- pour le gel modéré, le gel est effectué dans l'air et le dégel dans l'eau (norme NF P18-425 [107]).

I.11.5. La RSI

La RSI est une pathologie due à la formation interne et tardive de l'ettringite qui entraîne la création de produits gonflants à l'intérieur du béton. Il en résulte une dégradation de la cohésion entre la pâte de ciment et les granulats, puis une fissuration pouvant compromettre l'intégrité de l'ouvrage comme illustré dans la Figure I-47. Cette pathologie mise en évidence à la fin des années 1980 [108] est différente de la RSE (Réaction Sulfatique Externe) qui nécessite un apport extérieur de sulfates [109].



Figure I-47 : Manifestations de la RSI (réseau de fissures) [110].

I.11.5.1. Mécanismes de la RSI

La formation différée de l'ettringite dans le béton, a lieu après sa prise, sans apport de sulfates externes et concerne les bétons ayant subi au jeune âge un échauffement à cœur supérieur à 65 °C. Le mécanisme peut être décomposé en deux étapes :

- **Constitution d'une source de sulfates** : Une élévation importante de la température au jeune âge limite la formation d'ettringite primaire de sorte que des sulfates n'ayant pas réagi constituent une source susceptible de réagir plus tard ;

- **Précipitation de l'ettringite** : Plus tard dans la vie de l'ouvrage (après durcissement du béton et retour à la température ambiante), la précipitation de l'ettringite peut se produire en présence d'eau et développer des pressions élevées conduisant à un gonflement du béton.

Dans [111], Brunetaud estime que les mécanismes de la RSI suivent quatre phases (voir la Figure I-48) :

1. Phase initiale où l'ettringite est déstabilisée ;
2. Phase latente où l'ettringite précipite sans contrainte mécanique ;
3. Phase de détérioration accélérée où les gonflements se manifestent par une fissuration du béton ;
4. Phase d'équilibre qui correspond à l'arrêt des gonflements.

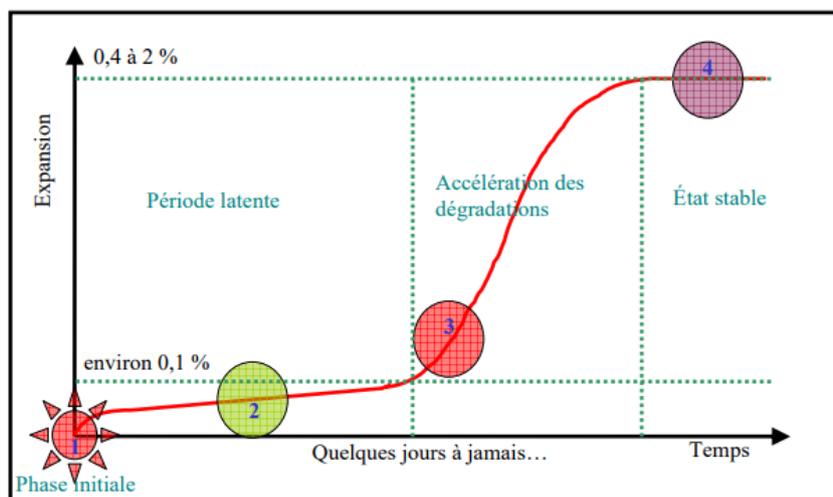


Figure I-48 : Mécanisme de gonflement de la RSI proposé par Brunetaud [111].

I.11.5.2. Principaux facteurs influençant la RSI

Comme cela a été précisé, le critère déclencheur d'une RSI est le dépassement d'une température seuil. Ce n'est cependant pas le seul facteur. En effet, la nature des granulats et de l'environnement, notamment la présence d'eau [110], sont des facteurs à prendre en compte. De plus, les teneurs en alcalins, en aluminates et en sulfates dans le béton affectent la stabilité de l'ettringite. La présence des alcalins peut favoriser un relargage tardif de sulfates et donc une formation d'ettringite après durcissement du béton. Une présence de sulfate peut

engendrer des expansions précoces dans le béton. De même, les aluminates étant un des composants de l'ettringite, leur présence augmente le risque du développement de la pathologie [108].

I.11.5.3. Essais de développement accéléré de la RSI

La RSI est une pathologie qui peut apparaître dans les ouvrages de génie civil après plusieurs années de service. L'évaluation de cette pathologie au laboratoire ne peut donc se faire qu'à partir d'un processus d'accélération de la pathologie. Des traitements thermiques sont donc appliqués aux échantillons en début d'essais pour déstabiliser l'ettringite et initier la RSI. Ensuite, un suivi dimensionnel des échantillons est réalisé en continu. Le conditionnement des éprouvettes ainsi que le protocole de vieillissement accéléré peuvent varier. Par exemple, dans l'essai de Duggan et Scott [112], il est procédé à des successions de phases d'échauffement à 82 °C et de phases d'immersion dans l'eau distillée à 21 °C. Le matériau est alors jugé réactif si les expansions dépassent un seuil de 0,05 % [108] [110]. Dans l'essai proposé par Fu [113], les éprouvettes sont tout d'abord conservées 24 heures à 23 °C dans une enceinte humide. On applique ensuite deux échauffements successifs : un traitement thermique de 12 heures à 95 °C suivi d'une phase de conservation en eau à 23 °C durant 6 heures. Le second échauffement correspond à l'application d'une température de 85 °C durant 24 heures. La référence des mesures des déformations est définie directement avant le second traitement thermique. On suit alors les déformations pour 42 jours sur les corps d'épreuve immergés en eau de chaux saturée à 23 °C afin de favoriser le développement de la RSI. Le seuil de déformation à la fin de cet essai est de 0,04 % [108] [110].

I.11.6. La RAG

I.11.6.1. Mécanismes de la RAG

La RAG est une pathologie du béton découverte en 1940, qui se manifeste par une réaction entre les phases siliceuses réactives des granulats et les alcalins présents dans la solution interstitielle.



Figure I-49 : Béton affecté par la RAG [114].

La RAG induit des gonflements internes suivis de la fissuration du béton qui, comme la RSI, peuvent affecter gravement les ouvrages atteints par cette pathologie (fissuration en faïençage, mouvements, déformations, éclatements...). Un exemple de béton attaqué par la RAG est illustré dans la Figure I-49. Il existe plusieurs mécanismes complémentaires expliquant la RAG :

- **Mécanisme du gel expansif selon l'approche « topochimique »** : ce mécanisme correspond à la formation d'un gel expansif, [115] à la surface des granulats réactifs et se déroule en trois phases :

-Phase 1 : Attaque des liaisons silanols (neutralisation des groupes silanols $Si-OH$ par les ions OH^- et attaque des ponts siloxanes par les ions OH^-) ;

-Phase 2 : Création d'un gel silico-alcalin (précipitation de produits amorphes ou « gel » après rééquilibrage de la charge de la solution par des alcalins) ;

-Phase 3 : Vieillessement du gel (certains ions Na^+ et K^+ , contenus dans le gel, peuvent être remplacés par des ions Ca^{2+}).

- **Mécanisme du gel expansif selon l'approche « trans-solution »** : une deuxième approche situe la formation de gel expansif dans la solution interstitielle [116]. Là encore, le processus se déroule en trois phases :

-Phase 1 : mécanisme topochimique (transformation des siloxanes en silanes, formation du gel de silice et ionisation de ce dernier) ;

-Phase 2 : Dissolution du gel et passage en solution (accord avec le principe de Le Chatelier) ;

-Phase 3 : Formation des gels d'alcali-réaction (réaction entre les ions calcium et des silicates en présence d'ions potassium, sodium et hydroxydes).

- **Gonflement granulaire** : Dans cette approche proposée par Bulteel *et al.* [117], le gonflement initial est attribué aux granulats eux-mêmes du fait de la transformation structurale de la silice des granulats.

I.11.6.2. Principaux paramètres influençant la RAG

Il a été démontré (par exemple dans [118]) que de nombreux paramètres influencent la RAG. La **température** joue un rôle d'accélération de la réaction, en modifiant l'instant de déclenchement de la pathologie, sa cinétique et l'amplitude de gonflements. Les **substances chimiques** contenues dans les adjuvants et les additifs peuvent aussi influencer la cinétique de la RAG. Dans [119], Mu et Li ont ainsi mis en évidence que certaines additions (sel de nitrite de calcium, cendres volantes et fumée de silice) diminuent l'amplitude des gonflements causés par cette pathologie. L'intensité des expansions peut aussi varier selon le niveau **HR** de l'environnement de l'ouvrage ou milieu de conservation des éprouvettes. La RAG se développe pour une HR de conservation des éprouvettes comprise entre 80 % et 100 % [115]. Cependant, d'après Poyet [120], l'HR n'est pas un critère objectif pour d'écrire l'effet de l'eau, l'expansion étant plutôt corrélée positivement à la prise de masse. Les travaux de Shi *et al.* [121] ainsi que ceux de Saint-Pierre *et al.* [122] dans lesquels les éprouvettes testées étaient immergées en solution alcaline, ont permis d'aboutir aux mêmes conclusions. Le gain de masse est dû principalement à l'absorption de la solution conduisant à la formation du gel expansif.

Concernant les **granulats**, c'est bien leur réactivité qui constitue un facteur majeur de la pathologie, puisque les expansions augmenteront avec la quantité de réactifs (silice dans les

granulats). Cependant, les propriétés géométriques et mécaniques des granulats affectent elles aussi la cinétique et les valeurs des expansions. Selon [123], [124] et [125], la rigidité des granulats étant dépendante de leurs tailles, les expansions induites par la RAG dépendent des diamètres des granulats utilisés. Par ailleurs, la forme des granulats est un paramètre à prendre aussi en considération. La forme elliptique, triangulaire, rectangulaire ou circulaire des granulats affecte l'anisotropie de l'expansion causée par la RAG. De plus, la rigidité du béton étant influencée par la forme des granulats, l'amplitude des expansions est alors affectée par la forme des granulats [126].

I.11.6.3. Essais de développement accéléré de la RAG

Ce sont principalement deux types d'essais qui sont pratiqués :

- **Essai de gonflement en atmosphère humide (HR > 95 %)** : Cet essai consiste à fabriquer des éprouvettes en béton avec une teneur en alcalis de $5,25 \text{ kg/m}^3$ et un rapport E/C compris entre 0,40 et 0,42. Les éprouvettes sont ensuite entreposées à $38 \text{ }^\circ\text{C}$ sur une couche de 2 à 5 cm d'eau dans des conteneurs hermétiques (voir [127] pour une description plus complète du protocole expérimental). Le suivi des gonflements évalue alors la réactivité des granulats. L'essai peut être réalisé sur des carottes extraites d'un ouvrage pour des mesures d'expansion résiduelle ;

- **Essai d'immersion en solution alcaline** [127] : Cet essai correspond à une mesure indirecte de la quantité de silice réactive restante dans le béton d'un ouvrage. Pour cela, les carottes extraites de l'ouvrage sont conservées dans un bain de solution saline ($[\text{NaOH}] = 1 \text{ mol/l}$) durant 24 jours à $80 \text{ }^\circ\text{C}$ ou durant 6 mois à $38 \text{ }^\circ\text{C}$. On vérifie ainsi si les granulats peuvent encore développer des gonflements en les plaçant dans un environnement riche en alcalis (Na^+). Il faut analyser les résultats des essais avec beaucoup de précaution car ces essais peuvent poser des problèmes de représentativité [127].

I.11.7. Couplage RAG / RSI

I.11.7.1. Études du couplage RAG / RSI

La RSI et la RAG sont deux pathologies qui produisent les mêmes effets macroscopiques d'expansion dans le béton. Lorsqu'un ouvrage est atteint de l'une de ces pathologies, il est difficile d'identifier laquelle est responsable des détériorations observées. De même, lorsque le béton est atteint par les deux pathologies, il est très complexe de distinguer la contribution aux dégradations observées de chacune de ces deux pathologies. Pour diagnostiquer l'état d'un ouvrage atteint et prédire sa durée de vie résiduelle, il est cependant important d'étudier individuellement chaque réaction, mais aussi le couplage entre les deux pathologies, notamment vis-à-vis des étapes liées à la cinétique des réactions lors d'un tel couplage. Par exemple, en étudiant des traverses de chemin de fer en béton détériorées en Finlande, les auteurs dans [112] ont conclu que les dégradations observées pouvaient être attribuées à une formation tardive de l'ettringite (RSI). Cependant, pour le béton de ces mêmes traverses, les auteurs dans [128] ont conclu que la RAG constitue la principale cause de fissuration qui aurait été aggravée par le gel et le dégel dans les conditions climatiques de la Finlande. La formation

d'ettringite a été la dernière étape de la détérioration, et est considérée comme étant le résultat de la fissuration due à la RAG plutôt que sa cause.

Plusieurs auteurs ont suivi le développement des expansions et des fissurations dans des bétons avec ou sans granulats réactifs, soumis ou non à des cures thermiques pour souligner le couplage des processus mécaniques et chimiques existants entre ces deux pathologies. Les résultats des études expérimentales dans [129], [130], [131] et [132] montrent que la RAG influence beaucoup la cinétique de la RSI. Selon ces études, la formation de l'ettringite tardive se fait surtout au niveau des fissures déjà créés par la RAG. Les fissures sont alors remplies et une expansion supplémentaire peut avoir lieu à cause de la formation de l'ettringite. Une explication chimique est aussi proposée par plusieurs auteurs pour justifier la variation de la cinétique de la formation de l'ettringite en cas du couplage RAG / RSI. Par exemple d'après Diamond [130], en plus de la génération de fissures de la RAG, l'association commune entre la RAG et la RSI est d'origine chimique et est liée à la réduction de la concentration d'hydroxyde alcalin associée à la RAG qui peut favoriser la précipitation tardive d'ettringite.

I.11.8. Conclusions de l'étude bibliographique relative aux pathologies du béton

Comme cela a été précisé dans les paragraphes précédents, le béton est susceptible de développer diverses pathologies. Ces dernières peuvent apparaître rapidement dans l'ouvrage comme elles peuvent se déclencher après plusieurs dizaines d'années. La cinétique de développement de ces pathologies dépend de nombreux paramètres tels que l'environnement de l'ouvrage où la composition chimique du béton qui le constitue. L'étude de ces pathologies est réalisée en laboratoire au travers d'essais accélérés permettant d'initier leur développement le plus rapidement possible. Cependant, ces procédés d'accélération peuvent soulever des problématiques de représentativité.

La RSI, la RAG et leur couplage sont les pathologies étudiées dans le cadre du projet ODOBA. En revanche, les conditions climatiques de la région où sont situés les blocs d'étude ainsi que la nature des protocoles expérimentaux appliqués à ces corps d'épreuve pour déclencher ces pathologies peuvent conduire au développement d'autres pathologies elles aussi déjà détaillées dans ce chapitre (lixiviation, corrosion, carbonatation, gel/dégel). La détection précoce du développement de ces pathologies dans un ouvrage permettrait d'anticiper une intervention de maintenance avant que la structure ne soit sévèrement dégradée. Puisque les gonflements internes sont les conséquences de la majorité des pathologies présentées. Les capteurs à FO peuvent alors être utilisés pour détecter de manière précoce le développement de ces pathologies. L'apport du travail de cette thèse pour le projet ODOBA est de préciser les conditions d'utilisation des capteurs repartis à FO pour la détection et le suivi du développement de la RAG et la RSI dans les blocs de béton du projet et proposer des critères pour l'analyse et l'interprétation des résultats de mesure.

I.12. Utilisation des capteurs à FO pour le suivi spécifique des pathologies des ouvrages en BA

Comme cela a été discuté précédemment, les capteurs à FO permettent un suivi des déformations et de la température de manière quasi-répartie (par association de plusieurs capteurs ponctuels dans une seule FO) ou de manière continue avec une résolution spatiale très fine. Ces mesures peuvent être très utiles pour vérifier le bon fonctionnement de l'ouvrage en service, mais elles revêtent un caractère particulièrement important lorsqu'elles permettent de détecter les premières manifestations de pathologies et de dégradations locales du béton de l'ouvrage qui, comme cela a été souligné dans le paragraphe précédent, peuvent mener à la ruine structurelle.

La mesure des déformations induites par un gonflement du béton dû à une pathologie de type RAG ou RSI peut s'effectuer suivant les mêmes techniques que celles de suivi d'un béton sain (bien qu'une protection supplémentaire du capteur puisse être nécessaire). Dans ce paragraphe, nous nous intéressons plutôt à quelques études visant le développement de méthodes de suivi, par capteur à FO, du développement des pathologies du BA au travers des indicateurs que sont la fissuration du béton et la corrosion des aciers. Certaines de ces techniques pourront ensuite être mises en œuvre dans le cadre du projet ODOBA de l'IRSN, où des corps d'épreuve en BA, de taille représentative, ont été instrumentés par capteurs à FO destinés à la détection et le suivi des pathologies RAG et RSI (chapitre IV).

I.12.1. Détection des fissures par capteur à FO

La grande sensibilité des systèmes de mesure basés sur les capteurs à FO permet une détection des fissures avant même que ces dernières ne soient visibles à l'œil nu (soit quelques dixièmes de millimètres). Ce résultat a été notamment présenté dans les travaux de Hénault *et al.* [2] où les auteurs ont testé une poutre en BA en flexion 4-points. Deux types de câble à FO ont été utilisés : un premier câble installé dans un ruban adhésif (collé en surface de la poutre) et un deuxième câble contenant plusieurs FOs standards (attachés aux armatures de la poutre). Des extensomètres à corde vibrante ont aussi été noyés dans la poutre pour fournir une mesure de référence.

Les profils de mesures des déformations par capteurs à FO font donc apparaître plusieurs pics qui correspondent à des fissures dans les zones en traction de la poutre (voir la Figure I-50) [33] [133] [134].

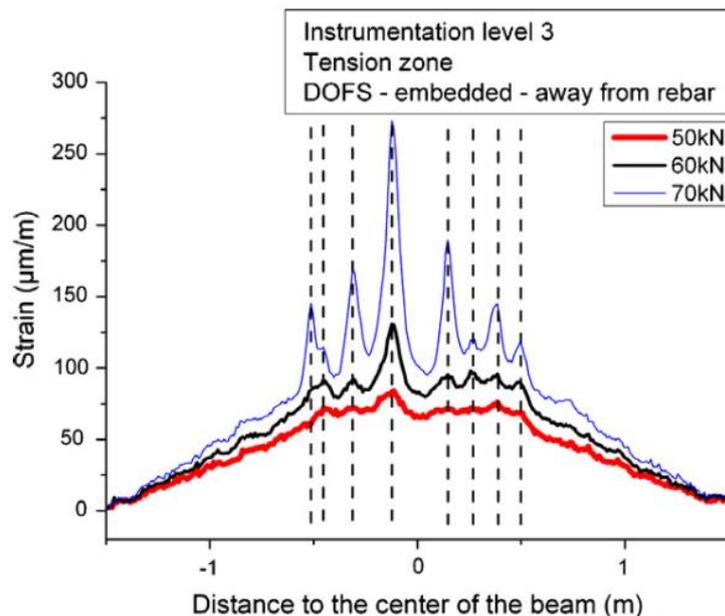


Figure I-50 : Profils de déformations relevés par les capteurs à FO, faisant apparaître des pics qui correspondent à des débuts de fissuration dans les régions en traction d'une poutre en BA durant un essai de flexion 4-points [2].

I.12.2. Suivi de la corrosion des armatures du BA

La corrosion des armatures est la pathologie la plus répandue dans les ouvrages en BA. Différentes techniques permettent la détection et le suivi de la corrosion des armatures en se basant sur des mesures de température ou de déformation par capteur à FO.

I.12.2.1. Détection de la corrosion par mesure des déformations

Une technique de détection de la corrosion des armatures en acier par mesure répartie des déformations par capteurs à FO a été proposée par Zhao *et al.* [135]. La technique consiste à enrouler les armatures avec des FOs. Les produits de corrosion étant plus volumineux que le volume d'acier corrodé, les expansions causées par la corrosion induisent une traction des FOs (voir le schéma de la Figure I-51).

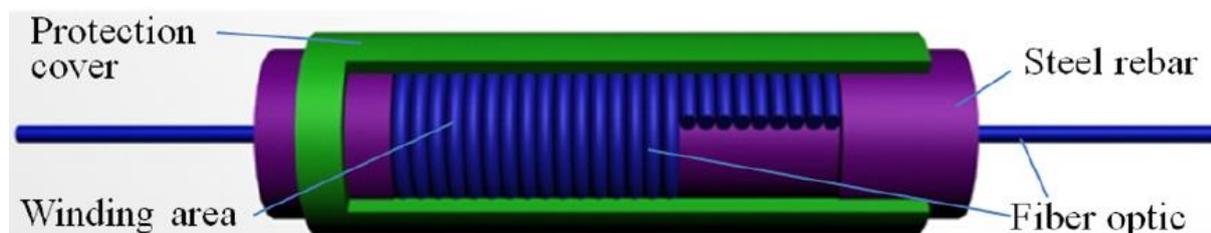


Figure I-51 : Principe de bobinage proposé dans [135] pour la détection de la corrosion des armatures.

A titre d'exemple, la Figure I-52 illustre l'évolution de l'expansion de deux armatures corrodées mesurée par deux capteurs à FO (S.1 et S.2).

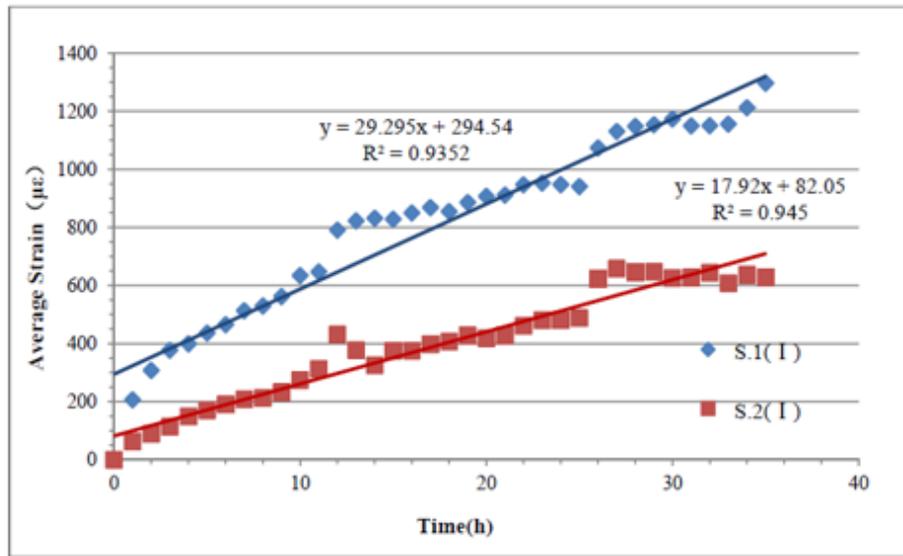


Figure I-52 : Évolution des déformations mesurées par les FO enroulées autour de deux armatures durant leur corrosion [135].

Une autre technique, proposée par Davis [136] consiste à coller les extrémités de FOs aux armatures longitudinales d'une poutre en BA sollicitée en flexion maintenue. Les FOs étaient munies d'un revêtement primaire en nylon et ont été collées, puis ont été protégées lors du collage par un revêtement en époxy. Lors du processus de corrosion accélérée des armatures, les capteurs à FO ont pu détecter la variation de déformations des armatures induite par la perte progressive de liaison entre le béton et les armatures corrodées.

Dans [137], les auteurs ont enroulé des capteurs à réseau de Bragg autour des éprouvettes cylindriques en BA pour détecter l'expansion de l'échantillon durant 36 jours sous corrosion accélérée. Là encore, les capteurs ont été protégés par une fine couche d'époxy. La Figure I-53 illustre l'évolution de l'expansion durant la corrosion de l'armature de l'échantillon cylindrique. Le changement de la vitesse de variation de la déformation identifiable sur la figure peut être attribué à la formation des fissures dans le béton, ce qui fournit un nouvel espace pour les produits de corrosion.

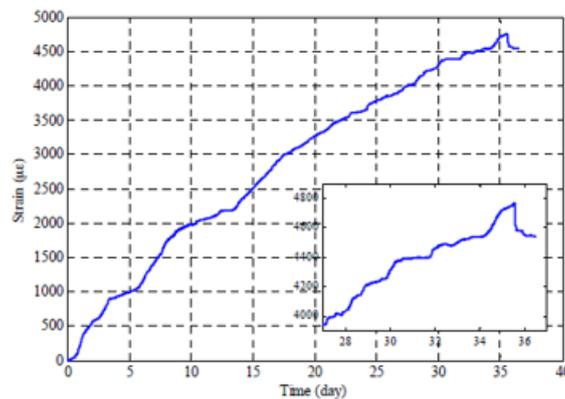


Figure I-53 : Évolution des déformations dans la FO entourant un cylindre soumis à l'essai de corrosion accéléré et zoom sur le changement de vitesse d'évolution des déformations [137].

I.12.2.2. Détection de la corrosion par mesure de température

Une technique originale a été proposée par Li *et al.* [138] pour détecter l'initiation de la corrosion des armatures en mesurant la température par capteurs à FO. Cette technique se base sur le fait que la conductivité thermique des produits de corrosion est très inférieure à celle des armatures en acier non corrodées. La cinétique de propagation de la chaleur le long de l'armature n'est donc plus la même quand cette dernière est corrodée.

Pour mettre en œuvre la technique de Li *et al.*, un faisceau de fibres de carbone est collé sur l'armature de l'élément en BA et est utilisé comme élément chauffant. Un capteur à réseau de Bragg destiné à mesurer la température est placé au milieu du faisceau tout en restant libre à se déplacer. L'essai décrit dans [138] est mené sur une éprouvette en BA soumise à la corrosion accélérée. Les résultats de l'essai montrent que plus la couche de rouille est épaisse, plus la vitesse de chauffe et la température maximale sont élevées. En revanche, lors de l'apparition des fissures dans l'éprouvette et à l'interface armature/béton, la température maximale chute de manière considérable. Cette baisse de température maximale peut être attribuée au fait que la zone de corrosion devient exposée à l'air et la chaleur n'y est plus piégée.

I.12.2.3. Suivi des déformations des éprouvettes sous essai gel/dégel accéléré

Les capteurs à FO peuvent être utilisés de façon simple pour détecter les contraintes résiduelles issues de la détérioration du béton suite à aux cycles de gel/dégel. Dans [139], un essai accéléré est mené sur une éprouvette cylindrique entourée de capteurs à réseau de Bragg. Ceux-ci sont fixés avec un adhésif à base d'époxy autour de l'éprouvette en béton de façon à mesurer les déformations ortho-radiales. L'enregistrement des déformations par les capteurs à FO s'effectue en continue durant l'application des cycles gel/dégel. L'apparition de déformations résiduelles croissantes lors des moments de dégel indique alors un endommagement progressif du béton.

I.13. Conclusion générale du chapitre I

Le sujet de cette thèse étant au cœur de trois axes principaux, ce premier chapitre bibliographique développe les notions importantes pour chaque axe.

Dans la première partie, une présentation des capteurs à FO est proposée et permet de souligner les avantages qu'offre cette technologie en la comparant aux techniques de mesures par capteurs dits « traditionnels ». Des protections mécaniques et chimiques sont généralement adoptées pour protéger une instrumentation par capteurs à FO noyés ou collés en surface. Toutefois, cette protection peut affecter négativement la fiabilité des mesures relevées par ces capteurs. Les déformations dans le béton par exemple ne sont pas parfaitement transmises au noyau en silice de la FO. Une partie de ces déformations est dissipée par cisaillement dans les couches intermédiaires de protection. A cela s'ajoutent les contacts aux interfaces qui ne sont pas parfaits et accentuent ces pertes. La partie traitant le transfert d'effort mécanique constitue donc un axe important permettant d'introduire plusieurs problématiques qui seront abordées par la suite : FTM entre le câble et matériau hôte lorsque celui-ci est un matériau continu, FTM entre le câble et matériau hôte au droit d'une fissure et évolution de la FTM lors du vieillissement du câble. Seule la maîtrise de ces problématiques permettra en effet une interprétation pertinente des mesures relevées par les capteurs à FO

Un état de l'art sur la durabilité des FOs est ensuite présenté dans ce chapitre. Cette étude de durabilité se limite bien souvent au comportement du noyau de la FO et de son revêtement primaire lorsque la FO est soumise à un environnement agressif, d'un point de vue thermique, chimique ou mécanique, ou lors de sollicitation couplant plusieurs de ces aspects. L'objectif principal du travail de cette thèse est par conséquent de compléter cette étude de durabilité pour des câbles à FO, disposant de plusieurs couches de protection et qui peuvent être noyés ou collés en surface des structures de génie civil, et donc subir des sollicitations du milieu environnant.

En parallèle à la campagne expérimentale de durabilité envisagée au laboratoire et menée sur des éprouvettes de dimensions réduites, les corps d'épreuve du projet ODOBA seront instrumentés par capteurs à FO noyés et collés en surface afin de détecter et de suivre les deux pathologies de gonflement interne du béton (RAG et RSI) et le couplage de ces deux pathologies. La deuxième partie de ce chapitre a donc été rédigée pour offrir une présentation voulue générale des pathologies qui peuvent affecter les ouvrages en BA.

La présentation des techniques innovantes proposée dans la dernière partie de ce chapitre permet de dresser un état de l'art des méthodes de suivi, par capteur à FO, des pathologies du BA au travers de la détection et de la mesure de la fissuration du béton et de la corrosion des aciers. Certaines de ces techniques ont influencé les travaux décrits au chapitre IV et menés sur les blocs massifs d'essai du projet ODOBA, subissant les pathologies de RSI et/ou RAG.

II. Protocoles expérimentaux et programme d'étude de la durabilité des câbles à FO

II.1. Introduction

Le présent chapitre détaille le programme expérimental qui a été défini et mis en œuvre dans le cadre de l'étude sur la durabilité des capteurs à FO destinés aux mesures des déformations des ouvrages en béton. Ce programme comprend des essais de vieillissement accéléré ou non, basés sur une reproduction simplifiée et éventuellement sévérée de l'environnement de service auquel est soumis le câble noyé dans la structure ou collé à la surface du béton. Dans le premier cas (câble noyé), et comme détaillé précédemment dans l'étude bibliographique, l'alcalinité du milieu cimentaire est le facteur le plus agressif vis-à-vis de la durabilité du capteur. En revanche, dans le deuxième cas (câble collé en surface), c'est l'environnement extérieur qui peut affecter la durabilité de l'instrumentation par capteurs à FO, notamment au travers des cycles de température et d'humidité.

Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu les deux câbles sélectionnés pour cette étude de durabilité et les différentes formulations de béton destinées à recevoir ces capteurs, en liaison avec le projet ODOBA (chapitre IV). En second lieu, nous détaillerons les protocoles expérimentaux suivis dans cette campagne de durabilité et qui peuvent être classés selon deux catégories : i) des essais de vieillissement accéléré ou non visant à évaluer la durabilité des capteurs à FO noyés dans le béton et collés en parement des structures ; ii) des essais de caractérisations mécanique, physico-chimique et géométrique des échantillons, réalisés à différentes échéances du vieillissement et permettant d'appréhender les effets des différents environnements sur les performances du capteur.

II.2. Câbles à FO

L'instrumentation durable d'un ouvrage en BA par capteurs à FO, noyés ou collés en parement, implique que le cœur en silice de la FO soit protégé de l'environnement extérieur. Le revêtement primaire de la fibre n'est pas capable d'assurer à lui seul cette fonction de protection, et par conséquent, ce sont généralement des câbles à FO munis de gaines de protection et de dispositifs de renforcement mécanique qui sont utilisés dans les applications sur le terrain [14] [140].

Deux câbles à FO, facilement disponibles dans le commerce et ayant déjà été mis en œuvre sur une large variété d'ouvrages de génie civil, ont été sélectionnés pour cette étude de durabilité. Cependant, malgré leur utilisation courante sur le terrain, ces deux câbles ne disposent pas de documentation spécifiant leur durabilité à long terme dans les conditions de service. Nous présentons dans ce qui suit les principales caractéristiques des deux câbles sélectionnés.

II.2.1. Câble NEUBREX FN-SILL-3

Le câble NEUBREX FN-SILL-3 constitue une évolution du modèle FN-SILL-2 qui avait déjà été utilisé pour l'instrumentation de blocs de béton expérimentaux dans le cadre de la thèse de J. Jabbour à l'IRSN [141]. Cette nouvelle version du câble diffère de la précédente par la présence de reliefs de surface destinés à améliorer l'adhérence avec le béton.

Comme l'illustrent les images de la Figure II-1, ce câble se compose de :

- deux FOs monomodes dont les revêtements primaires sont en acrylate ;
- deux tiges en acier de 0,3 mm de diamètre, assurant un renforcement mécanique du câble ;
- une gaine externe ($\approx 4,5 \text{ mm} \times 1,7 \text{ mm}$) en oléfine qui est un élastomère très souple permettant d'assurer une protection chimique et mécanique du câble (voir l'Annexe F-VI.6.1).

Selon la fiche technique du fournisseur, le câble offre une bonne résistance thermique et peut être utilisé à des températures atteignant les $80 \text{ }^\circ\text{C}$ (voir l'Annexe F-VI.6.1).

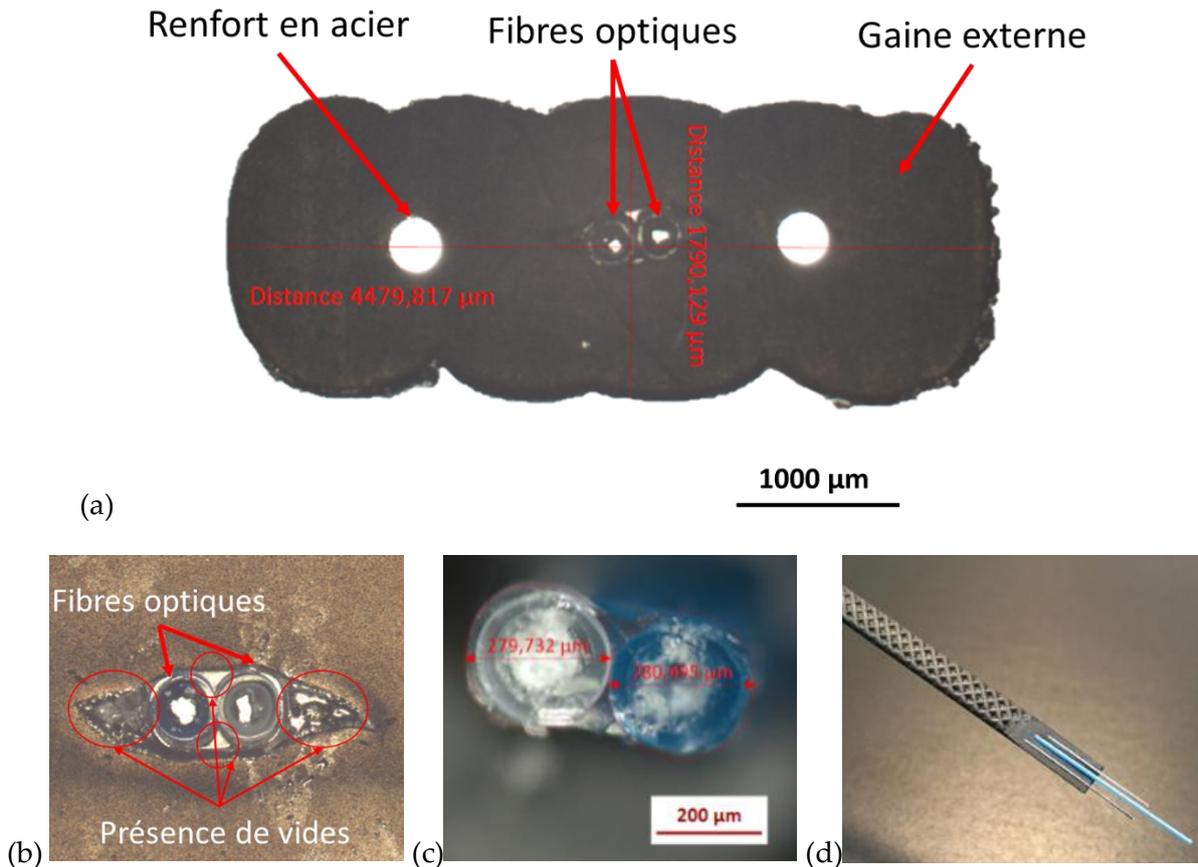


Figure II-1 : (a) Section du câble Neubrex FN-SILL-3 observée au microscope optique ; (b) Section de la partie centrale du câble, observée au microscope optique, montrant des vides au niveau de l'interface revêtement primaire de la FO/revêtement externe du câble ; (c) Section des deux FOs centrales ; (d) Reliefs au niveau de la surface externe du câble, avec une partie dénudée.

Les premières observations au microscope optique indiquent la présence de quelques vides au niveau de l'interface revêtement primaire des FOs/gaine en élastomère. Ces vides qui résultent de défauts de fabrication peuvent affecter négativement le transfert d'effort du milieu hôte entourant le câble vers le cœur en silice des FOs interrogées. L'importante souplesse de la gaine externe semble susceptible, elle aussi, d'entraîner un déficit de transfert d'effort. En revanche, la liaison entre les tiges en acier et le revêtement externe semble assurée par une interface de qualité, offrant ainsi une protection mécanique à l'ensemble du câble.

II.2.2. Câble AFL DNS-5553

Le câble AFL DNS-5553 résulte d'une évolution de la précédente version référencée AFL DNS-0470 étudiée dans le cadre de la thèse de J. M. Hénault [14]. D'après la fiche technique du fournisseur, ce nouveau modèle est doté d'une gaine externe résistante en milieu basique ($pH > 13$), et serait donc adapté à une insertion dans le béton (voir l'Annexe F-VI.6.2). Dans la thèse de J. M. Hénault, il avait été conseillé au câblé de remplacer la gaine externe en Hytrel du câble 0470, qui était très sensible aux alcalins, par un revêtement plus résistant en polyéthylène haute densité (PEHD). La fiche du modèle DNS-5553 ne précise cependant pas la nature du revêtement utilisé sur cette évolution du câble.

Comme l'illustrent les images de la Figure II-2, ce câble contient :

- 6 fibres enroulées autour d'un jonc central et noyées dans une matrice polymère molle (gel de silicone). Parmi ces 6 fibres, deux sont des FOs monomodes avec revêtement primaire en acrylate, deux sont des FOs multimodes elles aussi recouvertes d'un revêtement primaire en acrylate, et les deux dernières servent simplement à faciliter la production du câble ;
- un jonc central, constitué d'un matériau composite à fibres de verre, dont le rôle principal est d'assurer une protection mécanique du câble ;
- une gaine externe de diamètre 2,1 mm environ, constituée d'un revêtement bicouche (une couche interne rigide en polymère époxyde, et une couche externe plus souple en thermoplastique), conférant au câble une protection chimique vis-à-vis du milieu extérieur.

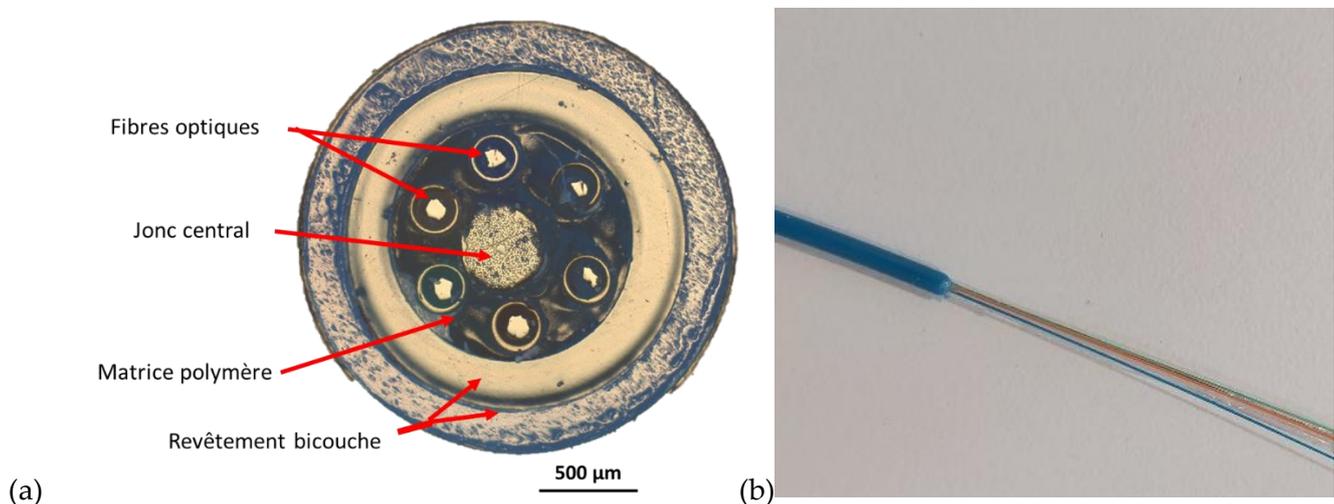


Figure II-2 : (a) Section du câble AFL DNS-5553 observée au microscope optique ; (b) Photographie du câble avec une partie dénudée de son revêtement externe.

A partir de ces premières observations au microscope, on peut conclure que l'interface entre les deux couches constituant la gaine externe semble en mesure d'assurer le transfert des efforts mécaniques entre ces deux couches (un glissement relatif d'une couche sur l'autre n'est cependant pas à exclure). En revanche, la présence de la matrice molle entre le revêtement externe et les fibres est susceptible d'affecter négativement le transfert d'effort vers les fibres.

A la manipulation, la couche externe du câble AFL semble beaucoup plus rigide que celle du câble Neubrex, ce qui pourrait améliorer le transfert d'effort du béton vers le câble. Cependant, la surface externe très lisse pourrait limiter le niveau d'adhérence entre le câble et le béton. La qualité de l'interface câble/béton sera évaluée dans le cadre de ce travail de thèse pour les deux câbles sélectionnés.

II.2.3. Comparaison des deux câbles

Les structures générales des deux câbles sont très différentes. Toutefois, certains composants des deux câbles remplissent des rôles identiques. En effet, le jonc central du câble AFL et les deux tiges en acier du câble Neubrex constituent des éléments de renforcement qui offrent dans les deux cas une protection mécanique du capteur. Les gaines externes des deux câbles ont pour fonction principale d'assurer une protection chimique des FOs.

Une partie importante des investigations sur la durabilité des deux câbles consistera à caractériser ces trois éléments (FOs, éléments de renforcement, gaine externe - voir la Figure II-3) ainsi que leurs interfaces.

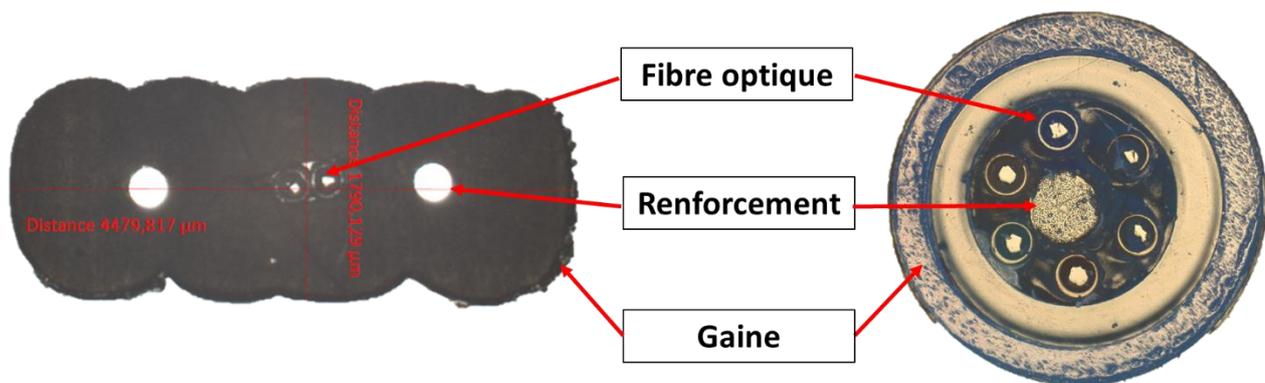


Figure II-3 : Sections des deux câbles à FO observées à l'aide du microscope optique.

II.3. Eprouvtes de l'étude

II.3.1. Types d'éprouvettes de l'étude

Suite à la sélection des câbles, différents types d'échantillons (câbles et adhésif) et éprouvettes (béton et béton instrumenté) ont été conçus pour assurer les besoins de l'étude de durabilité, en vue de caractériser mécaniquement (à l'état initial puis aux différentes échéances de vieillissement) : l'adhésif utilisé pour le collage des câbles en parement, les câbles à FO seuls, les bétons, les câbles à FO noyés dans le béton ou collés sur sa surface. Ces différents types d'éprouvettes sont illustrés sur la Figure II-4.

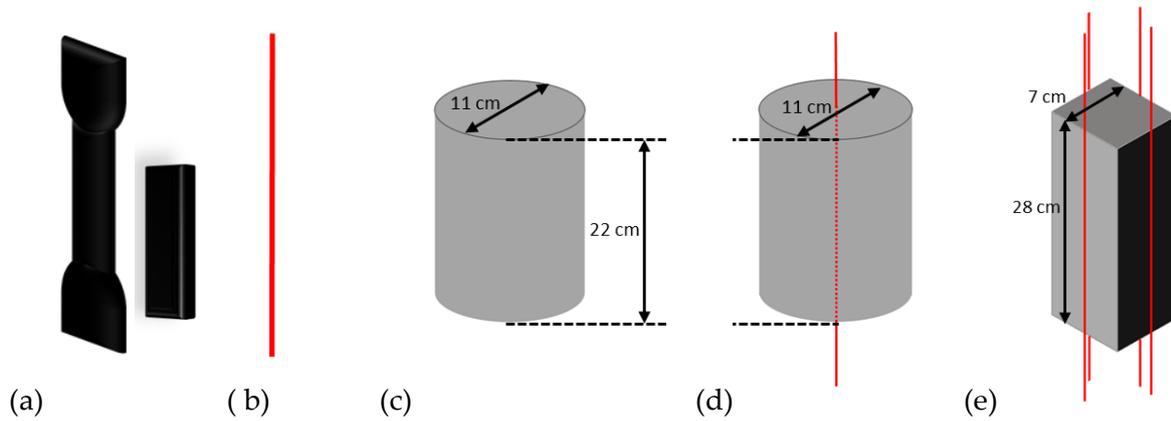


Figure II-4 : Schémas des différents types d'échantillons utilisés dans cette étude : (a) Échantillons d'adhésif (b) échantillons de câbles à FO, (c) cylindres de béton \varnothing 11 - 22 cm, (d) cylindres de béton \varnothing 11 - 22 cm avec câbles à FO noyés et (e) prismes de béton $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ avec câbles à FO collés dans des engravures sur les 4 faces latérales.

Les échantillons d'adhésif (Figure II-4-a), de forme haltère conforme à la norme EN-ISO 527-2 [142], sont destinés à la caractérisation mécanique en traction, tandis que des caractérisations physico-chimiques seront effectuées sur des petites éprouvettes prismatiques d'adhésif de taille $50 \times 12 \times 2 \text{ mm}^3$.

Les échantillons de câbles (Figure II-4-b) sont destinés à la caractérisation mécanique en traction et en arrachement et aux caractérisations physico-chimiques.

Les cylindres de béton de dimension \varnothing 11 - 22 cm (Figure II-4-c) sont destinés à la caractérisation des bétons en compression.

Les cylindres de béton avec câbles noyés dans l'axe central (Figure II-4-d) ont été conçus pour évaluer les caractéristiques mécaniques de l'interface câble/béton dans le cas d'une instrumentation par capteurs à FO noyés dans le béton. Une gaine en PVC est utilisée afin de maîtriser la longueur des câbles en contact avec le béton (voir le schéma de la Figure II-5).

Les prismes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ avec câbles à FO collés dans une engravure en surface (Figure II-4-e) ont été fabriqués afin d'évaluer les caractéristiques mécaniques des interfaces béton/adhésif et/ou câble/adhésif pour le cas d'une instrumentation par capteurs à FO collés en surface. Toutes ces caractérisations seront menées à l'état initial ainsi qu'à différentes échéances de vieillissement accéléré (et dans certains cas de vieillissement naturel).

La détermination d'une longueur de contact câble/béton pertinente, aussi bien pour les éprouvettes cylindriques que prismatiques, a nécessité la réalisation d'essais préliminaires dont la description est présentée dans l'Annexe B (VI.2).

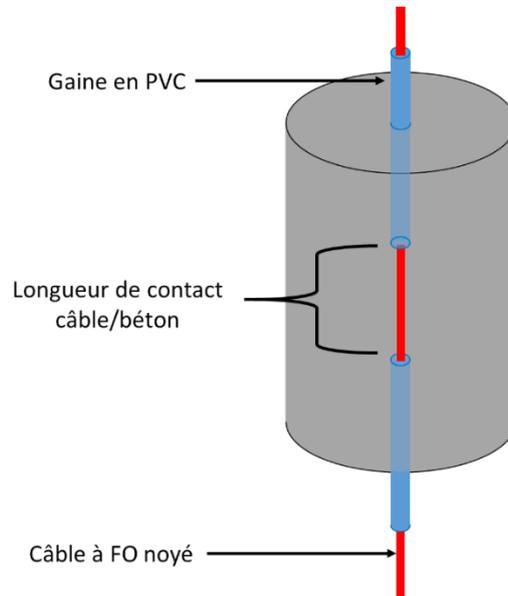


Figure II-5 : Schéma d'un cylindre de béton avec câble à FO noyé et utilisation d'une gaine en PVC pour maîtriser la longueur de contact câble/béton.

II.3.2. Éprouvettes d'adhésif

II.3.2.1. Adhésif utilisé pour le collage des câbles à FO

Pour le collage des câbles à FO en surface du béton, l'adhésif X120 a été sélectionné. Cet adhésif fabriqué par la société HBM est conçu spécialement pour le collage des FOs (voir l'Annexe F-VI.6.5). Il s'agit d'une résine époxydique bi-composant, qui polymérise après mélange des composants à température ambiante. L'application de l'adhésif est réalisée de manière simple au moyen d'un pistolet équipé d'un embout mélangeur, comme illustré sur la Figure II-6.

Un suivi gravimétrique et des caractérisations mécaniques et physico-chimiques de cet adhésif avant et après vieillissement sont prévus dans le cadre du programme expérimental de durabilité.

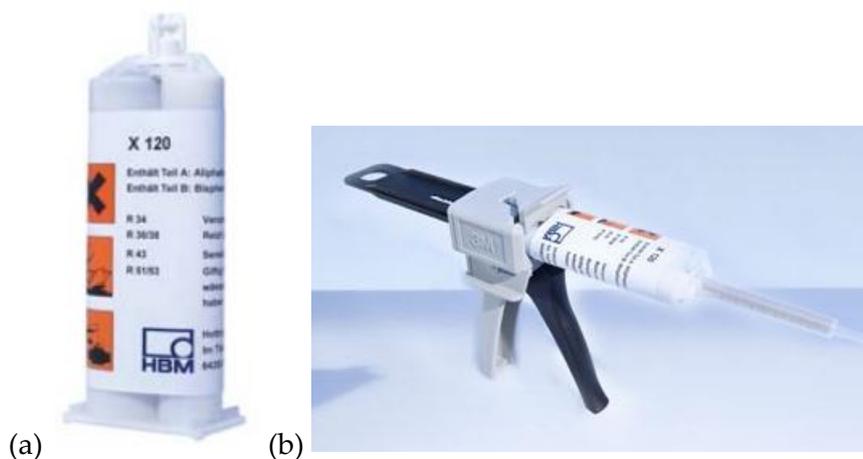


Figure II-6 : L'adhésif X120 d'HBM : (a) cartouche à deux composants et (b) applicateur et buse de mélange.

II.3.2.2. Géométrie des éprouvettes d'adhésif

Le choix de l'adhésif a été principalement guidé par sa facilité d'utilisation et les retours d'expérience positifs des utilisateurs. Cependant aucune information précise concernant la durabilité de ce système n'est disponible dans la documentation technique ou la littérature. Une caractérisation mécanique doit donc être effectuée pour cet adhésif comme pour les autres matériaux mis en œuvre lors de l'instrumentation par câble à FO collé en parement de structure.

Des essais de traction ont ainsi été réalisés avant et après vieillissement, selon la norme EN-ISO 527-2 [142], et au moyen d'une machine d'essais Instron 5969 équipée d'un extensomètre sans contact AVE (Advanced Video Extensometer). Des éprouvettes haltères de type 1B, (Figure II-7-a et Figure II-7-c) ont préalablement été moulées en vue de ces essais, afin de déterminer le module d'Young et la résistance en traction de l'adhésif X120. Chaque échantillon fait 150 mm de longueur (l_3), 10 mm de largeur (b_1) 4,2 mm d'épaisseur (h) et 50 mm de longueur de référence (l_0)

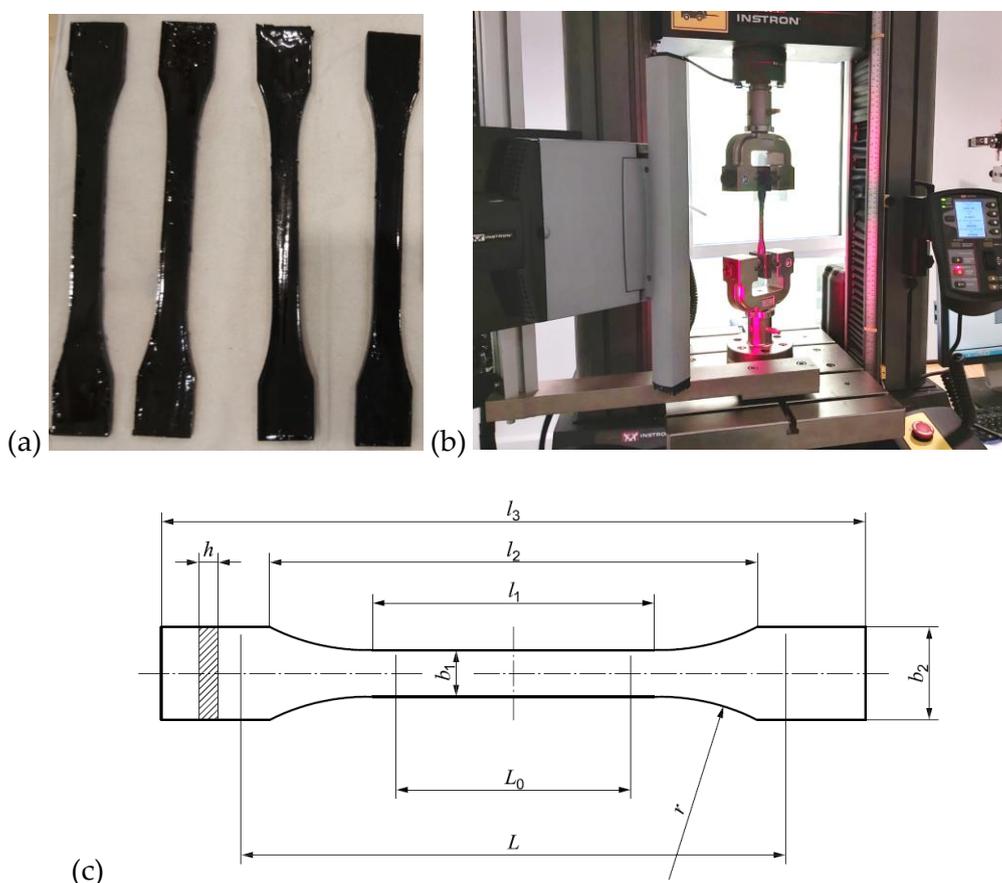


Figure II-7 : (a) Échantillons de X120 pour la caractérisation mécanique ; (b) Dispositif expérimental de traction (c) Géométrie des éprouvettes haltères de type 1B selon la norme EN ISO 527-2 [142].

II.3.3. Préparation des éprouvettes avec câbles noyés et collés en surface

Des essais préliminaires ont permis de définir une longueur de contact entre le câble noyé et le cylindre en béton adaptée à l'étude de durabilité de l'interface câble/béton (ces essais sont présentés dans l'Annexe B-VI.2, et montrent que la longueur optimale est de 9 cm). Le câble

devant traverser un cylindre dont la hauteur est supérieure à cette longueur de contact optimale, une gaine en PVC a donc été utilisée pour isoler la partie du câble ne devant pas se trouver au contact du béton. Les étapes de préparation des cylindres de béton avec câbles noyés sont illustrées dans les photographies de la Figure II-8.

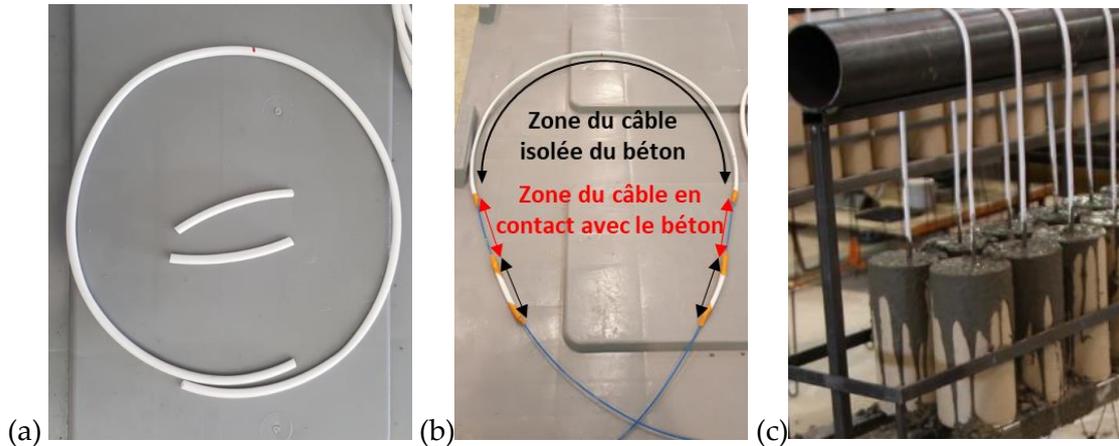


Figure II-8 : Préparation des cylindres avec câbles AFL noyés : (a) préparation de la gaine en PVC destinée à isoler une partie du câble; (b) protection du câble à l'exception de la partie devant être en contact avec le béton ; (c) coulage des cylindres avec câbles noyés.

Pour les prismes en béton avec câbles collés, des essais d'arrachement préliminaires ont également permis de déterminer une longueur de collage câble/béton optimale, qui est ici de l'ordre de 7 cm (voir l'Annexe B-VI.2). Bien que ces essais aient été menés sur des blocs support en béton de forme cylindrique, les conclusions de l'étude expérimentale ont été considérées valides pour les câbles collés sur bloc support prismatiques.

Après la fabrication des prismes et à l'aide d'une meuleuse d'angle, des rainures ont été réalisées au centre des quatre faces de chaque éprouvette, parallèlement à l'axe du prisme et sur une profondeur approximative de 3 mm (et sur une largeur approximative de 6 mm pour le câble Neubrex et 3 mm pour le câble AFL). Le collage des câbles est réalisé en insérant une première couche d'adhésif dans l'engravure, puis le câble est introduit dans l'engravure partiellement remplie d'adhésif. Enfin est appliqué une dernière couche d'adhésif, dite couche de fermeture, suffisamment épaisse pour recouvrir complètement le câble et remplir en excès l'engravure (voir la Figure VI-5 dans l'Annexe B-VI.2).

Les câbles sont collés sur les 4 faces du prisme, deux câbles par faces (insérés dans la même rainure), chaque câble étant collé à une extrémité différente de la rainure (voir le schéma de la Figure II-9-a) sur une longueur de 7 cm à partir d'une distance de 1 cm du bord du prisme. Cette disposition des câbles et de l'adhésif génère donc au total 8 zones de collage par prisme, ce qui offre un nombre suffisant d'interfaces à tester malgré le faible nombre de moules métalliques disponibles au laboratoire. Des photos illustrant la préparation des prismes sont illustrées sur les Figure II-9-b et Figure II-9-c.

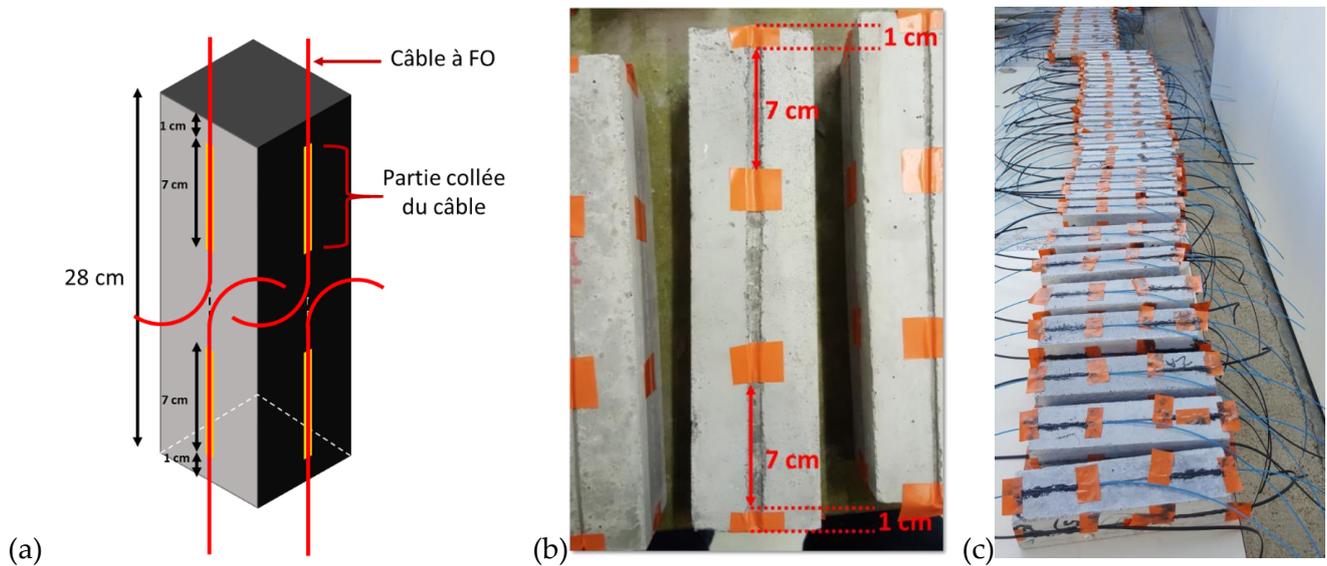


Figure II-9 : (a) Schéma d'instrumentation d'un prisme par câbles à FO collés ; Préparation des prismes avec câbles collés sur les 4 faces : (b) rainurage de l'éprouvette ; (c) Prismes instrumentés.

II.3.4. Compositions des bétons de l'étude

II.3.4.1. Bétons constitutifs des blocs expérimentaux du projet ODOBA

Deux formulations de béton ont été sélectionnées pour la fabrication des échantillons de cette étude de durabilité. Ces formulations sont représentatives de celles utilisées par l'IRSN pour la fabrication de deux des blocs en béton du projet ODOBA (chapitre IV). Les formulations de l'IRSN sont détaillées dans le Tableau II-1 et le Tableau II-2.

Tableau II-1: Formulation du béton utilisé à l'IRSN pour le bloc ODOBA nommé AA.

Type	Constituant	Quantité (kg/m ³)
Ciment 1	CEM I 52,5N LAFARGE	375
Sable 1	0/4 Concassé Estaque Carrière	822
Gravillons 1	11/22 Concassé Estaque Carrière	600
Gravillons 2	6,3/16 Concassé Estaque Carrière	348
Adjuvant 1	Chryso Tard CHR (retardateur de prise)	0,85
Adjuvant 2	Omega 152 (plastifiant)	1,70
Addition 1	AC A FM Châteauneuf les Martigues	50
Eaux 1	Eau naturelle	180

Le bloc AA est un bloc de référence qui ne doit pas développer de pathologie de gonflement interne. Aucun traitement thermique n'a été appliqué à ce bloc après le coulage (donc aucune

RSI n'est sensée se développer) et les granulats utilisés ne sont pas identifiés comme réactifs (donc pas de RAG à attendre).

Tableau II-2 : Formulation du béton utilisé à l'IRSN pour le bloc ODOBA nommé ZA.

Type	Constituant	Quantité (kg/m ³)
Ciment 2	CEM II 42,5R Airva	400
Sable 1	0/4 lavé CCB Gaurain	672
Gravillons 1	14/20 C CCB Gaurain	784
Gravillons 2	6/14 C CCB Gaurain	416
Adjuvant 1	Optima 206 (superplastifiant)	3,20
Eaux 1	Eau naturelle	229

Le bloc ZA est destiné à subir des cycles de vieillissement accéléré d'immersion/séchage dans l'eau. Les granulats de Gaurain utilisés dans le béton sont alcali-réactifs. De plus, un traitement thermique a été appliqué au bloc directement après le coulage. Par conséquent, un couplage des deux pathologies de gonflements interne (RAG et RSI) est attendu sur ce bloc.

II.3.4.2. Formulations modifiées utilisées pour l'étude de durabilité

En raison de la taille réduite des éprouvettes en béton qui ont été conçues pour cette étude de durabilité, les granulats 11/22 de la formulation du bloc AA (Tableau II-1) et les granulats 14/20 de la formulation ZA (Tableau II-2) ont été remplacés, respectivement par les granulats 6/16 de la formulation AA et les granulats 6/14 de la formulation ZA.

Les formulations AA et ZA modifiées (qu'on nommera tout de même AA et ZA par la suite, pour simplifier) sont répertoriées dans le Tableau II-3 et le Tableau II-4.

Tableau II-3 : Formulation AA des éprouvettes de l'étude de durabilité (formulation du bloc AA modifiée).

Constituant	Quantité (kg/m ³)
Ciments 1 (LAFARGE)	375
Sable (0/4)	822
Gravillons (6/16)	948
Chryso Tard CHR (retardateur de prise)	0,85
Omega 152 (plastifiant)	1,70
Additions	50
Eau	180

Tableau II-4 : Formulation ZA des éprouvettes de l'étude de durabilité (formulation du bloc ZA modifiée).

Constituant	Quantité (kg/m ³)
Ciments 2 Airva	400
Sable (0/4)	672
Gravillons (6/14)	1200
Optima 206 (superplastifiant)	3,20
Eau	229

II.3.5. Coulages des éprouvettes en béton

II.3.5.1. Bâti de coulage

Les éprouvettes destinées à la caractérisation du béton ont été coulées dans des moules cylindriques en carton, de manière classique.

En revanche, pour la fabrication des éprouvettes cylindriques avec câbles noyés, et notamment pour faciliter le coulage, il a été nécessaire de concevoir un bâti métallique permettant le positionnement des moules en carton et assurant que le câble noyé passe par le milieu du cylindre tout en demeurant tendu durant le coulage (voir la Figure II-10). Afin d'être en mesure de réaliser simultanément l'ensemble des éprouvettes confectionnées avec la même formulation, deux exemplaires de cette structure ont dû être fabriqués dans l'atelier de soudure de l'UGE. Sur chaque structure, il est possible de disposer 60 éprouvettes environ.

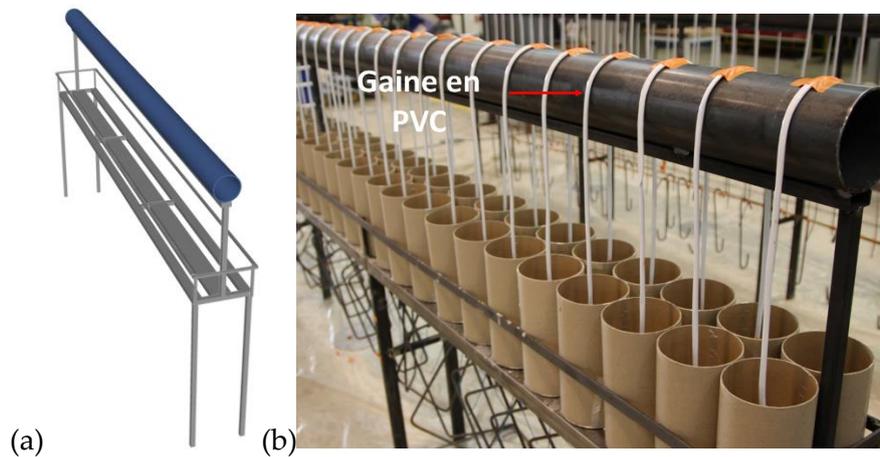


Figure II-10 : (a) Vue 3D du plan de la structure métallique ; (b) Structure métallique fabriquée à l'UGE pour le coulage des éprouvettes cylindriques avec câbles noyés.

II.3.5.2. Coulages des formulations AA et ZA

Le coulage des éprouvettes en béton de la présente étude s'est déroulé en plusieurs phases décrites ci-après. Le calendrier de réalisation de ces tâches est systématiquement précisé, notamment pour en assurer la traçabilité.

La préparation des éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ en béton, incluant un graissage de l'ensemble des moules, ainsi que la mise en place des câbles à FO dans les moules cylindriques $\varnothing 11 - 22 \text{ cm}$ en carton ont démarrés en août 2018.

Le coulage du béton de formulation AA, dit « béton AA » par la suite (voir le Tableau II-3), a été effectué le 21 août 2018. Un volume total de 470 l a été préparé en trois gâchées successives au moyen du malaxeur Couvrot de capacité 170 litres disponible au laboratoire (Figure II-11-a). Le béton, de consistance ferme, a présenté un affaissement moyen de 4 cm au cône d'Abrams.

Au total, 204 éprouvettes ont été fabriquées, réparties en 54 cylindres avec câbles AFL noyés, 60 cylindres avec câbles Neubrex noyés, 66 cylindres sans câbles et 24 prismes sans câbles (mais qui seront engravés par la suite pour le collage des câbles en surface). Les éprouvettes AA ont été démoulées le lendemain du coulage, puis immergées dans l'eau à température ambiante.

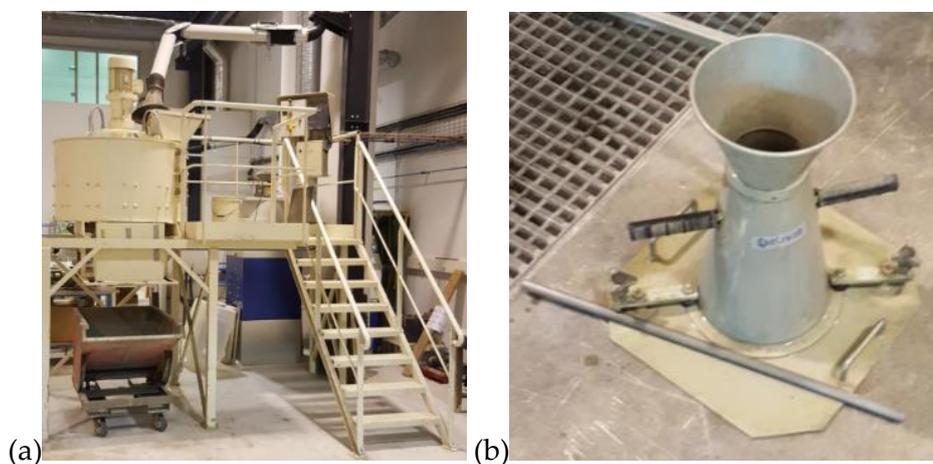


Figure II-11 : (a) Malaxeur Couvrot utilisé pour le coulage du béton de formulation AA ; (b) Dispositif de mesure de consistance du béton à l'état frais (cône d'Abrams).

Concernant le béton de formulation ZA, dit « béton ZA » par la suite (voir Tableau II-4), il n'a pas été possible de fabriquer le volume total en une seule opération de coulage impliquant plusieurs gâchées successives comme cela avait été pratiqué pour le béton AA. En effet un traitement thermique devait être appliqué le jour suivant le coulage du béton ZA (voir le paragraphe II.3.6.3). Or la limite de charge que peut supporter le bain de cure thermique est inférieure au poids des 4 gâchées de béton ZA nécessaires à la fabrication des différentes éprouvettes ZA. Par conséquent, la fabrication des éprouvettes ZA s'est déroulée sur deux journées.

Le 30 août 2019, 3 gâchées de béton ont été réalisées, en utilisant le même malaxeur que lors du coulage du béton AA, pour fabriquer 141 cylindres \varnothing 11 - 22 cm (63 cylindres avec câbles AFL noyés, 63 cylindres avec câbles Neubrex noyés et 15 cylindres sans câble) et 30 éprouvettes prismatiques $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$. Quelques photos du déroulement de ce premier coulage du béton ZA sont présentées sur la Figure II-12. Le béton, de consistance très fluide, a présenté un affaissement moyen de 25,5 cm et un étalement à l'état fais de 52,3 cm en moyenne.



Figure II-12 : Photographies prises lors du premier coulage du béton ZA (30 août 2018).

Une deuxième série d'éprouvettes ZA a été fabriquée le 21 novembre 2018 à partir d'une unique gâchée de 120 l de béton. Cette gâchée a permis de couler 48 cylindres de béton \varnothing 11 - 22 cm (3 cylindres avec câbles AFL noyés, 3 cylindres avec câbles Neubrex noyés et 42 cylindres sans câble). Pour ce deuxième coulage de béton ZA, le béton était encore très fluide avec 25 cm d'affaissement (classe S5) et son étalement à l'état frais a été mesuré à 52,6 cm en moyenne.

Les éprouvettes ZA ont subi un traitement thermique (voir le paragraphe II.3.6.3) le lendemain du coulage, après démoulage des éprouvettes. Suite à ce traitement thermique, elles ont ensuite été mises en eau.

II.3.6. Traitement thermique appliqué aux éprouvettes ZA

II.3.6.1. Objectif du traitement thermique au jeune âge

Comme détaillé dans la partie I.8.2, un traitement thermique est appliqué sur certaines éprouvettes au jeune âge afin d'initier la pathologie de gonflement interne de type RSI. Ce traitement thermique a pour objectif de simuler les montées en température du béton, causées par les réactions d'hydratation au jeune âge dans les pièces massives pour lesquels la chaleur dégagée n'est que très partiellement évacuée vers l'extérieur, ou générées par un processus industriel visant à accélérer la prise du béton. Cette montée en température modifie les réactions

d'hydratation et limite la formation d'ettringite primaire. Des sulfates se trouvent alors à l'état « libre » dans le béton et ne sont remobilisés que plus tard, en présence d'eau, lorsque le béton est durci. Cette formation tardive d'ettringite remplit les porosités du béton en premier lieu, puis génère des pressions élevées menant à la dégradation des propriétés mécaniques du matériau puis à sa fissuration.

II.3.6.2. Traitement thermique appliqué au bloc ZA du projet ODOBA

Afin de développer la RSI au sein du bloc ZA, le traitement thermique a été appliqué directement après le coulage du bloc, en utilisant une chambre climatique permettant d'effectuer la montée en température prévue pour ce traitement thermique. Les thermocouples noyés au sein du bloc ont permis d'enregistrer l'évolution de la température du béton durant ce traitement (voir le graphe de la Figure II-13).

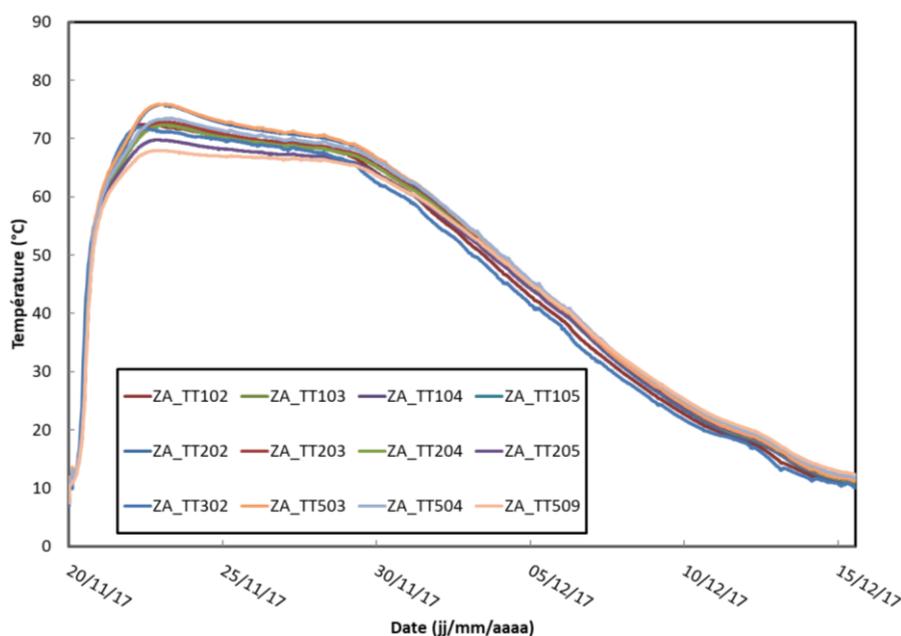


Figure II-13 : Évolution de la température enregistrée par quelques thermocouples noyés dans le bloc ZA, durant le traitement thermique.

II.3.6.3. Traitement thermique appliqué aux éprouvettes ZA

Un traitement thermique a été appliqué aux éprouvettes ZA afin d'y déclencher la RSI. Bien que l'objectif fondateur des travaux décrits dans ce manuscrit ne soit pas de participer à l'étude du comportement pathologique du bloc ZA (qui fait partie intégrante du programme ODOBA), mais plutôt d'évaluer la possibilité de suivre le développement des pathologies expansives du béton par instrumentation FO, il est apparu particulièrement intéressant de reproduire les conditions de réalisation du bloc ZA (formulation du béton constitutif et traitement thermique de celui-ci), afin de disposer de corps d'épreuve constitués de matériaux aux comportements similaires, mais dont la différence de volume pouvait apporter un complément profitable à l'analyse.

Pour des raisons pratiques, il n'était pas possible de retirer les éprouvettes cylindriques avec câbles noyés du bâti métallique de coulage avant la prise du béton, ceci pour s'assurer

notamment que le câble demeure immobile et tendu. Le traitement thermique des éprouvettes n'a donc été appliqué que le lendemain du coulage, après démoulage des éprouvettes (on rappelle que le traitement thermique du bloc ZA a été lancé directement après coulage). Ce traitement thermique a été réalisé dans un bain de cure thermique programmable (dénommé « piscine » par la suite) [108].

Les consignes de température introduites dans la programmation de l'asservissement thermique de la piscine ont été quasi-identiques à celles enregistrées lors du traitement thermique du bloc ZA. Plus précisément, les mesures prises comme référence étaient celles acquises par le thermocouple ZA_TT503 situé au milieu du bloc ZA (voir la Figure II-13). Lors du traitement des éprouvettes, l'asservissement thermique a tout d'abord veillé à reproduire le profil de montée en température appliqué au cœur du bloc. Il est à noter que les mesures enregistrées par les thermocouples du bloc ZA indiquent que la variation de température a été modérée durant tout le traitement thermique et ne dépassait pas les ± 6 °C/h (que ce soit pendant la phase d'échauffement ou celle de refroidissement du bloc). En raison des petites dimensions des éprouvettes ZA et de cette lente variation de température reproduite lors de leur traitement thermique, il est possible de considérer que la température du béton des éprouvettes ZA immergées dans la piscine est très semblable à celle de l'eau de la piscine.

Durant la phase de refroidissement impliquant des températures inférieures à 60 °C et donc hors de la zone d'instabilité de l'ettringite, une variation de température de -5 °C/h a été programmée (voir la « Consigne piscine » de la Figure II-14). Cette vitesse de refroidissement bien plus rapide que celle appliquée au bloc ZA durant cette phase de refroidissement (voir « ZA_TT503 » sur la Figure II-14) permet de diminuer drastiquement la durée d'occupation de la piscine sans pour autant induire un gradient de température dans l'épaisseur des éprouvettes susceptible de générer une microfissuration du béton.

La Figure II-14 illustre l'ensemble du traitement thermique appliqué tout d'abord à la série d'éprouvettes coulée en août 2018, puis identiquement à la série coulée en novembre 2018.

Les éprouvettes ZA ont été mises en eau à la suite du traitement thermique.

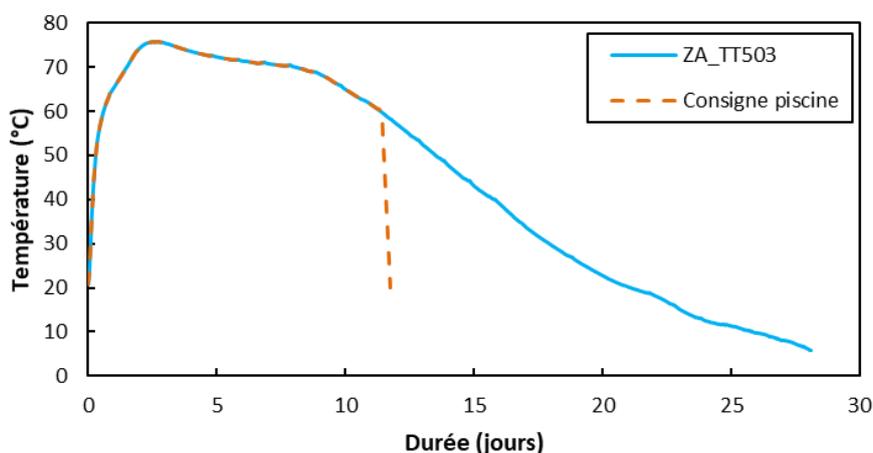


Figure II-14 : Consignes de température du traitement thermique appliqué aux éprouvettes ZA et comparaison avec les températures enregistrées par le thermocouple ZA_TT503 du bloc ZA au moment de son traitement thermique.

II.4. Description des essais mécaniques de caractérisation

II.4.1. Caractérisation mécanique des bétons

II.4.1.1. Compression sur cylindre

Les éprouvettes cylindriques (\varnothing 11 - 22 cm) en béton sont caractérisées en compression simple 28 jours après le coulage. Conformément à la norme NF EN 12390 [143], les essais de compression sont réalisés à l'aide d'une presse MFL de capacité 5000 kN (Figure II-15).



Figure II-15 : Presse de capacité 5000 kN utilisée pour la réalisation des essais de compression.

Une détermination des modules d'élasticité et des coefficients de Poisson des bétons à 28 jours est réalisée à l'aide d'un extensomètre J2P constitué de six capteurs placés sur 2 anneaux en aluminium. Ces anneaux sont en contact avec l'éprouvette cylindrique par l'intermédiaire de pointeaux montés sur lames élastiques comme le montre la Figure II-16.

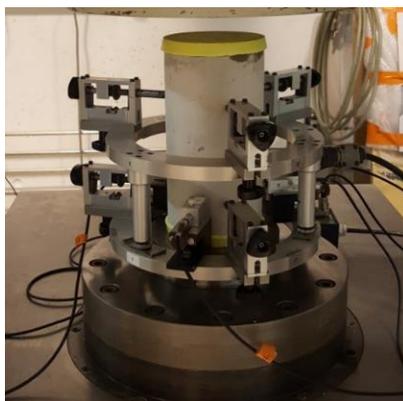


Figure II-16 : Éprouvette équipée de capteurs de déplacement pour la détermination du module d'Young et du coefficient de Poisson.

II.4.1.2. Flexion puis compression sur prisme

Des essais de flexion 3-points sont également réalisés sur des prismes de béton $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ après 28 jours. Une presse Tinius Olsen de 500 kN de capacité et un bâti de flexion métallique sont utilisés pour la réalisation de ces essais (voir Figure II-17-a). A l'issue de l'essai de flexion, les deux moitiés du prisme en béton sont récupérées et deux essais de compression sont réalisés (comme illustré sur la Figure II-17-b et la Figure II-17-c) en utilisant des plaques métalliques carrées ($7 \times 7 \text{ cm}^2$) pour délimiter la surface d'application de l'effort de compression. L'essai est alors interprété comme un essai de compression mené sur un cube $7 \times 7 \times 7 \text{ cm}^3$.

Après le lancement des essais de durabilité, les cylindres en béton sont testés en compression à différentes échéances de vieillissements afin de mesurer l'évolution de la résistance, du module d'Young et du coefficient de Poisson du béton constitutif des éprouvettes.

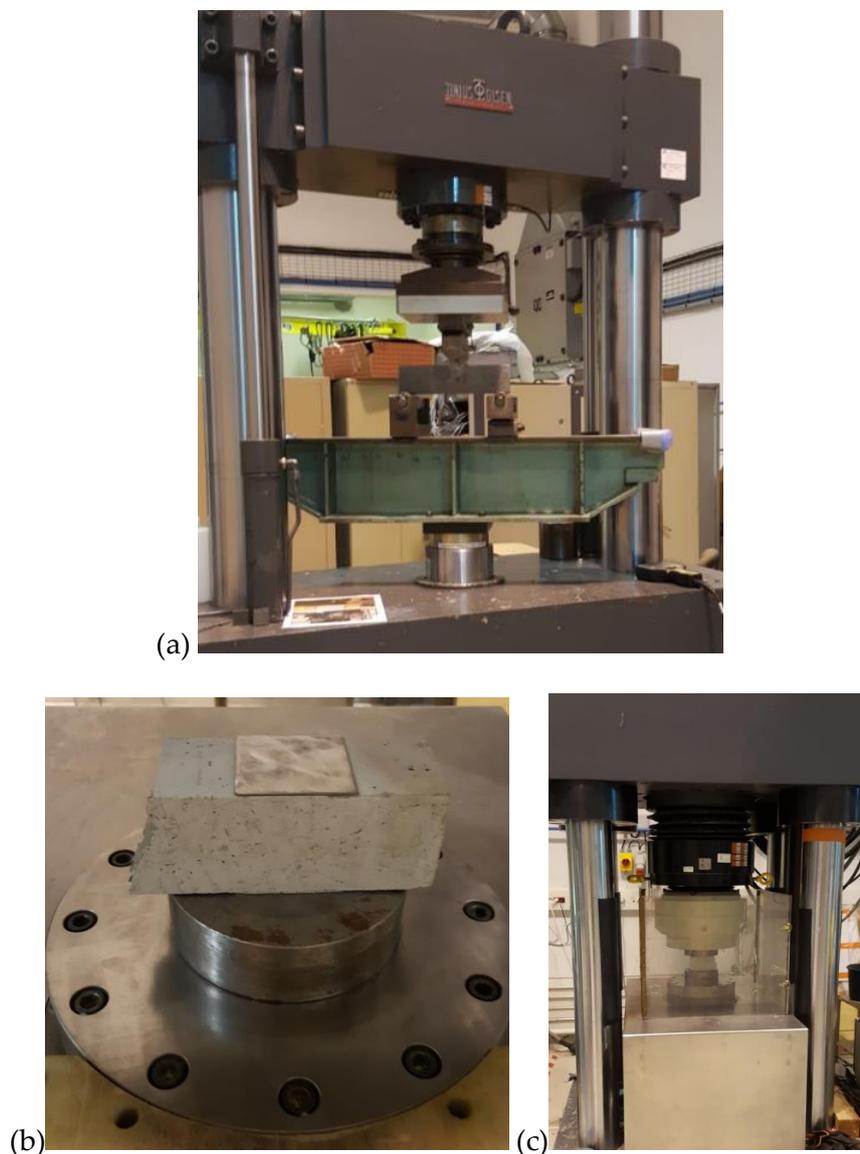


Figure II-17 : (a) Essai de flexion 3-points sur un prisme en béton; (b) Plaque support ($7 \times 7 \text{ cm}^2$) posée sur l'un des deux morceaux de béton issu de la rupture d'un prisme ($7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) sous essai de flexion et (c) Essai de compression sur un morceau de béton.

II.4.2. Caractérisation mécanique des câbles à FO

Les câbles à FO sont testés par essais de traction et d'arrachement afin de déterminer les modules d'élasticité des différents composants de chaque câble et de caractériser les différentes interfaces.

Il est possible de dénuder le câble Neubrex et de tester en traction, séparément, la gaine externe et les tiges en acier. Il en est de même pour le câble AFL, qui peut aussi être dénudé sans difficulté en vue de caractériser en traction, séparément, la gaine externe bicouche et le jonc central.

En revanche, il est plus difficile de dénuder une partie du câble suffisamment longue pour pouvoir réaliser les essais d'arrachement, sans abimer l'interface qu'on souhaite caractériser. Par conséquent, les résultats des essais d'arrachement doivent être analysés avec recul, et s'ils peuvent permettre de dégager des tendances dans les variations des propriétés des interfaces, il ne faudra pas considérer ces résultats comme des données quantitatives précises.

Les différents types d'échantillons utilisés pour la caractérisation mécanique des câbles à FO sont illustrés sur la Figure II-18. Les extrémités des échantillons testés sont collées sur des petites plaques métalliques qui seront serrées dans les mors de la presse lors des essais de traction ou d'arrachement (Figure II-18-b et Figure II-18-c). Ce dispositif évite l'écrasement de l'échantillon par les mors.

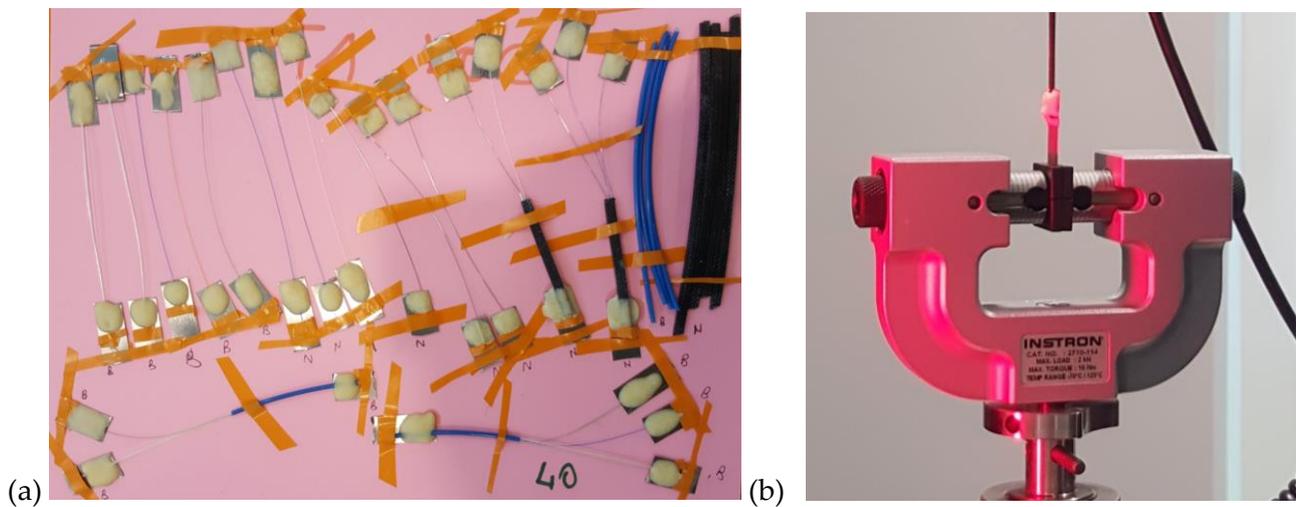


Figure II-18 : (a) Préparation des échantillons pour la caractérisation mécanique des câbles à FO ; (b) Mors serrant une plaque support d'échantillon.

La presse utilisée pour la réalisation des différents essais de traction et d'arrachement est de référence Instron 5969 de capacité 50 kN (voir la Figure II-7-b et la Figure II-19). Cette presse équipée d'un AVE permet de suivre les variations de distance entre deux marques à la surface d'un échantillon et d'en déduire le déplacement différentiel (déformation de l'échantillon entre ces deux points ou déplacement différentiel au niveau d'une interface).

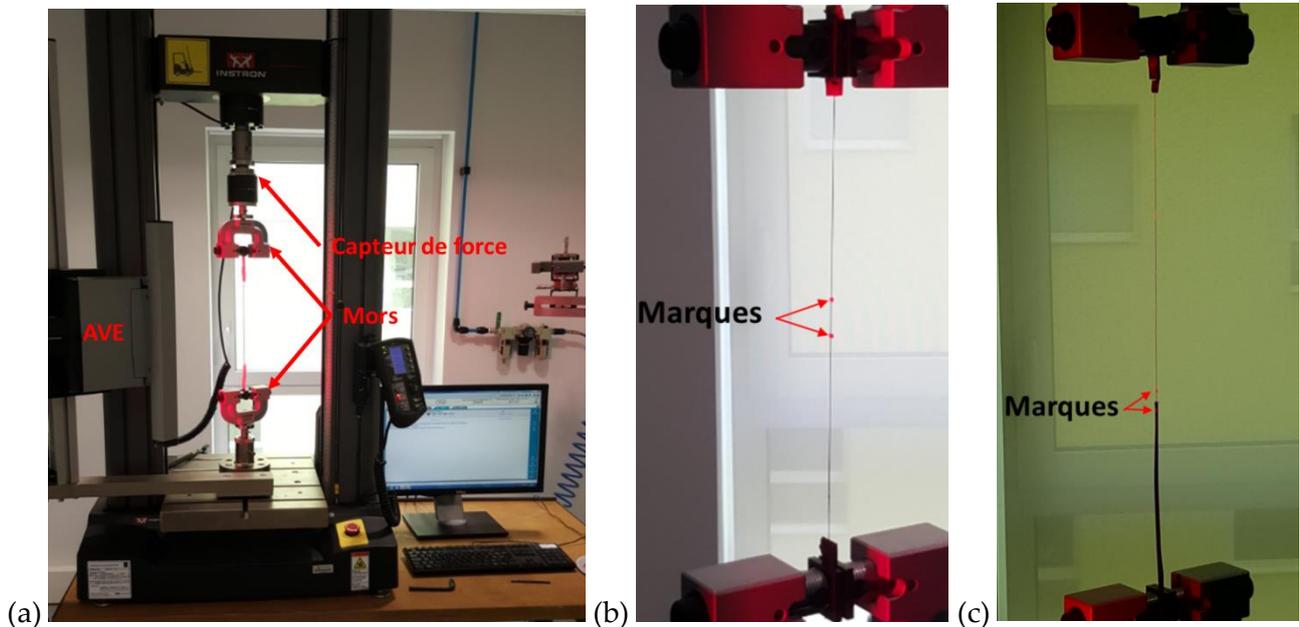


Figure II-19 : (a) Dispositif d'essai pour la caractérisation mécanique des câbles ; (b) Echantillon de renfort en acier du câble Neubrex marqué par deux points pour le suivi extensométrique par AVE ; (c) Essai d'arrachement gaine du câble Neubrex/renfort en acier et marquage de l'échantillon pour le suivi du déplacement différentiel à l'interface.

Les essais de traction (Figure II-19-b) sont réalisés sur les échantillons des renforts pour les deux câbles à FO (tiges en acier pour le câble Neubrex et jonc central pour le câble AFL) et sur des échantillons des revêtements externes des deux câbles à FO. La pente de la partie linéaire de la courbe contrainte/déformation correspond au module d'Young du matériau de l'échantillon testé. Les valeurs de la contrainte de traction sont calculées en divisant les valeurs de charge enregistrées à l'aide du capteur de la presse par la section de l'échantillon testé.

Les essais d'arrachement (Figure II-19-c) visent à caractériser l'interface gaine/renfort mécanique et gaine/FO pour les deux câbles à FO. La caméra AVE permet un suivi du déplacement différentiel entre deux marques (une marque sur la gaine externe du câble et une marque sur la FO ou le renfort mécanique arraché). Le capteur de la presse enregistre en continu les valeurs de charge d'arrachement permettant de déduire les valeurs de la contrainte en divisant ces valeurs de charge par la surface de contact entre les deux matériaux. Cette surface de contact est égale au produit du périmètre de contact P par la hauteur de ce contact l_e (voir Figure I-8 et l'Equation I-9). Le faible diamètre des FOs et des renforts induit dans la majorité des essais d'arrachement un glissement au niveau du support serré avec le mors supérieur de la presse. Par conséquent, une grande partie des courbes contrainte/déplacement différentiel obtenues ne font apparaître que la partie linéaire de la courbe typique présentée dans la Figure II-20. Le suivi des évolutions des interfaces internes des câbles à FO est donc réalisé en analysant l'évolution d'un seul paramètre d'interface : la rigidité tangentielle (exprimée en MPa/mm).

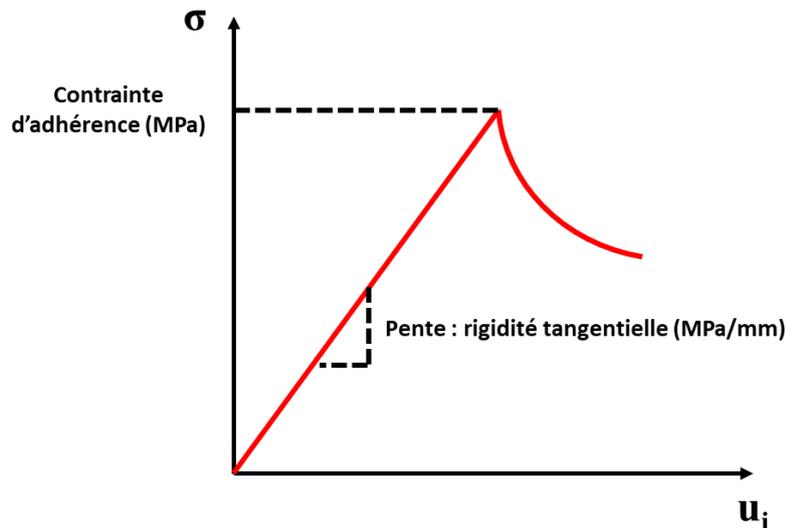


Figure II-20 : Courbe typique contrainte/déplacement différentiel d'un essai d'arrachement.

II.4.3. Essais d'arrachement câble/béton

II.4.3.1. Dispositif de maintien des éprouvettes en béton

Un dispositif rigide a été spécifiquement conçu et fabriqué afin de maintenir les éprouvettes en béton lors des essais d'arrachement des câbles noyés dans les cylindres en béton ou collés sur les prismes (voir la Figure II-21). Cette structure entièrement métallique est constituée de deux plaques liées entre elles par des tiges filetées. L'une des plaques prend une forme en T pour être serrée au mors inférieur de la presse durant l'essai d'arrachement. L'autre plaque est libre de se déplacer verticalement afin de se positionner au contact de l'éprouvette testée. Ce positionnement est maintenu par serrage des écrous autour de tiges filetées. Chaque plaque contient un trou central permettant le passage du câble, soit en partie haute pour assurer l'arrachement, soit en partie basse pour ne pas écraser le câble qui pourra éventuellement être interrogé lors de l'essai.

Lors d'un essai d'arrachement d'un câble collé en surface d'un prisme (qui rappelons-le dispose de 8 câbles, deux étant collés sur une face), les trois autres câbles, non encore testés, sortent par d'autres trous réalisés sur les deux plaques. Le détail de l'utilisation de ce dispositif sera présenté par la suite.

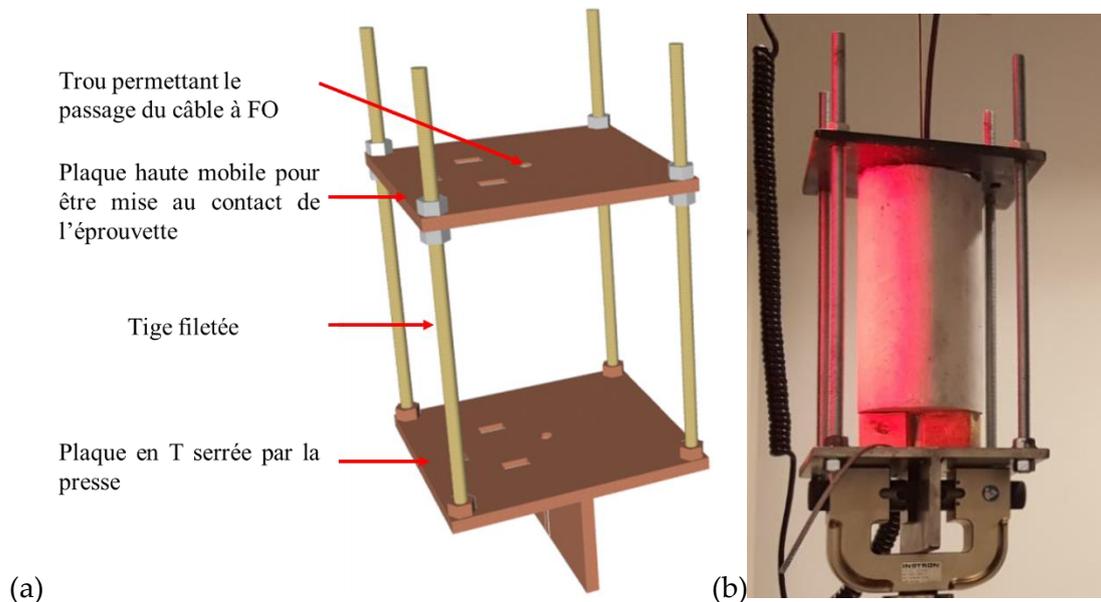


Figure II-21 : (a) Vue en 3D du plan de la structure métallique pour la fixation de l'éprouvette en béton lors des essais d'arrachement ; (b) Utilisation de la structure lors d'un essai d'arrachement câble noyé/cylindre de béton.

II.4.3.2. Généralités concernant les essais d'arrachement

Pour la réalisation des essais d'arrachement câble noyé/éprouvette cylindrique ou câble collé sur prisme, l'éprouvette est préalablement mise en place dans le dispositif de maintien (voir le paragraphe II.4.3.1) puis la plaque supérieure du dispositif est mise au contact de l'éprouvette puis serrée en vissant les écrous des quatre tiges filetées. Le dispositif muni de l'éprouvette est ensuite fixé à la presse de traction, en serrant le mors inférieur à la plaque inférieure en T. Pendant cette mise en place, on prend soin de ne pas écraser les FOs traversant les plaques par les trous disposés à cet effet. Le mors supérieur est ensuite serré à l'extrémité libre du câble à FO et l'essai est finalement réalisé en pilotant en déplacement avec une vitesse de déplacement axial de 1 mm/min. Cependant, pour interroger les FOs durant les essais d'arrachement câble/béton à différents paliers de chargement, il est nécessaire de marquer un temps d'arrêt suffisamment long pour que l'interrogation se fasse, mais suffisamment court pour éviter les effets de fluage en traction. De plus, la gestion de la durée globale de l'essai nécessite de limiter le nombre de paliers là où l'obtention d'une courbe représentative nécessite un maximum de point.

Suite aux résultats d'essais préliminaires réalisés pour déterminer la longueur de contact câble noyé/béton (voir l'Annexe B-VI.2), qui ont démontré une meilleure adhérence du câble Neubrex que du câble AFL, il a donc été décidé de réaliser des incréments de charge plus importants lors des essais menés avec le câble Neubrex. Ce choix permet de conserver un nombre de mesure par FO et une durée d'essais comparables entre les deux types de câble. Des incréments 20 N ont donc été décidés pour les essais d'arrachement du câble Neubrex et des incréments de 10 N pour le câble AFL.

Lors des paliers, la consigne impose au vérin de la presse de bloquer son déplacement pour une durée d'une minute. Deux exemples de déroulements d'essais d'arrachement câble/béton (pour les câbles Neubrex et AFL) sont présentés sur la Figure II-22 notamment le suivi de la consigne

sur la courbe noire et le suivi de la charge sur la courbe rouge qui fait apparaître une relaxation des contraintes durant les paliers.

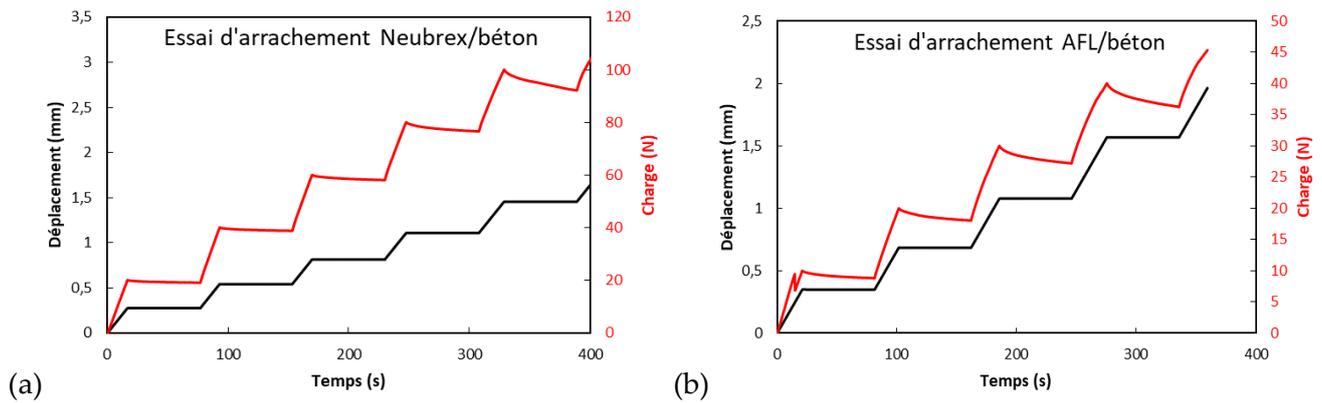


Figure II-22 : (a) Exemple d'essai d'arrachement câble Neubrex/béton; (b) Exemple d'essai d'arrachement câble AFL/béton.

II.4.3.3. Mesures de déplacement lors des essais d'arrachement des câbles noyés

Pour le suivi par AVE, deux marques (ou pastilles) sont placées sur l'échantillon testé : une marque immobile par rapport à l'éprouvette en béton (voir pastille verte de la Figure II-23-b) et une seconde fixée sur la partie du câble sollicité en arrachement (pastille orange de la Figure II-23-b). A l'aide de la caméra AVE dont est équipée la presse, un suivi du déplacement différentiel (u_d) entre les deux marques est réalisé en continu. Ce déplacement différentiel peut s'écrire selon l'Equation II-1.

$$u_d = u_t + u_i \quad (II-1)$$

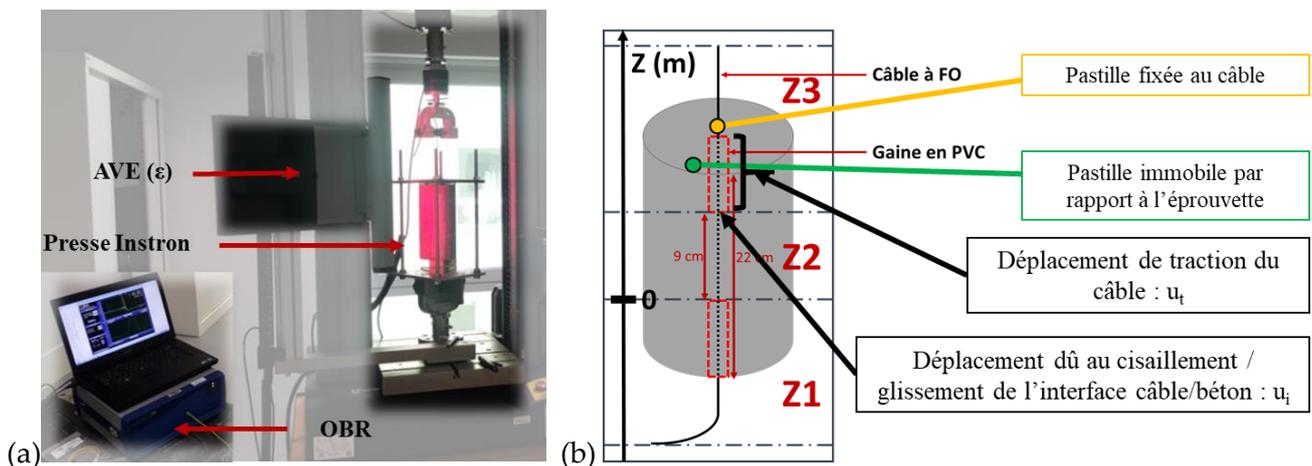


Figure II-23: (a) Dispositif de l'essai d'arrachement et (b) méthode de caractérisation de l'interface câble/béton pour le cas du câble noyé dans le béton.

L'objectif de l'essai est de déterminer en continu le déplacement (u_i) dû au cisaillement / glissement de l'interface câble/béton, afin de caractériser le comportement tangentiel de cette dernière. Seule la grandeur u_d étant accessible à la mesure, il est donc nécessaire de déterminer le déplacement u_t relatif à la déformation de traction de la longueur de câble (d) située entre la marque collée sur le câble et le lieu de sortie du câble hors du béton (voir la Figure II-23-b). En

considérant l'hypothèse d'une déformation élastique (ε) du câble, u_t s'écrit alors suivant l'Equation II-2 :

$$u_t = d \times \varepsilon \quad (\text{II-2})$$

Avec :

$$\varepsilon = \frac{F}{SE} \quad (\text{II-3})$$

Ou E est le module d'élasticité équivalent du câble (ou module du câble homogénéisé), F est l'effort de traction (arrachement) appliqué par le mors supérieur de la presse et S est la section du câble. La quantité SE est qualifiée par la suite de raideur en traction du câble (coefficient de proportionnalité entre la déformation et la force). On note $k = SE$

L'extrémité du câble étant serrée avec le mors supérieur, la déformation de chaque constituant du câble est donc supposée identique dans la phase de comportement élastique du câble. Il est alors possible de déterminer la raideur du câble à partir de :

- i) la mesure de la déformation de traction d'un constituant du câble (par exemple la FO) à un instant « t » de l'essai d'arrachement (N.B. en prenant soin de réaliser cette mesure sur une partie non noyée dans le béton et donc sur une partie en traction – c'est à dire dans le domaine Z3 de la Figure II-23-b) ;
- ii) la mesure de l'effort appliqué au même instant « t » de l'essai.

Pour réaliser la mesure de déformation, une des FO du câble de l'éprouvette testée est interrogée à différents niveaux de chargement, en utilisant un réflectomètre optique à rétrodiffusion Rayleigh (OBR) (Figure II-23-a). Cette interrogation permet d'obtenir un profil de déformation tout au long de la fibre. Avec seulement deux profils de déformation (ε_1 et ε_2) correspondant à deux niveaux de chargement fixés (F_1 et F_2), il est possible de déduire la raideur en traction élastique du câble (voir les Equations suivantes) :

$$\Delta\sigma = E\Delta\varepsilon \quad (\text{II-4})$$

$$\frac{\Delta F}{S} = E\Delta\varepsilon \quad (\text{II-5})$$

$$ES = \frac{\Delta F}{\Delta\varepsilon} \quad (\text{II-6})$$

Donc :

$$ES = (F_2 - F_1)/(\varepsilon_2 - \varepsilon_1) \quad (\text{II-7})$$

La valeur calculée de la raideur en traction permet de déduire u_i en fonction de la charge appliquée F à tout moment de l'essai réalisé dans le domaine élastique du comportement en traction du câble, suivant les Equations suivantes :

$$u_t = d\varepsilon \quad (\text{II-8})$$

$$u_t = d \frac{\sigma}{E} \quad (\text{II-9})$$

$$u_t = \frac{dF}{ES} = \frac{dF}{k} \quad (\text{II-10})$$

$$u_i = u_d - d \frac{F}{k} \quad (\text{II-11})$$

II.4.3.4. Mesures de déplacement lors des essais d'arrachement des câbles collés

Lors des essais d'arrachement du câble collé sur éprouvette prismatique, il est possible de suivre directement le déplacement différentiel à l'interface câble/béton (u_i) à l'aide de la caméra AVE (Figure II-24). En effet, le câble étant collé en surface, une première marque (pastille orange de la Figure II-24) est placée sur la partie du câble se trouvant directement à la suite de la partie collée (il n'y a donc pratiquement pas de partie de câble en traction pure sous cette marque). La deuxième marque (pastille verte de la Figure II-24) est placée sur le prisme de béton.

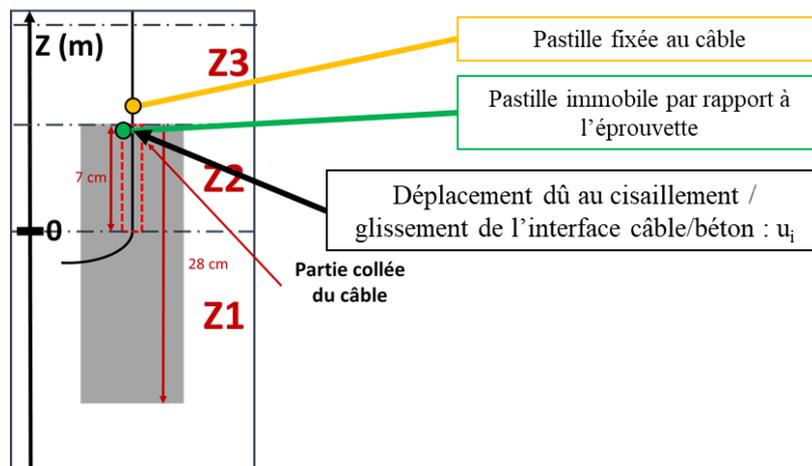


Figure II-24 : Méthode de caractérisation de l'interface câble/béton pour le cas du câble collé à la surface du béton.

II.4.3.5. Suivi de l'évolution des paramètres de l'interface câble/béton

Les paragraphes II.4.3.4 et II.4.3.5 présentent les détails des méthodes de calcul des valeurs du déplacement différentiel u_i à l'interface câble/béton pour les deux configurations (câble à FO noyé et collé). En divisant les valeurs de la charge d'arrachement par la surface de contact (Equation I-9) nous obtenons une courbe expérimentale contrainte/déplacement différentiel identique à la courbe typique de la Figure II-20. Le suivi de l'état de l'interface câble/béton se

fait donc en analysant l'évolution de deux paramètres : la rigidité tangentielle (exprimée en MPa/mm) et la contrainte d'adhérence (exprimée en MPa).

II.5. Essais de caractérisations physico-chimiques

Les essais mécaniques réalisés à différentes échéances sur les éprouvettes en béton ainsi que sur les échantillons de câbles et d'adhésif permettent d'évaluer les principaux effets des vieillissements sur les propriétés mécaniques des matériaux constitutifs et interfaces. En parallèle à ces essais, des investigations ont été menées afin de suivre les évolutions de plusieurs paramètres physiques (suivi dimensionnel et gravimétrique, observations par microscopies optiques ou électroniques) ou physico-chimiques des échantillons (analyses par spectroscopie infrarouge et par calorimétrie différentielle à balayage - DSC), afin de dégager des informations sur les mécanismes de dégradation mis en jeu dans le cadre des différents vieillissements accélérés ou naturel.

II.5.1. Suivi dimensionnel des câbles à FO et des éprouvettes en béton

II.5.1.1. Suivi dimensionnel des câbles à FO

Avant le lancement des essais de vieillissement, puis à différentes échéances de ceux-ci, un suivi de la géométrie externe des câbles est réalisé à l'aide d'un pied à coulisse dont la résolution est de l'ordre du 0,01 mm. Pour le câble AFL, le pied à coulisse est utilisé pour effectuer un suivi de l'évolution du diamètre externe du câble. Les mesures sont effectuées sur 8 sections d'un échantillon de câble. Nous retenons alors une valeur moyenne du diamètre de câble et un écart type. En revanche, pour le câble Neubrex, le suivi dimensionnel concerne deux caractéristiques de la section : sa hauteur (petite longueur de sa section rectangulaire) et sa largeur (grande longueur de sa section rectangulaire). Les mesures sont effectuées sur 4 sections d'un échantillon de câble et permettent de déterminer des valeurs moyennes de la hauteur et de la largeur, ainsi que leurs écarts types.

Toute variation dimensionnelle constatée sur l'un des deux câbles à l'une des échéances de vieillissement donnera lieu à une analyse physico-chimique du revêtement externe du câble concerné.

II.5.1.2. Suivi dimensionnel des éprouvettes en béton

a. Principe du suivi par extensométrie à pointeaux

Comme détaillé dans le chapitre I, les granulats réactifs utilisés pour la fabrication des éprouvettes en béton de la formulation ZA (voir le paragraphe II.3.4.2) ainsi que le traitement thermique appliqué rendent ces dernières susceptibles de développer des pathologies de gonflement du béton (RSI et/ou RAG). De telles pathologies pourraient, dans le futur, être suivies sur ouvrage au moyen d'une instrumentation par FO. Cependant, comme il paraît probable que l'amplitude du gonflement pathologique influence le comportement de l'interface câble/béton, il est donc nécessaire de quantifier ce gonflement pour confronter son intensité aux

résultats des tests d'arrachement câble/béton réalisés aux différentes échéances de vieillissement des éprouvettes instrumentées. Afin d'analyser plus finement les paramètres affectant les phénomènes de gonflements, et en particulier l'influence de la composition du béton sur ces phénomènes en lien avec la nature des vieillissements, le suivi dimensionnel est réalisé sur les éprouvettes des deux formulations de béton, ZA et AA.

Pour disposer d'un suivi de référence de l'évolution dimensionnelle des éprouvettes en béton, il a été décidé de réaliser une mesure régulière par extensométrie à pointeaux (voir Figure II-25), cette méthode ayant déjà été validée dans de nombreuses études. Des inserts métalliques de mesure (dits « plots ») sont ainsi collés à la surface de quelques éprouvettes. Une « base de mesure » est réalisée en collant deux plots à une distance de 10 cm calibrée à l'aide d'une barre étalon. Chaque insert contient un trou conique. Il est donc possible de placer les deux pointes de l'extensomètre entre les deux inserts collés afin de déterminer la distance séparant les inserts. Une telle mesure est effectuée dès que les plots sont collés, afin de connaître l'écart initial entre les plots, car le collage manuel, même aidé par la barre de calibrage, ne permet pas de réaliser un collage à une distance strictement égale à 10 cm. La mesure est ensuite réalisée à différentes échéances pour évaluer le gonflement de l'éprouvette dans l'axe de la base de mesure. Chaque mesure est répétée 3 fois et la valeur moyenne est retenue quand la différence entre les trois mesures est inférieure à 3 micromètres. Le dispositif utilisé offre une résolution de l'ordre du micromètre.

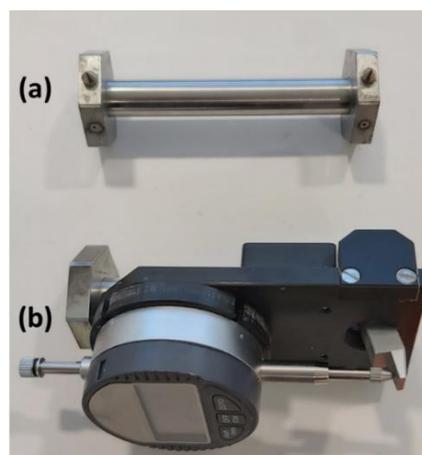


Figure II-25 : (a) Barre étalon (b) Extensomètre à pointeaux.

À un stade avancé, les réactions de gonflement provoquent généralement l'apparition de fissures à la surface des éprouvettes. Ces fissures peuvent traverser les points de collage des inserts et entraîner leurs décollements. Lorsque cela arrive, les inserts détachés sont remplacés et une nouvelle base de mesure est ainsi créée. De manière identique à ce qui a été fait pour la précédente base de mesure, la distance initiale des plots de la nouvelle base est mesurée. Le suivi de la déformation de la base de mesure concernée se poursuit donc en additionnant la valeur de la dernière déformation mesurée avant décollement de l'insert aux valeurs de déformation mesurées aux échéances qui ont suivi le décollement.

b. Suivi de l'expansion des éprouvettes cylindriques en béton

Chaque éprouvette cylindrique (\varnothing 11 - 22 cm) devant subir un suivi dimensionnel par extensométrie à pointeaux est munie de 3 bases de mesures parallèles qui sont créées à la

surface de l'éprouvette en y collant 6 inserts. Les bases de mesure sont disposées selon des angles de 120° (voir la Figure II-26). La valeur de la déformation de l'éprouvette retenue pour le suivi dimensionnel est alors la moyenne des trois déformations mesurées au niveau des trois bases. Le suivi dimensionnel des éprouvettes cylindriques pour un type de vieillissement s'effectue sur trois éprouvettes. Cela permet alors d'obtenir une moyenne de déformation ainsi qu'un écart type.

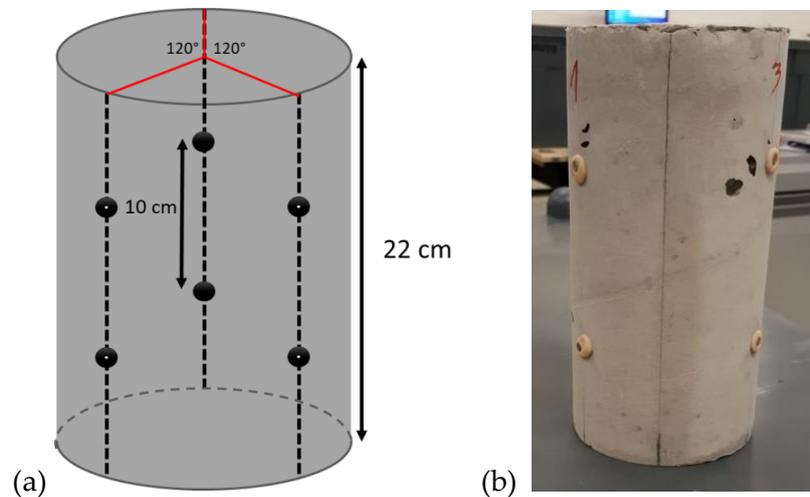


Figure II-26 : (a) Disposition des bases de mesures sur une éprouvette $\varnothing 11 - 22$ cm pour le suivi dimensionnel et (b) photographie d'une éprouvette instrumentée.

c. Suivi de l'expansion des éprouvettes prismatiques en béton

Un suivi dimensionnel a également été réalisé par extensométrie à pointeaux sur quelques éprouvettes prismatiques en béton utilisées pour l'instrumentation par câbles à FO collés. Pour chacun de ces prismes, trois bases de mesure sont générées par collage d'un couple d'inserts sur chacune des trois faces latérales lisses du prisme (i.e. les trois faces latérales en contact avec le moule métallique lors du coulage). Ces trois bases sont parallèles aux arêtes latérales du prisme et donc parallèles entre elles. Chaque base est disposée à 1,5 cm d'une arête latérale, de telle manière qu'elle soit située systématiquement à gauche pour un observateur positionné devant la face considérée. Les bases sont ainsi éloignées du milieu de chaque face où le câble à FO est collé. La valeur de la déformation axiale de l'éprouvette retenue par la suite correspond à la moyenne des déformations des trois bases de mesure (voir la Figure II-27). Le suivi dimensionnel des prismes pour un type de vieillissement s'effectue sur deux éprouvettes. Cela permet alors d'obtenir une déformation moyenne ainsi qu'un écart type.

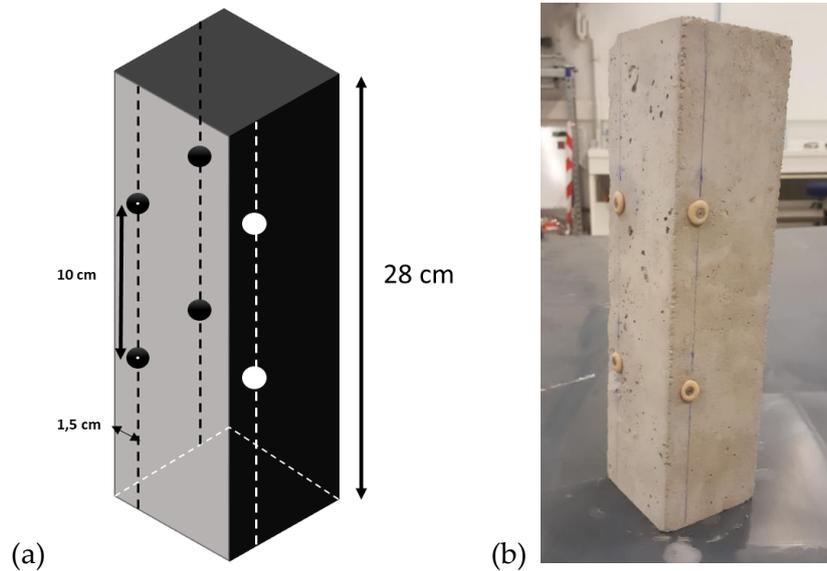


Figure II-27 : (a) Disposition des bases de mesures sur une éprouvette $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ pour le suivi dimensionnel et (b) photographie d'une éprouvette instrumentée.

II.5.2. Suivi gravimétrique

Un suivi de masse est réalisé sur les éprouvettes cylindriques en béton, au moment de la réalisation des mesures d'expansion, en utilisant une balance dont la résolution est de 0,1 g et la capacité de 6 kg pour des éprouvettes pesant approximativement 5,5 kg. Ce suivi s'effectue après un séchage de la surface externe des éprouvettes à l'aide d'un tissu et complète les mesures d'expansion car il peut permettre de confirmer la formation des produits liés au développement de la RAG et/ou de la RSI, ceux-ci induisant une augmentation de masse des éprouvettes.

Afin d'évaluer l'absorption d'humidité de l'adhésif X120 lorsqu'il est au contact de l'eau, un suivi gravimétrique a également été réalisé sur des échantillons prismatiques d'adhésif de dimension $(50 \times 12 \times 2 \text{ mm}^3)$, immergés 24 heures après leur fabrication. A cet effet, une balance de plus haute résolution a été utilisée (1 mg, pour des échantillons pesant approximativement 1,5 g) (Figure II-28). Avant la mesure de masse, les échantillons sortis de l'eau sont séchés en surface à l'aide d'un tissu (le même tissu à toutes les échéances de mesure). Les mesures sont réalisées sur 8 échantillons, de manière à déterminer une masse moyenne et un écart type.

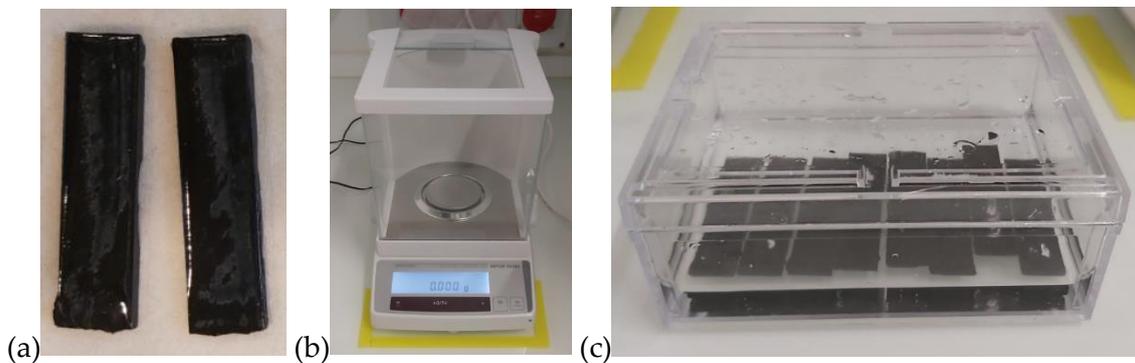


Figure II-28 : (a) Échantillons d'adhésif X120 pour le suivi de masse; (b) Balance de précision Mettler-Toledo pour la prise de masse des échantillons de l'adhésif ; (c) Échantillons de l'adhésif en immersion.

II.5.3. Observations en microscopie optique

Des observations en microscopie optique ont été réalisées sur des coupes transversales des câbles à FO afin de caractériser leur structure géométrique interne, ainsi que sur les revêtements externes de ces câbles pour évaluer les endommagements de surface induits par les vieillissements. Un microscope Zeiss AxioScope A1 a été utilisé pour effectuer ces observations (Figure II-29-a).

Pour les sections transversales de câble (Figure II-29-b), il est préalablement nécessaire d'enrober les échantillons dans un cylindre de résine (système d'enrobage epofix de Struers). La surface des échantillons est ensuite polie avec une polisseuse automatique Struers LaboForce-100, en utilisant une succession de disques abrasifs puis des sprays aux particules de diamant.

Après acquisition des images, un logiciel d'analyse d'image (ZEN 2012) permet également de mesurer des distances caractéristiques sur l'échantillon observé.

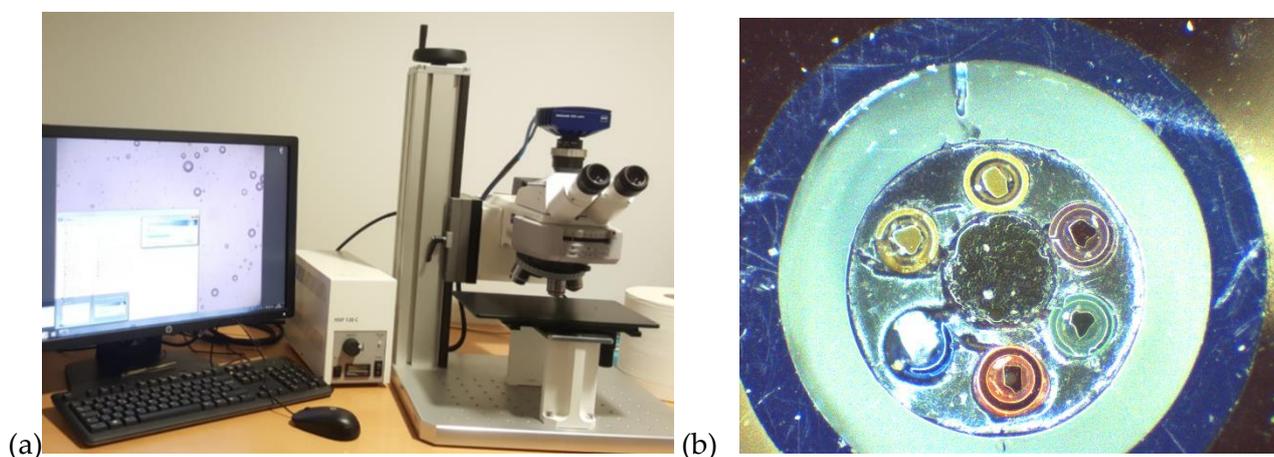


Figure II-29 : (a) Microscope optique Zeiss AxioScope A1, et (b) exemple d'image de section transverse de câble AFL.

II.5.4. Observations en Microscopie électronique à balayage couplée à l'analyse élémentaire EDX

La Microscopie Electronique à Balayage (MEB) couplée à un instrument de spectrométrie des rayons X à dispersion d'énergie (microsonde EDX), a été utilisée pour identifier les pathologies à l'origine des phénomènes d'expansion dans les éprouvettes de béton soumises aux vieillissements. Ces examens ont été réalisés en collaboration avec le laboratoire CPDM de l'UGE au moyen d'un MEB FEI Quanta 400 équipé d'une microsonde EDAX DX4i (Figure II-30).

Des observations sont d'abord réalisées en utilisant le mode électrons rétrodiffusés du MEB, puis une analyse élémentaire par EDX peut être ensuite être réalisée à un endroit précis de la surface de l'échantillon (en un point sélectionné sur l'image MEB) afin de détecter les éléments chimiques en présence. Le principe de l'analyse EDX consiste à envoyer un faisceau d'électron qui, lors de son impact sur la surface de l'échantillon, produit des rayons X caractéristiques des éléments chimiques présents.

Préalablement aux analyses MEB-EDX, une préparation des échantillons est nécessaire, qui consiste à imprégner ces derniers par une résine d'enrobage, puis à effectuer un polissage et une métallisation de la surface à analyser. La métallisation confère des propriétés conductrices à cette surface et permet d'éviter les accumulations de charges qui génèrent localement des défauts sur l'image MEB.



Figure II-30 : Equipement MEB-EDX utilisé dans le cadre de l'étude.

II.5.5. Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (IRTF)

Des analyses par IRTF ont été réalisées sur les gaines externes des câbles et sur l'adhésif X120 utilisé pour le collage des câbles à la surface du béton, à l'état initial non vieilli et après certaines échéances de vieillissements accélérés. Elles visent à mettre en évidence d'éventuelles modifications de la structure chimique des échantillons induites par les différentes conditions de vieillissement de l'étude de durabilité.

Ce type d'analyse permet en effet de détecter les vibrations caractéristiques des liaisons chimiques d'un matériau et donc de mettre en évidence les différentes fonctions chimiques et groupements de molécules qui le composent.

Les analyses ont été réalisées au moyen d'un Spectromètre IR-TF Nicolet iS50 (Thermo-Fischer), équipé d'un dispositif de réflexion totale atténuée (ATR) Diamant (Figure II-31). Les spectres ont été enregistrés dans un domaine de nombre d'onde s'étendant de 4000 à 400 cm^{-1} , avec une résolution de 4 cm^{-1} et une accumulation de 32 spectres.

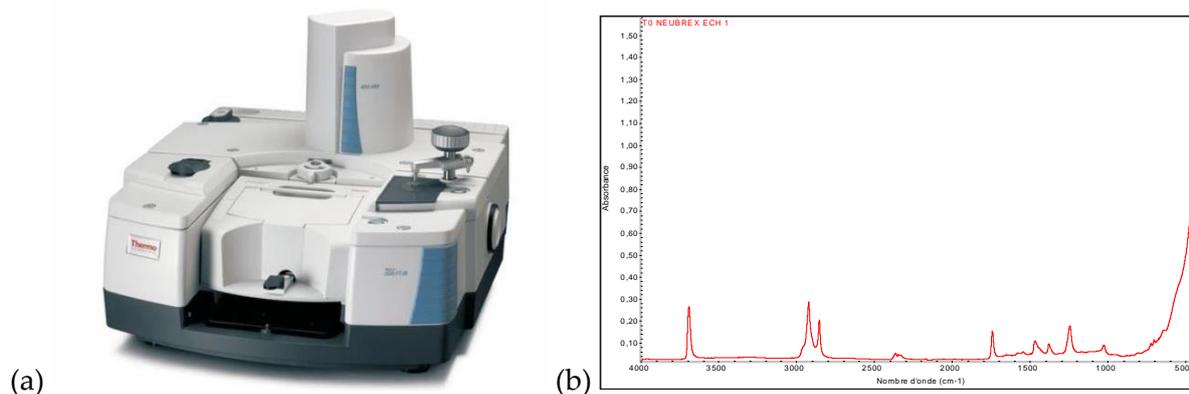


Figure II-31 : (a) Spectromètre IR-TF Nicolet iS50 équipé d'un dispositif ATR Diamant et (b) exemple de spectre IRTF-ATR obtenu pour la gaine externe du câble Neubrex à l'état non vieilli.

II.5.6. Calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

La calorimétrie différentielle à balayage ou DSC est une technique couramment employée pour quantifier les phénomènes endo- ou exo-thermiques associés aux transitions de phases des polymères ou à leurs transformations chimiques. Son principe consiste à mesurer le flux de chaleur (dH/dT) nécessaire pour maintenir le matériau que l'on souhaite analyser à la même température qu'une référence inerte, les deux échantillons étant soumis simultanément à une rampe de température linéaire.

Dans le cas des polymères thermodurcissables (de type époxyde par exemple), cette technique permet de détecter le saut de chaleur spécifique (C_p) associé à la transition vitreuse qui caractérise le passage du matériau d'un état vitreux rigide à un état souple dit « caoutchoutique ». Elle permet alors de déterminer la température de transition vitreuse du matériau, notée T_g , qui est identifiée au point d'inflexion de la courbe au niveau du saut de C_p .

Dans le cas des polymères thermoplastiques semi-cristallins, la DSC permet de visualiser la transition vitreuse de la phase amorphe (en donc d'en évaluer la T_g), ainsi que les phénomènes de fusion/cristallisation de la phase cristalline qui se traduisent par l'apparition de pics enthalpiques sur les thermogrammes. Ces derniers permettent de déterminer les températures de fusion T_f ou de cristallisation T_c (température au sommet du pic correspondant) ; par ailleurs l'aire du pic de fusion (enthalpie de fusion) est corrélée au taux de cristallinité du matériau.

Les phénomènes de vieillissement physiques ou chimiques consécutifs à l'exposition prolongée d'un matériau polymère dans certains types d'environnements, sont susceptibles d'induire des évolutions microstructurales (phénomènes de post-réticulation, scissions de chaînes liées à des dégradations par oxydation, hydrolyse, thermolyse, etc...), qui peuvent alors se traduire par des variations des caractéristiques précédemment citées, notamment de T_g , T_f ou du taux de cristallinité.

Dans le cadre de la présente étude de durabilité, des analyses DSC ont été réalisées au moyen d'un calorimètre Discovery DSC 250 de TA Instruments (Figure II-32-a), sur les gaines externes des deux câbles à FO et sur l'adhésif X120 à l'état initial et après différentes échéances de vieillissements accélérés ou naturel. L'objectif était justement de mettre en évidence d'éventuels

changements de la microstructure de ces matériaux polymères consécutifs aux vieillissements appliqués.

Concernant les gaines externes des câbles AFL et Neubrex, les essais ont été réalisés sur des échantillons de masse 15-20 mg, auxquels a été appliquée une rampe de température de -70 °C à 230 °C avec une vitesse de chauffage de 20 °C/min. Dans le cas de la gaine bicouche du câble AFL, l'analyse a porté simultanément sur la couche rigide époxy et sur le revêtement externe thermoplastique (exemple de thermogramme sur la Figure II-32-b).

Pour l'adhésif X120, les analyses ont été réalisées en mode MDSC (DSC à modulation de température) afin de mieux discerner le saut de C_p associé à la transition vitreuse. Les échantillons de masse 10 mg environ ont été soumis simultanément à une rampe de température linéaire de -10 °C à 130 °C avec une vitesse de chauffage de 2 °C, et à une modulation de température de 1,5 °C avec une période de 60 s.

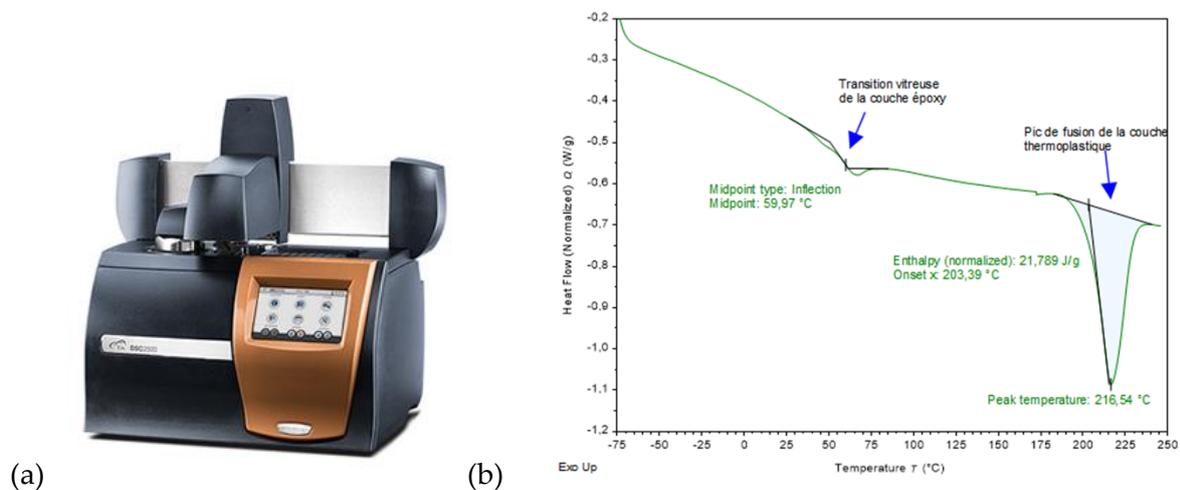


Figure II-32 : Discovery DSC 250 de TA Instruments et (b) exemple de thermogramme obtenu pour la gaine bi-couche AFL non vieillie.

II.6. Programme d'étude de durabilité des capteurs à FO

Afin d'étudier la durabilité des capteurs à FO noyés dans le béton et collés en parement des structures en BA, les différents types d'échantillons et d'éprouvettes présentés dans le paragraphe II.3 ont été soumis à des vieillissements accélérés ou non dans différents environnements, selon les protocoles détaillés ci-dessous.

II.6.1. Programme de suivi des câbles noyés immergés en milieu alcalin

L'essai d'attaque chimique en milieu alcalin vise à étudier de manière accélérée l'effet de l'alcalinité du milieu cimentaire sur les câbles à FO noyés dans le béton. Cet essai consiste à immerger les éprouvettes de béton instrumentées par câbles à FO noyés, dans une solution alcaline dont le pH est de l'ordre de 13. La température étant susceptible d'influencer significativement la cinétique de dégradation, plusieurs températures du milieu alcalin ont été choisies afin de moduler le facteur d'accélération de cet essai de vieillissement.

D'autre part, pour faciliter l'analyse des résultats, des cylindres de béton sans câbles noyés, ainsi que des échantillons des deux câbles à FO ont également été exposés aux mêmes environnements alcalins, de manière à évaluer l'impact de ces expositions sur le béton lui-même et sur les câbles seuls. La solution alcaline a été préparée à base d'hydroxyde de sodium ($NaOH$) et d'hydroxyde de potassium (KOH) avec des concentrations identiques à celles adoptées dans les travaux de J. M. Hénault [14] et précisées dans le Tableau II-5. Le pH de cette solution est de l'ordre de 13,5 et serait assez représentatif de l'alcalinité des bétons au jeune âge. J. M. Hénault avait par ailleurs montré que le pH de la solution évolue peu au cours du temps dans les bacs thermostatiques, à des températures identiques à celles utilisées dans la présente étude.

Tableau II-5 : Composition chimique de la solution alcaline.

Composé chimique	Concentration
NaOH	0,1 mol/l (4 g/l)
KOH	0,5 mol/l (28,05 g/l)

1,6 m³ de solution alcaline ont été préparés puis répartis dans six bacs thermo-régulés de 600 l de capacité (voir la Figure II-33-a). Trois bacs étaient dédiés à l'immersion des éprouvettes de chaque formulation de béton (trois bacs pour les éprouvettes AA et trois bacs pour les éprouvettes ZA). Pour chaque formulation de béton, trois températures de conservation ont été mises en œuvre : température ambiante (environ 20 °C), 40 °C et 60 °C. Au total, l'étude impliquait donc deux bacs laissés à température ambiante du laboratoire, deux bacs fonctionnant à 40 °C et deux bacs à 60 °C.

Comme précisé au paragraphe II.3.1 (Cf. Figure II-5), les sorties de câbles à FO sur les cylindres de béton instrumentés ont été protégées avec des gaines en PVC avant immersion (gaines blanches visibles sur la Figure II-33-b). Cette précaution permet de mieux maîtriser la longueur de câble soumise à l'attaque chimique, et également d'agripper par les mors une partie de câble saine lors des essais d'arrachement, ces éprouvettes étant destinées à une caractérisation de l'interface câble/béton à différentes échéances de vieillissement.

Les cylindres de béton Ø 11 - 22 cm non instrumentés par FO et placés en immersion dans les différents bacs ont permis la caractérisation mécanique en compression des bétons AA et ZA à différentes échéances.

Les échantillons de câble immergés en solution alcaline aux trois températures choisies ont également été testés / analysés à différentes échéances afin de suivre l'évolution des propriétés mécaniques (modules d'élasticité des constituants des deux câbles et comportement des interfaces internes) et les évolutions de certaines caractéristiques physico-chimiques (microstructure des revêtements externes) des deux câbles durant le vieillissement (Cf. partie II.5).



Figure II-33 : (a) Bacs thermo-régulés destinés au vieillissement des éprouvettes en solution alcaline; (b) Stockage des éprouvettes dans un bac avant immersion et après mise en place d'une protection des sorties de câbles à l'aide d'une gaine en PVC.

Le programme de vieillissement accéléré en milieu alcalin a duré 18 mois au total, et comprenait six échéances d'essais de caractérisation (une échéance tous les trois mois). Le nombre total de cylindres (avec et sans câbles noyés) devait permettre de réaliser trois essais à chaque échéance, pour chaque formulation de béton, chaque température de vieillissement, et pour les deux types de câbles à FO. Le nombre d'éprouvettes AA avec câbles noyés fabriquées a été légèrement inférieur au nombre visé (car le poids volumique du béton du bloc AA de l'IRSN semble être sous-estimé). De ce fait, le nombre d'essais a été réduit à deux pour quelques échéances particulières (échéances à 3 et 6 mois de vieillissement aux températures inférieures à 60 °C pour les cylindres avec câble AFL noyé). Ce choix a permis de conserver un nombre de 3 essais pour les échéances les plus lointaines où des dégradations sévères peuvent avoir lieu). Le Tableau II-6 résume l'ensemble du programme expérimental de vieillissement en solution alcaline, en précisant le nombre d'échantillons testés à chaque échéance.

Les éprouvettes ont été mises en solution le 10 décembre 2018, date correspondant au lancement (échéance T0) du vieillissement accéléré.

Tableau II-6 : Programme d'essais de la campagne de vieillissement accéléré par immersion en solution alcaline.

Formulation		AA			ZA			Câble à FO	
Types d'échantillons		Cylindres Ø 11 - 22 cm	Cylindres avec câbles noyés		Cylindres Ø 11 - 22 cm	Cylindres avec câbles noyés			
			Câble Neubrex	Câble AFL		Câble Neubrex	Câble AFL		
Types d'essais		Compression	Arrachement	Arrachement	Compression	Arrachement	Arrachement	Traction et arrachement	
								Analyses physico-chimiques	
20 °C	T0	Nombre d'échantillons	3	3	3	3	3	3	3 pour chaque série
	3 mois		3	3	2	3	3	3	3 pour chaque série
	6 mois		3	3	2	3	3	3	3 pour chaque série
	9 mois		3	3	3	3	3	3	3 pour chaque série
	12 mois		3	3	3	3	3	3	3 pour chaque série
	15 mois		3	3	3	3	3	3	3 pour chaque série
	18 mois		3	3	3	3	3	3	3 pour chaque série
40 °C	T0	Nombre d'échantillons	0	0	0	0	0	0	0
	3 mois		3	3	2	3	3	3	3 pour chaque série
	6 mois		3	3	2	3	3	3	3 pour chaque série
	9 mois		3	3	3	3	3	3	3 pour chaque série
	12 mois		3	3	3	3	3	3	3 pour chaque série
	15 mois		3	3	3	3	3	3	3 pour chaque série
	18 mois		3	3	3	3	3	3	3 pour chaque série
60 °C	T0	Nombre d'échantillons	0	0	0	0	0	0	0
	3 mois		3	2	3	3	3	3	3 pour chaque série
	6 mois		3	2	3	3	3	3	3 pour chaque série
	9 mois		3	3	3	3	3	3	3 pour chaque série
	12 mois		3	3	3	3	3	3	3 pour chaque série
	15 mois		3	3	3	3	3	3	3 pour chaque série
	18 mois		3	3	3	3	3	3	3 pour chaque série
Nombre total			57	55	53	57	57	57	57 pour chaque série

II.6.2. Programme de suivi des câbles collés soumis à un vieillissement accéléré

Les câbles collés à la surface des prismes de béton ainsi que des échantillons prismatiques de béton seront soumis à des vieillissements accélérés représentatifs des conditions de service sur ouvrage. En effet, contrairement au cas des câbles noyés, un câble collé en parement n'est protégé que par une couche mince de l'adhésif, et se trouve plus exposé aux conditions climatiques. Cette exposition est susceptible d'affecter sur le long terme : i) la qualité de l'instrumentation en dégradant les matériaux (câble ou couche de colle) ou les interfaces (adhérence du câble avec l'adhésif ou encore de l'adhésif avec le substrat béton) et ii) l'intégrité du matériau béton en induisant des fissurations de peau (i.e. en surface) comme mis en évidence précédemment dans l'étude bibliographique. Ces fissurations du béton peuvent elles-mêmes conduire à une dégradation de l'interface adhésif/béton.

Les vieillissements accélérés appliqués dans cette étude sur les prismes instrumentés (ainsi que sur des échantillons de câbles et d'adhésif de collage) visent à simuler, de manière accélérée, les variations de température liées à l'alternance jour/nuit ainsi que les cycles de vieillissement appliqués à l'IRSN sur les blocs ODOBA. Dans cette optique, il a été décidé de retenir des cycles gel/dégel, qui peuvent être représentatifs de conditions climatiques hivernales sévères, ainsi que des cycles immersion/séchage reproduisant de manière accélérée les conditions de vieillissement des blocs ODOBA.

II.6.2.1. Vieillissement accéléré par cycles gel/dégel

Afin d'étudier l'effet des cycles gel/dégel de manière accélérée, des éprouvettes prismatiques munies de câbles collés ainsi que des échantillons des deux câbles à FO et de l'adhésif X120 ont été conservés en enceinte climatique pendant une durée totale de 18 mois (Figure II-34-a). En complément de la caractérisation initiale avant vieillissement, des essais d'arrachement sur éprouvettes prismatiques avec câbles collés ont été réalisés à six échéances de vieillissement (une échéance tous les trois mois). En revanche, trois échéances de caractérisation seulement ont été menées sur les échantillons de câbles (traction sur les constituants des câbles et essais d'arrachement au niveau des interfaces revêtement/FO et revêtement/éléments de renforcement) après 6 mois, 12 mois et 18 mois de vieillissement. Concernant l'adhésif X120, seule une caractérisation réalisée à l'issue de la durée de vieillissement complète la caractérisation initiale (essais de traction + analyses physico-chimiques). L'ensemble du programme expérimental proposé pour l'étude de la durabilité des câbles collés soumis à des cycles gel/dégel est détaillé dans le Tableau II-7.

Le cycle thermique retenu simule une alternance jour/nuit d'amplitude thermique amplifiée (de +30 °C à -10 °C) et accélérée (le cycle dure 6 heures, soit un facteur d'accélération de 4). Cette durée de 6 heures correspond à la durée minimale nécessaire à l'enceinte pour atteindre les températures souhaitées. En effet, la vitesse de refroidissement de l'enceinte ne peut être plus rapide que -4,5 °C/heure entre -5 °C et -10 °C et diminue avec la température pour atteindre -1 °C/heure à la fin du cycle.

Concernant l'HR, son contrôle est possible lors de la montée en température. Elle reste alors aux alentours de 70 %. En revanche, lors du refroidissement, aucun contrôle d'HR n'est possible. Le graphe de la Figure II-34-b présente les deux courbes de température et d'HR mesurées durant un cycle complet (6 heures).

Les éprouvettes ont été placées dans l'enceinte pour subir les cycles de gel/dégel le 11 décembre 2018, date correspondant au lancement de vieillissement (échéance T0) pour ce type de vieillissement.

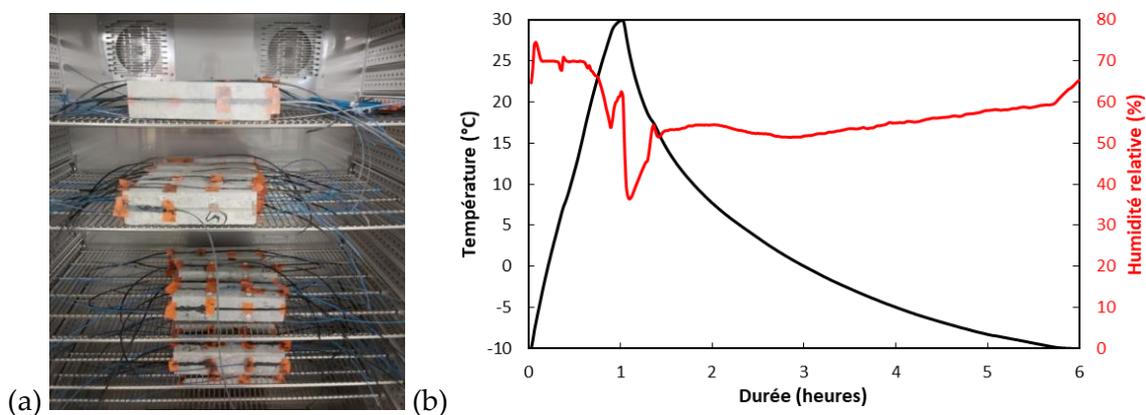


Figure II-34 : (a) Positionnement des échantillons dans l'enceinte climatique ; (b) Courbes de température et d'HR enregistrées dans l'enceinte climatique durant un cycle gel/dégel.

Lors d'un cycle gel/dégel, la température demeure inférieure à 0 °C pendant 3 heures environ, c'est-à-dire durant la moitié du cycle. Cette durée permet d'assurer un effet gel et dégel sur la

totalité du volume de l'éprouvette prismatique en béton. En effet, la diffusion de chaleur dans un corps homogène suit l'Equation II-12 :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \cdot \Delta T \quad (\text{II-12})$$

T est la température du matériau au temps t et à l'abscisse x (on considère ici un modèle unidimensionnel), D est sa diffusivité thermique en m^2/s . La diffusivité thermique permet de caractériser la profondeur de pénétration l_d (ou longueur de diffusion) d'un signal de température périodique sinusoïdal imposé à la surface d'un milieu continu semi-infini suivant l'Equation II-13 :

$$l_d = \sqrt{\frac{D}{\pi f}} \quad (\text{II-13})$$

Où f est la fréquence d'excitation thermique.

Pour simplifier cette analyse, admettons en première approximation, que les hypothèses ayant permis d'établir l'Equation II-13 sont valides pour notre problème (signal sinusoïdal et milieu continu semi-infini). Alors, pour une longueur de diffusion $l_d = 3,5 \text{ cm}$ (demi-largeur du prisme $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) et une diffusivité thermique de béton de $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ [14], la période d'excitation est de l'ordre de 2 heures. Par conséquent, le gel/dégel affecte tout le volume des prismes pendant le cycle de température.

Tableau II-7 : Programme d'essais de la campagne de vieillissement accéléré par cycles gel/dégel.

Formulation		AA	ZA	Câbles à FO	Adhésif
Types d'échantillons		Prismes avec câbles collés			
Types d'essais		Arrachement		Traction et arrachement	Traction
				Analyses physico-chimiques	
T0	Nombre d'échantillons	2	2	3 pour chaque série	3
3 mois		1	1	0	0
6 mois		1	1	3 pour chaque série	0
9 mois		1	2	0	3
12 mois		2	2	3 pour chaque série	0
15 mois		2	2	0	0
18 mois		2	2	3 pour chaque série	0
Nombre total			11	12	12 pour chaque série

II.6.2.2. Vieillissement accéléré par cycles d'immersion/séchage

Des vieillissements par cycles d'immersion/séchage ont également été appliqués sur les prismes instrumentés par capteurs à FO collés en parement. Les essais associés à cette campagne sont réalisés sur les différentes composantes de cette instrumentation (câbles, adhésif et interfaces au travers des prismes instrumentés). Le protocole de vieillissement retenu reproduit de manière accélérée les cycles d'immersion/séchage appliqués sur les blocs ODOBA pour initier le développement des pathologies de gonflement interne. Ces cycles peuvent alors induire des

dégradations liées à la lixiviation du béton en surface, en plus des pathologies de gonflement qui peuvent se propager si la formulation de béton et de nature réactive ou si un traitement thermique est déjà appliqué.

La durée prévue des cycles appliquée aux blocs ODOBA étant de deux mois (un mois dans l'eau et 1 mois à l'air ambiant), un facteur d'accélération de 4 environ (comparable à celui utilisé pour les cycles thermiques) est retenu pour les éprouvettes AA et ZA stockées en enceinte. Des cycles de deux semaines ont donc été appliqués, comportant une phase d'immersion dans l'eau d'une semaine et une phase de séchage à l'air ambiant d'une semaine. L'eau est renouvelée à chaque cycle afin d'accentuer la lixiviation du béton, conformément au protocole suivi sur les blocs ODOBA.

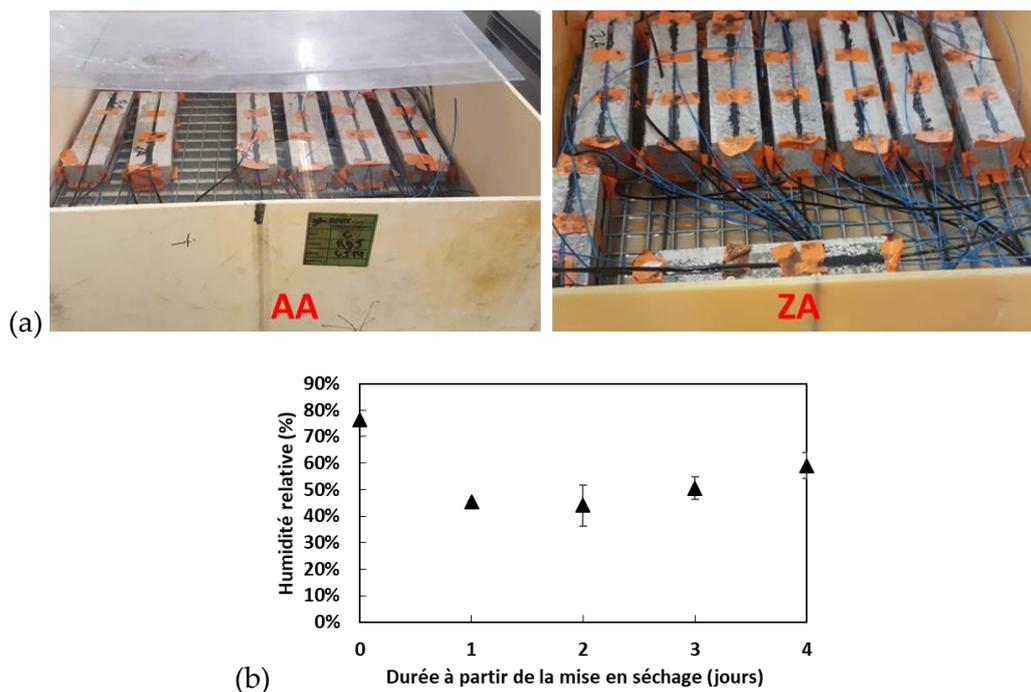


Figure II-35 : (a) Mise en place des éprouvettes AA et ZA pour l'essai de vieillissement par cycles d'immersion /séchage ; (b) Evolution de l'HR pendant un cycle de séchage (moyenne sur les deux bacs AA et ZA).

Dans la pratique, des éprouvettes prismatiques avec câbles collés ont été placées dans deux bacs (un bac pour chaque formulation, AA et ZA) ainsi que des échantillons des deux câbles à FO (Figure II-35-a). La durée totale de vieillissement qui devait être de 18 mois, a finalement été réduite à 16 mois environ (la campagne a été interrompue début avril 2020 en raison de la crise sanitaire du Covid-19).

6 échéances de caractérisation par essais d'arrachement ont été réalisées en vue d'évaluer les propriétés de l'interface câble collé/béton (une échéance tous les trois mois, sauf pour la dernière qui n'était espacée de la précédente que d'un mois). En revanche, seules 3 échéances de caractérisation ont été menées sur les échantillons de câbles (après 6 mois, 12 mois et 16 mois de vieillissement), en vue de suivre l'évolution des propriétés mécaniques des composants de chaque câble. Concernant l'adhésif X120, une caractérisation unique a été réalisée à la fin du vieillissement.

Le nombre total d'éprouvettes prismatiques avec câbles à FO collés est détaillé dans le Tableau II-8. La campagne de vieillissement par immersion/séchage a été lancée le 21 décembre 2018 (premier séchage). Un suivi de l'HR a été réalisé au cours d'un cycle de séchage, dans les deux bacs contenant les échantillons AA et ZA. La Figure II-35-b présente la courbe d'évolution de HR (moyenne sur les deux bacs) pendant cette phase de séchage (sur 5 jours du lundi au vendredi).

Tableau II-8 : Programme d'essais de la campagne de vieillissement accéléré par cycles d'immersion/séchage.

Formulation		AA	ZA	Câbles à FO	Adhésif
Types d'échantillons		Prismes avec câbles collés			
Types d'essais		Arrachement		Traction et arrachement	Traction
				Analyses physico-chimiques	
T0	Nombre d'échantillons	2	2	3 pour chaque série	3
3 mois		1	2	0	0
6 mois		1	2	3 pour chaque série	0
9 mois		1	2	0	3
12 mois		2	2	3 pour chaque série	0
15 mois		2	2	0	0
16 mois		2	2	3 pour chaque série	0
Nombre total			11	14	12 pour chaque série

II.6.3. Programme des essais de fluage appliqué aux câbles à FO

Comme précédemment rapporté dans la partie bibliographique relative au transfert d'effort mécanique (Cf. paragraphe I.5), quand un câble à FO est noyé ou collé en surface d'une structure en BA, les déformations de la structure hôte sont transmises à travers les différentes couches de revêtement du câble jusqu'au cœur en silice de la FO interrogée. Une partie des sollicitations mécaniques appliquées à ces structures étant permanentes, les propriétés mécaniques des différents composants des câbles à FO ainsi que les caractéristiques des interfaces entre ces composants risquent de s'évoluer dans le temps sous l'effet du fluage.

Il a donc été décidé de mettre en œuvre un essai de fluage dans le cadre de cette étude de durabilité, afin de mettre en évidence d'éventuelles évolutions des propriétés mécaniques, géométriques des câbles à FO et des interfaces internes de ces câbles. Cet essai a consisté à exercer un effort de traction à charge constante pendant plusieurs mois sur des échantillons des deux câbles étudiés.

Six supports de chargement métalliques ont été spécifiquement conçus et fabriqués. Chacun de ces supports comporte un plateau permettant de déposer les masses qui génèrent la sollicitation. Chaque plateau est relié à une poulie permettant une accroche sans pincement du câble au plateau. Cette poulie permet de plus une répartition équivalente de la charge entre les deux longueurs du câble situées en sortie de poulie (Figure II-36-d). Chacun des six échantillons de câble est mis en place sous la forme d'une boucle fermée (Figure II-36-a). La partie basse de la boucle est enroulée autour de la poulie du plateau qui lui est dédié et la partie haute de la

boucle est suspendue sur un bâti qui reprend les six câbles sollicités, comme illustré dans la Figure II-36-b. La boucle est fermée par un dispositif de serrage à vis (Figure II-36-c).

Chaque support de plateau pèse 7,5 kg (tout compris, masses incluses). Trois câbles Neubrex et trois câbles AFL sont ainsi mis en charge, ce qui permet la réalisation de trois échéances de caractérisation mécanique pour chaque câble : après 5, 10 et 15 mois de sollicitation. La campagne de fluage a été lancée le 15 mars 2019, date correspondant au lancement (échéance T0) de ce type de sollicitation dans la suite du document.

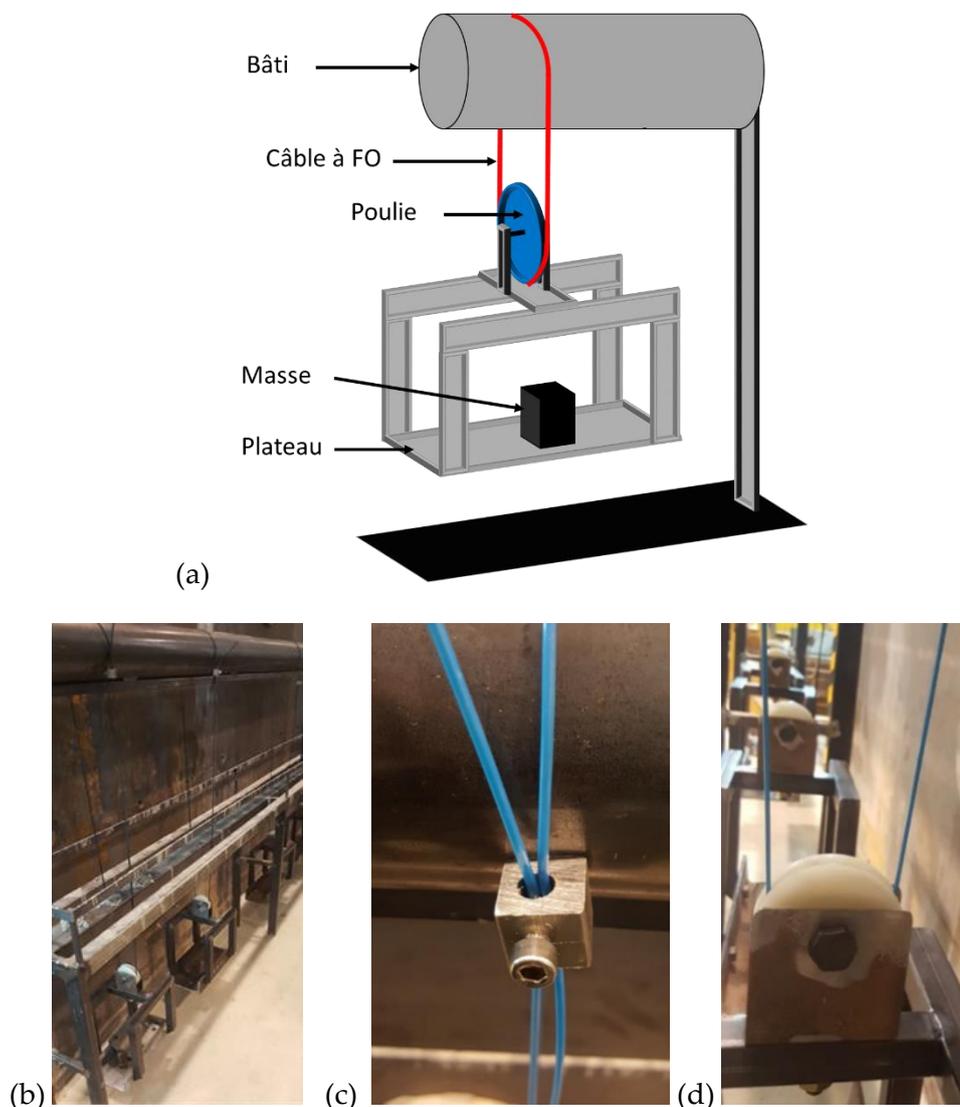


Figure II-36 : Dispositif de sollicitation en fluage : (a) schéma, (b) vue globale, (c) fermeture d'une boucle de câble et (d) poulie de fixation du câble au plateau de chargement.

II.6.4. Vieillessement sur site naturel

Les campagnes de vieillissements accélérés mis en œuvre dans cette étude visent à évaluer en quelques mois, ce que pourrait être les évolutions à plus long terme des caractéristiques de l'instrumentation par capteurs à FO d'une structure en béton. Toutefois, il demeure toujours compliqué d'assurer la représentativité de tels essais ainsi que leurs réels facteurs d'accélération. En effet, concernant la configuration d'instrumentation par câble noyé, les vieillissements par immersion en solution alcaline à différentes températures génèrent à

l'évidence des facteurs d'accélération différents qui restent à établir. De même, le facteur d'accélération associé aux protocoles de vieillissement accéléré sur câbles à FO collés (cycles d'immersion/séchage et cycle gel/dégel), a été évalué à 4 à partir des ratios cycles accélérés/cycles de référence, mais il est probable que cette valeur ne représente pas la réelle accélération de l'essai par rapport aux conditions de service sur ouvrage. En effet, les températures extrêmes des cycles -10 °C et 30 °C imposés en enceinte ne sont, par exemple, pas systématiquement atteintes durant l'année. En France métropolitaine, des températures avoisinant -10 °C sont rarement rencontrées en hiver et celles aux alentours de +30 °C ne sont atteintes (ou dépassées) que quelques jours durant l'été.

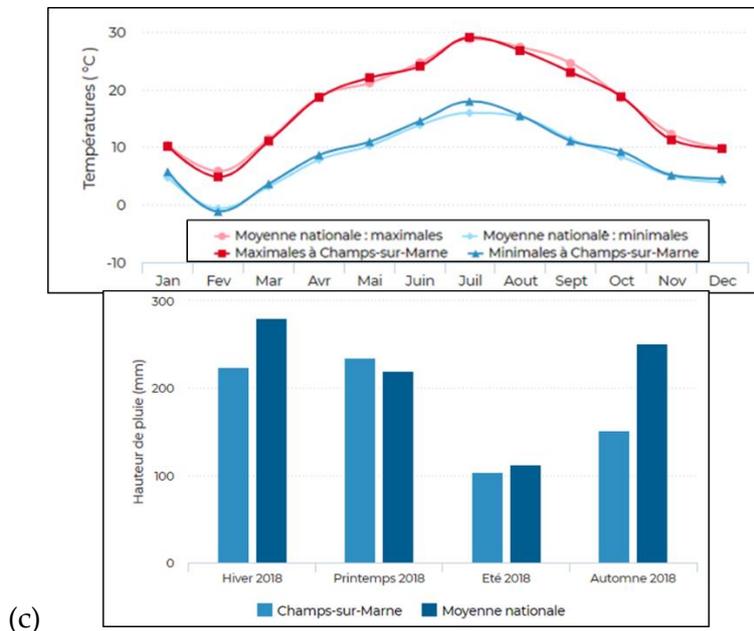
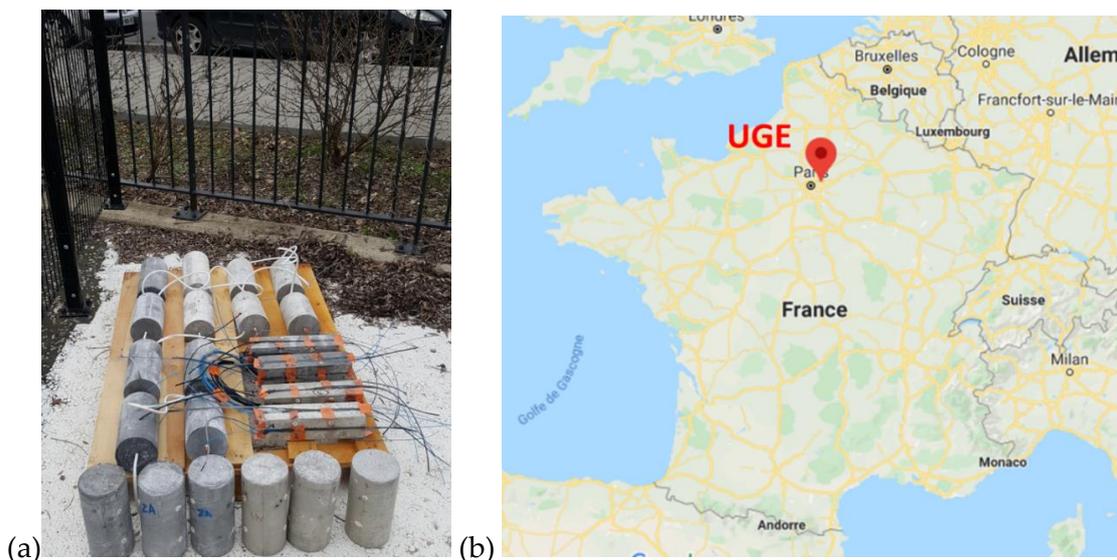


Figure II-37 : (a) Stockage des éprouvettes sur le site de vieillissement naturel ; (b) Situation géographique du site de l'UGE à Marne-la-Vallée ; (c) Courbes des données climatiques mesurées à proximité du site sur l'année 2019 (données publiques de météo France) [144].

Afin de disposer d'éléments fiables de comparaison, des échantillons de tous les types d'éprouvettes ont été placés sur un site de vieillissement naturel situé sur le campus de l'UGE à Marne-la-Vallée (Figure II-37). La durée de vieillissement programmée était de 16 mois, pour une mise en place des éprouvettes le 4 février 2019, cette date correspondant au lancement

(échéance T0) de ce type de vieillissement. Des essais de caractérisation mécanique des bétons, des câbles à FO et de l'adhésif, ainsi que des essais d'arrachement pour la caractérisation des interfaces câble noyé/béton et câble collé/béton ont été réalisés à la fin de la période de vieillissement naturel. Ces essais à 16 mois permettent d'estimer des valeurs réalistes des facteurs d'accélération par comparaison avec les résultats des essais réalisés aux diverses échéances des vieillissements accélérés. Ils visent ainsi à établir une relation entre la durée des vieillissements accélérés et la durée de vieillissement naturel équivalente.

Le détail des éprouvettes et échantillons stockés en site naturel ainsi que le programme d'essais associé sont indiqués dans le Tableau II-9.

Tableau II-9 : Programme d'essais de la campagne de vieillissement en site naturel.

Formulation	AA				
Types d'échantillons	Cylindres Ø 11 - 22 cm	Cylindres avec câbles noyés		Prismes avec câbles collés	
		Câble Neubrex	Câble AFL	Câble Neubrex	Câble AFL
Types d'essais	Compression	Arrachement	Arrachement	Arrachement	Arrachement
Nombre d'éprouvettes	3	3	3	2	2
Formulation	ZA				
Types d'échantillons	Cylindres Ø 11 - 22 cm	Cylindres avec câbles noyés		Prismes avec câbles collés	
		Câble Neubrex	Câble AFL	Câble Neubrex	Câble AFL
Types d'essais	Compression	Arrachement	Arrachement	Arrachement	Arrachement
Nombre d'éprouvettes	3	3	3	2	2
Types d'échantillons	Câbles à FO		Adhésif		
Types d'essais	Traction et arrachement		Traction		
Nombre d'éprouvettes	3 pour chaque série		3		

II.6.5. Récapitulatif des échéances de caractérisation associées aux différentes conditions de vieillissement

Les différentes campagnes de vieillissements accélérés ou naturel planifiées dans cette étude de durabilité n'ont pas toutes débuté à la même date. De même, le nombre d'échéances et leurs dates ne sont pas identiques pour tous les essais. Afin de faciliter la lecture des chapitres suivants, le Tableau II-10 présente donc une synthèse des échéances de caractérisations pour les différents types de vieillissements.

Tableau II-10 : Synthèse des échéances de caractérisations associées aux différentes conditions de vieillissement de l'étude.

Type de vieillissement	Lancement du vieillissement	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Attaque chimique en milieu alcalin	déc-18	mars-19	juin-19	sept-19	déc-19	mars-20	juin-20
Cycles gel/dégel	déc-18	mars-19	juin-19	sept-19	déc-19	mars-20	juin-20
Cycles immersion/séchage	déc-18	mars-19	juin-19	sept-19	déc-19	mars-20	juin-20
Fluage des câbles	mars-19	X	août-19	X	janv-20	X	juin-20
Vieillissement naturel	févr-19	X	X	X	X	X	juin-20
Durabilité X120	sept-19	X	X	X	X	X	juin-20

II.7. Synthèse du Chapitre II

Ce chapitre a permis de présenter en détail le programme expérimental planifié à l'UGE et visant à étudier la durabilité des câbles à FO destinés à la mesure des déformations des ouvrages en BA. Dans cette étude, deux configurations d'installation des capteurs à FO ont été considérées, en cohérence avec les pratiques rencontrées sur le terrain : des câbles noyés dans le béton et des câbles collés en surface du béton.

Pour les besoins de cette recherche, différents types d'échantillons ont été conçus puis fabriqués pour chacune de ces deux configurations d'instrumentation, et différents dispositifs d'essais associés à des protocoles spécifiques ont été identifiés en vue de la caractérisation initiale puis du suivi, à différentes échéances de vieillissement, des évolutions des caractéristiques mécaniques, physico-chimiques et géométriques des éprouvettes et échantillons.

Différents protocoles de vieillissement des échantillons et éprouvettes ont ensuite été définis afin de simuler de manière accélérée l'effet de l'alcalinité du béton sur une instrumentation par câble à FO noyé ainsi que l'effet de l'environnement extérieur sur une instrumentation par câble à FO collé en surface. Parallèlement à ces vieillissements accélérés en laboratoire, il est apparu nécessaire d'exposer les mêmes types d'échantillons sur un site de vieillissement naturel en environnement extérieur, pour tenter d'évaluer les facteurs d'accélération effectifs résultant des conditions accélérées.

On notera que la campagne expérimentale réalisée sur les blocs massifs du projet ODOBA de l'IRSN n'a pas été décrite dans le présent chapitre et fera l'objet du chapitre IV de ce manuscrit.

III. Résultats de l'étude de durabilité sur les câbles à FO

III.1. Introduction

Le chapitre précédent a permis de définir le programme de l'étude de durabilité ainsi que les différents protocoles expérimentaux associés.

Dans le présent chapitre, nous présenterons d'abord les résultats issus des essais de caractérisation réalisés sur les différents types d'éprouvettes à l'état initial non vieilli (échéance T0) puis aux différentes échéances de vieillissements accélérés ou naturel (échéances T1 à T6). Ceci permettra de déterminer les évolutions de propriétés mécaniques induites par ces vieillissements et de mieux cerner les mécanismes physico-chimiques responsables de ces évolutions. La seconde partie du chapitre sera ensuite consacrée au développement d'une approche numérique simplifiée visant à décrire le mécanisme de transfert d'effort entre la structure hôte en béton et la FO des deux câbles considérés dans cette étude. Ce modèle, qui sera alimenté par les résultats expérimentaux, sera appliqué pour prédire l'influence des vieillissements sur le transfert d'effort, et donc sur la mesure de déformation du capteur, pour deux configurations d'instrumentation couramment utilisées sur ouvrages, à savoir des capteurs noyés dans le béton et collés en parement.

III.2. Caractérisations à l'état initial avant vieillissement

III.2.1. Caractérisation mécanique des bétons AA et ZA

Les bétons de compositions AA et ZA ont été caractérisés mécaniquement à 28 jours après le coulage. Les éprouvettes de la formulation AA ont été conservées dans l'eau pour favoriser l'hydratation du béton jusqu'à 28 jours. Les éprouvettes ZA, qui ont subi un traitement thermique dans l'eau commencé le lendemain du coulage et d'une durée de 12 jours (traitement détaillé au paragraphe II.3.6), ont également été conservées dans l'eau entre la fin de ce traitement et le 28^{ième} jours. Le Tableau III-1 présente les résultats des essais mécaniques à 28 jours sur les bétons des deux formulations.

Aux différentes échéances des vieillissements et en raison de la présence des câbles à FO engravés sur les 4 surfaces des prismes $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$, le suivi mécanique des bétons s'effectuera uniquement sur les cylindres $\varnothing 11 - 22 \text{ cm}$ conservés en solution alcaline à différentes températures et en site de vieillissement naturel.

Tableau III-1 : Résultats des essais de caractérisation mécanique des bétons AA et ZA à 28 jours.

	AA		ZA	
	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart type</i>	<i>Moyenne</i>	<i>Ecart type</i>
Résistance à la compression sur cylindres Ø 11 - 22 cm (MPa)	63,7	0,9	33,2	0,9
Résistance à la compression sur cubes 7 x 7 x 7 cm³ (MPa)	58,7	5,5	36,0	1,8
Résistance à la traction par essai de flexion sur prismes 7 x 7 x 28 cm³ (MPa)	3,0	0,1	3,4	0,1
Module d'Young (GPa)	40,8	0,2	33,39	0,06
Coefficient de Poisson	0,25	0,02	0,22	0,05

III.2.2. Caractérisation mécanique des deux câbles à FO

Les deux câbles à FO utilisés dans la présente campagne expérimentale ont été caractérisés mécaniquement avant le lancement des différents vieillissements. Chacun des deux câbles a été dénudé afin de tester séparément en traction les différents matériaux constitutifs en vue de déterminer leurs modules d'élasticité (voir l'exemple présenté dans la Figure III-1-a). Des essais d'arrachement ont également été effectués (voir l'exemple présenté dans la Figure III-1-b) afin de caractériser les différentes interfaces internes de chaque câble (interfaces gaine/FO et gaine/élément de renforcement).

Comme évoqué dans le paragraphe II.2, le jonc central du câble AFL constitue son renforcement mécanique. Pour le câble Neubrex, ce sont les 2 fils métalliques qui assurent une protection mécanique du câble.

Les résultats de ces essais à l'échéance T0 sont répertoriés dans le Tableau III-2. Deux paramètres d'interface y sont présentés : la rigidité tangentielle qui correspond à la pente de la courbe « Contrainte d'arrachement/Déplacement différentiel au niveau de l'interface » (dont on suit l'évolution à différentes échéances des vieillissements) et la contrainte d'adhérence qui correspond à la contrainte maximale atteinte avant glissement (calculée à T0 uniquement). On rappelle que la contrainte est calculée en divisant la charge par la surface de contact entre les couches sollicitées en cisaillement pendant l'essai d'arrachement (Cf. Equation I-9).

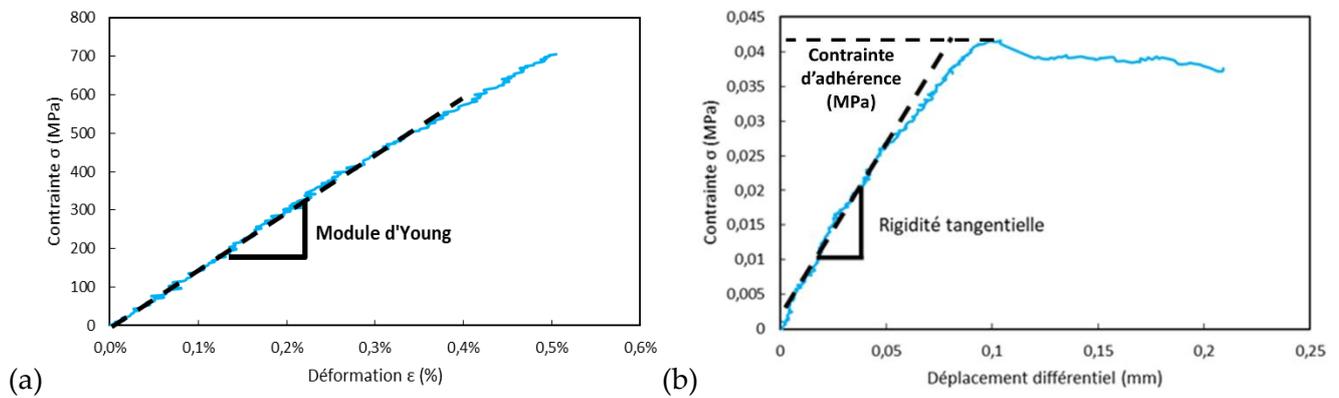


Figure III-1 : Exemple de courbes expérimentales obtenues en testant (a) un renfort mécanique du câble Neubrex en traction et (b) l'interface gaine du câble AFL/FO en arrachement.

Tableau III-2 : Résultats des essais de caractérisation mécanique des deux câbles à FO à l'état initial avant vieillissement.

	Neubrex		AFL	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Module d'Young de la gaine externe (MPa)	38	5	1603	295
Module d'Young de l'élément de renforcement mécanique (GPa)	234	12	47	7
Rigidité tangentielle Gaine/FO (MPa/mm)	0,21	0,14	0,34	0,04
Rigidité tangentielle Gaine/Renforcement (MPa/mm)	7,97	0,11	0,97	0,04
Contrainte d'adhérence Gaine/FO (MPa)	0,055	0,004	0,137	0,006
Contrainte d'adhérence Gaine/Renforcement (MPa)	0,39	0,04	0,23	0,05

Il convient d'analyser les résultats du Tableau III-2 avec précaution. En effet, la préparation des échantillons et en particulier le dénudage, est susceptible d'altérer les propriétés mécaniques de certains constituants des deux câbles et l'intégrité des interfaces. Par conséquent, les propriétés mécaniques issues des essais expérimentaux peuvent être sensiblement différentes des valeurs réelles, surtout en ce qui concerne les valeurs d'adhérence aux interfaces. Néanmoins, en s'assurant de suivre rigoureusement le même protocole de dénudage des deux câbles à FO pour l'ensemble des essais de caractérisation et à toutes les échéances, il est possible de suivre l'évolution de ces propriétés de manière à mettre en évidence d'éventuelles dégradations induites par les différents types de vieillissements considérés. Il faut aussi souligner que les propriétés aux interfaces (rigidité tangentielle et contrainte d'adhérence) dépendent de la surface de contact au niveau d'une interface.

Afin de mieux interpréter les résultats de ce tableau et parvenir à comparer les caractéristiques des deux câbles à FO, il est nécessaire de prendre en considération les dimensions des constituants spécifiques à chaque câble. A titre d'exemple, le câble AFL est muni d'un élément de renforcement unique de 0,4 mm de diamètre, tandis que le câble Neubrex est muni de deux fils métalliques de 0,3 mm de diamètre. La section de l'élément de renforcement est donc différente dans les deux cas, de même que la surface de contact à l'interface gaine/élément de renforcement.

A partir des résultats du Tableau III-2 et des informations disponibles sur les deux câbles à FO étudiés, nous proposons dans ce qui suit une discussion sur leurs caractéristiques comparées :

-le revêtement externe du câble Neubrex apparaît beaucoup plus souple que celui du câble AFL, comme en témoignent les modules d'Young obtenus. Une meilleure adhérence câble/béton est attendue pour le câble Neubrex en raison de la présence de reliefs sur sa surface externe. Toutefois, le transfert d'effort pourrait être meilleur pour le câble AFL, car son revêtement plus rigide est en mesure d'assurer une meilleure transmission des efforts vers la FO en silice ;

-le renforcement mécanique du câble Neubrex est beaucoup plus rigide que le jonc central du câble AFL. Cela peut avoir un effet négatif si ce renforcement affecte lui-même le transfert d'effort vers la fibre centrale, induisant alors un biais sur les mesures de déformations du milieu hôte, mais une protection mécanique du câble Neubrex semble en tout cas être parfaitement assurée. Il est également possible que la grande rigidité du renforcement mécanique du câble Neubrex vienne compenser la souplesse de son revêtement externe, en assurant ainsi la protection mécanique et un transfert d'effort optimal ;

-l'interface gaine/FO est plus rigide pour le câble AFL que pour le câble Neubrex, comme l'indiquent les valeurs comparées de la contrainte d'adhérence au niveau de cette interface (Tableau III-2). Les observations de la section du câble Neubrex présentées au chapitre II sur la Figure II-3 avaient déjà révélé la présence de vides (défaut de fabrication) entre les FOs et l'enrobage externe, ce qui pourrait expliquer la faible résistance mécanique de cette interface pour ce câble ;

-l'interface gaine/renforcement mécanique apparaît en revanche beaucoup plus rigide pour le câble Neubrex. Ce dernier est en effet muni de deux fils de renforcements très rigides et qui adhèrent très bien au revêtement externe du câble. Pour le câble AFL, l'adhérence du jonc central apparaît beaucoup plus limitée, probablement en raison de la présence du gel polymère très souple dans la structure interne du câble.

III.2.3. Caractérisation de l'adhésif X120

III.2.3.1. Suivi gravimétrique

Dans le cadre du programme de durabilité, les prismes de béton comportant des câbles collés en surface (au moyen de l'adhésif X120) ont été conservés dans l'eau pendant une durée de 3 mois environ avant le lancement des vieillissements. D'autres part, certains protocoles de vieillissement utilisés (cycle immersion/séchage, ou même cycle de température) impliquaient un contact direct du câble collé avec le milieu aqueux environnant, ou au moins une exposition

à l'air humide. De ce fait, il nous a semblé important d'évaluer la cinétique de prise en eau de l'adhésif X120 par mesures gravimétriques. Des échantillons de cet adhésif ont donc été immergés dans l'eau et un suivi de masse a été réalisé selon le protocole décrit au paragraphe II.5.2. La Figure III-2 présente la courbe de sorption de l'adhésif en fonction du temps d'immersion (valeurs moyennes et écarts types sur 8 échantillons).

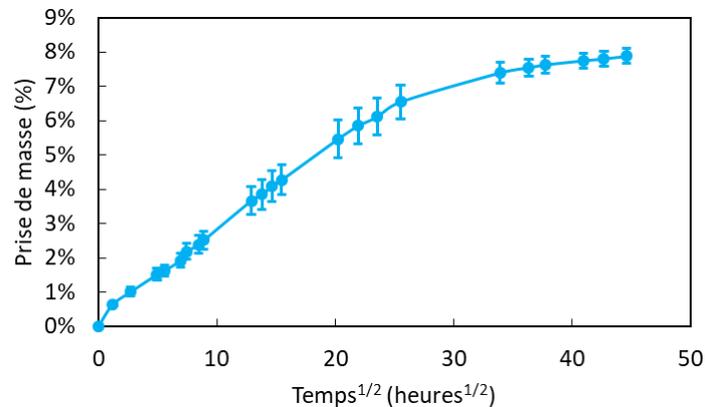


Figure III-2: Prise de masse en fonction du temps pour les échantillons d'adhésif X120 immergés dans l'eau à 20 °C.

La courbe de sorption semble indiquer un comportement Fickien de l'adhésif X120, avec une partie initiale linéaire, puis une diminution progressive de la cinétique de diffusion d'eau [145]. Après 80 jours dans l'eau, la prise de masse est voisine de 7,8 % et le plateau de saturation n'est pas encore totalement atteint. On peut penser que la teneur en eau à l'équilibre est de l'ordre de 8 - 8,5 %.

III.2.3.2. Caractérisation mécanique de l'adhésif à T0

Deux séries d'échantillons d'adhésif ont été testées en traction à l'échéance T0 (Cf. protocole d'essai au paragraphe II.3.2.2). La première série a été conservée dans l'eau (protocole identique à celui des prismes de béton avec câbles collés en surfaces) pendant 3 mois avant la réalisation des essais de traction. La deuxième série a été conservée à l'air ambiant pendant la même durée. La Figure III-3 présente des courbes de traction typiques obtenues pour les échantillons de chaque série, et le Tableau III-3 regroupe les résultats des essais de traction pour les deux séries testées (valeurs moyennes et écarts types sur 3 éprouvettes)

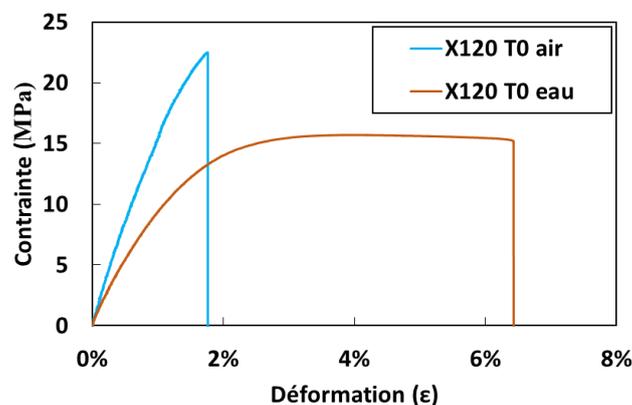


Figure III-3 : Courbes contrainte/déformation en traction typiquement obtenues pour les échantillons d'adhésif X120 conservés 3 mois dans l'eau ou dans l'air à 20 °C.

Tableau III-3 : Résultats des essais de traction sur les échantillons d'adhésif X120 après trois mois de conservation dans l'eau ou dans l'air à 20 °C (caractérisation à l'échéance T0).

	Eprouvettes conservées dans l'eau		Eprouvettes conservées à l'air ambiant	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Module d'Young en traction (MPa)	882	138	1333	109
Résistance à la traction (MPa)	13,7	0,8	22,7	2,3

Les résultats d'essais montrent que l'immersion dans l'eau affecte de manière importante les propriétés mécaniques de l'adhésif X120. En effet, le module d'élasticité (pente initiale de la courbe) de l'adhésif diminue notablement après immersion (-34 %). En parallèle, on observe une augmentation de la ductilité du matériau et l'apparition d'un palier de déformation plastique à une contrainte seuil de 14 MPa. Toutefois, l'immersion dans l'eau conduit à une perte importante de la résistance à la traction (-40 % environ par rapport à l'échantillon conservé dans l'air).

Ces résultats sont cohérents avec plusieurs études de la littérature traitant l'influence de la teneur en eau de systèmes polymères de type époxydes sur les propriétés mécaniques de ces matériaux. D'après les résultats présentés dans [146] et [147], l'immersion dans l'eau d'un réseau époxyde polymérisé induit un phénomène d'absorption selon deux mécanismes distincts. Le premier concerne le transport des molécules d'eau par diffusion, avec une cinétique qui dépend de la disponibilité des pores de taille moléculaire, et donc de la microstructure, de la morphologie et de la densité de réticulation du réseau polymère. Le deuxième mécanisme est lié à la présence de sites polaires (de type hydroxyles -OH) sur les chaînes du polymère, qui favorise la création de liaisons hydrogènes avec les molécules d'eau. La formation de ces liaisons hydrogènes entraîne la rupture de liaisons physiques (de type van der Waals) au sein du réseau polymère, conduisant ainsi à une augmentation globale de la mobilité moléculaire et à une diminution de la température de transition vitreuse (T_g) du polymère : c'est le phénomène de plastification du réseau par les molécules d'eau. Ce phénomène s'accompagne généralement d'une diminution notable des propriétés mécaniques du polymère (module d'Young, contrainte à la rupture, indice de dureté) et d'une augmentation de ductilité [147], conformément à ce qui a été observé dans le cas de l'adhésif X120 immergé dans l'eau.

III.2.4. Caractérisation mécanique de l'interface câble à FO/béton par essais d'arrachement

III.2.4.1. Acquisition des profils de déformation par interrogation des FO

La caractérisation des interfaces câbles à FO/béton est réalisée au moyen d'essais d'arrachement, selon le protocole décrit au paragraphe II.4.3. Lors de ces essais, les FOs sont interrogées à différents niveaux d'effort au moyen du dispositif OBR, de manière à collecter les profils de déformation le long de la ligne de mesure. Ces profils peuvent ainsi fournir des

informations précieuses sur le mécanisme de transfert d'effort et le comportement des interfaces.

Dans ce paragraphe sont présentés les profils de déformation obtenus à l'échéance T0, avant mise en vieillissement des échantillons. Les résultats obtenus aux échéances suivantes, qui permettront d'évaluer l'influence des différents vieillissements accélérés ou naturel sur la réponse des câbles à FO, seront présentés plus loin dans ce chapitre.

a. Cas du câble noyé dans le béton

La Figure III-4 présente les profils de déformation enregistrés à différents niveaux de charge au cours des essais d'arrachement réalisés sur cylindres de béton ZA avec câbles Neubrex et AFL noyés.

Ces graphes nous permettent de tirer des premières conclusions sur le comportement des deux câbles à FO lors de l'essai d'arrachement, et en particulier sur leur adhérence avec le béton ZA à l'échéance T0.

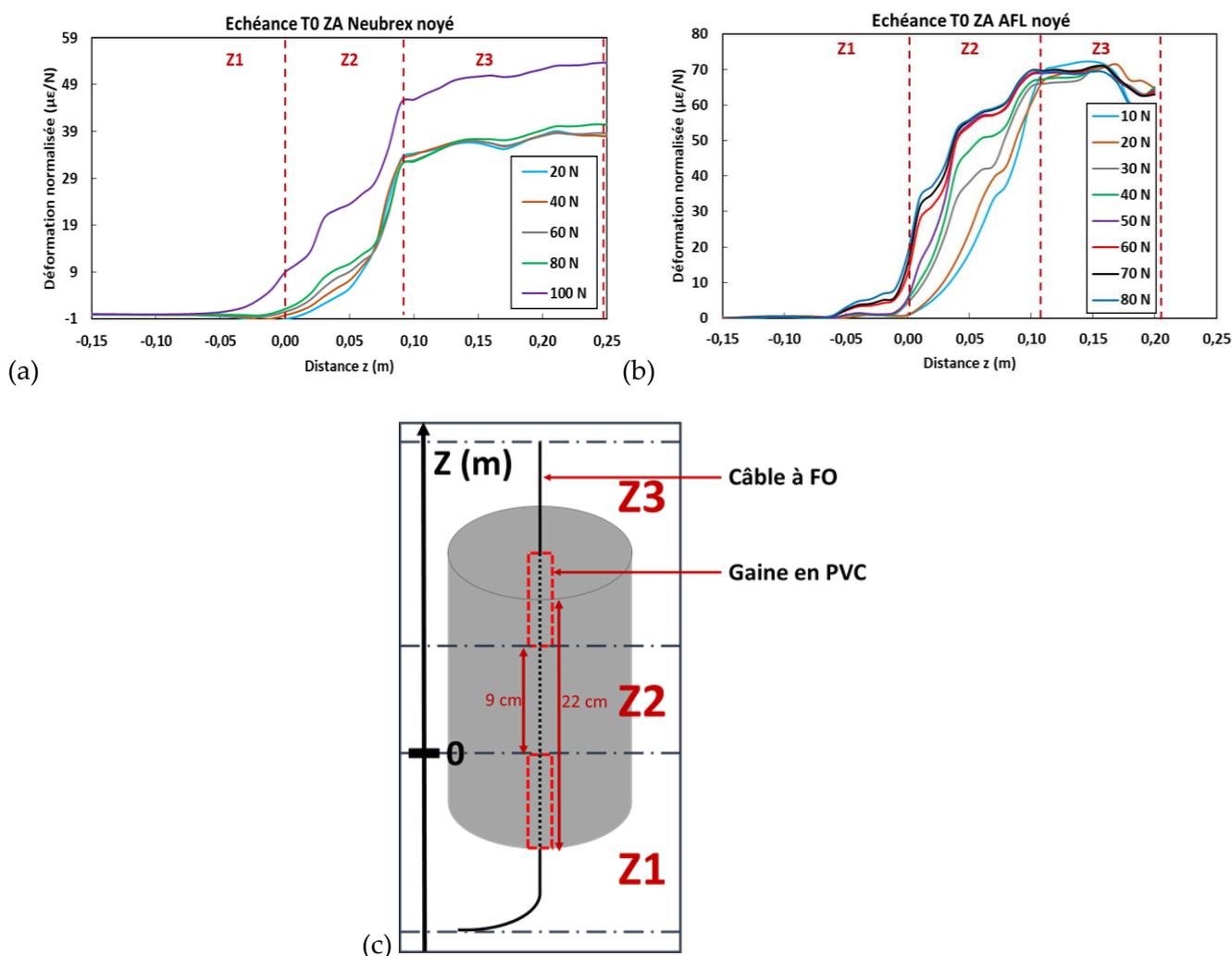


Figure III-4: Profils de la déformation enregistrés au cours d'essais d'arrachement à l'échéance T0 sur éprouvettes de béton ZA comportant des câbles (a) Neubrex et (b) AFL noyés. Les profils sont donnés pour différents niveaux de charge appliquée et la déformation est normalisée par rapport à la charge.

L'abscisse z correspond à la position du câble sur la hauteur de l'éprouvette ; (c) Schéma de l'éprouvette avec les différentes zones Z1, Z2 et Z3.

Les profils de déformation font apparaître 3 zones de comportement du câble à FO, qui correspondent à des zones précises de l'éprouvette Figure III-4-c :

- Z1 correspond à la zone de câble non adhérente, située en dessous du segment de câble en contact avec le béton. Dans cette zone, le câble n'est soumis à aucun effort et la déformation est nulle ;
- La zone Z2 correspond à la partie du câble noyée dans le béton et est marquée par une évolution de la déformation (celle-ci est maximale du côté chargé en haut de l'éprouvette, et tend vers des valeurs nulles du côté non chargé). La longueur de cette zone est de l'ordre de 9 cm, ce qui correspond à la longueur de contact câble/béton définie à la fabrication des éprouvettes. Néanmoins, cette longueur apparaît parfois supérieure à 9 cm pour les éprouvettes avec câble AFL noyé. Ce résultat est dû à la présence du gel polymère souple présent à l'intérieur du câble, qui induit une diffusion des efforts à l'interface câble/béton sur une longueur de FO supérieure à la longueur de contact avec le béton ;
- Finalement, une dernière zone Z3 correspond à la partie du câble non adhérente située au-dessus de la zone de contact Z2, et qui est soumise à un effort de traction pure lors de l'essai d'arrachement.

En ordonnée des deux graphes, la valeur de déformation normalisée par la charge est corrélée au module d'élasticité en traction global du câble à FO. Par exemple, en comparant les deux graphes au niveau de la zone Z3, on peut conclure que le câble Neubrex est 2 fois plus rigide que le câble AFL (en comparant la déformation normalisée des deux câbles). Toutefois, on voit bien que le comportement global du câble Neubrex n'est plus linéaire pour des charges appliquées supérieures à 100 N.

En analysant le comportement de la FO dans les zones Z2 et Z1, on note que pour des niveaux de charge élevés, la FO devient également sollicitée dans une partie de la zone Z1. Ce résultat peut être expliqué par l'apparition d'un phénomène de glissement interne lié à une décohésion de la FO à l'intérieur du câble à FO. Ce glissement au niveau de l'interface gaine/FO peut conduire à une sollicitation de la fibre sur toute la longueur entre les deux extrémités de la FO encore adhérentes dans la gaine du câble.

b. Cas du câble collé en surface du béton

De la même manière, des essais d'arrachement sont réalisés sur les prismes de béton avec câbles à FO collés en parement, en vue de caractériser le comportement de l'interface câble collé/béton à l'échéance T0. La Figure III-5 présente les profils de déformation obtenus par interrogation OBR des câbles Neubrex et AFL collés en surface des prismes ZA au cours des essais d'arrachement, et à plusieurs niveaux de chargement.

Comme précédemment pour la configuration avec câbles noyés, trois zones distinctes sont visibles sur les profils de déformation Figure III-5-c :

- Une première zone Z1, correspond à la partie de câble non-adhérente située juste en dessous de la partie de câble collée. Dans cette zone, le câble n'est soumis à aucun effort.
- Ensuite, une zone Z2 dans laquelle les valeurs de déformation normalisée varient fortement (valeur maximale du côté chargé de la portion de câble collée, et valeur proche

de 0 du côté non chargé) est visible sur une longueur de 7 cm environ, qui correspond à la longueur de collage câble/béton définie lors de la phase de réalisation des éprouvettes. Là encore, on notera que la longueur de cette zone Z2 peut dépasser 7 cm pour le câble AFL, en raison de la présence du gel souple à l'intérieur du câble, qui favorise la diffusion des efforts sur des distances plus grandes.

- La dernière zone Z3 correspond à la partie du câble non-adhérente située au-dessus de la zone de câble collé, et qui est soumise à un effort de traction pure pendant l'essai d'arrachement. Dans cette zone Z3, on remarque que le niveau de déformation normalisée est presque constant (du moins pour le câble Neubrex) ; par ailleurs, ce niveau étant corrélé à la rigidité globale du câble, on retrouve à nouveau une rigidité 2 fois plus grande pour le câble Neubrex comparé au câble AFL.

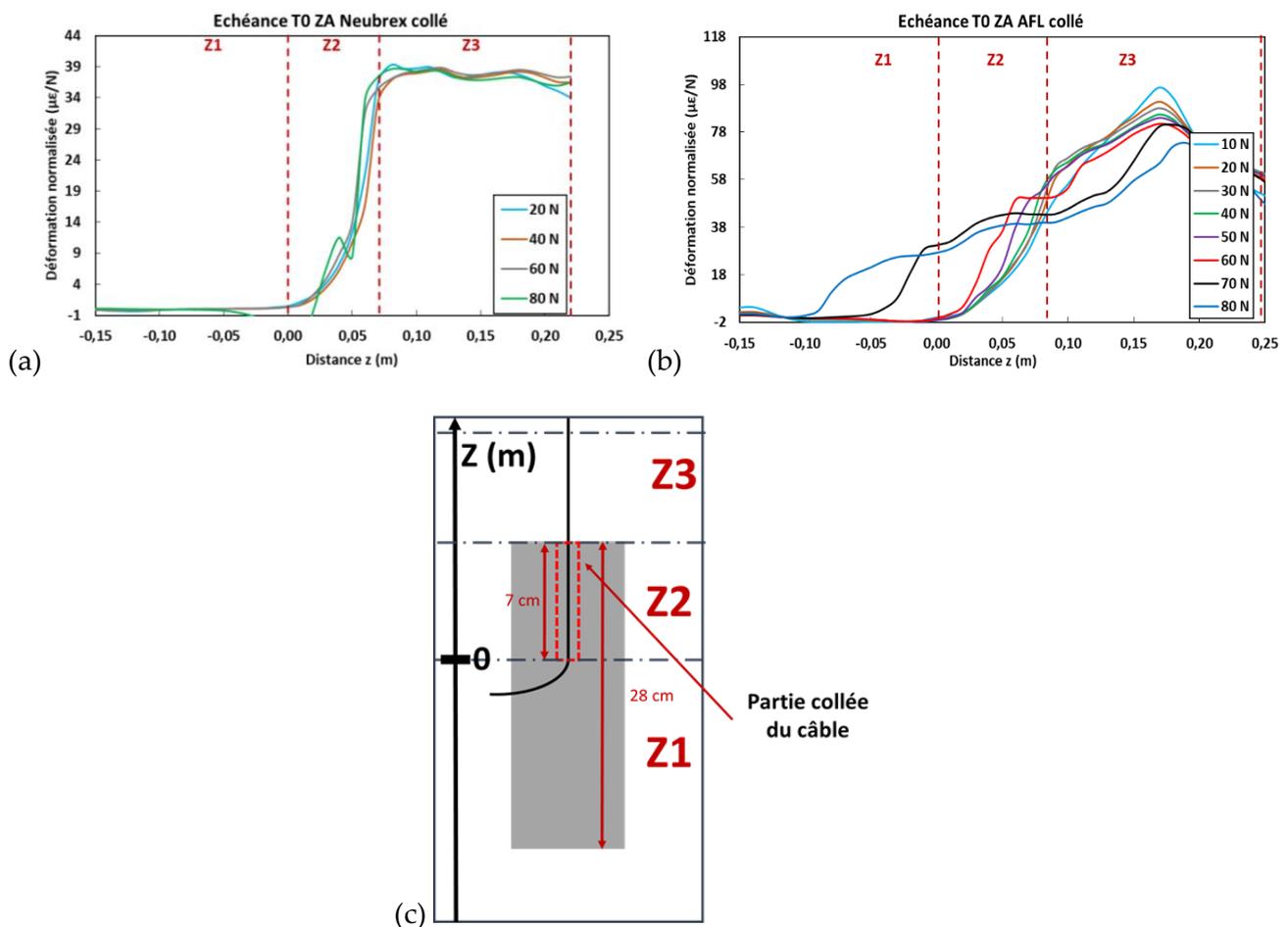


Figure III-5 : Profils de la déformation enregistrés au cours d'essais d'arrachement à l'échéance T0 sur éprouvettes de béton ZA comportant des câbles (a) Neubrex et (b) AFL collés en parement. Les profils sont donnés pour différents niveaux de charge appliquée et la déformation est normalisée par rapport à la charge. L'abscisse z correspond à la position du câble sur la hauteur de l'éprouvette ; (c) Schéma de l'éprouvette avec les différentes zones Z1, Z2 et Z3.

Dans le cas du câble AFL, on remarque que pour les niveaux élevés de charge appliquée, la longueur de la FO sollicitée dépasse la zone Z2 et s'étale sur une large partie de la zone Z1. Ce résultat traduit un phénomène d'endommagement de l'interface fibre/gaine et/ou un glissement interne de la FO à l'intérieur de la gaine du câble.

III.2.4.2. Détermination des propriétés mécaniques de l'interface câble/béton

En complément des profils des déformations obtenus par interrogation des FO, les essais d'arrachement permettent également de déterminer des propriétés mécaniques de l'interface câble/béton, en particulier une pente contrainte/déplacement différentiel qui caractérise la rigidité tangentielle de l'interface, et une contrainte maximale avant glissement du câble qui caractérise le niveau d'adhérence câble/béton (voir la courbe de la Figure III-6). Les valeurs de contraintes sont calculées en divisant la charge mesurée par la surface de contact câble/béton (en tenant compte des périmètres différents des deux câbles à FO, et des longueurs de contact câble/béton différentes pour les éprouvettes cylindriques et prismatiques, à savoir 9 cm et 7 cm respectivement).

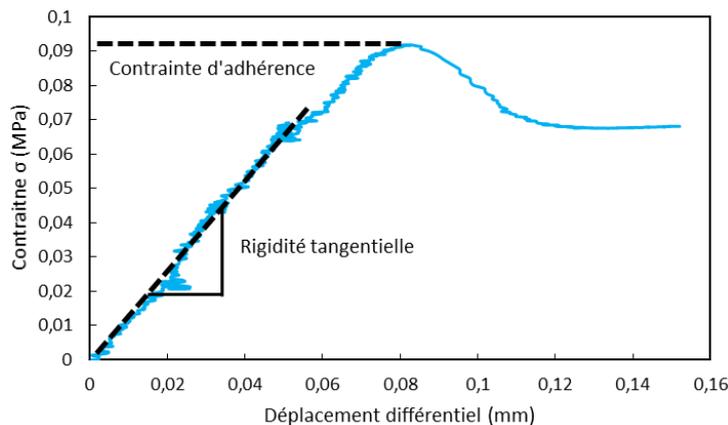


Figure III-6 : Exemple de courbe expérimentale du essai d'arrachement câble Neubrex collé/béton.

Les valeurs des paramètres déterminés à l'état initial avant mise en vieillissement (échéance T0) sont indiquées dans le Tableau III-4, pour les deux types de câbles à FO, les deux cas d'instrumentation (câble noyé ou collé) et pour les deux formulations de béton AA et ZA.

Ces résultats permettent de tirer certaines conclusions sur les propriétés de l'interface câble/béton à l'état initial avant vieillissement, en fonction de la configuration d'instrumentation et de la formulation de béton considérées :

- En comparant les résultats des deux configurations pour un câble donné (insertion directe dans le béton ou collage en parement), on peut noter que la rigidité tangentielle de l'interface (pente de la courbe contrainte/déplacement différentiel) est nettement plus élevée en présence d'un adhésif de collage que dans le cas d'une insertion directe. La contrainte d'adhérence semble en revanche assez comparable dans les deux configurations ;
- On note également que le câble Neubrex présente des valeurs de rigidité d'interface supérieures à celles du câble AFL pour les deux cas d'instrumentation, mais de manière plus marquée dans le cas du câble noyé dans le béton. Ceci pourrait être lié à la géométrie de surface spécifique de ces câbles (présence de reliefs), qui permet de développer une surface de contact importante et donc de favoriser l'engrenage mécanique. Il faut garder à l'esprit que cette rigidité dépend fortement de la rigidité du câble lui-même (et donc de celle des éléments de renforcement du câble, comme les tiges métalliques pour le Neubrex) ;

- Les résultats font également apparaître quelques différences sur les propriétés de l'interface câble/béton selon le type de bétons considéré (AA et ZA), pour un câble et une configuration d'instrumentation donnés. On note en particulier des valeurs moyennes de rigidité d'interface et de contraintes d'adhérence légèrement plus élevées avec la formulation AA dans le cas des câbles noyés, et avec la formulation ZA dans le cas des câbles collés en parement. Toutefois, compte tenu des grands écarts types observés sur ces valeurs, il est difficile de conclure à ce stade sur le caractère significatif de ces tendances.

Tableau III-4 : Propriétés mécaniques de l'interface câble/béton déterminées à partir des essais d'arrachement sur éprouvettes de béton AA et ZA instrumentées par câbles Neubrex et AFL noyés ou collés en surface.

	Neubrex				AFL			
	Rigidité tangentielle (MPa/mm)		Contrainte d'adhérence (MPa)		Rigidité tangentielle (MPa/mm)		Contrainte d'adhérence (MPa)	
	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type	Moyenne	Ecart type
Béton AA – câble noyé	0,417	0,023	0,104	0,011	0,255	0,015	0,112	0,012
Béton ZA – câble noyé	0,401	0,043	0,131	0,021	0,22	0,02	0,095	0,012
Béton AA – câble collé	1,20	0,62	0,093	0,023	0,90	0,13	0,12	0,02
Béton ZA – câble collé	1,70	0,37	0,110	0,010	1,44	0,27	0,14	0,02

III.3. Caractérisations aux différentes échéances des vieillissements

Dans cette partie, nous allons dans un premier temps suivre les évolutions de propriétés des divers matériaux en présence (béton, câble à FO, adhésif) lorsqu'ils sont soumis aux différentes conditions de vieillissements accélérés et naturel considérées dans cette étude. Nous présenterons à la fois les résultats des essais mécaniques réalisés aux différentes échéances de vieillissement (T1 à T6) sur une durée totale de 18 mois, ainsi que les résultats issus des caractérisations physico-chimiques et des observations micrographiques complémentaires. Ces derniers visent à mieux appréhender les mécanismes de dégradation responsables des évolutions de propriétés mécaniques observées sur les matériaux vieillissés séparément. Dans le cas spécifique des bétons, on évaluera notamment l'influence des pathologies (RAG et/ou RSI), selon leur occurrence dans les différents milieux de vieillissement.

Dans un second temps, les évolutions de comportement mécanique de l'interface câble/béton seront également analysées à la lumière des mécanismes précédemment identifiés sur les matériaux constitutifs. L'impact de ces évolutions sur la réponse en déformation des câbles à FO sera également discuté.

III.3.1. Caractérisation des bétons AA et ZA vieilliss

III.3.1.1. Suivis dimensionnel et gravimétrique des éprouvettes de béton

a. Courbes d'expansion

Un suivi dimensionnel des éprouvettes de bétons AA et ZA (mesures d'expansion) a été réalisé selon le protocole décrit au paragraphe II.5.1., basé sur l'utilisation d'extensomètres à pointaux. Pour la formulation ZA, ce suivi a débuté dès la fin du traitement thermique et s'est poursuivi pendant toute la période de vieillissement.

Les courbes d'expansion des éprouvettes cylindriques de bétons AA et ZA immergées en solutions alcalines et soumises au vieillissement naturel sur site extérieur sont présentées sur la Figure III-7, tandis que les courbes obtenues pour les éprouvettes prismatiques soumises aux cycles d'immersion/séchage et gel/dégel, ainsi qu'au vieillissement naturel sont illustrées sur la Figure III-8.

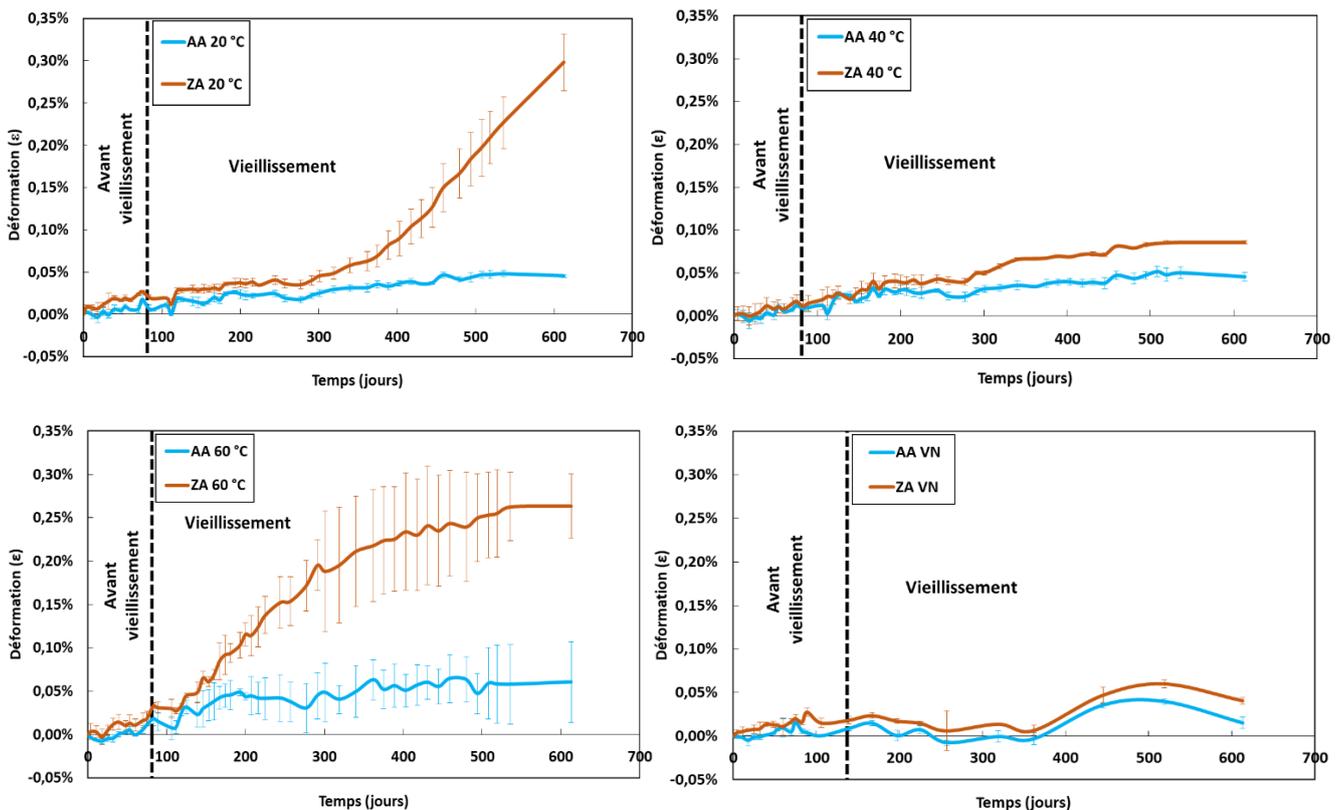


Figure III-7 : Courbes d'expansion des cylindres de béton AA et ZA immergés en solution alcaline à 20 °C, 40 °C et 60 °C et exposés au vieillissement naturel (VN).

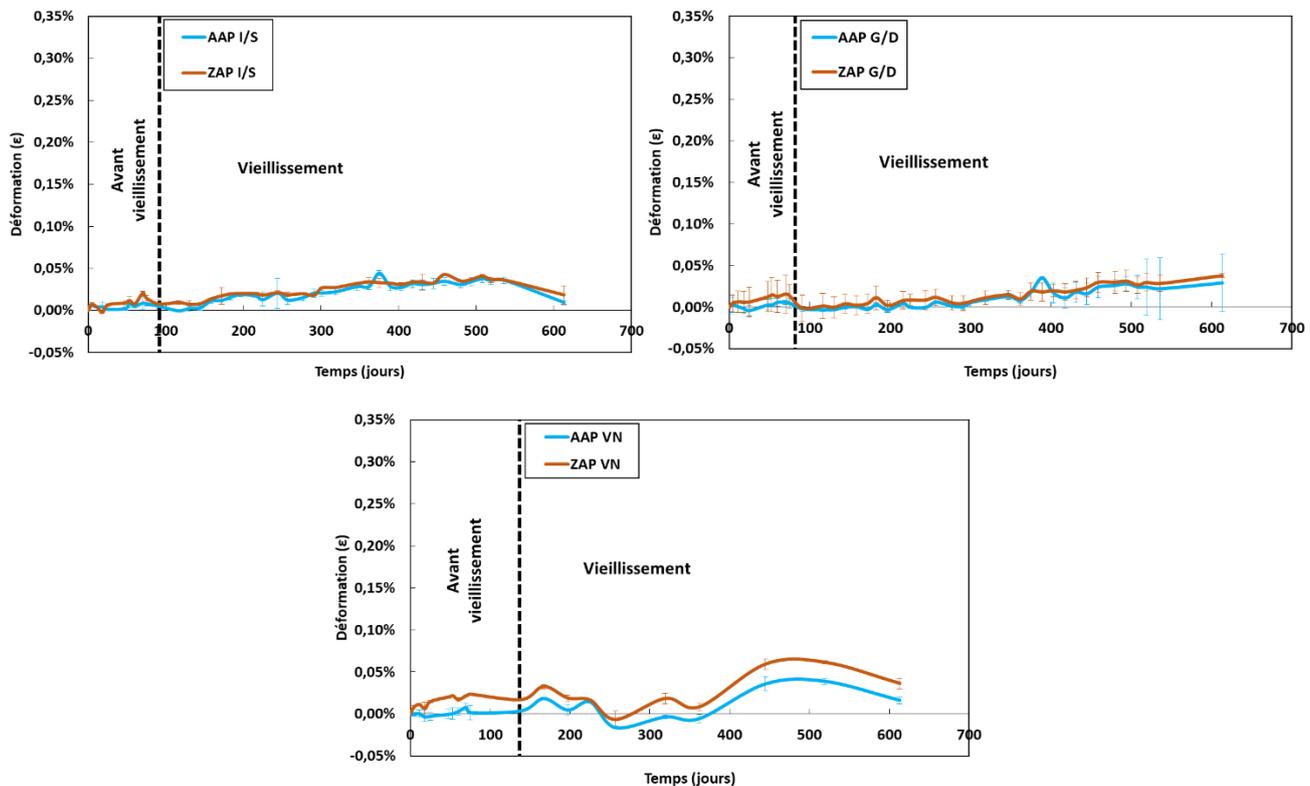


Figure III-8 : Courbes d'expansion des prismes (P) de béton AA et ZA (AAP et ZAP) exposés aux cycles d'immersion/séchage (I/S), de gel/dégel (G/D) et au vieillissement naturel (VN).

On notera que les graphes montrent une première phase de suivi d'expansion avant la mise en vieillissement des éprouvettes (pendant la conservation dans l'eau), et une deuxième phase après le lancement des vieillissements. L'origine de l'axe des temps (temps 0) correspond donc ici au moment de la mise en eau des éprouvettes et non à celui de leur mise en vieillissement.

Il apparaît clairement que l'expansion des cylindres de béton AA immergés en solution alcaline à différentes températures ne dépasse pas le seuil de 0,05 % pendant toute la durée du suivi. Cette expansion très limitée résulte principalement du gonflement hydrique des éprouvettes et confirme que le béton AA ne développe pas de pathologie expansive pendant le vieillissement, comme cela était attendu.

En revanche, les cylindres ZA présentent une expansion supérieure au seuil de 0,05 % après 100 jours de vieillissement en solution alcaline à 60 °C, et après 300 jours en solutions à 20 °C et à 40 °C. A l'issue de la période de suivi, les valeurs d'expansion dépassent 0,2 % dans le cas des vieillissements en solution alcaline à 20 °C et à 60 °C, tandis que l'expansion reste inférieure à 0,1 % pour le vieillissement en solution à 40 °C. On note par ailleurs que l'expansion semble atteindre un pallier d'équilibre pour les éprouvettes vieilles à 40 °C et 60 °C, tandis que la courbe d'expansion des éprouvettes ZA à 20 °C reste encore dans une phase d'accélération rapide à la fin de la campagne de suivi et l'expansion finale pourrait donc être beaucoup plus importante si l'on poursuivait ce vieillissement. Ces évolutions traduisent le développement de pathologies de gonflement du béton ZA en milieu alcalin, dont la nature sera discutée plus loin à partir des observations MEB.

Les courbes d'expansion des cylindres AA et ZA exposés au vieillissement naturel montrent des évolutions très limitées, les valeurs restant en deçà du seuil de 0,05 %, ce qui permet

d'exclure le développement de pathologies expansives dans ces conditions spécifiques. En outre, on n'observe pas d'écart important entre les deux formulations de béton, même si les valeurs sont toujours légèrement plus élevées pour le béton ZA par rapport à AA. Par ailleurs, le graphe fait apparaître un comportement cyclique, probablement lié à l'influence des variations météorologiques saisonnières. En effet, le stockage des éprouvettes sur le site de vieillissement naturel a débuté en février 2019, et la première partie de la courbe montrant une stagnation de l'expansion voire un léger retrait qui correspond donc au suivi réalisé pendant la saison chaude et peu pluvieuse de l'année (printemps/été). Une deuxième partie de la courbe, marquée par une légère expansion, traduirait le gonflement hydrique des éprouvettes pendant la période plus humide de l'année couvrant l'automne et l'hiver. Enfin, nous constatons à nouveau un retrait des éprouvettes lors des dernières mesures effectuées au printemps 2020.

Le suivi dimensionnel réalisé sur les prismes de béton AA et ZA (AAP et ZAP) soumis aux cycles d'immersion/séchage, de gel/dégel et au vieillissement naturel ne révèle pas non plus de phénomène d'expansion significatif, et permet également d'exclure l'apparition de pathologies de gonflement dans ces conditions de vieillissement.

b. Courbes de prise de masse

Un suivi gravimétrique a également été réalisé sur les cylindres de béton AA et ZA immergés en solution alcaline à différentes températures (20 °C, 40 °C et 60 °C), selon le protocole décrit au paragraphe II.5.2. Les courbes des évolutions de masse sont présentées sur la Figure III-9.

Pour les éprouvettes ZA, le suivi gravimétrique a débuté directement après le traitement thermique des éprouvettes.

La prise de masse rapide observée pendant la première phase de suivi est liée au remplissage des pores internes des cylindres en béton lors de leur conservation dans l'eau, avant la mise en vieillissements. Cette augmentation initiale étant nettement plus marquée pour le béton ZA que pour AA, il semble donc que la porosité accessible à l'eau soit plus importante pour cette formulation ZA.

La petite perte de masse vers 60 jours est liée à la mise en place des éprouvettes dans les bacs de vieillissements (vides), conduisant à une dessiccation du béton. La prise de masse reprend ensuite lors du remplissage des bacs par la solution alcaline lors de la mise en vieillissement.

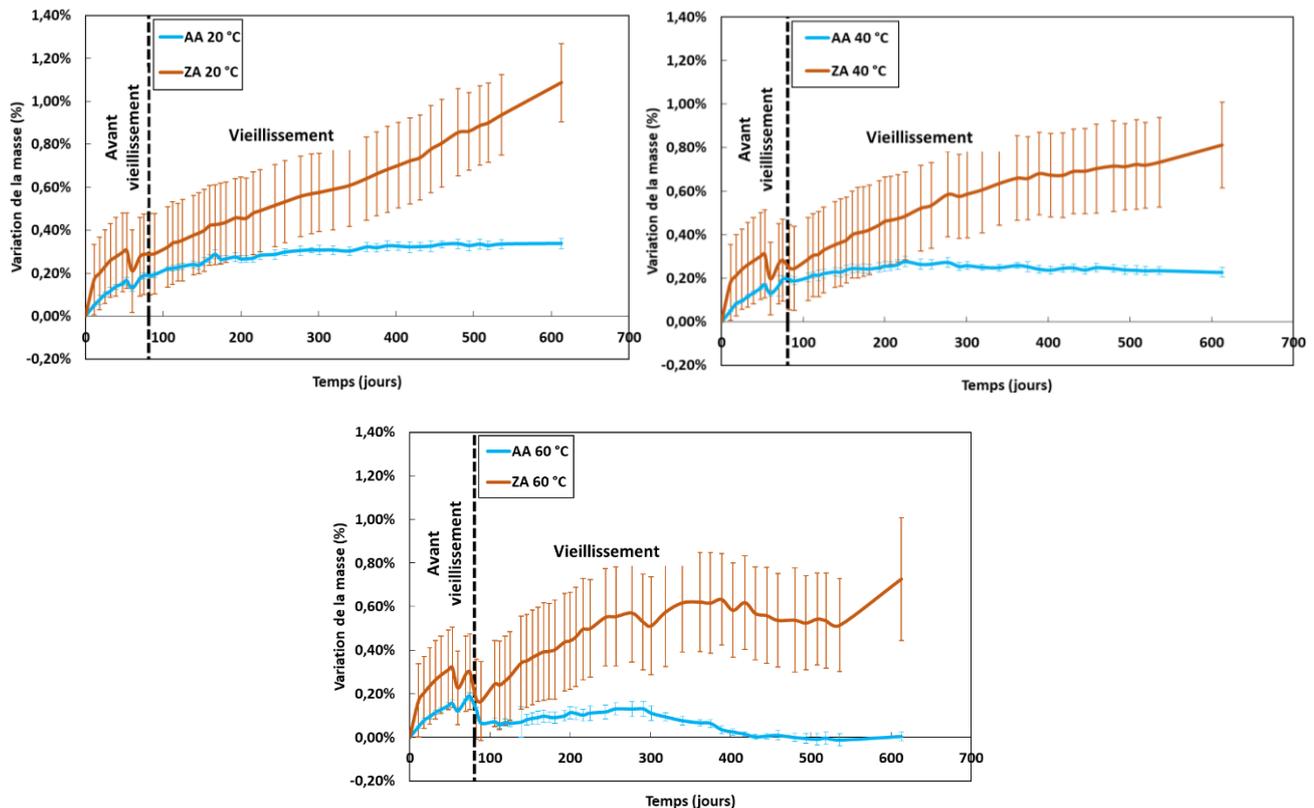


Figure III-9 Suivi gravimétrique des cylindres de béton AA et ZA immergés en solution alcaline à 20 °C, 40 °C et 60 °C.

Au cours du vieillissement par immersion en solution alcaline, les courbes de suivi gravimétrique montrent des évolutions fortement corrélées à celles des courbes d'expansion. Pour les cylindres ZA, on observe ainsi une prise de masse significative qui accompagne le phénomène d'expansion associé au développement des pathologies. Cette prise de masse apparaît plus marquée pour la condition d'immersion à 20 °C, comme c'était déjà le cas sur les relevés d'expansion. Pour les éprouvettes AA, les évolutions de masse sont nettement plus limitées, en accord avec les courbes d'expansion obtenues précédemment pour ces mêmes échantillons, et traduisent essentiellement l'absorption d'eau par diffusion dans les porosités du béton.

Ces résultats démontrant le lien entre courbes de suivi gravimétrique et l'expansion des éprouvettes sont en accord avec la littérature. En effet, le développement des pathologies de gonflement engendre une dégradation du béton et donc sa fissuration. Ce réseau de fissures crée des volumes supplémentaires de porosité accessible à l'eau, dont le remplissage par la solution alcaline est à l'origine de la prise de masse observée [148] [108].

La Figure III-10 illustre l'aspect de surface des éprouvettes ZA après vieillissement dans la solution alcaline à 60 °C et à 20 °C, et confirme justement le développement de réseaux de fissures résultant des pathologies de gonflement. Pour les éprouvettes vieilles à 60 °C, l'image a été prise 300 jours après le début du suivi gravimétrique, ce qui correspond approximativement à la fin de la période d'accélération de l'expansion (cf. Figure III-7). Le zoom de la Figure III-10-a montre que les fissures sont alors déjà colmatées avec les produits de gonflement.

En revanche pour les éprouvettes vieilles à 20 °C, l'image est prise à 500 jours après le début du suivi de masse, alors que l'on se trouve toujours dans la phase d'accélération rapide de l'expansion ; dans ce cas, les fissures en surface ne sont pas encore colmatées avec les produits de gonflement (zoom de la Figure III-10-b)

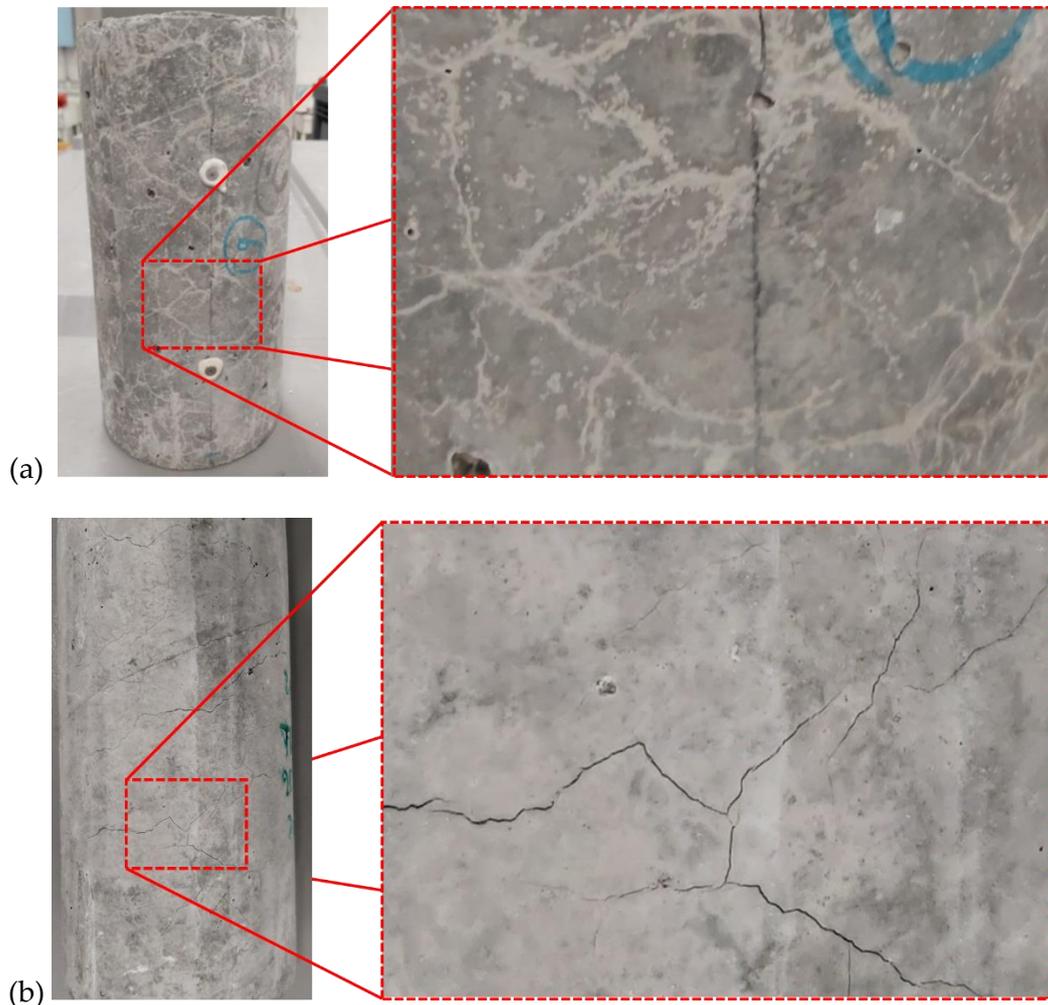


Figure III-10 : Réseau de fissures à la surface d'une éprouvette ZA soumise à un vieillissement en solution alcaline à (a) 60 °C, 300 jours après le début du suivi des expansions et à (b) 20 °C après 500 jours de suivi des expansions.

De manière générale, les cinétiques de prise de masse et d'expansion dépendent aussi de la nature de la pathologie et des produits de réaction formés :

- La RAG, qui conduit à la formation d'un gel de gonflement, nécessite la présence d'alcalins pour se développer, et son occurrence est donc très probable dans la solution de vieillissement alcaline utilisée dans cette étude ;
- La RSI pourrait également contribuer à la prise de masse observée pour le béton ZA, à travers la formation différée d'ettringite. Cette réaction nécessite un apport d'eau externe [149], qui peut être fourni par la solution de vieillissement dans le cas présent.

Il est donc proposé dans le paragraphe suivant, de réaliser des analyses complémentaires par microscopie électronique à balayage couplée à l'analyse élémentaire EDX (MEB-EDX), afin d'identifier plus précisément les produits de gonflement formés au sein du béton ZA. Une discussion, basée à la fois sur nos résultats expérimentaux et sur des travaux de la littérature,

est ensuite initiée pour tenter d'expliquer les comportements observés dans les différents milieux de vieillissement.

III.3.1.2. Etude des pathologies du béton ZA

a. Analyses MEB-EDX des éprouvettes immergées en solution alcaline

La Microscopie Electronique à Balayage (MEB) est une technique performante pour déterminer la pathologie à l'origine des phénomènes macroscopiques observés (expansions, prise de masse et fissurations). Des examens ont ainsi été effectués sur des éprouvettes ZA ayant été soumises à un vieillissement en solution alcaline à 60 °C pendant une durée d'un an (la Figure III-7 montre que le béton ZA présente alors un niveau d'expansion élevé de l'ordre de 0,25 %).

Les observations ont été réalisées en mode électrons rétrodiffusés sur des échantillons préalablement polis et métallisés (Cf. protocole au paragraphe II.5.4), et des analyses complémentaires par sonde EDX ont permis de déterminer la composition élémentaire locale en certains points remarquables des échantillons.

La Figure III-11 montre des exemples de micrographies et de spectres EDX obtenus, et permet de dégager les résultats suivants :

- Les observations mettent en évidence la présence éparse d'un gel d'alcali-réaction qui s'est formé principalement dans la porosité des granulats réactifs (Figure III-11-a). Cette présence est confirmée par le spectre EDX qui fait apparaître des pics des éléments suivants : oxygène, potassium, silice et calcium. Toutefois, il ressort que la réaction alcali-granulats demeure encore très peu développée à ce stade ;
- Les images MEB et les spectres élémentaires associés révèlent surtout la présence d'ettringite qui comble toute la porosité du béton et vient également se loger au niveau de l'interface pâte/granulats (Figure III-11-b).

Ces analyses démontrent donc que les deux pathologies envisagées, à savoir la RAG et la RSI, coexistent dans le béton ZA vieilli en solution alcaline, mais également que la RSI semble prédominante. L'ettringite remplit en effet une majeure partie de la porosité existante et se forme également au niveau de l'interface pâte/granulats en générant des pressions internes importantes. Ce résultat explique les tendances observées sur les courbes d'expansion (Cf. Figure III-7), avec des niveaux d'expansions importants après un an d'immersion et la présence d'un réseau de fissure très développé à la surface des cylindres de béton.

IL aurait été intéressant de pouvoir réaliser les mêmes analyses sur les bétons ZA vieillis dans les autres conditions de vieillissement, et même sur les béton AA vieillis, mais malheureusement cela n'a pas été possible en raison des contraintes fortes sur l'utilisation du MEB.

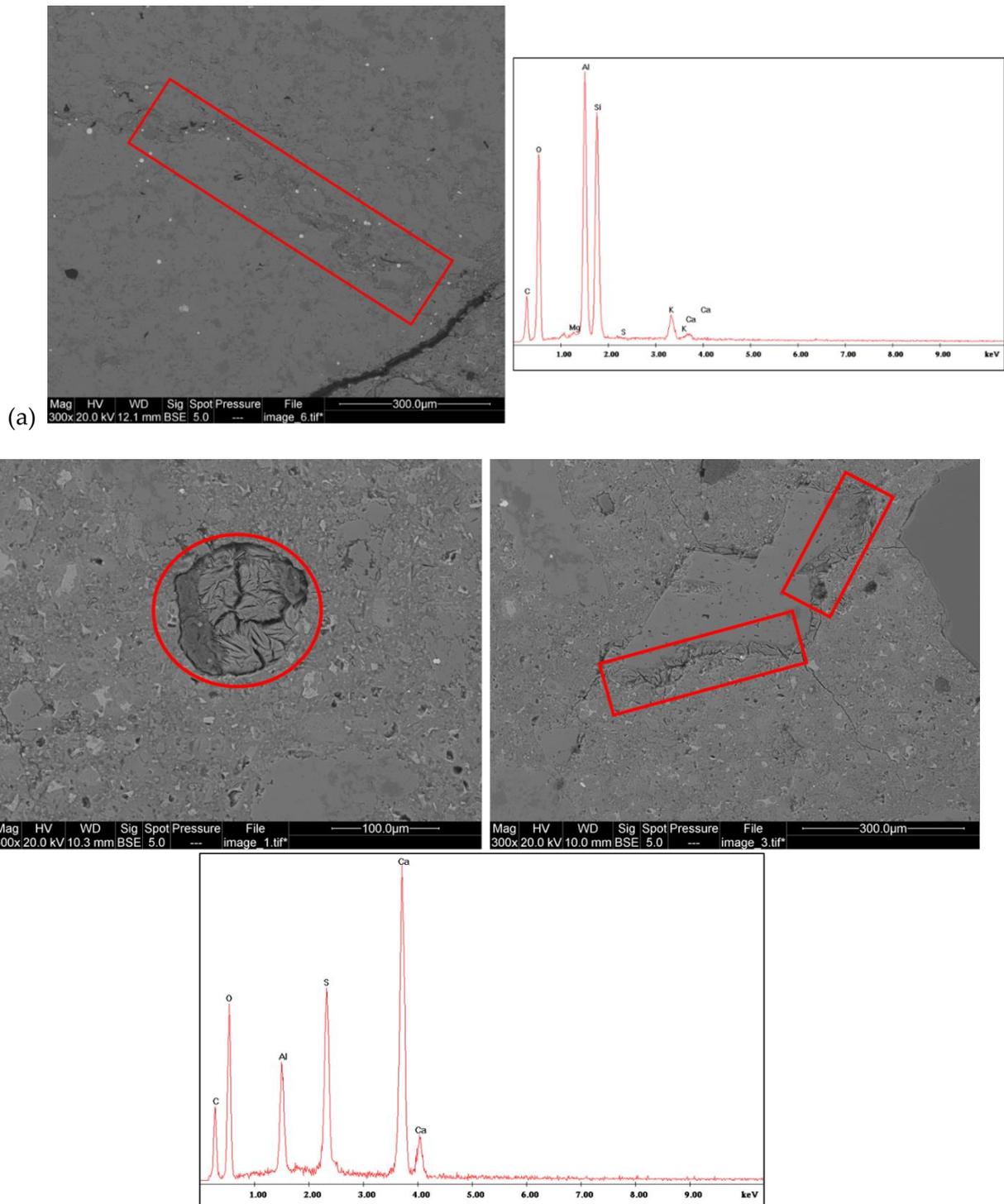


Figure III-11 : (a) Analyses MEB-EDX du béton ZA après 1 an de vieillissement en solution alcaline à 60 °C : (a) mise en évidence du gel formé par la RAG, et (b) mise en évidence de l'ettringite formée par la RSI.

b. Discussion sur le développement des pathologies dans les différents milieux de vieillissement

Comme évoqué dans l'étude bibliographique, outre le traitement thermique appliqué au jeune âge sur le béton, d'autres paramètres affectent la stabilité de l'ettringite et favorisent ou non sa formation tardive. La présence d'alcalins et la conservation dans un environnement humide peuvent ainsi jouer un rôle important sur la cinétique des expansions et sur l'ordre de grandeur de l'expansion finale.

Concernant les alcalins, il est nécessaire de distinguer les effets à court terme et à long terme :

- A court terme, les alcalins présents dans le ciment ou ajoutés dans l'eau de gâchage, ont un effet sur la stabilité de l'ettringite similaire à celui de la température [150]. Une concentration élevée en alcalins, couplée à une température d'hydratation élevée, favorise l'absorption des sulfates dans les C-S-H. De ce fait, l'ettringite ne peut pas se former en raison d'un déficit en sulfate [151] ;
- Après le durcissement du béton, les conditions de conservation peuvent favoriser la formation tardive de l'ettringite. La diminution des alcalins est un facteur principal conduisant à une libération des sulfates absorbés par les C-S-H au jeune âge. Ces derniers peuvent alors réagir avec les aluminates pour former l'ettringite tardive [151]. Cette précipitation tardive d'ettringite est à l'origine des gonflements et de la fissuration de la pâte de ciment [141].

La diminution de la concentration des alcalins à long terme peut être liée à leur réaction avec les phases siliceuses des granulats, conduisant à la formation d'un gel de gonflement. La RAG consomme alors les alcalins présents dans la solution interstitielle et favorise alors la désorption des sulfates qui vont former tardivement de l'ettringite. Cette chaîne de causalité peut expliquer la coexistence des deux pathologies RAG et RSI dans les bétons atteints par des pathologies de gonflement.

Le milieu dans lequel sont conservées les éprouvettes peut également contribuer à faire diminuer la concentration en alcalins dans la solution interstitielle du béton :

- Une conservation dans l'eau engendre un gradient de pH entre la solution interstitielle basique du béton et le milieu de conservation neutre, favorisant alors la migration des alcalins hors du béton [151] [152]. Cette lixiviation des alcalins produit alors les mêmes effets sur la stabilité de l'ettringite que leur consommation lors du développement de la RAG. Elle libère les sulfates et déstabilise l'équilibre existant entre les alcalins et les ions calcium [120]. La disponibilité de ces sulfates et l'augmentation de la concentration des ions calcium dans la solution interstitielle favorise alors la formation de l'ettringite. De manière générale, le transport des ions impliqués dans les réactions de RAG et RSI ne peut se faire qu'en situation d'immersion dans l'eau ou à des valeurs d'HR supérieures à 90 % environ [108] [153]. Un dépassement tardif de ce seuil peut toujours déclencher les pathologies de gonflement ;
- Dans le cas d'une conservation en solution alcaline, comme celle utilisée dans la présente étude, il faut également prendre en compte l'effet des alcalins présents dans la solution sur le développement des pathologies de RAG et RSI, sur l'accélération ou le ralentissement des réactions après la phase de latence, et sur le niveau d'expansion final. Dans cette configuration, il n'existe pas de gradient de concentration générant la migration des alcalins vers l'extérieur des éprouvettes. La désorption des sulfates et l'augmentation de la concentration des ions calcium peuvent alors être retardées, et la formation de l'ettringite tardive reste donc limitée. Leklou *et al.* [154] ont d'ailleurs montré que l'immersion de bétons atteints de RSI dans des solutions de $NaOH$ permet de ralentir le développement de la pathologie. Famy *et al.* [155] ont également rapporté que la conservation du béton en solution alcaline affecte la cinétique de la RSI, en limitant la formation d'ettringite sans nécessairement l'arrêter complètement.

Dans le cadre de cette étude, nous rappelons que le traitement thermique des éprouvettes ZA a été réalisé dans une piscine d'eau en suivant un profil de température identique à celui appliqué sur le bloc ZA de l'IRSN. Directement après ce traitement, les cylindres ont été conservés dans l'eau à température ambiante jusqu'au démarrage des vieillissements, tandis que les prismes étaient conservés pour quelques semaines à l'extérieur, le temps de finaliser le collage des câbles à FO en surface avant de les mettre dans l'eau jusqu'au démarrage des vieillissements.

Les éléments de bibliographie qui précèdent, ainsi que les résultats des suivis d'expansion et des analyses MEB-EDX, permettent alors d'ébaucher des scénarios sur les mécanismes de développement des pathologies du béton ZA dans les différentes conditions de vieillissement de l'étude :

- On peut ainsi supposer que la période de conservation dans l'eau des cylindres ZA a entraîné la migration d'une partie des alcalins du béton vers l'extérieur, puis une libération des sulfates déjà piégés durant le traitement thermique formant ainsi de l'ettringite. Par la suite, l'immersion en solution alcaline a initié la RAG et ralenti le développement de la RSI sans pour autant la stopper complètement. Les cylindres ZA immergés en solution alcaline ont donc été sujets à un couplage RAG/RSI, comme en témoignent le suivi dimensionnel et les analyses MEB-EDX ;
- Concernant les prismes ZA conservés en enceinte climatique, le taux d'humidité relative maximal atteint pendant le cycle gel/dégel (de l'ordre de 70 %) est bien inférieur au seuil permettant le déclenchement des pathologies rapporté dans la littérature. De même, pour les éprouvettes (prismes et cylindres) stockées sur le site de vieillissement naturel, le taux d'hygrométrie peut dépasser ponctuellement le seuil de déclenchement des pathologies au cours de l'année. Toutefois, la durée pendant laquelle ces seuils sont atteints semble insuffisante pour générer une quantité de produits de gonflements entraînant des dégradations à l'échelle macroscopique. Pour ces deux types de vieillissement, le protocole expérimental peut donc expliquer l'absence de gonflement observée sur les relevés d'expansion ;
- Il est en revanche plus difficile d'interpréter les résultats d'expansion obtenus pour les prismes ZA soumis aux cycles d'immersion/séchage. Selon les données de la littérature, ces cycles devraient favoriser la lixiviation des alcalins et conduire au déclenchement plus ou moins rapide de la RSI. L'absence de gonflement observée pour ces prismes pourrait alors résulter d'une lixiviation des réactifs (sulfates, aluminates et calcium) lors du traitement thermique effectué en piscine sur une durée de plusieurs jours, empêchant ensuite le déclenchement ultérieur des pathologies. En toute logique, cette hypothèse aurait également dû être vérifiée pour les cylindres ZA qui ont subi le même traitement thermique, et qui n'auraient donc pas dû développer de pathologies lors de leur immersion ultérieure en solution alcaline, ce qui n'a pas été le cas. Une explication pourrait provenir du faible volume des prismes, comparé à celui des cylindres, qui aurait favorisé une lixiviation quasi-totale des réactifs lors du traitement en piscine, alors que cette lixiviation n'aurait été que partielle pour les cylindres plus massifs. Ces derniers auraient donc pu développer des pathologies par la suite à partir des réactifs résiduels.

La discussion précédente a donc permis d'ébaucher des hypothèses permettant d'expliquer les comportements observés expérimentalement (cinétique d'expansion, présence ou non de produits de gonflement associés à la RAG ou à la RSI). Ces hypothèses restent forcément incomplètes, et un diagnostic plus précis des pathologies nécessiterait la réalisation d'une étude spécifique s'appuyant sur des analyses physico-chimiques poussées et systématiques pour l'ensemble des échantillons vieillis. Toutefois, cela sort du cadre de la thèse dont l'objectif principal est d'étudier la durabilité de l'instrumentation par câbles à FO appliquée au monitoring de structures en béton, ces dernières pouvant être sujettes à des pathologies de gonflement ou non. Dans ce cadre, la pathologie de gonflement du béton est surtout considérée comme un facteur pouvant contribuer à dégrader les caractéristiques de l'interface béton/câble à FO, et donc susceptible d'altérer la fonctionnalité métrologique du capteur.

On notera également que les conditions de préparation des échantillons et les conditions de vieillissement ont été optimisées pour l'étude de la durabilité des capteurs à FO, et ne correspondent pas aux protocoles généralement retenus pour étudier les pathologies du béton. Ainsi, nous n'avons pas ajouté d'alcalins dans l'eau de gâchage du béton, car ils pourraient induire une éventuelle dégradation des câbles à FO noyés dans les cylindres avant le lancement des vieillissements accélérés. Nous n'avons pas non plus appliqué le traitement thermique classique de 3 jours pour initier la RSI, car l'objectif était plutôt de reproduire le traitement réellement appliqué sur les blocs RSI ODOBA (le bloc ZA en particulier).

III.3.1.3. Caractérisation mécanique des cylindres de béton aux différentes échéances des vieillissements

Maintenant que nous avons une idée plus précise des évolutions dimensionnelles et des mécanismes pathologiques des bétons induits par les différents types de vieillissements, nous pouvons présenter les résultats relatifs au suivi des propriétés mécaniques des bétons vieillis.

Des essais de compression ont été réalisés sur des cylindres \varnothing 11 - 22 cm des deux formulations AA et ZA à différentes échéances de vieillissement accéléré en solution alcaline à 20 °C, 40 °C et 60 °C, et de vieillissement naturel (Cf. matrices d'essais synthétisées dans le Tableau II-6 et le Tableau II-9). Les essais ont été effectués selon le protocole décrit au paragraphe II.4.1.1, et ont permis de suivre les évolutions de la résistance à la compression, du module d'Young et du coefficient de Poisson des bétons aux cours des vieillissements. Les courbes correspondantes sont présentées sur la Figure III-12 (l'ensemble des résultats sont répertoriés dans les tableaux présentés dans l'Annexe C-VI.3). Les valeurs des propriétés mécaniques avant vieillissement (T0) présentées sur la Figure III-12 correspondent aux résultats obtenus lors des essais à 28 jours et n'incluent pas les évolutions de ces paramètres entre la période des essais à 28 jours (septembre 2018) et le lancement des vieillissement (décembre 2018).

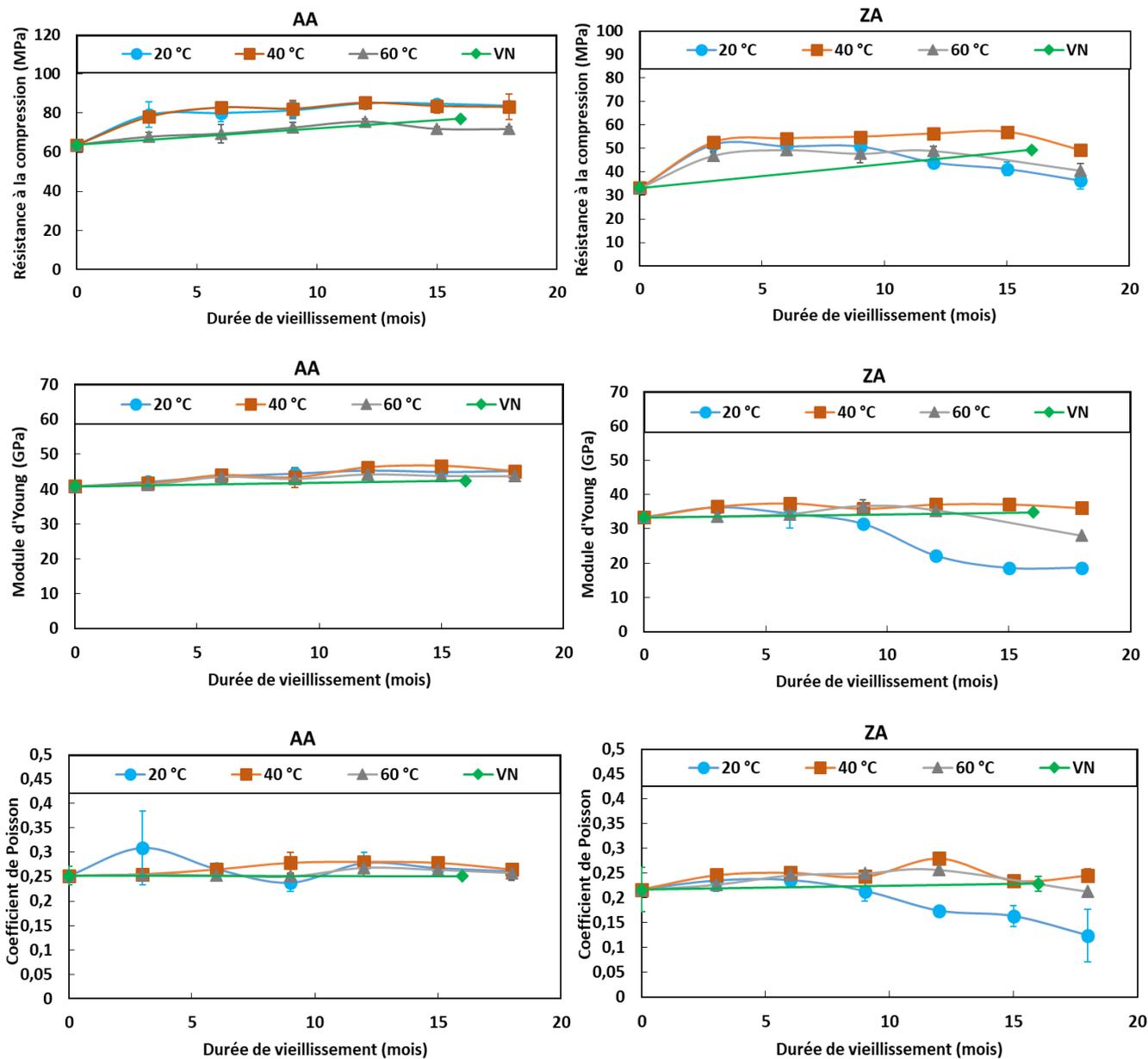


Figure III-12 : Evolutions de la résistance à la compression, du module d'Young et du coefficient de Poisson des cylindres de béton AA et ZA en fonction du temps de vieillissement en solution alcaline à 20 °C, à 40 °C et à 60 °C et sur site extérieur (VN).

Afin de mieux analyser les évolutions de propriétés du béton ZA, intéressons-nous d'abord aux évolutions obtenues pour le béton AA ne développant pas de pathologies. Les courbes d'évolutions montrent que :

- Les solutions alcalines à 20 °C et à 40 °C sont des milieux favorisant l'hydratation de la matrice cimentaire et permettent d'atteindre les valeurs de résistance les plus élevées [156]. Dans la solution à 60 °C et lors du vieillissement naturel dans des conditions climatiques n'assurant pas toujours un degré d'humidité suffisant, les valeurs de la résistance à la compression augmentent aussi progressivement, mais sans atteindre les niveaux de résistance VN obtenus à 20 °C et à 40 °C.
- En ce qui concerne le module d'Young et le coefficient de Poisson, les évolutions sont presque identiques pour tous les vieillissements considérés. On note ainsi une légère augmentation du module d'Young dans le temps, tandis que le coefficient de Poisson ne varie pas de manière significative.

Concernant les cylindres ZA, malgré le fait que les propriétés mécaniques soient globalement inférieures à celles des cylindres AA, leurs évolutions pendant les premiers mois de vieillissements suivent des tendances similaires à celles du béton AA (augmentation de propriétés liées à la maturation du béton). En revanche, à partir du 9^{ème} mois de vieillissement, on note une chute importante de la résistance à la compression et du module d'Young pour les bétons ZA immergés en solution alcaline à 20 °C et à 60 °C, les pertes de propriétés étant plus marquées à 20 °C. Ces pertes de propriétés peuvent être corrélées au suivi dimensionnel des éprouvettes, qui montre une nette accélération de la cinétique d'expansion vers le 9^{ème} mois de vieillissement, en particulier dans la solution alcaline à 20 °C. Elles sont surtout la conséquence du développement de la fissuration, induit par les pathologies de gonflement mise en évidence précédemment pour ces conditions de vieillissement (couplage RAG/RSI).

III.3.2. Caractérisation des câbles à FO vieillis

Dans cette partie, nous présenterons les résultats des différentes caractérisations réalisées sur des échantillons des deux câbles à FO à différentes échéances de vieillissement (T1 à T6), sur une durée totale de 18 mois. Les caractérisations mécaniques des matériaux constituant les deux câbles (gaine externe et élément de renforcement) et des interfaces internes (gaine/FO et gaine/renforcement) sont d'abord rapportées. Une étude microstructurale des revêtements externes des câbles à FO vieillis est ensuite proposée en vue d'identifier les mécanismes de dégradation responsables des changements de propriétés (dimensionnelles et mécaniques) observés au cours des vieillissements accélérés et naturel.

III.3.2.1. Caractérisation mécanique des câbles à FO

Des essais de traction ont été réalisés sur les gaines externes et les éléments de renforcement, et des essais d'arrachement ont été effectués sur les interfaces internes des deux câbles vieillis dans les différents milieux et aux différentes échéances de temps. Les évolutions des modules d'Young des constituants, et celles des rigidités tangentielles des interfaces sont illustrées sur la Figure III-13.

Il est important de rappeler que ces résultats expérimentaux doivent être analysés avec précaution, car plusieurs phénomènes indésirables peuvent induire des biais sur les valeurs obtenues, en amplifiant notamment le niveau de dispersion. En effet, des agents agressif (alcalins, humidité) peuvent éventuellement pénétrer au niveau des extrémités de câbles exposées et s'infiltrer par capillarité le long des interfaces, contribuant ainsi aux dégradations observées. Par ailleurs, lors de la préparation des échantillons, l'opération de dénudage visant à séparer les couches internes des câbles peut éventuellement affecter l'intégrité des couches ou de certaines interfaces, affectant ainsi les résultats des tests mécaniques.

Pour une meilleure clarté des résultats, nous avons présenté les évolutions majeures des propriétés mécaniques en trait continu, et gardé le reste des courbes en trait pointillé. Les tendances suivantes peuvent être mentionnées :

- Concernant le module d'Young des gaines externes : pour le câble Neubrex, ce module semble augmenter au cours des vieillissements en solution alcaline à 60 °C, sous fluage (FL), en cycle d'immersion séchage (I/S) et en cycle thermique de gel/dégel (G/D), avec

une tendance plus marquée après 8-10 mois d'exposition. En revanche, dans le cas du câble AFL, cette grandeur évolue peu au cours des vieillissements, sauf en condition d'immersion à 60 °C dans la solution alcaline où une chute drastique est observée après 3 mois d'exposition. Cette chute s'accompagne d'ailleurs d'une diminution du diamètre externe de la gaine, visible à l'œil nu ;

- Concernant le module d'Young de l'élément de renforcement mécanique des deux câbles, on ne note pas d'évolution significative au cours des différents vieillissements, compte tenu de la dispersion des résultats ;
- En ce qui concerne la rigidité tangentielle de l'interface gaine/renforcement mécanique : une diminution importante est observée dans le cas du câble Neubrex immergé en solution alcaline, cette évolution étant d'autant plus rapide que la température du milieu est élevée (la température constitue donc un facteur d'accélération). On peut penser que cette dégradation fait suite à la pénétration de la solution alcaline au niveau des extrémités du câble, puis à sa diffusion le long de l'interface gaine/renforcement. Dans les autres conditions de vieillissement du câble Neubrex, on note une légère diminution de la rigidité tangentielle, qui pourrait résulter de la diffusion d'humidité ou de dilatations différentielles au niveau de l'interface gaine/fil métallique selon l'environnement considéré, ou encore du couplage de ces facteurs thermo-hydriques lors du vieillissement naturel. Concernant l'interface câble AFL/jonc central, le niveau de rigidité reste globalement stable au cours des vieillissements, et l'effet délétère de la solution alcaline n'apparaît qu'à la température de 60 °C et à la dernière échéance du vieillissement, c'est-à-dire quand le revêtement externe du câble devient très dégradé et laisse pénétrer la solution. Cette stabilité traduit la bonne cohésion de l'interface jonc central/câble AFL qui prévient l'infiltration de la solution par capillarité ;
- Concernant la rigidité de l'interface gaine/FO : dans le cas du câble Neubrex immergé en solution alcaline, on observe une diminution de cette propriété au cours du vieillissement, qui apparaît avant celle constatée à l'interface gaine/fil métallique. Ce phénomène peut également être attribué à l'infiltration de la solution dans le câble à partir des extrémités, et dont la cinétique de diffusion augmente avec la température. Dans les autres conditions de vieillissement, la rigidité de l'interface gaine/FO du câble Neubrex semble augmenter au cours du temps, mais cette tendance reste difficile à démontrer en raison de la forte dispersion des résultats. Pour le câble AFL, les propriétés de l'interface gaine/FO restent assez stables au cours du temps (comme celle de l'interface gaine/jonc central), et une dégradation n'est observée qu'à la dernière échéance d'essai sur l'échantillon vieilli en milieu alcalin à 60 °C.

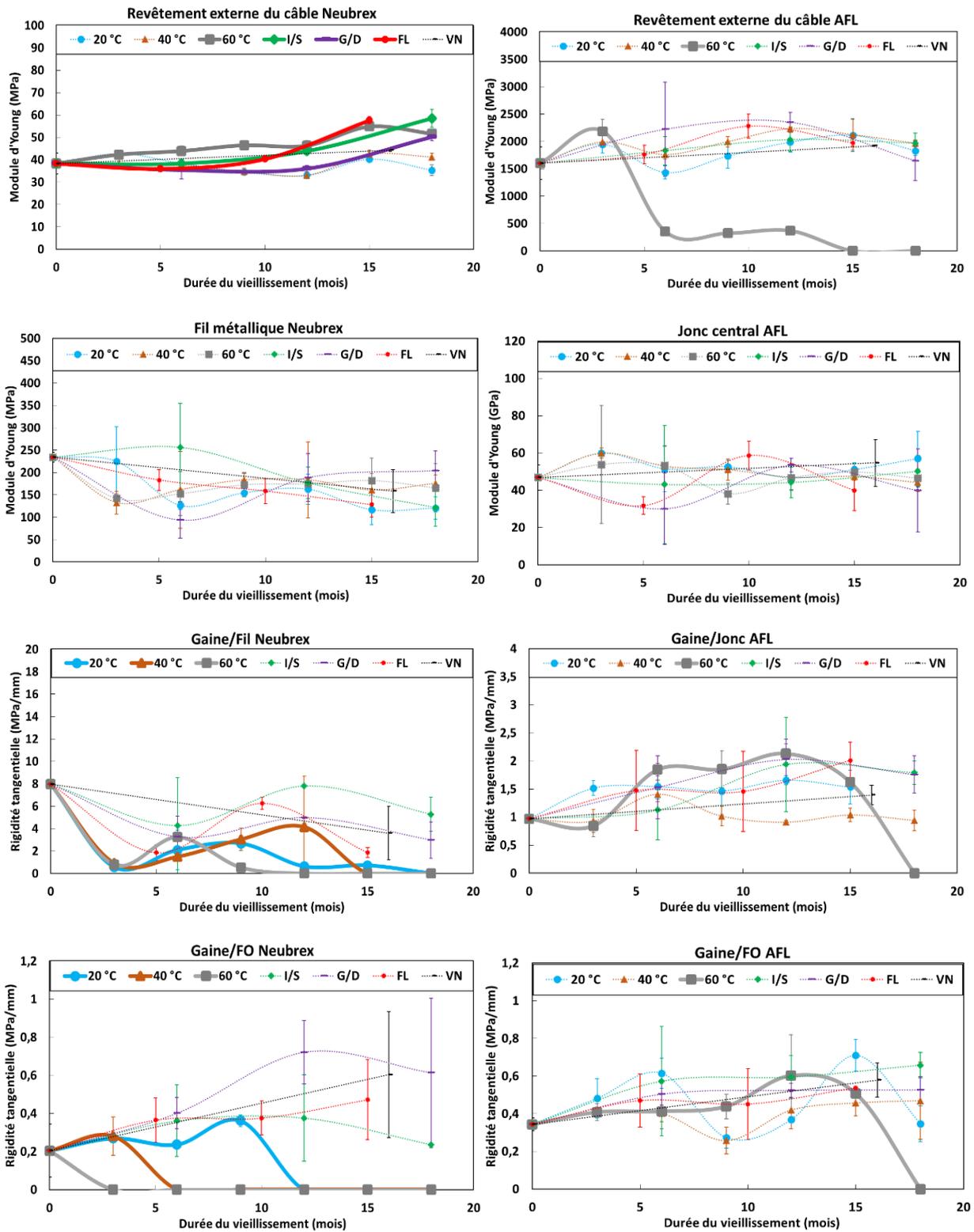


Figure III-13 : Evolutions des propriétés mécaniques des matériaux constitutifs et des interfaces internes, pour les deux câbles à FO exposés aux différentes conditions de vieillissements accélérés et naturel sur une durée totale de 18 mois.

III.3.2.2. Suivi dimensionnel et observations en microscopie optique

La Figure III-14 présente les courbes de suivi dimensionnel des deux câbles à FO soumis aux différentes conditions de vieillissement sur une période totale de 18 mois. Nous rappelons qu'à

l'aide d'un pied à coulisse, nous mesurons à chaque échéance la petite et la grande longueur de la section rectangulaire du câble Neubrex, ainsi que le diamètre du câble AFL.

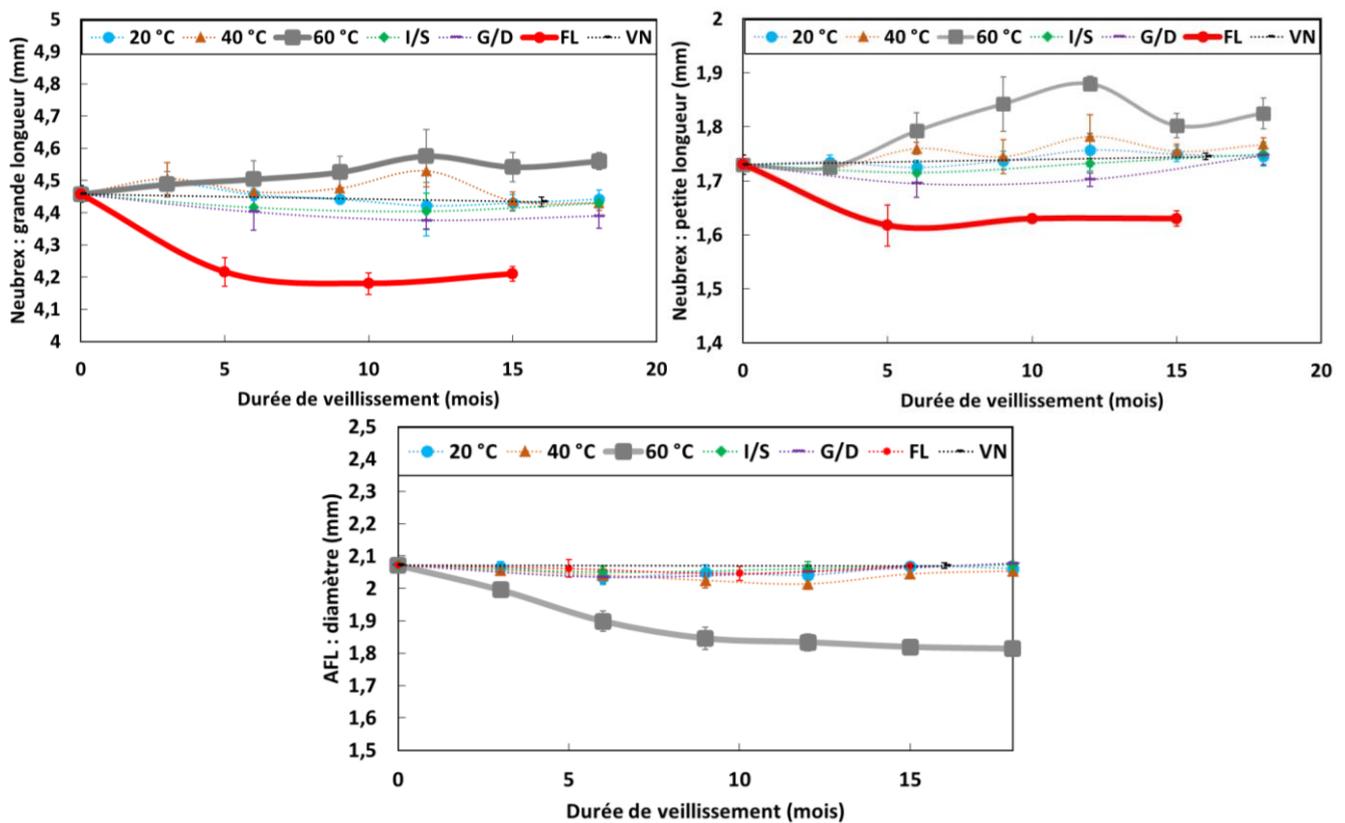


Figure III-14 : Suivi dimensionnel des deux câbles à FO soumis aux différents vieillissements.

Pour le câble Neubrex, on observe une relative stabilité dimensionnelle dans la plupart des environnements, à l'exception des conditions d'immersion en solution alcaline à 60 °C et de fluage (FL). En effet, un gonflement progressif du câble est constaté au cours du vieillissement dans la solution à 60 °C, dont l'origine sera recherchée par la suite au moyen d'essais physico-chimiques complémentaires. A contrario, pour les échantillons soumis au fluage, la section du câble diminue de manière importante pendant les 5 premiers mois de fluage pour se stabiliser ensuite ; ce phénomène peut être attribué à un étirement plastique du revêtement souple du câble par effet Poisson, sous l'effet de la charge permanente de traction.

Concernant le câble AFL, le suivi indique également une bonne stabilité dimensionnelle au cours des différents vieillissements, à l'exception de la condition d'immersion en solution alcaline à 60 °C (courbe en trait continu sur le graphe correspondant). Pour ce type de vieillissement, nous remarquons une diminution très importante du diamètre du câble, dont l'origine devra également être étudiée au moyen d'essais physico-chimiques complémentaires.

Les observations au microscope optique des revêtements des deux câbles à FO n'ont pas relevé d'évolution notable de l'aspect de surface des échantillons vieillis, hormis pour les échantillons conservés en solution alcaline à 60 °C. La Figure III-15 présente l'état de la surface externe des câbles Neubrex et AFL à plusieurs échéances de vieillissement dans cette condition particulière.

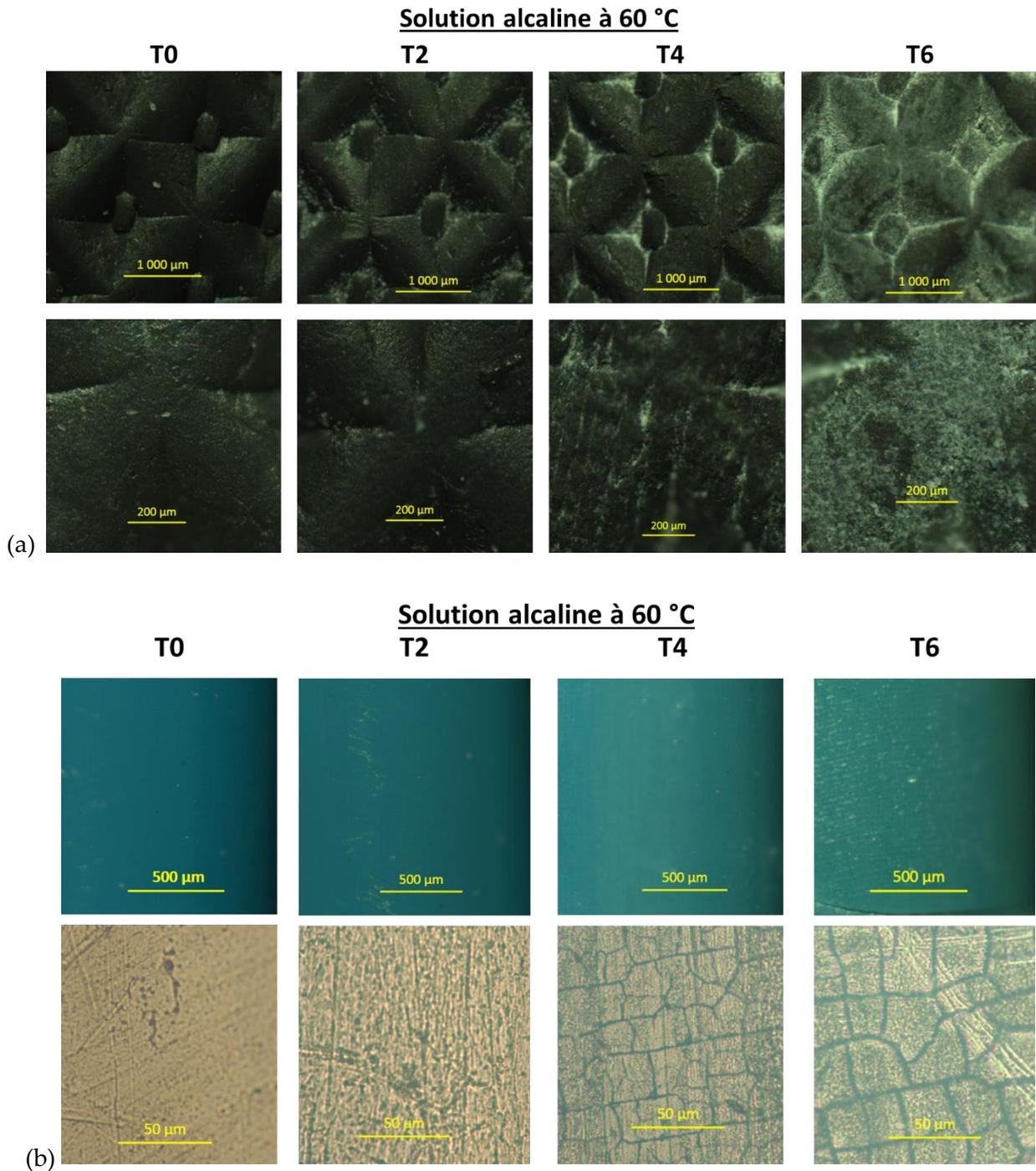


Figure III-15 : Micrographies optiques de la surface des deux câbles à FO « (a) Neubrex ; (b) AFL » à l'état initial (T0), et après 6 mois (T2), 12 mois (T4) et 18 mois (T6) de vieillissement en solution alcaline à 60 °C.

La surface du câble Neubrex à l'état initial est relativement lisse et brillante, et laisse principalement entrevoir le relief macroscopique destiné à assurer l'adhérence avec le béton. Sur les échantillons vieillis en solutions alcaline à 60 °C, on note l'apparition de micro-griffures après 6 mois d'exposition, qui se multiplient aux échéances suivantes et confèrent à la surface un aspect granuleux et mat. En outre, ces micro-griffures se remplissent avec des grains de sels de la solution alcaline qui adhèrent fortement à la surface du câble.

Concernant le câble AFL à l'état initial, la surface externe présente un aspect lisse et comporte quelques défauts de petite taille (bulles, microcavités, griffures). L'immersion en solution

alcaline à 60 °C conduit à l'apparition d'une piqûration de surface et à un ternissement de la couleur bleue du polymère dès 3 mois d'exposition, ce phénomène s'accroît ensuite au cours du temps. A fort grossissement, on observe le développement progressif d'un réseau de microfissures réparties sur toute la surface, qui donne un aspect de faïençage. Ces éléments démontrent clairement l'existence d'un mécanisme de dégradation du polymère en milieu alcalin à 60 °C, et sont cohérents avec la diminution de diamètre et les pertes de propriétés mécaniques de la gaine décrites précédemment dans les mêmes conditions de vieillissement.

Les essais complémentaires présentés dans les paragraphes suivants viendront expliquer d'avantage ces évolutions constatées sur les revêtements des deux câbles soumis aux différents vieillissements (l'immersion en solution alcaline à 60 °C en particulier).

III.3.2.3. Etude des modifications de structure chimique par analyses IRTF

Des analyses par IRTF ont été réalisées sur des échantillons des deux câbles à FO, à l'état initial et après 1 an d'exposition aux différentes conditions de vieillissements accélérés et naturel. Ces essais ont été réalisés en mode ATR selon le protocole décrit au paragraphe II.5.5. L'objectif était d'identifier la nature des matériaux constituant la gaine externe des deux câbles, puis de mettre en évidence l'influence éventuelle des différents vieillissements sur la structure chimique de ces matériaux.

a. Analyses sur la gaine externe du câble Neubrex

La Figure III-16 illustre un spectre IRTF-ATR typique obtenu en surface du câble Neubrex à l'état initial avant vieillissement, ainsi que le spectre issu des bases de données Thermo-Scientific disponibles à l'UGE qui se rapproche le plus du spectre de l'échantillon.

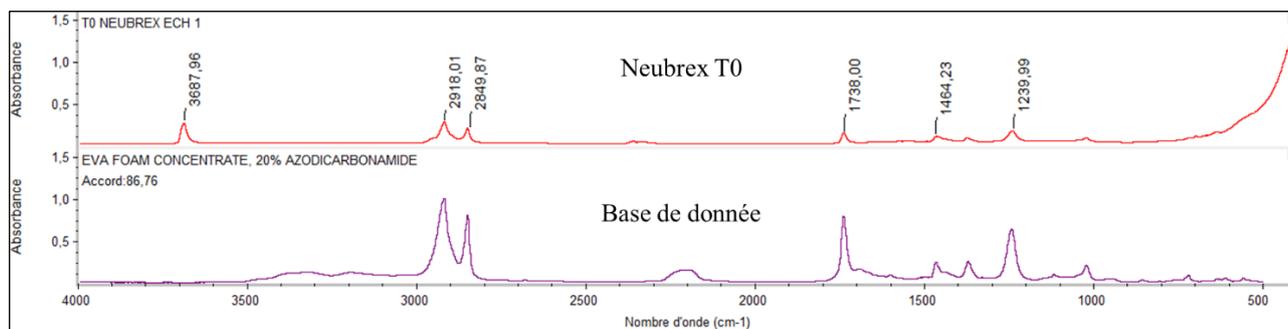


Figure III-16 : Spectre IRTF-ATR de la gaine du câble Neubrex à l'état initial non vieilli (échéance T0) et spectre de la base de donnée ayant la meilleure correspondance.

Le spectre du câble Neubrex fait apparaître des bandes caractéristiques d'espèces chimiques présentes dans les copolymères d'éthylène vinyle acétate (EVA). On trouve ainsi des pics vers 2850 cm^{-1} et 2920 cm^{-1} correspondant à des mouvements d'élongation des groupes méthylènes $-\text{CH}_2-$, une bande à 1738 cm^{-1} correspondant à l'élongation des carbonyles $\text{C}=\text{O}$ présents sur les groupes acétates, et une bande vers 1240 cm^{-1} relative à l'élongation des $\text{C}-\text{O}$ provenant des groupes acétates de vinyle.

Par ailleurs, on trouve une bonne corrélation (accord supérieur à 80 %) entre le spectre du câble Neubrex et plusieurs spectres provenant de copolymères de type EVA référencés sur les bases

de données. Il est donc possible d'affirmer que la gaine du câble Neubrex est un copolymère EVA.

De manière générale, les copolymères EVA contiennent entre 10 et 40 % en masse d'acétate de vinyle, le restant étant constitué de motifs éthylène. Ils présentent un caractère plus élastomère que le polyéthylène, car l'acétate de vinyle diminue la cristallinité et donc la rigidité du matériau, conférant ainsi une flexibilité accrue et une meilleure tenue aux chocs. La densité des copolymères EVA est corrélée à la teneur en VA [157].

Des analyses IRTF ont ensuite été réalisées sur le câble Neubrex après vieillissement dans les différentes conditions de vieillissement accéléré pendant une durée de 12 mois (échéance T4). De manière générale, les spectres n'ont pas mis en évidence de modification significative de la structure chimique induite par ces vieillissements, sauf pour la gaine des câbles immergés en solution alcaline à 40 °C et 60 °C. La Figure III-17 présente les spectres IRTF-ATR obtenus dans ces deux conditions particulières, ainsi que le spectre de la gaine non vieillie pour comparaison. Des zooms de ces spectres sur certains intervalles de longueurs d'onde sont également rajoutés en encarts.

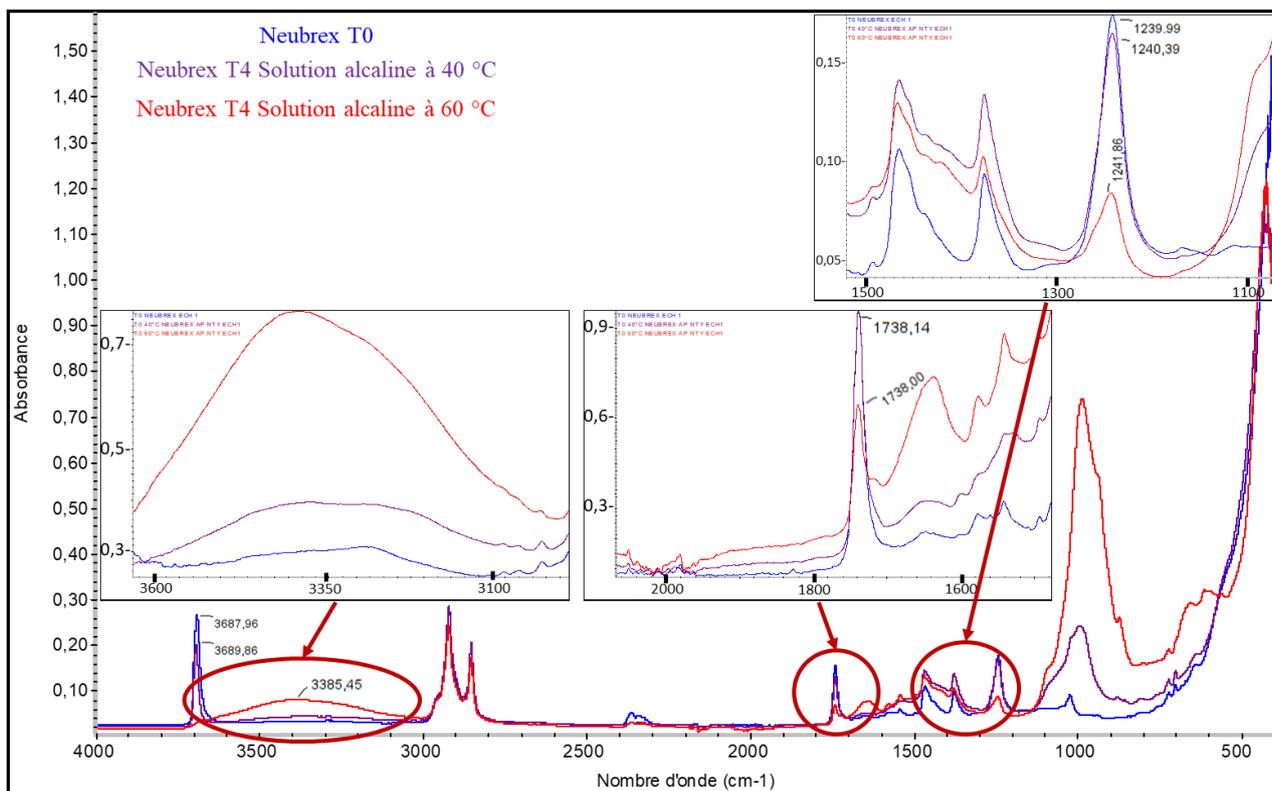


Figure III-17 : Spectres IRTF-ATR obtenus pour la gaine du câble Neubrex à l'état non vieilli (échéance T0) et après 12 mois de vieillissement (échéance T4) en solution alcaline à 40 °C et à 60 °C.

Les spectres des échantillons vieillis en solution alcaline à température élevée mettent en évidence une nette diminution des bandes à 1738 cm^{-1} et à 1250 cm^{-1} relatives aux groupes esters (acétates de vinyle), ainsi qu'une augmentation de la hauteur du pic à 1650 cm^{-1} indiquant la formation d'acides carboxyliques. Ces effets sont d'autant plus marqués que la température du milieu est élevée, indiquant que le mécanisme mis en jeu est activé par la température. Les groupes acétates de vinyle, qui sont des esters, sont connus pour être particulièrement sensibles à différents facteurs environnementaux comme la température, le rayonnement UV ou

l'oxygène. Ils peuvent facilement se décomposer pour générer des radicaux libres, qui vont ensuite pouvoir former différents acides carboxyliques [158] [159]. Les analyses IRTF confirment donc qu'une dégradation thermique de ces esters a bien eu lieu dans la solution alcaline à 40 et 60 °C.

D'autre part, les spectres IRTF des échantillons Neubrex vieillis montrent également l'apparition d'une large bande dans la région 3000-3600 cm⁻¹, dont l'amplitude augmente avec la température de la solution alcaline. Cette bande pourrait mettre en évidence l'existence d'un mécanisme de dégradation complémentaire par hydrolyse des groupes acétates, qui conduirait à la formation de groupes hydroxyyles selon le mécanisme décrit sur la Figure III-18 [160] [161]. Cette décomposition des acétates contribuerait, comme la dégradation thermique, à la diminution des pics à 1738 cm⁻¹ et à 1250 cm⁻¹. Par ailleurs, ce phénomène d'hydrolyse pourrait également être à l'origine du gonflement observé sur les câbles Neubrex vieillis en solution alcaline à température élevée (Cf. Figure III-14) [161].

On notera que ces analyses IRTF-ATR sont des analyses de l'extrême surface des gaines (profondeur de pénétration du faisceau IR dans le matériau de l'ordre du micron). Elles révèlent donc des dégradations chimiques actives au niveau de la surface de la gaine en contact avec la solution alcaline, et qui ne sont pas forcément présentes ou aussi marquées dans l'épaisseur de l'échantillon. Ceci peut expliquer que les dégradations de propriétés mécaniques sont essentiellement observées au niveau des interfaces FO/gaine ou renforcement/gaine suite aux infiltrations de solution alcaline le long de ces interfaces, et que le module d'Young de la gaine elle-même ne diminue pas (voire augmente) au cours des vieillissement (Cf. Figure III-13). Les analyses DSC permettront par la suite d'explorer les modifications de la microstructure intervenant dans toute l'épaisseur de la gaine.

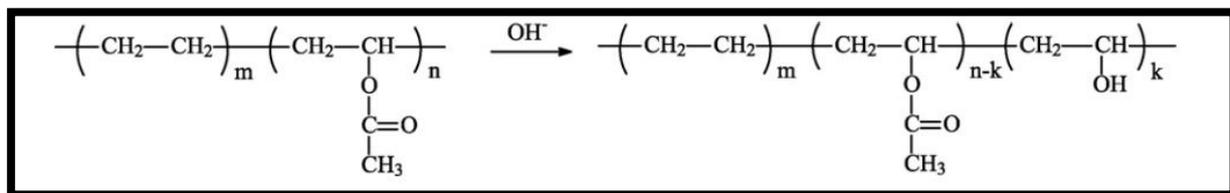


Figure III-18 : Mécanisme d'hydrolyse des EVA, selon [161].

b. Analyses sur la gaine externe du câble AFL

De la même manière, des analyses IRTF-ATR ont été réalisées à la surface du câble AFL à l'état initial non vieilli (T0) et après 12 mois d'exposition aux différentes conditions de vieillissements accélérés et naturel (T4).

La Figure III-19 montre un spectre typique du câble non vieilli, ainsi que le spectre issu des bases de données qui offre la meilleure correspondance.

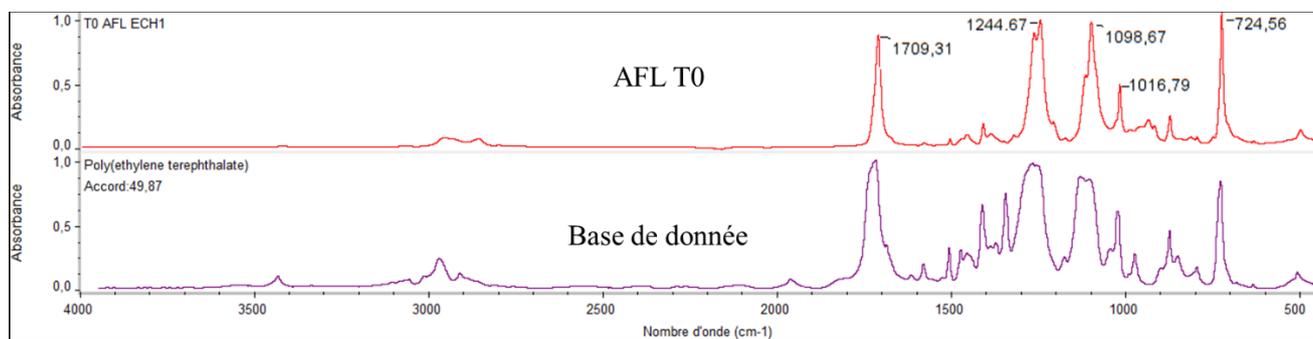


Figure III-19 : Spectre IRTF-ATR de la gaine du câble AFL à l'état initial non vieilli (échéance T0) et spectre de la base de donnée offrant la meilleure correspondance.

Le spectre initial du câble AFL fait apparaître des bandes vers 1710 cm^{-1} caractérisant les fonctions carbonyles comme les esters. La bande vers 1240 cm^{-1} correspond également à une fonction ester (vibration du segment éthylène glycol) et la bande vers 1100 cm^{-1} correspond aux groupes méthylènes. On note par ailleurs une bonne correspondance (accord voisin de 50 %) entre ce spectre et celui d'un Polyéthylène Téréphtalate (PET) référencé sur les bases de données.

Ces éléments indiquent que le revêtement externe du câble AFL contient un thermoplastique polyester de type PET. Ceci remet en question les propos du fournisseur, selon lesquels le modèle de câble AFL DNS-5553 présente une bonne résistance en milieu basique et serait adapté à un usage en milieu cimentaire (c'est d'ailleurs cet argument qui avait motivé le choix de ce câble dans cette étude). Il semble en effet que la composition du câble soit toujours comparable à celle de l'ancienne version DNS-0470 étudiée dans le cadre de la thèse de J. M. Hénault en 2012 [14], et comportant une couche externe en PET de type Hytrel. Or, il avait été montré à l'époque, que l'Hytrel se dégradait de manière très rapide dans une solution alcaline à 60 °C , et que la gaine perdait totalement son intégrité au bout de quelques mois. Il avait alors été conseillé au câblier de remplacer la couche d'Hytrel par un polyéthylène haute densité (PEHD) beaucoup plus résistant aux alcalins. Le câblier avait alors bien développé une version avec gaine PEHD (le modèle DNS-4807), mais il semble donc qu'il soit revenu en arrière pour son modèle actuel DNS-5553, tout en gardant l'argument de résistance aux alcalins qui ne semble alors plus justifié.

Rappelons que le PET est un polyester saturé à structure semi-cristalline. Lorsque ce matériau est exposé en milieu humide, il peut se dégrader principalement selon deux types de mécanismes [162] :

- Un vieillissement physique qui conduit à une modification de la structure cristalline et à une diminution globale du taux cristallinité [163] ;
- Une dégradation chimique liée à la coupure de chaîne des esters en présence d'eau (hydrolyse) dont la cinétique dépend de la température et de la présence d'alcalins. Dans un environnement basique, la réaction d'hydrolyse est catalysée par des ions OH^- . Au cours de ces réactions, les fonctions esters sont irréversiblement transformées en fonctions alcool et en ions carboxylates puis en sels d'acide carboxylique (sodium, potassium, etc...) suivant la réaction chimique illustrée sur la Figure III-20.

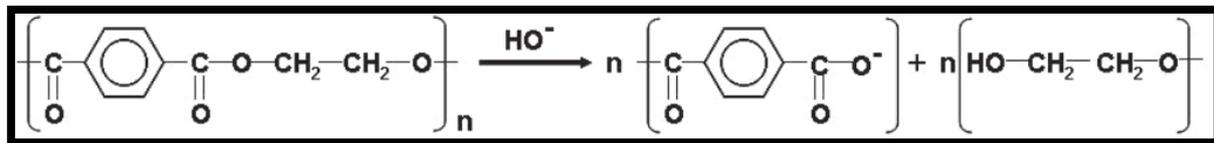


Figure III-20 : Mécanisme d'hydrolyse des PET, selon [162].

L'hydrolyse des PET en milieu basique engendre des ruptures de chaînes en cascade conduisant à la formation de molécules de faible masse moléculaire, qui peuvent ensuite être extraites et migrer vers la solution aqueuse. Le matériau se délite alors par lambeaux successifs, et se dissout progressivement dans le milieu environnant. Cette dégradation conduit à des pertes de matière, de masse, et de propriétés mécaniques [163] [164]. Des évolutions similaires ont justement été observées pour la gaine du câble AFL immergée en solution alcaline à 60 °C, ce qui est cohérent avec la nature du matériau (PET) identifiée par IRTF.

Les spectres des gaines AFL vieilles 12 mois dans les différentes conditions n'ont pas mis en évidence de modification significative de la structure chimique du matériau, y compris pour les échantillons exposés dans la solution alcaline à 60 °C. Ces spectres ne sont donc pas présentés ici. Il faut souligner que l'hydrolyse du PET est difficilement détectable par analyse IRTF de surface, car les produits de dégradation sont rapidement dissouts dans le milieu aqueux, et la composition chimique de la couche de matériau résiduelle reste globalement inchangée.

III.3.2.4. Etude des modifications microstructurales par DSC

En complément des analyses IRTF destinées à identifier les dégradations chimiques, des caractérisations par DSC ont également été réalisées pour évaluer l'impact des différents vieillissements accélérés et naturel sur la microstructure des matériaux, et en particulier sur les caractéristiques des phases amorphes et semi cristallines. Contrairement à l'IRTF-ATR qui est une technique d'analyse de surface, la DSC fournit des informations moyennes sur l'ensemble de l'échantillon, et permet donc de révéler des mécanismes intervenant dans l'épaisseur du matériau.

a. Analyses sur la gaine externe du câble Neubrex

Des analyses DSC ont été réalisées selon le protocole décrit au paragraphe II.5.6, sur des échantillons de gaine Neubrex à l'état initial (échéance T0) et après vieillissement dans les différentes conditions de l'étude pendant une durée de 12 mois (échéance T4).

La Figure III-21 montre le thermogramme obtenu pour la gaine à T0. Ce dernier met en évidence plusieurs éléments caractéristiques :

- un saut enthalpique vers -30 °C, associé à la transition vitreuse de la phase amorphe du polymère ;
- un large massif endothermique entre -30 et 110 °C environ, duquel émergent trois pics distincts centrés vers 40 °C, 50 °C et 90 °C, qui correspond au domaine de température généralement rapporté pour la fusion de la phase cristalline des EVA [158] [159] [165].

La présence de pics multiples révèle l'existence de plusieurs populations de tailles de lamelles cristallines ;

- un pic endothermique à plus haute température vers 160 °C, qui ne semble pas caractéristique de la structure cristalline des EVA. Ce domaine de température correspond généralement à la fusion du polypropylène (PP), ce qui pourrait indiquer que la gaine Neubrex est en fait un copolymère EVA/PP [166].

La Figure III-22 présente ensuite les thermogrammes obtenus pour les échantillons vieillis en solution alcaline aux différentes températures. Il ressort clairement que ces vieillissements ont un impact important sur la structure cristalline de l'EVA, et modifient les distributions des tailles de lamelles cristallines. En effet, la position des différents pics de fusion (dans l'intervalle -30 °C – 110 °C) est nettement modifiée dans les échantillons vieillis. En particulier, on note que les vieillissements à 40 °C et 60 °C font respectivement croître les pics de fusion situés vers 60 °C et 90 °C, mettant en évidence une augmentation des populations de lamelles les plus épaisses au cours du vieillissement. Ces modifications peuvent être attribuées à des mécanismes de recristallisation [165], probablement activés par la température mais également par les dégradations à l'échelle moléculaire identifiés précédemment en IRTF (scission au niveau des groupes acétates, hydrolyse dans le cas du vieillissement en solution à 60 °C). On ne cherchera pas à identifier précisément les mécanismes mis en jeu, car cela sort du cadre de l'étude.

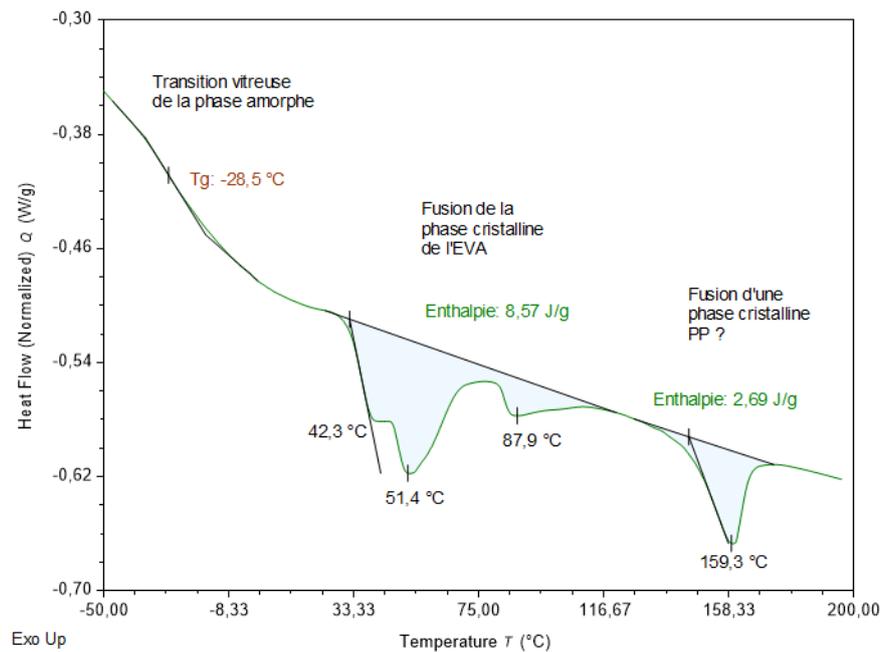


Figure III-21 : Thermogramme DSC de la gaine Neubrex à l'état initial (échéance T0).

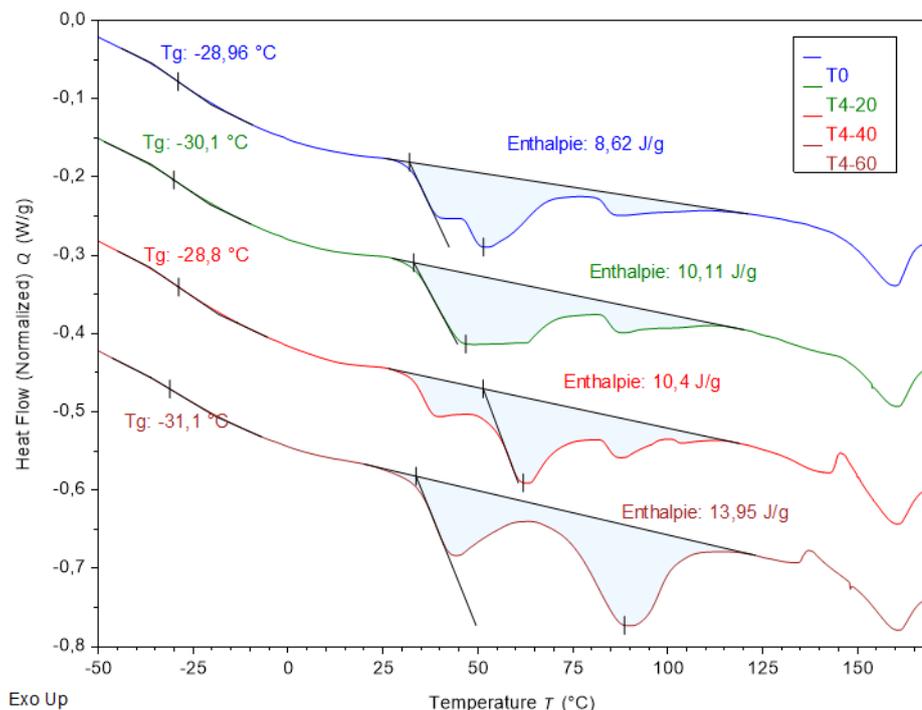


Figure III-22 : Thermogrammes DSC de la gaine Neubrex à T_0 et après 12 mois de vieillissement (échéance T4) en solution alcaline à différentes températures.

La Figure III-23 montre les thermogrammes obtenus pour les échantillons exposés 12 mois aux autres conditions de vieillissements accélérés et naturel. Comme précédemment, on note des modifications de la distribution des tailles de lamelles, mais de moindre ampleur que celles observées lors des vieillissements en solution alcaline à température élevée. Dans le cas du vieillissement naturel, de telles modifications de la structure cristalline sont généralement activées par la photo-oxydation [165].

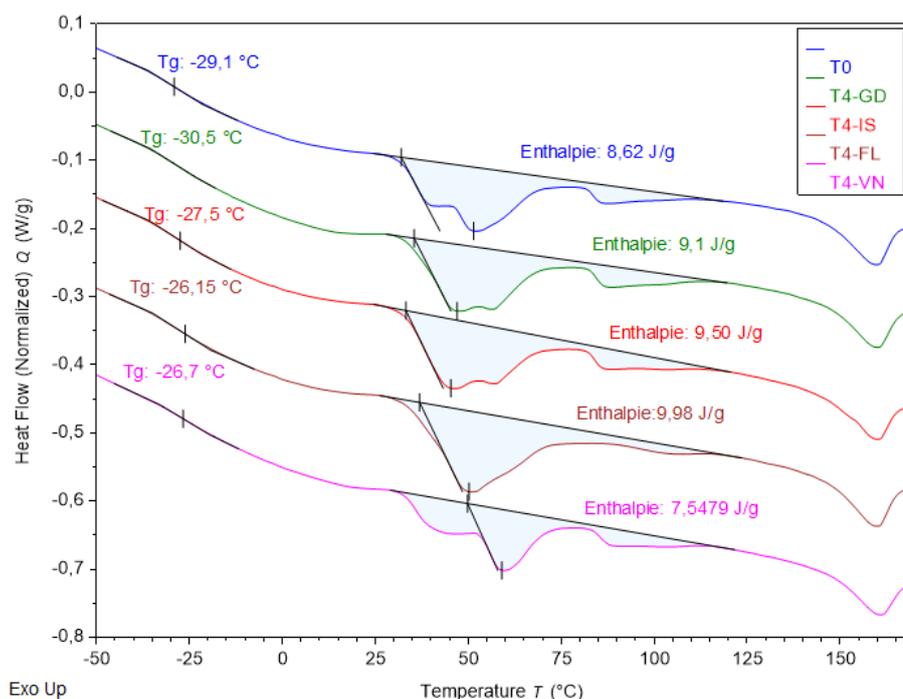


Figure III-23 : Thermogrammes DSC de la gaine Neubrex à T_0 et après 12 mois de vieillissement (T4) dans les autres conditions de vieillissements accélérés (cycles G/D et I/S, Fluage) et naturel (VN).

Les thermogrammes ont ensuite permis de déterminer la T_g de la phase amorphe ainsi que le taux de cristallinité pour l'ensemble des échantillons (à l'état initial T0, et à T4 après 12 mois de vieillissement). Le taux de cristallinité est évalué selon l'expression suivante [158] [167] :

$$\chi_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_f^*} \quad (\text{III-1})$$

Avec ΔH_f^* , l'enthalpie de fusion d'un cristal de polyéthylène parfait (277,1 J/g) et ΔH_f , l'enthalpie de fusion des échantillons déterminée sur les thermogrammes (en intégrant à la fois l'aire des pics de fusion associés à l'EVA et l'aire du pic associé au PP vers 160 °C).

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le Tableau III-5, avec leurs écarts types. Ils permettent de tirer les conclusions suivantes :

- On n'observe pas d'évolution significative de la T_g du matériau, et il apparaît donc que les vieillissements n'affectent pas (ou peu) la phase amorphe du polymère ;
- Bien que le taux de cristallinité de la gaine soit assez faible (voisin de 4 %), on note néanmoins une augmentation sensible de ce taux dans la plupart des milieux de vieillissement, et particulièrement en solution alcaline à 60 °C. Ceci résulte des modifications de la structure cristalline déjà évoquées précédemment (phénomènes de recristallisation notamment).

Or les propriétés mécaniques des polymères semi-cristallins sont principalement contrôlées par le taux de cristallinité, car les lamelles cristallines jouent un rôle de renforcement de la phase amorphe. On peut ainsi penser que les augmentations de module d'Young observés pour les échantillons de gaine Neubrex vieilles (Cf. Figure III-13) résultent essentiellement de cette augmentation de taux de cristallinité dans toute l'épaisseur du matériau.

Tableau III-5 : Valeurs de T_g et du taux de cristallinité déterminées à partir des thermogrammes DSC réalisés sur la gaine du câble Neubrex à T0 et après 12 mois d'exposition (T4) dans les différentes conditions de vieillissements accélérés et naturel.

	T0	T4						
		20 °C	40 °C	60 °C	G/D	I/S	FL	VN
T_g (°C)	-28,5±1,0	-29,5±0,8	-29,5±0,6	-30,5±0,5	-29,1±0,8	-27,7±0,6	-27±1	-28,0±1,3
Taux cristallinité (%)	4,08±0,18	4,60±0,14	4,57±0,15	6,00±0,11	4,14±0,15	4,25±0,16	4,46±0,18	3,80±0,15

b. Analyses sur la gaine externe du câble AFL

Des analyses DSC ont également été réalisées sur des échantillons de gaine AFL à l'état initial (échéance T0) et après vieillissement dans les différentes conditions de l'étude pendant une durée de 12 mois (échéance T4). On notera que les échantillons testés contiennent les deux couches constitutives de la gaine, à savoir la couche interne en polymère époxyde et la couche externe thermoplastique. La DSC fournira donc un signal moyenné sur ces deux couches.

La Figure III-24 présente le thermogramme de la gaine à T0 qui fait clairement apparaître le saut enthalpique relatif à la transition vitreuse de la couche époxyde vers 55 °C, ainsi qu'un pic endothermique lié à la fusion de la phase cristalline vers 216 °C. Ce thermogramme, qui est parfaitement identique à celui rapporté par Hénault pour l'ancienne version du câble AFL DNS 0470 [14], confirme aussi que la couche thermoplastique est bien constituée d'hytrel. Il s'agit donc d'un matériau de type PET très sensible à l'hydrolyse alcaline, qui n'est pas préconisé pour une utilisation dans le béton, contrairement aux spécifications du fabricant.

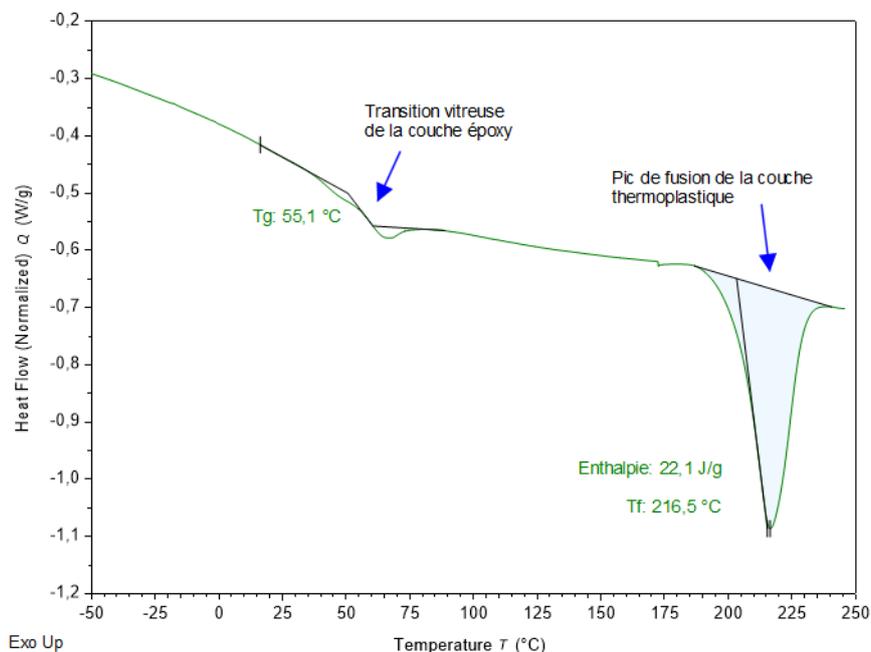


Figure III-24 : Thermogramme DSC de la gaine AFL à l'état initial (échéance T0).

La Figure III-25 présente les thermogrammes obtenus pour les échantillons vieillis en solution alcaline aux différentes températures. Ces analyses mettent en évidence :

- Une petite augmentation de T_g de la couche époxyde au cours du vieillissement à 40 °C, qui pourrait être liée à un phénomène de vieillissement physique du réseau amorphe ;
- Et surtout une diminution de l'enthalpie de fusion de la phase cristalline lors des vieillissements en température à 40 °C et à 60 °C. Ceci est en accord avec les résultats rapportés par Hénault [14] sur le câble DNS 0470 et traduit une diminution du taux de cristallinité de la couche hytrel associée aux dégradations du matériau. Elle est également cohérente avec la diminution du diamètre du câble, et avec la chute de module d'Young décrites dans les paragraphes précédents lors du vieillissement en solution à 60 °C.

On notera par ailleurs que les analyses DSC effectuées à T4 sur les gaines AFL exposées aux autres conditions de vieillissement (cycles G/D et I/S, fluage, vieillissement naturel) n'ont pas mis en évidence d'évolution particulière de la structure des couches époxyde et hytrel. Les thermogrammes ne sont donc pas présentés ici.

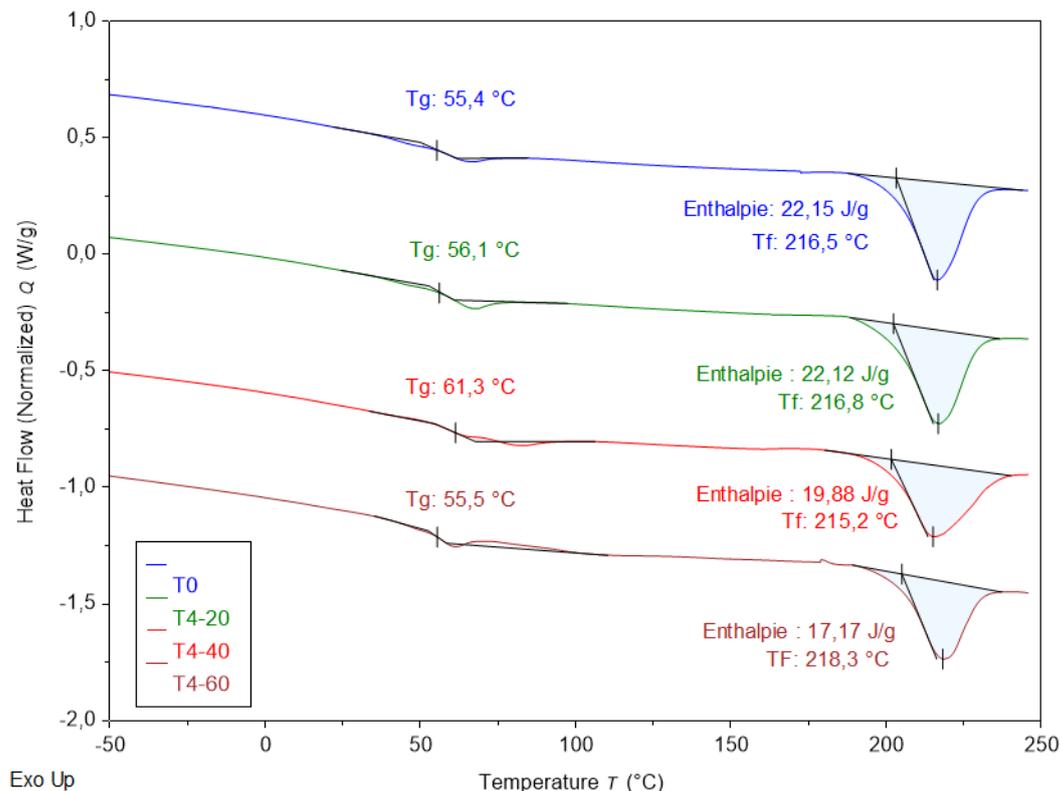


Figure III-25 : Thermogrammes DSC de la gaine AFL à T0 et après 12 mois de vieillissement (échéance T4) en solution alcaline à différentes températures.

III.3.3. Caractérisation de l'adhésif X120 après vieillissement

Dans ce paragraphe, nous présenterons les résultats des essais mécaniques réalisés sur les échantillons d'adhésif X120 (utilisé pour le collage des câbles à FO sur les prismes de béton) après plusieurs mois d'exposition dans les différentes conditions de vieillissement. Nous étudierons ensuite les modifications microstructurales de cet adhésif induites par les vieillissements, et qui pourraient être à l'origine des évolutions de propriétés mécaniques observées.

III.3.3.1. Caractérisation mécanique

Des essais de traction ont été réalisés selon le protocole décrit au paragraphe II.3.2.2, sur des éprouvettes haltères d'adhésifs vieilles pendant 8 mois dans les mêmes conditions que les prismes de béton instrumentés (cycles G/D, I/S et vieillissement naturel), en vue de déterminer leur résistance et leur module de Young. Les résultats sont présentés sur la Figure III-26, avec les valeurs obtenues à T0 sur les échantillons conservés dans l'eau ou stockés à l'air.

Comme déjà expliqué dans le paragraphe III.2.3, la conservation des échantillons dans l'eau avant le début du vieillissement a affecté négativement les propriétés mécaniques de l'adhésif époxyde à T0 par rapport aux éprouvettes conservées à l'air. Cet effet a été attribué principalement au phénomène de plastification du réseau polymère consécutif à la forte absorption d'eau du matériau (de l'ordre de 8,5 % en masse à T0). Pendant les vieillissements, les conditions d'hygrométrie étaient ensuite moins sévères (70 % d'HR au maximum pour les

cycles G/D en enceinte, une semaine à l'air ambiant dans un cycle d'immersion/séchage et 2 mois à l'air ambiant durant le confinement ; conservation à l'extérieur sur le site de vieillissement naturel). Les résultats à 8 mois sur éprouvettes vieilles montrent alors des gains très significatifs de propriétés mécaniques (module d'Young et résistance en traction), liés notamment à la désorption des échantillons, mais sans que l'on récupère totalement les valeurs obtenues sur les échantillons secs à T0. Il ressort donc que les effets de la plastification de l'adhésif par l'eau ne seraient que partiellement réversible après désorption, en accord avec les résultats de la littérature [168].

Les deux graphes de la Figure III-26 semblent également indiquer que la conservation sur site de vieillissement naturel permet de récupérer des niveaux de propriétés supérieurs à ceux des échantillons exposés aux cycles I/S et G/D, bien que la dispersion des résultats soit importante.

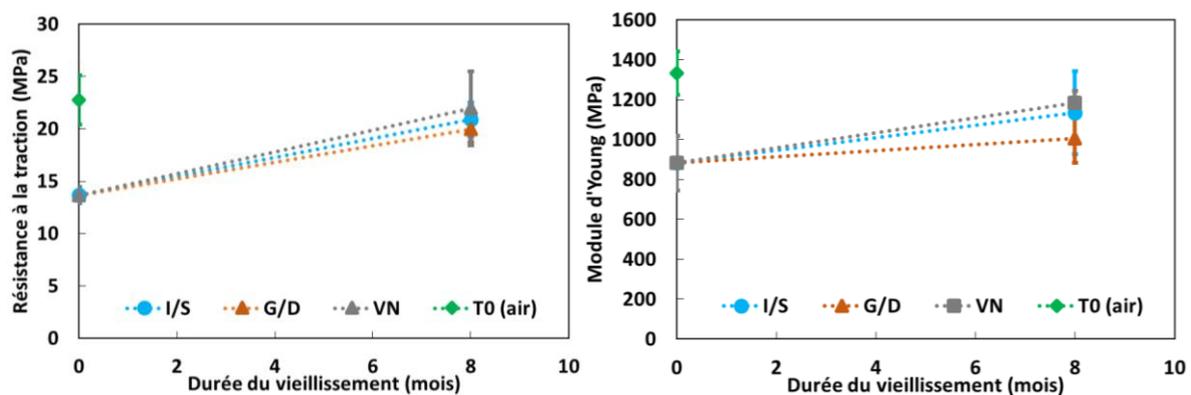


Figure III-26 : Courbes des évolutions de la résistance à la traction et du module d'Young de l'adhésif X120 avant et après exposition aux cycles d'immersion/séchage (I/S) ou de gel/dégel (G/D) et au vieillissement naturel (V/N) pendant une période de 8 mois. Les valeurs à T0 sont indiquées pour les éprouvettes préalablement conservées 3 mois dans l'eau et dans l'air (sans eau).

III.3.3.2. Analyses par spectroscopie IRTF

La Figure III-27 présente le spectre IRTF-ATR obtenu pour un échantillon d'adhésif X120 à T0 (après 3 mois de conservation à l'ambiante en laboratoire) ainsi que le spectre s'en approchant le plus sur les bases de données. L'accord de 80 % entre les deux spectres nous permet de conclure que l'adhésif X120 est bien une résine de type époxyde.

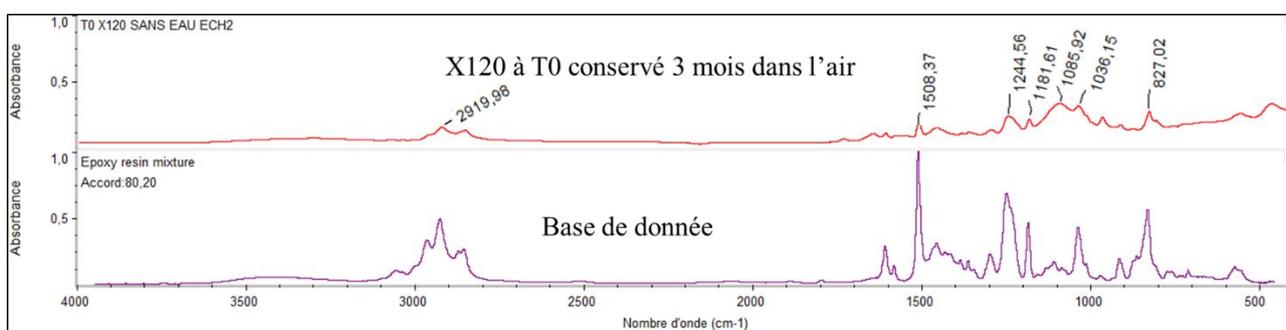


Figure III-27 : Spectre IRTF-ATR de l'adhésif X120 avant vieillissement, et spectre offrant la meilleure correspondance sur les bases de données.

La Figure III-28 compare ensuite les spectres des échantillons à T0 (ceux ayant subi une conservation préalable de 3 mois dans l'eau ou dans l'air), et ceux des mêmes échantillons ayant

ensuite été exposés à 5 mois de vieillissement sous cycles gel/dégel et immersion/séchage. Ces spectres ne mettent pas en évidence de modifications de la structure chimique de l'adhésif époxyde induites par les vieillissements. Les seules différences observées entre les spectres sont liées aux variations de teneurs en eau des échantillons, et sont visibles au niveau de l'intensité de la bande des hydroxyles entre 3000 et 3700 cm^{-1} .

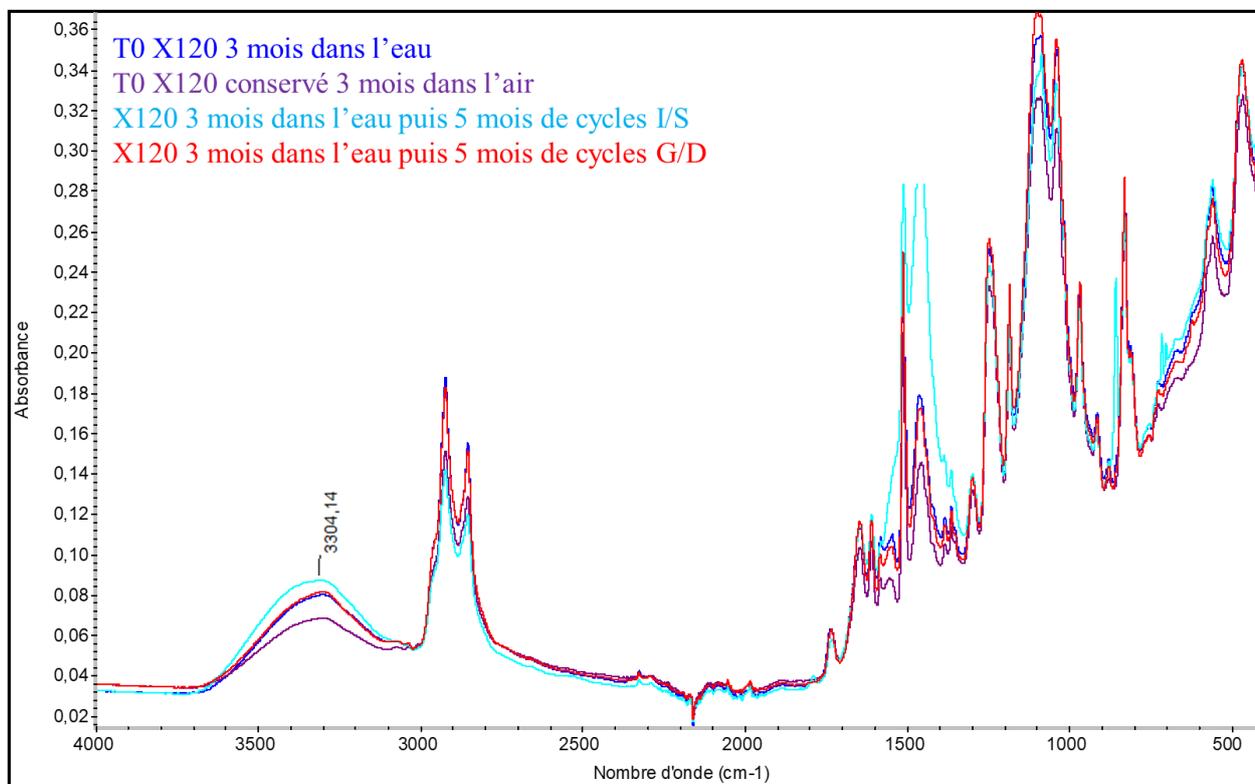


Figure III-28 : Spectres IRTF-ATR des échantillons d'adhésif X120 à T0 et après 5 mois de vieillissements par cycles G/D et I/S.

III.3.3.3. Analyse microstructurale par DSC

Des analyses par DSC modulée (MDSC) ont également été réalisées sur des échantillons d'adhésifs à T0, et sur les échantillons vieillis 8 mois dans les conditions de gel/dégel (G/D), immersion/séchage (I/S), et de vieillissement naturel (VN).

La technique MDSC permet de séparer des phénomènes thermiques complexes se produisant simultanément dans l'échantillon. En particulier, le saut enthalpique associé à T_g apparaît sur une composante dite « réversible » du signal, tandis que les phénomènes cinétiques endo ou exothermiques apparaissent une composante dite « non-réversible ». Dans le cas des polymères therm durcissables comme les époxydes, cette technique permet de séparer la transition vitreuse et la relaxation enthalpique, cette dernière se manifestant par un pic endothermique au voisinage de T_g . Il est alors beaucoup plus facile de déterminer la T_g du matériau.

La Figure III-29 compare les thermogrammes obtenus pour les échantillons à l'état initial T0, préalablement conservés 3 mois dans l'eau comme les prismes de béton instrumentés, ou 3 mois dans l'air. Les transitions vitreuses sont visibles sur la composante réversible (Figure III-29-a) et permettent de déterminer des T_g de l'ordre de 56 °C pour l'adhésif conservé dans l'eau, et 65 °C pour celui conservé dans l'air. Par ailleurs la composante non réversible des

thermogrammes (Figure III-29-b) met en évidence un large pic exothermique pour l'adhésif conservé dans l'eau, traduisant une post-réticulation du polymère pendant l'essai, liée à la présence de monomères résiduels qui réagissent lors du chauffage. Par contre, ce phénomène n'est pas observé pour le matériau conservé dans l'air. Ces éléments montrent donc que l'adhésif conservé dans l'eau présente une réticulation incomplète à T₀, alors que le matériau conservé dans l'air a pu achever sa polymérisation. Les écarts de T_g et les écarts de propriétés mécaniques à T₀ en fonction du mode de conservation (dans l'eau ou dans l'air, Cf. Figure III-26) s'expliquent donc à la fois par le phénomène de plastification du réseau par l'eau absorbée, comme mentionné précédemment, mais également par des différences de taux de réticulation.

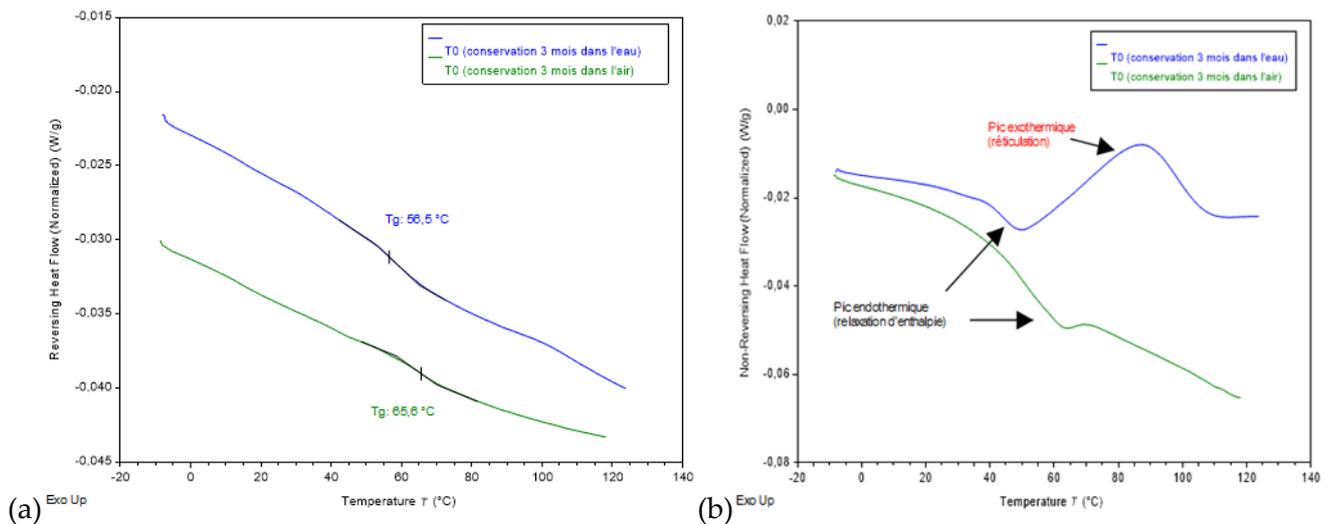


Figure III-29 : Thermogrammes MDSC des échantillons d'adhésif X120 à T₀, après 3 mois de conservation dans l'eau ou dans l'air : (a) signal réversible, et (b) signal non réversible.

Les analyses MDSC réalisées sur les échantillons vieillis 8 mois dans les conditions G/D, I/S et VN ont également permis de déterminer les valeurs de T_g des adhésifs vieillis, qui sont rapportées sur le diagramme de la Figure III-30-a. On note que ces valeurs sont nettement plus élevées que la T_g de l'adhésif à T₀ après conservation dans l'eau, et se rapprochent de la valeur à T₀ après conservation dans l'air (de l'ordre de 65 °C). Les composantes non-réversibles des thermogrammes présentées sur la Figure III-30-b montrent également qu'il subsiste un petit pic exothermique de post-réticulation pour les échantillons vieillis, mais dont l'enthalpie (aire sous le pic) est beaucoup plus faible que celle observée sur l'échantillon à l'état initial avant vieillissement (T₀ après conservation dans l'eau).

Ces résultats montrent d'une part que les échantillons vieillis ont désorbé une grande partie de l'eau qui était initialement présente à T₀, et qu'ils ont également poursuivi le processus de réticulation pendant la période de vieillissement sans toutefois parvenir à une réticulation complète du réseau époxyde. Ceci explique également l'augmentation des propriétés mécaniques des échantillons vieillis par rapport à l'échantillon initial (T₀ après conservation dans l'eau), et le fait que l'on reste néanmoins légèrement en dessous des propriétés de l'échantillon à T₀ conservé dans l'air.

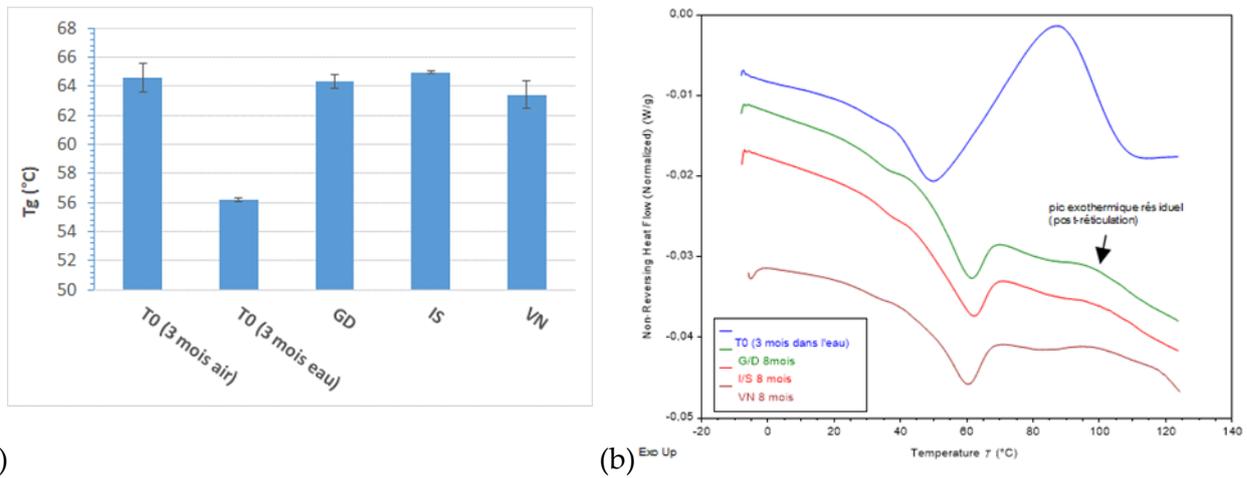


Figure III-30 : Analyses MDSC des échantillons d'adhésif X120 après 8 mois de vieillissements par cycles G/D ou I/S et en vieillissement naturel (VN) : (a) valeurs de T_g , et (b) composante non réversible des thermogrammes.

III.3.4. Caractérisation mécanique par essais d'arrachement de l'interface câble à FO/béton vieillie

La caractérisation des interfaces câbles à FO/béton après vieillissement est également réalisée au moyen d'essais d'arrachement, selon le protocole décrit au paragraphe II.4.3. Ces essais mécaniques ont bien été effectués sur les éprouvettes des deux formulations de bétons (ZA et AA) vieilles, mais seules les FO des éprouvettes ZA ont été interrogées au moyen du dispositif OBR en vue de collecter les profils de déformation le long de la ligne de mesure. Ce choix est lié à des raisons de disponibilité de l'interrogateur OBR et à une optimisation du plan d'expérience compte tenu du nombre élevé d'essais à réaliser.

La première partie de ce paragraphe présente les profils de déformation les plus intéressants obtenus à chaque échéance d'essais pendant les 18 mois de vieillissements accélérés (échéances T1 à T6), en l'occurrence ceux qui font apparaître des évolutions significatives dans le comportement de l'interface câble/béton ZA entre deux échéances successives (on notera que tous les autres profils sont également regroupés dans l'Annexe D-VI.4). Les profils de déformation obtenus dans le cas des éprouvettes instrumentées exposées au vieillissement naturel sont également analysés dans un second temps. Pour tenter d'expliquer les évolutions observées, des interprétations sont proposées sur la base des résultats précédemment acquis lors de l'étude du vieillissement des différents constituants individuels (le béton ZA, les deux câbles à FO et l'adhésif X120 utilisé pour le collage des câbles en parement du béton).

La seconde partie rapporte plus particulièrement les évolutions des caractéristiques mécaniques de l'interface câble/béton déterminées par ces essais d'arrachement sur l'ensemble des éprouvettes AA et ZA vieilles.

III.3.4.1. Acquisition des profils de déformation par interrogation des FO

a. Caractérisation après 3 mois de vieillissement accéléré (T1)

Cas des câbles noyés

Les interrogations des câbles à FO noyés dans les cylindres ZA lors des essais d'arrachement à après 3 mois de vieillissement en solution alcaline à 20 °C et à 40 °C n'ont pas fait apparaître d'évolution significative des profils de déformation par rapport à T0.

En revanche, des évolutions notables sont observées dans le cas des éprouvettes de béton ZA immergées dans la solution alcaline à 60 °C, comme le montrent les profils de déformation des 2 câbles sur la Figure III-31:

- Pour le câble Neubrex noyé, la seule différence par rapport à l'état initial (T0) apparaît dans la zone Z3 de la ligne de mesure (segment de câble en traction pure) à niveau de charge élevé. En effet, la valeur de la déformation normalisée par la charge augmente significativement lorsqu'on atteint une charge avoisinant les 100 N. Cette « plastification » à charge élevée pourrait être due à un glissement interne entre la gaine et les renforcements métalliques du câble, cohérent avec la diminution de rigidité de l'interface gaine/renforcement notée sur précédemment sur la Figure III-13.
- Concernant le câble AFL noyé, le graphe correspondant fait apparaître une dégradation majeure de l'interface câble/béton dans la zone Z2. Une non-linéarité du comportement de l'interface câble AFL/béton est en effet remarquée dès le deuxième palier de charge (20 N). Lors de la remise en charge après le second palier, le câble va ensuite se mettre à glisser dans l'éprouvette de béton avant que le palier suivant puisse être atteint (30 N), traduisant alors une décohésion totale de l'interface câble/béton.

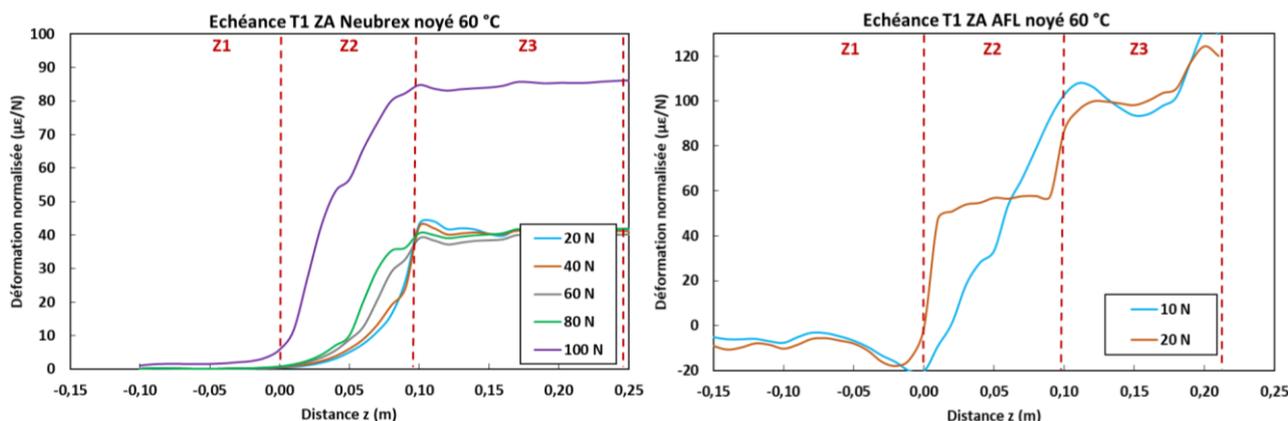


Figure III-31 : Profils de la déformation normalisée le long des deux câbles à FO noyés dans les cylindres ZA après 3 mois de vieillissement (T1) en solution alcaline à 60 °C. Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

Cas des câbles collés

Les 3 mois de vieillissements accélérés appliqués sur les primes instrumentés n'ont pas fait apparaître de modification importante des profils de déformation enregistrées lors des essais d'arrachement câble/béton, par rapport à ceux de l'échéance T0.

Quelques évolutions mineures sont néanmoins apparues pour les éprouvettes exposées aux cycles gel/dégel, et les profils de déformation correspondants sont représentés sur la Figure III-32 pour les deux types de câbles collés. De manière générale, on note les

- Pour le câble Neubrex collé, le vieillissement de 3 mois en cycles G/D favorise l'apparition d'une décohésion de l'interface câble/adhésif (identifiée par l'apparition d'un glissement du câble) à un niveau de charge inférieur à celui qui avait été obtenu à T0.

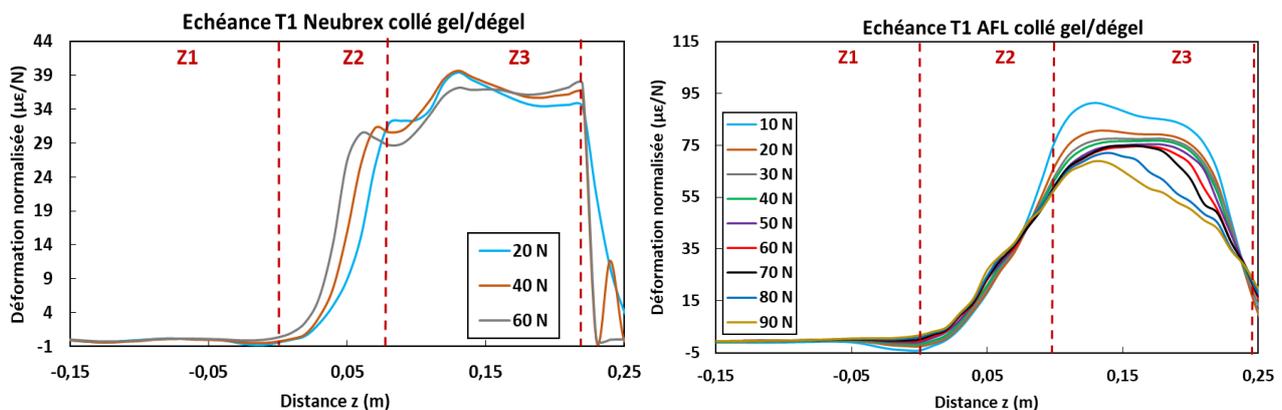


Figure III-32 : Profils de la déformation normalisée le long des deux câbles à FO collés en parement des prismes ZA, après 3 mois de vieillissement (T1) en enceinte climatique (cycles de gel/dégel). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

b. Caractérisation après 6 mois de vieillissement accéléré (T2)

Cas des câbles noyés

Après 6 mois d'immersion dans la solution alcaline, les profils de déformation enregistrés lors des essais d'arrachement câble/béton n'ont pas révélé d'évolution majeure (par rapport aux résultats à T0) pour le câble Neubrex noyé dans les cylindres ZA exposés à 20 °C, ni pour le câble AFL noyé dans les cylindres ZA exposés à 20 °C et à 40 °C. En revanche, des évolutions ont été observées aux autres températures de vieillissement et les profils de déformation correspondants sont illustrées sur la Figure III-33. Les éléments suivants sont alors mis en évidence sur les graphes à T2:

- Concernant le câble Neubrex noyé dans les cylindres vieillis à 40 °C, l'interrogation des FO fait toujours apparaître une augmentation de la valeur de déformation normalisée à niveau de charge élevé, attribuée à une décohésion/un glissement à l'interface gaine/renfort métallique. Cette augmentation apparait ici pour un niveau de charge appliquée de 80 N, alors qu'elle n'était visible qu'à 100 N à l'état initial non vieilli (T0), ce qui est cohérent avec une légère dégradation des caractéristiques de l'interface gaine/renfort au cours du vieillissement à 40 °C.
- Pour le câble Neubrex noyé dans les cylindres vieillis à 60 °C, seuls trois palier d'acquisition OBR ont pu être réalisés, car une décohésion précoce de l'interface câble/béton et un glissement du câble ont été observés lorsque le niveau de charge a dépassé 60 N. Ceci indique une forte dégradation des propriétés de l'interface câble/béton ZA dans cette condition de vieillissement, qui pourrait être liée aux dégradations de surface du câble (hydrolyse et dégradation thermique des acétates

mis en évidence précédemment par IRTF) au contact de la solution interstitielle du béton.

- Concernant le câble AFL noyé dans le cylindre vieilli à 60 °C, il ressort que le câble glisse facilement dans l'éprouvette avant même d'atteindre le premier palier de charge (10 N). Ceci est la conséquence d'une dégradation majeure de l'interface câble/béton dans cette condition de vieillissement, en accord avec les résultats des caractérisations IRTF et DSC qui ont mis en évidence des phénomènes de dégradation par hydrolyse alcaline de la surface de la gaine Hytrel.

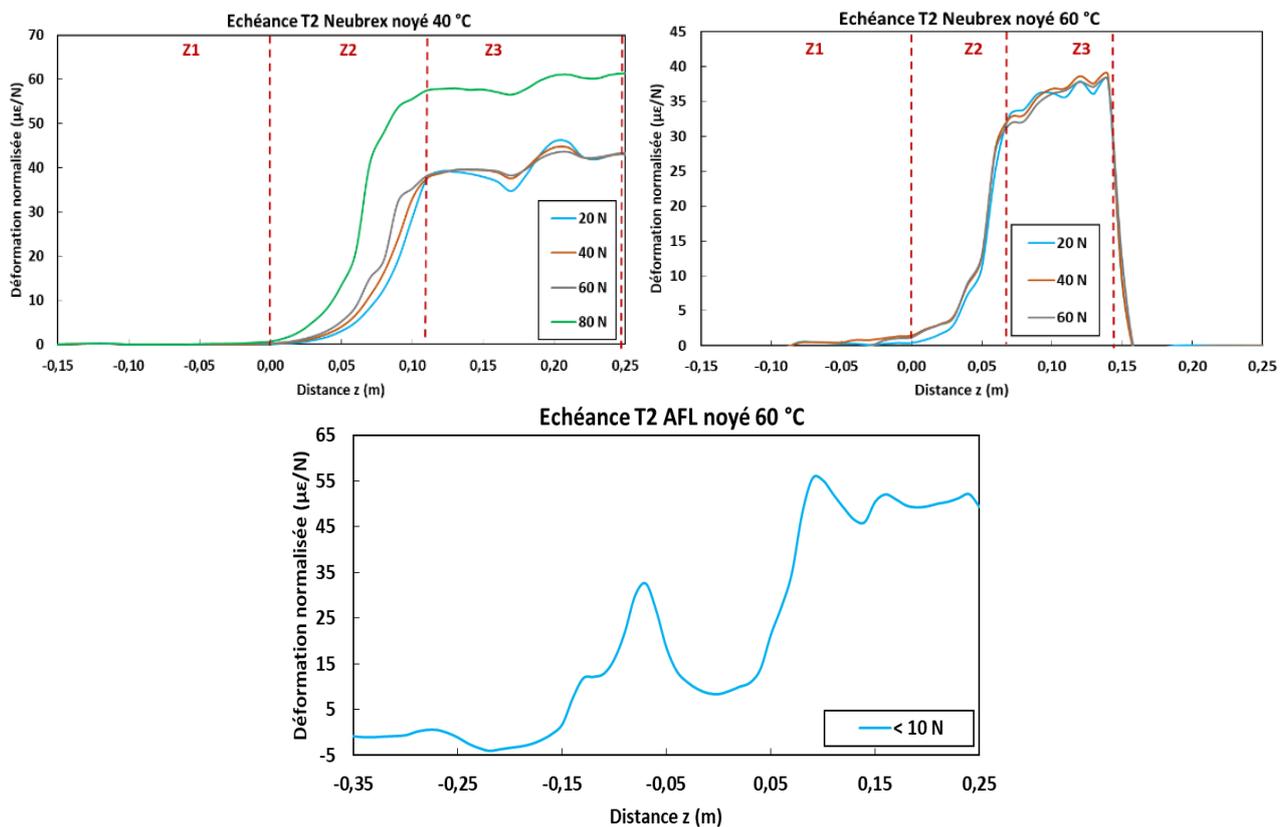


Figure III-33 : Profils de la déformation normalisée le long des deux câbles à FO noyés dans les cylindres ZA après 6 mois de vieillissement (T2) en solution alcaline à différentes températures. Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

Cas des câbles collés

La Figure III-34 présente les profils de la déformation normalisée des câbles Neubrex collés en parement de prismes ZA après 6 mois (T2) d'exposition aux cycles G/D et I/S, et du câble AFL collé à la surface d'un prisme soumis aux cycles G/D. A partir de ces graphes, on peut conclure que :

- 6 mois d'exposition aux cycles gel/dégel n'engendrent pas de dégradation majeure de l'interface câble/béton, que ce soit sur les câbles Neubrex ou AFL collés. En effet, les profils de déformation restent inchangés par rapport aux échéances précédentes.
- De la même façon, les 6 mois de vieillissement par cycles gel/dégel induisent peu de changement sur les profils de déformation expérimentaux du câble Neubrex collé. Néanmoins, on note que le nombre de paliers de charge auxquels il est possible d'enregistrer les profils est réduit, car on obtient une perte d'adhérence précoce (glissement du câble) pour une charge appliquée légèrement supérieure à 60 N, alors

qu'elle était supérieure à 80 N à T0. Ceci témoigne d'un affaiblissement de l'interface gaine Neubrex/adhésif ZA dans cette condition.

- Concernant le câble AFL collé sur les prismes vieillis en conditions G/D, la longueur de la zone Z2 reste toujours supérieure à la longueur de contact de 7 cm, ce qui était déjà observé aux échéances précédentes, mais il semble aussi qu'elle devienne supérieure à celle obtenue à T2 dans les autres conditions de vieillissement.

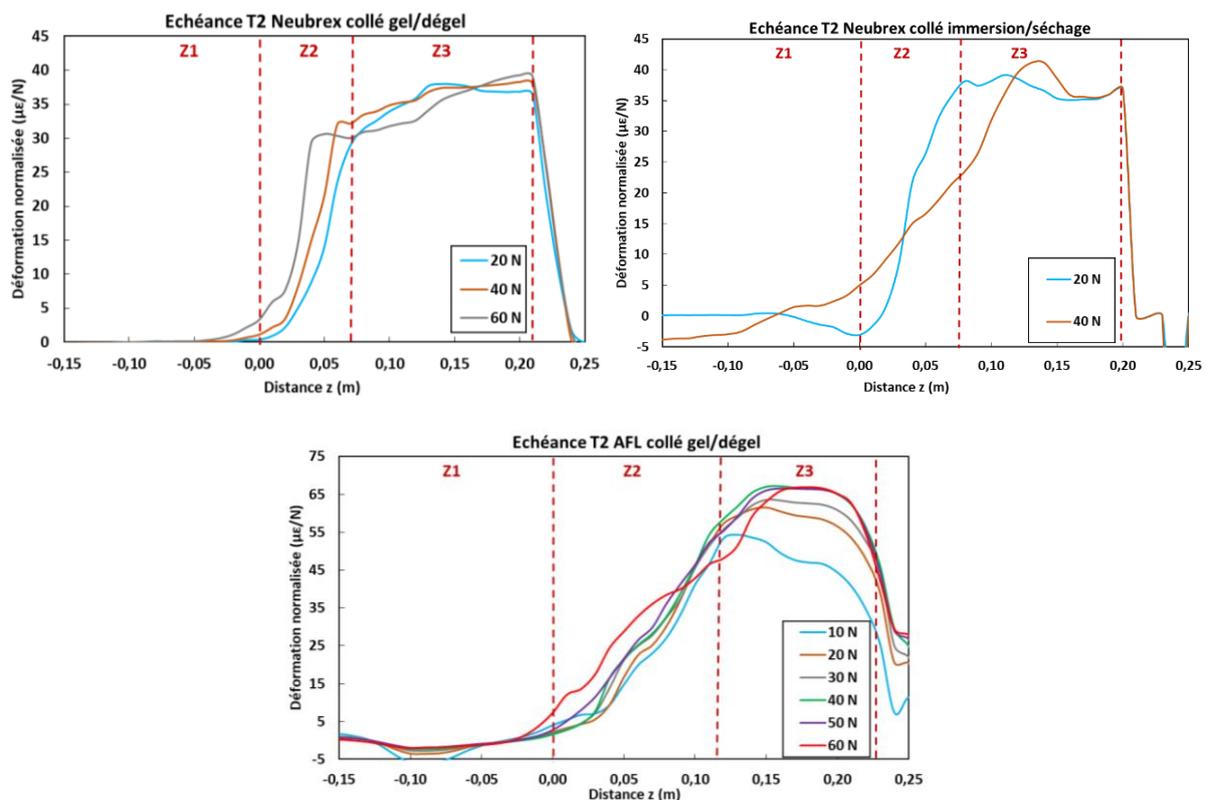


Figure III-34 : Profils de la déformation normalisée le long des deux câbles à FO collés en surface des prismes ZA après 6 mois de vieillissements (T2) par cycles de gel/dégel et d'immersion/séchage. Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

c. Caractérisation après 9 mois de vieillissement accéléré (T3)

Cas des câbles noyés

Entre les échéances T2 et T3 (9 mois de vieillissement), les évolutions les plus marquantes sont à nouveau observées sur les profils de déformation des câbles noyés dans les cylindres exposés en solution alcaline à 60 °C. Ces profils sont illustrés sur la Figure III-35, et on peut noter les tendances suivantes :

- Sur les profils du câble Neubrex, il devient difficile de localiser les différentes zones Z1, Z1 et Z3 le long de la ligne de mesure, car il semble y avoir une transmission des efforts sur presque toute la longueur du câble, et avec un taux de transmission de ces efforts vers la FO plus faible qu'aux échéances précédentes. Ce phénomène peut être attribué aux dégradations des interfaces gaine/FO et câble/béton. La dégradation de l'interface gaine/FO est induite par l'infiltration de solution dans les vides préexistants (Cf. Observation en microscopie optique au chapitre II - Figure II-1) et conduit à une perte de propriétés mécaniques voire une décohésion de cette interface interne du câble (Cf.

Figure III-13), facilitant alors les glissements de la FO dans le câble pendant l'essai. Ces glissements de la FO ne permettent pas de voir sur les profils de déformation le phénomène de plastification du câble à charge élevée. La dégradation de l'interface câble/béton ZA pourrait être liée aux dégradations de surface du câble (hydrolyse et dégradation thermique des acétates) au contact de la solution interstitielle du béton.

- En ce qui concerne le câble AFL noyé, une dégradation très importante de l'interface câble/béton est constatée après 9 mois de vieillissement et le câble glisse manuellement sans même effectuer l'essai d'arrachement sur la presse. L'état du câble dégradé sorti de l'éprouvette est visible sur la Figure III-36 et fait apparaître une altération et une rupture de l'enrobage externe du câble, ainsi qu'un ternissement de sa couleur bleue. Cette dégradation peut être attribuée à la réaction d'hydrolyse alcaline de l'hytrel constituant la couche externe de la gaine, qui a été mise en évidence par le suivi dimensionnel et par les caractérisations microstructurales du câble AFL exposé en solution alcaline à 60 °C.

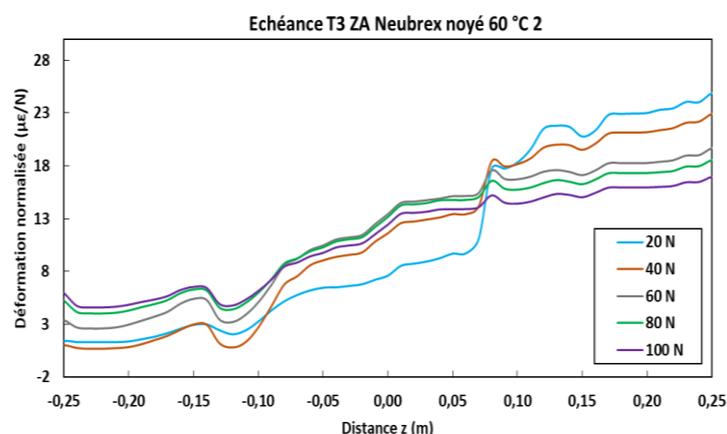


Figure III-35 : Profils de la déformation normalisée le long du câble Neubrex noyé dans un cylindre ZA après 9 mois de vieillissement (T3) en solution alcaline à 60 °C. Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.



Figure III-36 : Etat de la surface externe du câble AFL arraché manuellement du cylindre de béton après 9 mois de vieillissement en solution alcaline à 60 °C.

Cas du câble collé

A l'échéance T3, on observe toujours qu'au niveau de l'interface câble Neubrex/béton pour les prismes instrumentés vieillissés par cycles d'immersion/séchage, le nombre de paliers de charge auxquels il est possible d'enregistrer les profils est réduit, car on obtient une perte d'adhérence précoce (glissement du câble) (visible sur le graphe de la Figure III-37), comme c'était déjà le cas à T2. On note par ailleurs que le dernier palier de charge atteint avant glissement du câble

est ici de 20 N, alors que l'on avait réussi à enregistrer un profil de déformation à un palier de 40 N à l'échéance T2. La résistance mécanique de l'interface câble/béton s'est donc dégradée entre ces deux échéances. Ceci pourrait être lié à l'hydrolyse des groupes acétate à la surface du câble Neubrex sous l'effet de l'humidité lors de la phase d'immersion.

Les profils de déformations obtenus pour les câbles à FO collés sur les éprouvettes vieilles 9 mois dans les autres conditions n'ont pas relevé de différences majeures par rapport à ceux de l'échéance T2.

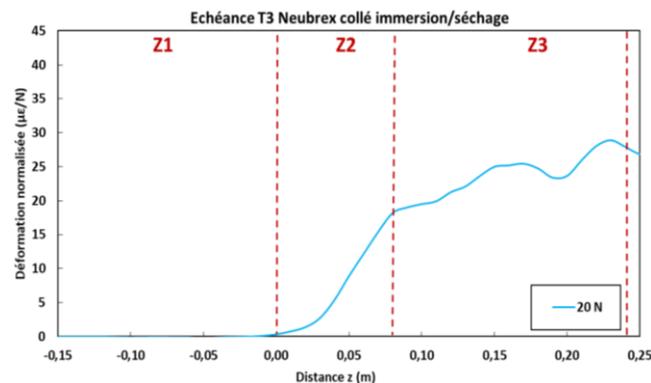


Figure III-37 : Profils de la déformation normalisée le long du câble Neubrex collé en parement d'un prisme ZA, après 9 mois de vieillissement (T3) par cycles d'immersion/séchage.

d. Caractérisation après 12 mois de vieillissement accéléré (T4)

Cas des câbles noyés

Les profils de déformation obtenus à l'échéance T4 pour le câble Neubrex noyé dans les cylindres ZA vieillis en solution alcaline à 60 °C sont présentés sur la Figure III-38. L'allure de ces profils est similaire à celle observé précédemment à T3, mais avec un niveau de transmission des efforts vers la FO encore plus faible. Ceci résulterait à la fois de la dégradation quasi-totale de l'interface gaine/FO lié à l'infiltration de solution dans la gaine, et à la dégradation de la surface du câble en contact avec la solution interstitielle du béton. Au final ces profils ne permettent plus de distinguer des comportements spécifiques du câble à FO dans chacune des 3 zones Z1, Z2 et Z3.

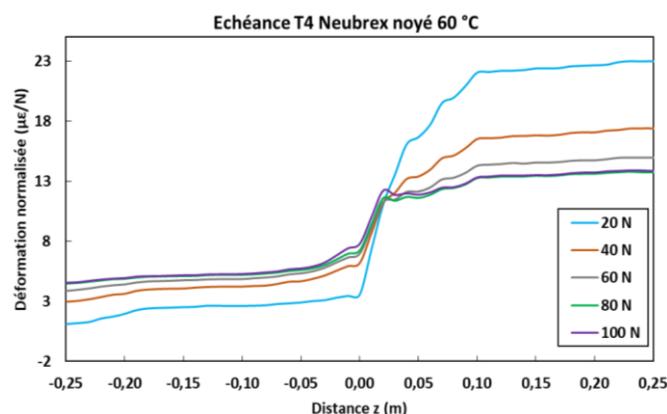


Figure III-38 : Profils de la déformation normalisée le long du câble Neubrex noyé dans un cylindre ZA, après 12 mois de vieillissement (T4) en solution alcaline à 60 °C. Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

Le câble AFL noyé dans les cylindres immergés à 60 °C glisse toujours facilement dans l'éprouvette de béton et une dégradation importante de sa surface externe est illustrée sur la Figure III-39.

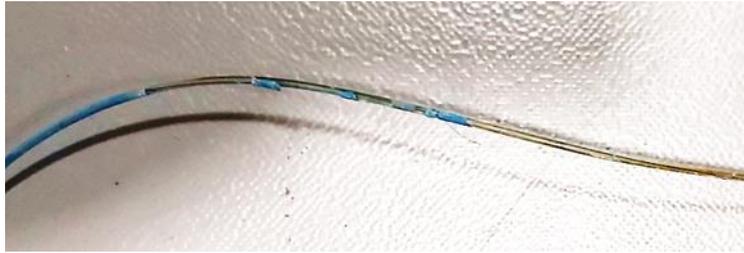


Figure III-39 : Etat de la surface externe du câble AFL arraché manuellement du cylindre après 12 mois de vieillissement en solution alcaline à 60 °C.

Cas des câbles collés

Après 12 mois de vieillissements accélérés par cycles d'immersion/séchage et de gel/dégel, les profils de déformation des câbles collés en parement des prismes ZA n'ont pas révélé d'évolution importante par rapport à ceux de l'échéance précédente T3.

Pour le câble Neubrex collé sur les prismes soumis aux cycles I/S, on note toujours une perte d'adhérence précoce à des niveaux de charge relativement faibles (40 N et 60 N), traduisant une interface câble/adhésif dégradée.

En revanche, concernant le câble AFL collé sur les prismes, et malgré le fait que le transfert d'effort ne soit pas toujours optimal (en raison de la présence du gel polymère dans la structure interne du câble), une bonne adhérence câble/adhésif semble pouvoir être conservée dans toutes les conditions de vieillissement.

e. Caractérisation après 15 mois de vieillissement accéléré (T5)

Cas des câbles noyés

A partir de 15 mois de vieillissement (échéance T5), les évolutions précédemment observées pour les éprouvettes vieilles en solution alcaline à 60 °C commencent également à être visibles sur celles exposées à 40 °C.

Ainsi, la Figure III-40 montre les profils de déformation obtenus à T5 pour le câble AFL noyé dans un cylindre ZA vieilli à 40 °C. Ces profils font apparaître les mêmes tendances qui avaient été observées à l'échéance T1 pour les cylindres exposés à 60 °C : au deuxième palier de charge appliqué (20 N), on note ainsi l'apparition d'une non-linéarité de la réponse en déformation du câble dans la zone Z2. On constate également une perte d'adhérence précoce pendant l'essai d'arrachement, qui empêche d'atteindre le 3ème palier de mesure (30 N), et traduit une dégradation de l'interface câble/béton ZA associée à l'hydrolyse alcaline de la couche d'hytrel.

Compte tenu du décalage temporel observé sur l'apparition des premiers effets du vieillissement en fonction de la température de la solution alcaline, on peut donc penser que l'augmentation de la température de 40 °C à 60 °C induit un facteur d'accélération de l'ordre de 5 pour la dégradation de l'interface béton/câble AFL.

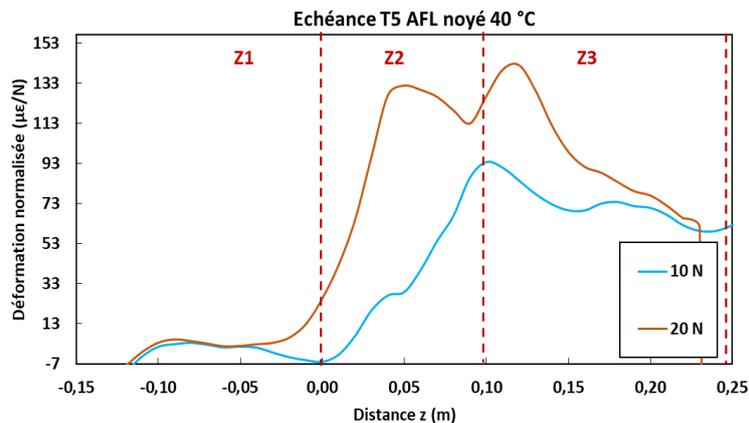


Figure III-40 : Profils de la déformation normalisée le long du câble AFL noyé dans un cylindre ZA, après 15 mois de vieillissement (T5) en solution alcaline à 40 °C. Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

Cas des câbles collés

Après 15 mois de vieillissement en cycles d'immersion/séchage ou en enceinte climatique, les courbes de profils de déformations au long des capteurs collés en surface des prismes n'ont pas relevées des évolutions importantes par rapport à l'échéance précédente.

f. Caractérisation après 18 mois de vieillissement accéléré (T6)

Cas du câble noyé

Après 18 mois de vieillissement en solution alcaline, les évolutions remarquées aux différentes échéances sont confirmées à cette dernière échéance. Nous notons donc une dégradation totale de l'interface câble AFL/béton en solution alcaline à 60 °C. Nous remarquons toujours les mêmes évolutions aux couches internes du câble AFL (le gel polymère) menant à un élargissement de la zone Z2 et donc à un transfert d'effort non optimal entre le milieu hôte et la FO en silice. Concernant le câble Neubrex noyé dans le béton, ce dernier adhère toujours relativement bien dans le béton. En revanche, l'existence des vides entre les FO et le revêtement externe du câble engendre toujours une infiltration de la solution alcaline dans ces vides à partir de l'extrémité du câble. Cette infiltration induit une dégradation de ces FO qui s'accroît avec l'augmentation de la température et qui ne permet, donc, pas de réaliser les interrogations à 40 °C et à 60 °C.

Cas du câble collé

Après 18 mois de vieillissement en cycles d'immersion/séchage et gel/dégel, les évolutions constatées aux échéances précédentes demeurent les mêmes. En effet, il semble que le câble Neubrex perd un petit peu de son adhérence en surface du béton (dans l'adhésif). Cette conclusion sera vérifiée en analysant les résultats du suivi de la pente et de la contrainte d'adhérence dans le paragraphe III.3.4.2. Concernant le câble AFL, les vieillissements influencent toujours le gel polymère interne du câble et font apparaître des fois un rallongement de la zone Z2.

g. Caractérisation après 16 mois en vieillissement naturel (VN)

Cas des câbles noyés

Les profils de déformation issus de l'interrogation des deux câbles à FO noyés dans les cylindres de béton ZA après 16 mois du vieillissement sur site naturel (Figure III-41) n'ont pas révélé de modification significative par rapport aux profils à T0. Ceci semble indiquer l'absence de dégradation majeure dans cette condition particulière, à la fois pour les matériaux constitutifs du câble et pour les différentes interfaces situées entre le béton et la FO. Ce résultat devra encore être confirmé par les résultats des essais mécaniques d'arrachement.

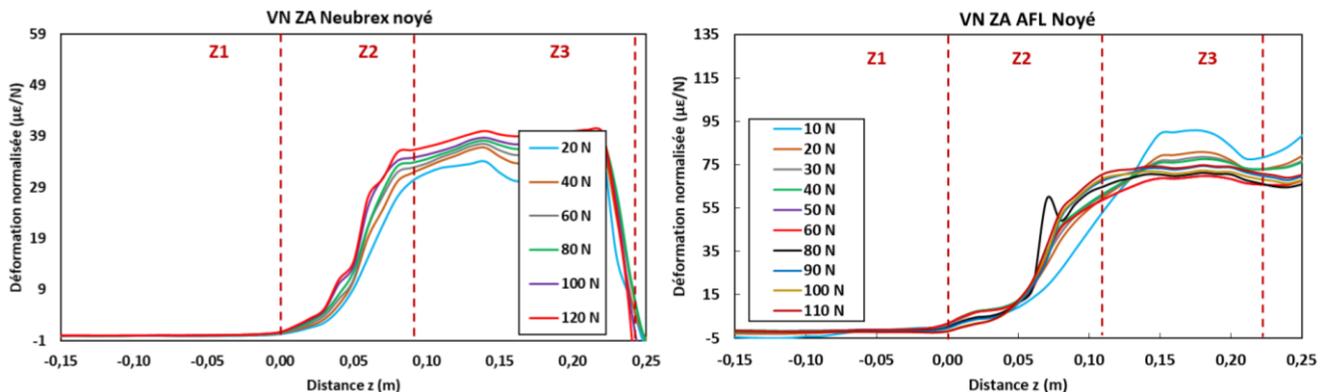


Figure III-41 : Profils de la déformation normalisée le long des deux câbles à FO noyés dans les cylindres ZA après 16 mois de vieillissement naturel (VN). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

Cas du câble collé

Contrairement à la configuration par câble noyé, les courbes d'interrogation des câbles collés sur la surface des prismes après 16 mois en vieillissement naturel (Figure III-42) montrent des différences par rapport à celles obtenues à l'échéance T0.

On notera en particulier, pour le câble Neubrex comme pour l'AFL, qu'il n'a pas été possible de réaliser autant de paliers d'acquisition des profils de déformation qu'à T0, en raison de la rupture précoce de l'interface câble/adhésif à des niveaux de charge plus faibles. Cette constatation suggère l'existence de mécanismes de dégradation de cette interface câble/adhésif en conditions de vieillissement naturel.

D'autre part, comme cela avait été constaté aux échéances de vieillissements accélérés, on observe pour certaines éprouvettes un élargissement de la zone Z2 des profils de déformation, qui dépasse à nouveau la longueur de collage effective de 7 cm.

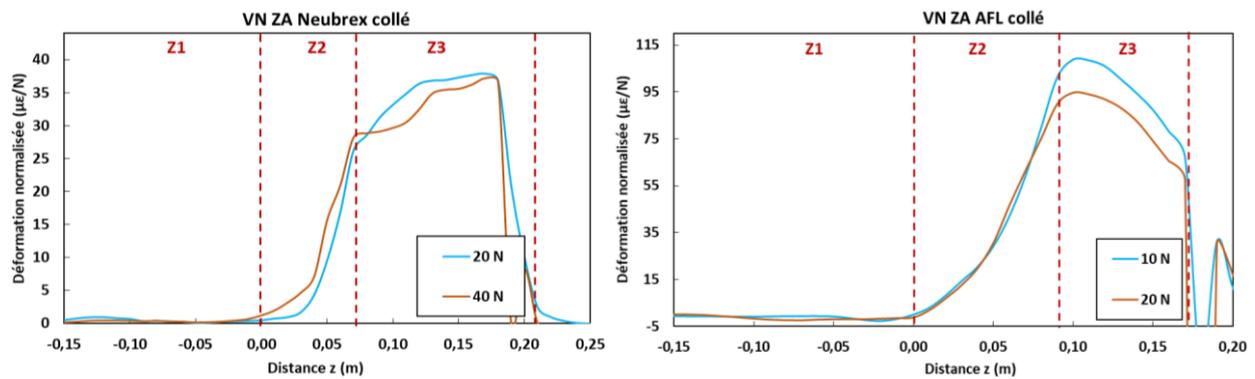


Figure III-42 : Profils de la déformation normalisée le long des deux câbles à FO collés en surface des primes ZA après 16 mois de vieillissement naturel (VN). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

III.3.4.2. Evolution des propriétés mécaniques de l'interface câble/béton (ou câble/adhésif) au cours des vieillissements

Dans ce paragraphe sont présentées les évolutions des caractéristiques mécaniques des interfaces câbles noyés/béton ou câbles collés/adhésif déterminées à partir des essais d'arrachement réalisés sur les éprouvettes instrumentées, après exposition aux différentes conditions de vieillissements accélérés ou naturel sur des durées allant jusqu'à 18 mois. On rappelle que ces essais d'arrachement câble/béton sont effectués selon le protocole décrit au paragraphe II.4.3, et permettent de déterminer une rigidité tangentielle de l'interface ainsi qu'une contrainte d'adhérence à partir de laquelle le câble commence à glisser.

Le plan d'expérience étant très complet (il visait à cerner l'influence des différents vieillissements à plusieurs échéances de temps, pour les deux formulations de béton AA et ZA, pour les deux cas d'instrumentation possibles, et avec chacun des deux câbles à FO sélectionnés), il a été nécessaire de fabriquer un très grand nombre d'éprouvettes de manière à pouvoir réaliser 3 essais pour chaque configuration. Les résultats ont alors parfois fait apparaître des dispersions importantes, ce qui a rendu difficile leur interprétation. Notre analyse s'est donc focalisée sur quelques grandes tendances dans les évolutions de propriétés de l'interface, qui ont pu être dégagées à partir des données expérimentales. Ces tendances seront discutées à la lumière des évolutions déjà mises en évidence précédemment pour les matériaux constitutifs (les bétons AA et ZA, les câbles à FO et l'adhésif de collage).

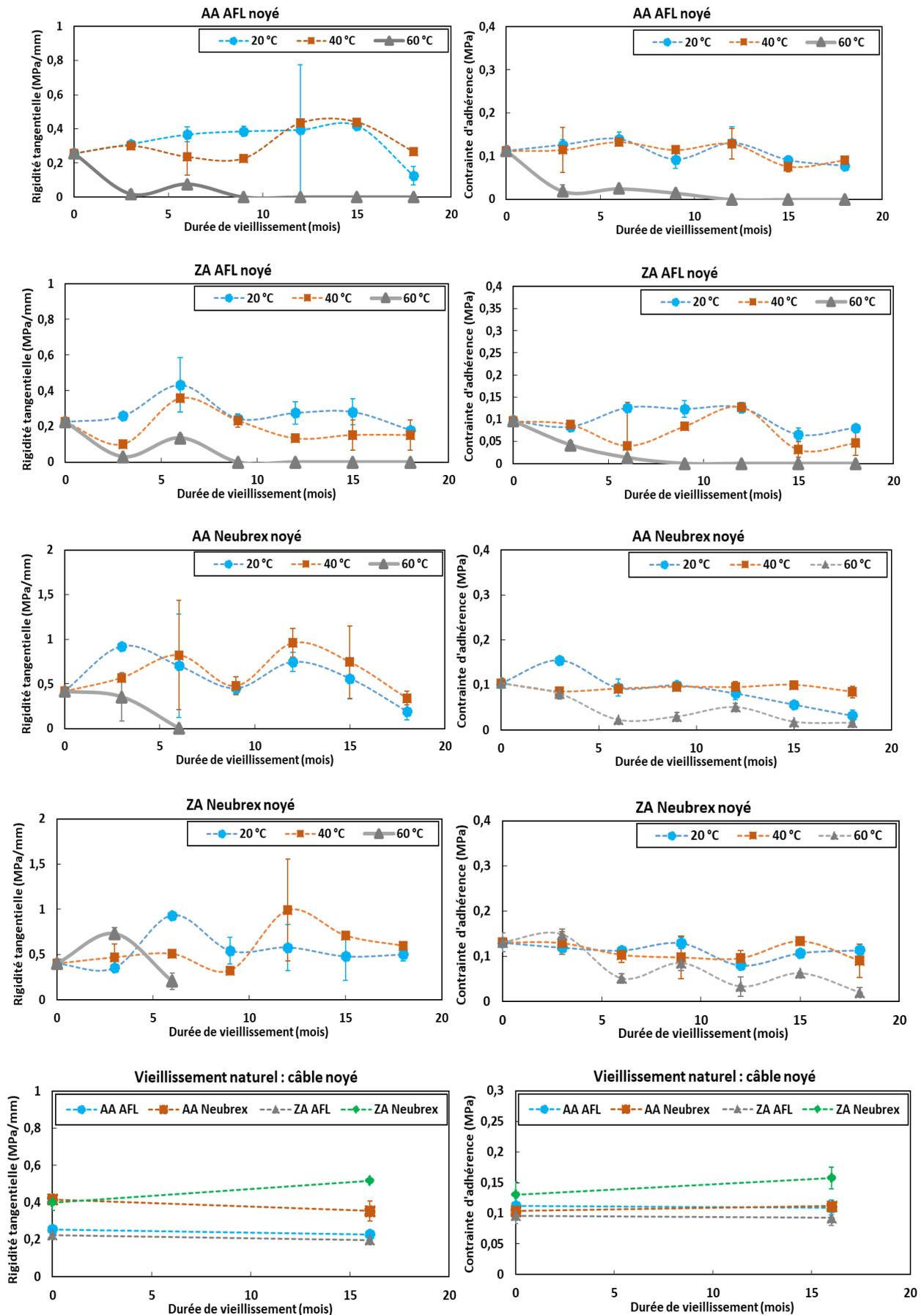


Figure III-43 : Evolutions des caractéristiques mécaniques de l'interface câble/béton déterminées par essais d'arrachement sur cylindres de béton AA et ZA instrumentées par câbles noyés, après immersion en solution alcaline à différentes températures (20 °C, 40 °C et 60 °C) sur une durée totale de 18 mois (échéances T0 à T6), et après vieillissement naturel sur une période de 16 mois.

La Figure III-43 présente les évolutions des caractéristiques de l'interface câble/béton (rigidité et contrainte d'adhérence) obtenues pour les cylindres de béton AA et ZA avec câbles noyés, en fonction de la durée de vieillissement accéléré en solution alcaline (à 20 °C, 40 °C et 60 °C) et de vieillissement naturel. Les graphes permettent d'observer les tendances suivantes :

- Dans le cas des cylindres instrumentés par câbles AFL noyés, et immergés en solution alcaline à 60 °C (trait gris continu sur les graphes), on voit clairement la chute drastique des deux propriétés d'interface sans différence notable entre les deux formulations de béton et après seulement 3 mois de vieillissement accéléré. Ce résultat vient confirmer les tendances déjà dégagées à partir de l'interrogation OBR des câbles pendant les essais, et peut être attribué à la dégradation par hydrolyse alcaline du revêtement externe en hytrel au contact de la solution interstitielle du béton. Au cours des vieillissements en solution à 20 °C et 40 °C, il est plus difficile de dégager des tendances claires pour l'interface câble AFL/béton ; on note néanmoins une diminution de la rigidité d'interface pour les cylindres AA à la dernière échéance de vieillissement, ainsi qu'une diminution de la contrainte d'adhérence des cylindres ZA aux deux dernières échéances. Ceci tend à valider les hypothèses émises à partir des profils de déformation, à savoir que l'effet des dégradations chimiques à 40 °C commence à se répercuter sur les caractéristiques mécaniques à partir du 15^{ème} mois d'exposition.
- Concernant les cylindres avec câbles Neubrex noyés en vieillissement dans la solution à 60 °C (courbes en trait gris continu), nous remarquons également une diminution des valeurs des deux propriétés d'interface dès les premières échéances, que l'on peut attribuer aux dégradations de surface du câble Neubrex au contact de la solution interstitielle du béton (hydrolyse et dégradation thermique des groupes acétates mises en évidence par IRTF). On notera qu'il n'a pas été possible de calculer la valeur de la raideur du câble (paragraphe II.4.3.3) et donc la rigidité tangentielle de l'interface câble/béton au-delà de 6 mois de vieillissement. En effet, les profils d'interrogation réalisés au-delà de T2 pour ce type de vieillissement ont fait apparaître une dégradation très importante de l'interface gaine/FO suite à l'infiltration de la solution alcaline depuis les deux extrémités du câble (Figure III-38 par exemple). La déformation de la FO interrogée dans la zone Z3 lors des essais d'arrachement câble/béton (Figure III-4-c) ne représente donc plus une déformation globale du câble. Toutefois, l'évolution de la contrainte d'adhérence a pu être évaluée jusqu'à la dernière échéance d'essais, et fait apparaître une diminution progressive de ce paramètre sans que l'on atteigne une dégradation/décohésion totale de l'interface comme pour le câble AFL.

Concernant les courbes de vieillissement en solution alcaline à 20 °C et à 40 °C, nous remarquons que les évolutions des propriétés d'interface diffèrent selon la formulation du béton. En effet, les cylindres de formulation ZA présentent de moindres niveaux de dégradation de l'interface câble/béton comparés à ceux des cylindres AA, en particulier à la température de conservation de 20 °C. Ceci pourrait être corrélé à l'expansion du béton ZA qui accompagne le développement des pathologies de gonflement (particulièrement dans la solution alcaline à 20 °C, comme montré au paragraphe III.3.1.1), et qui pourrait générer un effet de confinement du câble, conférant ainsi des propriétés d'interface supérieures à celles des éprouvettes AA dont le béton ne développe pas de pathologie.

- Concernant les cylindres avec câbles noyés exposés sur le site de vieillissement naturel, on ne met pas en évidence d'évolution significative des propriétés d'interface consécutive aux 16 mois d'exposition, compte tenu des écarts-types sur les valeurs expérimentales. Ceci est cohérent avec les résultats issus de l'interrogation des FO, qui ne montraient pas dévolution des profils de déformation fournis par les capteurs. Ce résultat montre également que le vieillissement naturel, qui correspond à des conditions de service réelles en environnement extérieur, reste un environnement peu agressif vis-à-vis de l'instrumentation étudiée. De plus, les conditions d'immersion en solution alcaline à 60 °C peuvent alors paraître trop extrêmes et peu représentatives des conditions de service sur ouvrage. Néanmoins, un suivi sur un plus long terme serait nécessaire pour confirmer ces tendances.

La Figure III-44 présente ensuite les évolutions des propriétés de l'interface câble/adhésif (rigidité et contrainte d'adhérence) déterminées pour les prismes de béton AA et ZA avec câbles collés en parement, en fonction de la durée de vieillissement accéléré par cycles d'immersion/séchage et de gel/dégel, et de vieillissement naturel.

Compte tenu de la forte dispersion des résultats, ces graphes ne montrent pas d'évolution très significative des propriétés d'interface au cours des vieillissements par cycles I/S ou G/D, que ce soit pour le câble Neubrex ou le câble AFL collés. On peut tout juste déceler une légère diminution de la rigidité et dans une moindre mesure de la contrainte moyenne d'adhérence de l'interface Neubrex/béton, en particulier sous l'effet des cycles G/D, ce qui est cohérent avec les observations faites précédemment sur les profils de déformation des FOs (pour mémoire, la décohésion précoce de l'interface réduisait le nombre de paliers de charge auxquels on pouvait interroger les FOs). Ces propriétés d'interface semblent donc peu corrélées aux évolutions de propriétés mécaniques de l'adhésif au cours des vieillissements, ces dernières ayant plutôt tendance à augmenter par rapport à T0, du fait de la désorption des éprouvettes et de la poursuite du processus de réticulation (Cf. paragraphes III.3.3).

On ne note pas non plus d'influence particulière de la formulation du béton sur les évolutions de propriétés de l'interface, mais il faut souligner que le câble n'est pas ici directement au contact du matériau cimentaire, car il est scellé avec l'adhésif dans une rainure du béton.

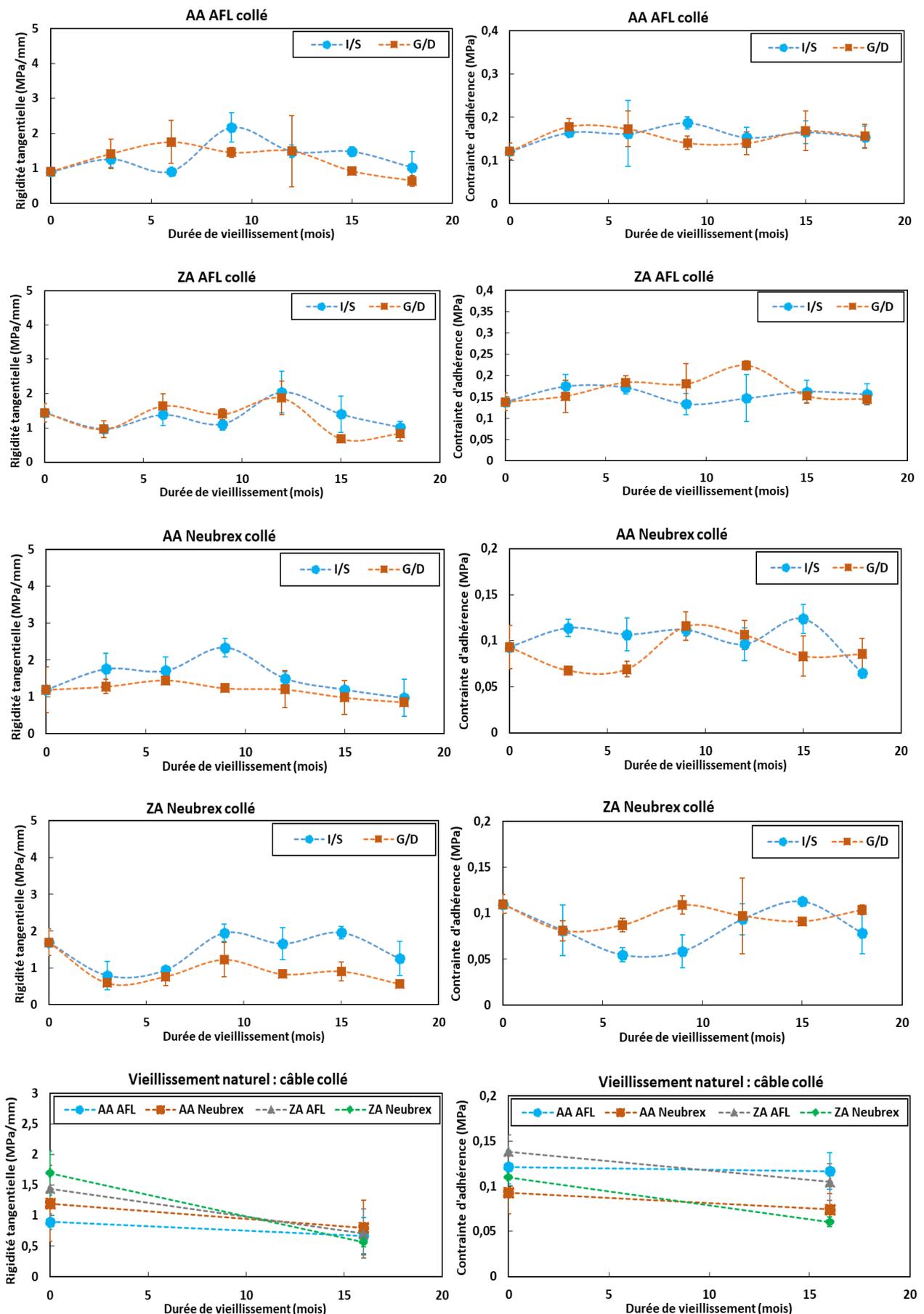


Figure III-44 : Evolutions des caractéristiques mécaniques de l'interface câble/adhésif déterminées par essais d'arrachement sur prismes de béton AA et ZA instrumentés par câbles collés en parement, après mois de vieillissements par cycles d'immersion/séchage (I/S) et de gel/dégel (G/D) sur une période totale de 18 mois (échéances T0 à T6), et après vieillissement naturel sur une période de 16 mois.

Au cours du vieillissement naturel, une diminution de la rigidité et de la contrainte d'adhérence de l'interface câble/adhésif est observée entre T0 et l'échéance à 16 mois, en particulier pour câble Neubrex collé. Ce résultat peut sembler surprenant, car il contraste avec les résultats des vieillissements accélérés par cycles I/S et G/D qui ne montrent pas d'évolution très nette. Il doit néanmoins être nuancé, car l'on ne dispose ici que d'une échéance d'essais unique à 16 mois de vieillissement, et des échéances supplémentaires auraient peut-être fait apparaître des fluctuations de valeurs liées à la dispersion des résultats, comme c'est le cas pour les vieillissements accélérés. Néanmoins, plusieurs facteurs pourraient expliquer l'apparition de telles dégradations lors du vieillissement naturel :

- Ce type de vieillissement fait intervenir à la fois des cycles thermiques (alternance jour/nuit et succession des saisons) et des cycles d'immersion/séchage (alternance de précipitations et de périodes sèches). Ce couplage thermo-hydrique, qui n'intervient pas dans les essais accélérés G/D et I/S, pourrait alors être à l'origine des dégradations de l'interface câble/adhésif observées ;
- lors du vieillissement naturel, les éprouvettes instrumentées peuvent également être exposées à des pics de chaleur en période estivale ainsi qu'au rayonnement UV, ce qui pourrait également affecter les caractéristiques de l'instrumentation collée en surface du béton, et notamment les propriétés mécaniques de l'interface câble/adhésif.

III.4. Modélisation du transfert d'effort mécanique entre la structure hôte en béton et les câbles à FO noyés ou collés en parement

Cette partie de l'étude a pour objectif de proposer des modèles numériques simplifiés permettant de décrire le comportement mécanique, et donc la réponse en déformation des deux câbles à FO lors des essais d'arrachement câble/béton, pour les deux configurations d'instrumentation possibles (câble à FO noyé dans le béton et collé sur sa surface). Ces travaux de modélisation s'appuieront sur les résultats des essais expérimentaux de traction et d'arrachement effectués à T0, et en particulier sur les profils de déformation fournis par l'interrogation OBR des FOs pendant les essais d'arrachement.

Le transfert d'effort mécanique entre la structure hôte en béton et le cœur de la FO des deux câbles sera étudié à l'aide de ces modèles simplifiés. Les différents paramètres d'entrée des modèles seront identifiés en calant les simulations sur les profils de déformation expérimentaux. On s'attachera notamment à évaluer l'aptitude ces modèles à décrire la réponse des capteurs en présence d'une ouverture de fissure dans le béton, et à rendre compte des évolutions du transfert d'effort observés après vieillissement accéléré.

III.4.1. Géométries simplifiées des câbles à FO

A partir des observations des sections des deux câbles à FO présentées dans la Figure II-1 et la Figure II-2 chapitre II, il a été possible de définir des géométries simplifiées, à la fois représentatives de la structure interne des câbles et facilement utilisable dans des modèles aux éléments finis. Les géométries adoptées sont illustrées dans la Figure III-45.

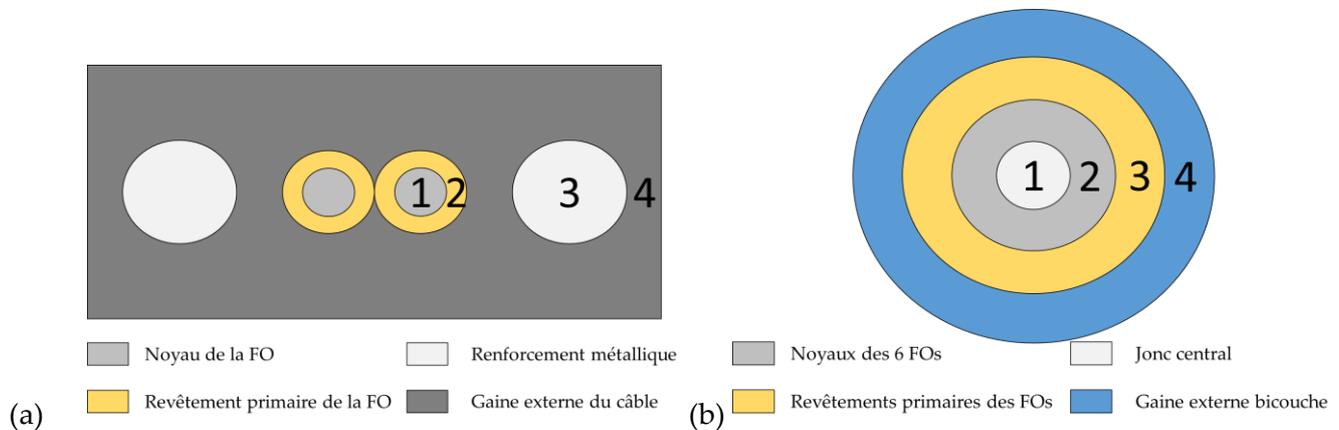


Figure III-45 : Géométries simplifiées des sections (a) du câble Neubrex et (b) du câble AFL adoptées pour les modélisations numériques.

La section du câble Neubrex (Figure III-45-a) comporte 4 composants : (1) la FO en silice, (2) son revêtement primaire, (3) le renforcement métallique et (4) la gaine externe du câble dont la forme externe est identifiée à un rectangle. Sur le schéma de la Figure III-45-b, la géométrie simplifiée de câble AFL se compose de 4 couches : (1) le renforcement mécanique « jonc central », (2) une couche de silice qui représente les FOs enroulées autour du jonc central, (3) une couche qui représente les revêtements primaires des FOs (4) et une dernière couche qui représente la gaine externe bicouche.

Pour chacune des deux géométries des câbles, deux modèles aux éléments finis sont implémentés sur le code Cast3m [169], l'un correspondant au cas d'une instrumentation par câble noyé, et l'autre au cas d'une instrumentation par câble collé en surface. Dans ces quatre modèles, les paramètres mécaniques des matériaux (bétons, constituants des câbles et adhésif) seront issus à la fois des essais mécaniques de compression et de traction réalisés à T0 et de la littérature, tandis que les propriétés des interfaces seront identifiées à partir des résultats expérimentaux acquis lors des essais d'arrachement câble/béton (profils de déformation issus de l'interrogation des FOs).

Une fois les modèles validés, des modifications seront apportées aux conditions aux limites et aux efforts appliqués afin d'étudier le transfert d'effort du milieu hôte « béton » vers la FO en silice, et de prédire le comportement des câbles au droit d'une fissure dans le béton.

Enfin, la dernière partie de cette étude consistera à prendre en compte dans ces modèles numériques les évolutions de propriétés mécaniques des constituants et interfaces induits par les vieillissements, afin de décrire leur influence sur le transfert d'effort mécanique entre le béton et la FO.

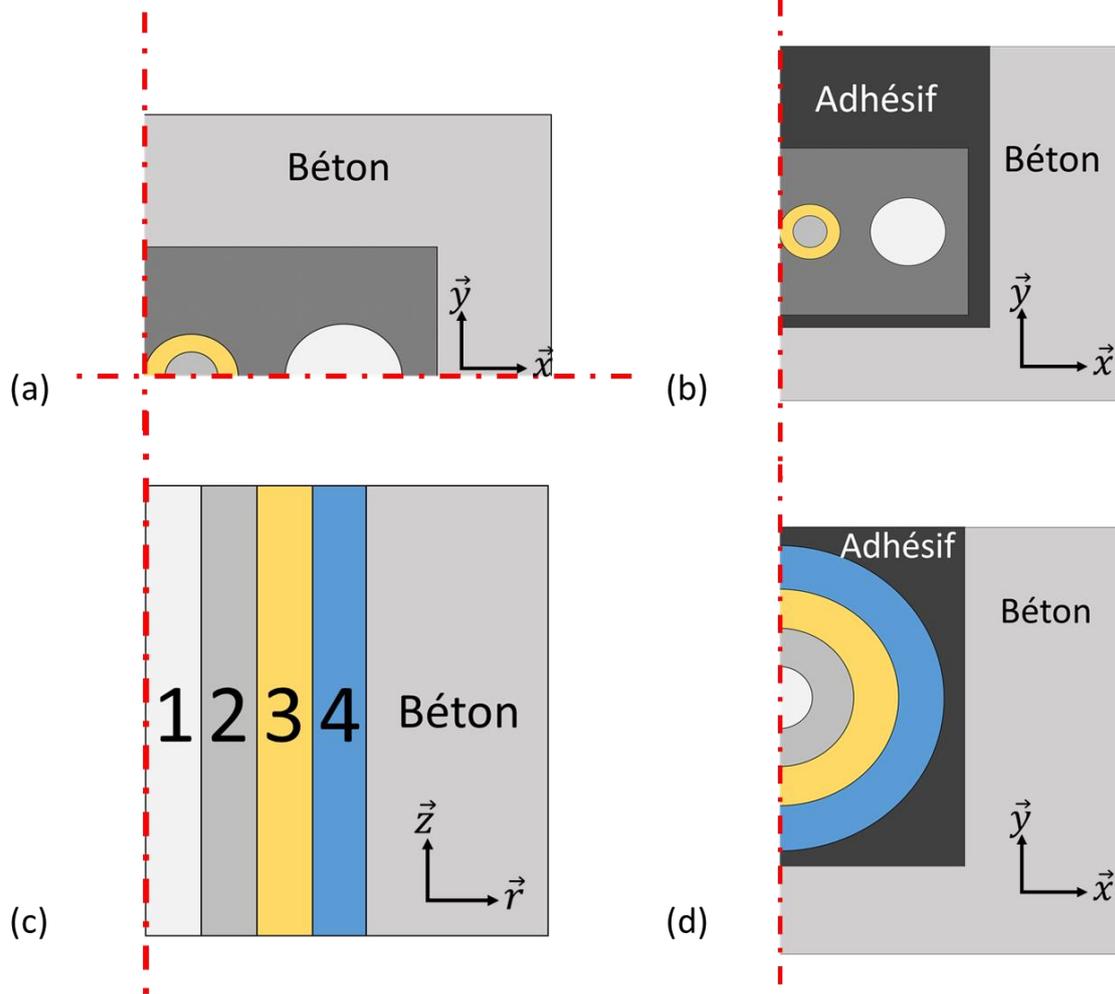


Figure III-46 : Géométries adoptées pour les modélisations numériques : cas du câble Neubrex (a) noyé dans le béton et (b) collé en parement ; cas du câble AFL (c) noyé dans le béton et (d) collé en parement.

Les conditions aux limites des modèles sont définies selon le type de câble et la configuration d'instrumentation considérés. La Figure III-46 présente les géométries adoptées dans ces différents modèles. Les schémas (a) et (b) correspondent respectivement aux sections 2D transversales adoptées pour modéliser les cas du câble Neubrex noyé dans le béton et collé en surface. Le maillage des sections 2D est réalisé en premier et une extrusion suivant l'axe \vec{z} permet de générer le maillage en 3D. Le schéma (c) illustre la section modélisée du câble AFL noyé dans un cylindre en béton. La symétrie de révolution autour de l'axe \vec{z} permet de simplifier les calculs pour cette configuration. Finalement, le schéma (d) correspond à la section 2D du câble AFL collé en parement du béton et qui permettra, par extrusion suivant l'axe \vec{z} de générer le maillage en 3D.

III.4.2. Hypothèses des modèles et conditions aux limites

Dans les différents modèles numériques proposés, le comportement des différents matériaux est supposé élastique linéaire. Les modules d'élasticité et coefficients de Poisson qui alimentent les modèles sont tirés de la littérature ou issus des essais de caractérisation mécanique effectués à T0 sur le béton des formulations AA et ZA, sur les câbles à FO et sur l'adhésif. On pourra se rapporter à la partie III.2 pour retrouver l'ensemble des valeurs numériques utilisées.

Concernant les comportements des interfaces considérés dans ces modèles, deux approches différentes ont été explorées, l'objectif étant de retenir celle qui fournit les résultats numériques les plus cohérents avec les données expérimentales des essais d'arrachement.

Une première approche est partie de l'hypothèse que les interfaces internes des deux câbles à FO sont parfaites : les interfaces internes du câble Neubrex (interfaces silice/revêtement primaire, revêtement primaire/gaine et renforcement métallique/gaine) ainsi que les interfaces internes du câble AFL (interfaces jonc central/silice, silice/revêtement primaire et revêtement primaire/gaine). L'interface béton/adhésif est également considérée parfaite. Les lois de comportement utilisées pour décrire l'interface câble/béton pour le cas noyé et l'interface câble/adhésif dans le cas collé sont supposées élastiques. Ces lois sont alors régies par deux paramètres : une rigidité tangentielle et une rigidité normale, qui traduisent respectivement les déplacements différentiels normaux et tangentiels pour un élément de joint d'épaisseur nulle. Une valeur élevée est affectée à la rigidité normale de ces deux interfaces, de manière à écarter toute possibilité de décollement entre les deux matériaux. En revanche, la valeur de la rigidité tangentielle est identifiée à partir des résultats de l'interrogation des FOs lors des essais d'arrachement sur cylindres avec câbles noyés et sur prismes avec câbles collés en surface. La valeur de la rigidité tangentielle obtenue englobe alors tous les déplacements différentiels aux différentes interfaces situées entre le béton et la FO en silice.

Cette première approche n'ayant pas permis de décrire correctement les résultats expérimentaux, comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, une deuxième approche a été proposée en considérant cette fois une interface imparfaite entre le revêtement primaire de la FO et la gaine des deux câbles. La valeur de la rigidité tangentielle de cette interface est à nouveau identifiée de manière à retranscrire au mieux les résultats des essais d'arrachement câble/béton, et également à rendre compte de la largeur effective de la zone Z2 des profils de déformations issus des interrogations OBR, qui dépassait dans certains cas la longueur de contact effective câble/béton (9 cm ou 7 cm selon la configuration d'instrumentation).

Les schémas de la Figure III-47 présentent les différentes conditions aux limites qui seront considérées dans les modèles associés aux quatre configurations d'instrumentation de la Figure III-46 :

- Le schéma (a) représente la configuration de l'essai d'arrachement câble/béton. Le bloc de béton est alors bloqué suivant \vec{z} au niveau de la face supérieure afin de simuler l'effet de réaction du bâti métallique. Un déplacement imposé est alors appliqué à l'extrémité supérieure du câble et permet de simuler l'effort d'arrachement appliqué par le mors supérieur de la presse de traction ;
- Le schéma (b) reprend la configuration classique de l'étude de transfert d'effort, qu'on retrouve souvent dans la littérature, permettant de déduire les courbes du pourcentage de l'effort transmis du béton sollicité en traction, vers la FO en silice. Par symétrie, nous ne modélisons ici que la demi-longueur de l'éprouvette en béton ;
- Le schéma (c) concerne le cas d'une ouverture d'une fissure préexistante dans le béton. Une pré-fissure est alors considérée dans le modèle et un déplacement est appliqué sur les deux faces de cette fissure afin de simuler son ouverture. Là encore, en raison de la symétrie du système, la modélisation n'est appliquée qu'à la moitié de l'éprouvette.

Quand une fissure se produit dans le béton, un gradient d'effort important est appliqué sur la partie de l'instrumentation située au droit de la fissure, ce qui peut engendrer un glissement sur une petite longueur du capteur, surtout dans la configuration par capteur noyé (dans le cas du câble collé en surface, une diffusion des contraintes se produit dans la couche intermédiaire d'adhésif). En raison de la nature très simplifiée de la loi de comportement adoptée dans le cadre de nos modélisations, les déplacements différentiels non réversibles (glissements) ne sont pas autorisés. Nous avons alors choisi de considérer une pré-fissure (une entaille ou ouverture initiale de dimension finie) de manière à ce que l'effet produit s'applique sur la longueur de capteur située au droit de cette discontinuité, et que la loi de comportement sans glissement demeure valide.

Le maillage est généré à partir d'éléments triangulaires quadratiques dans le cas de l'AFL noyé et à partir d'éléments tétraédriques linéaires pour les autres configurations. Le nombre de nœuds est optimisé de manière à minimiser les erreurs numériques et le temps de calcul, ce dernier augmentant rapidement avec la finesse du maillage en 3D.

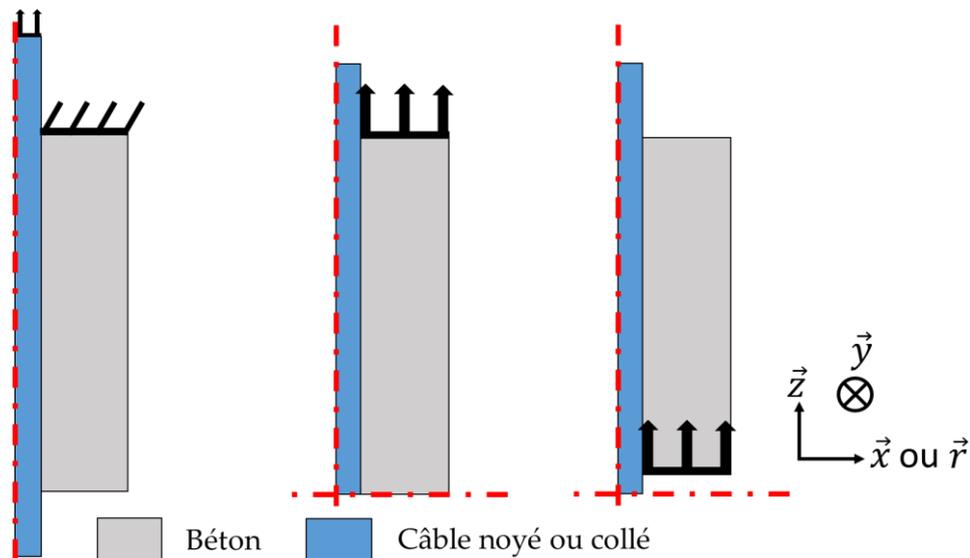


Figure III-47 : Schémas des différentes conditions aux limites considérées dans les modèles numériques : configurations (a) d'arrachement, (b) de transfert d'effort et (c) d'ouverture de fissure. Les flèches indiquent les surfaces d'application des efforts.

III.4.3. Modélisation des essais d'arrachement

Nous présentons dans ce paragraphe une première comparaison des simulations obtenues avec les deux approches proposées concernant le choix des comportements des interfaces. La confrontation avec les résultats expérimentaux permettra ensuite de retenir l'approche la plus pertinente, et d'identifier les paramètres associés aux différentes interfaces.

Les lois de comportement étant identifiées, il sera ensuite possible de modéliser le transfert d'effort dans les deux câbles à FO et pour les deux configurations d'instrumentation (noyé ou collé), puis d'estimer la réponse des capteurs à une ouverture de fissure dans le béton.

III.4.3.1. Comparaison des deux approches numériques – choix des lois de comportement d’interfaces

La Figure III-48 présente des exemples de profils de déformation le long des FO des deux câbles noyés dans le béton lors d’un essai d’arrachement, obtenus par calcul numérique suivant les deux approches (1 et 2) et expérimentalement durant les essais d’arrachement (épreuve 1), au premier palier de charge (20 N pour le câble Neubrex et 10 N pour le câble AFL).

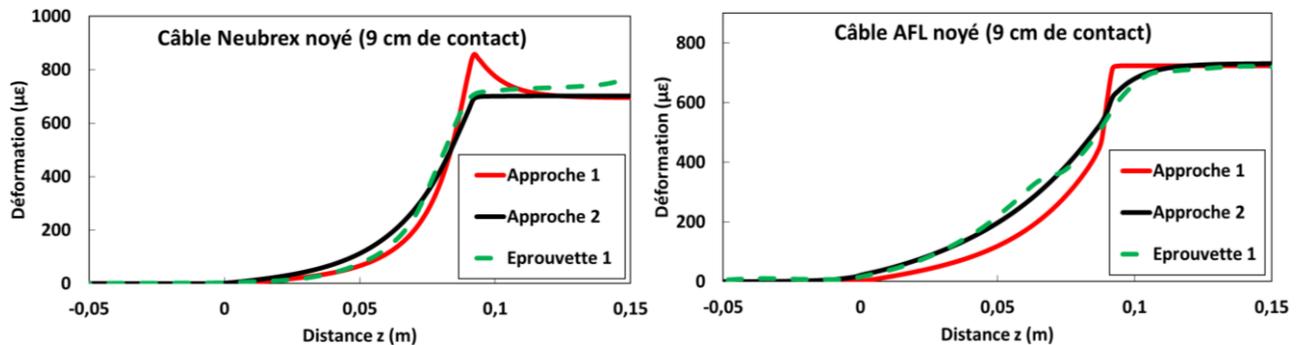


Figure III-48 : Profils de déformation le long des FO lors d’un essai d’arrachement câble noyé/béton (au premier palier de charge), simulés selon les deux approches relatives au choix des comportements d’interfaces et comparés au profil obtenu expérimentalement lors de l’essai d’arrachement.

La simulation suivant l’approche 1 fait apparaître un pic sur le profil de déformation du câble Neubrex, à la limite des zones 2 et 3 (s’étalant de l’extrémité du câble en contact avec le béton au début de la zone du câble en traction pure). Ce pic n’apparaît pas dans les résultats expérimentaux issus de l’interrogation des FOs, et son amplitude dépend du module d’élasticité des fils de renforcement mécanique du câble (l’amplitude diminue lorsque l’on abaisse le module du renforcement mécanique dans le modèle). Ce pic n’est pas présent sur la simulation effectuée selon l’approche 2, suggérant ainsi que la prise en compte d’une interface imparfaite entre la FO et la gaine externe du câble fournit une description plus réaliste de la réponse des capteurs.

Concernant le câble AFL noyé dans le béton, nous remarquons que la courbe obtenue numériquement suivant l’approche 2 fait apparaître une longueur d’ancrage supérieure à la longueur de contact câble/béton égale à 9 cm. Cette approche permet donc de retranscrire l’effet de diffusion des efforts induit par le gel polymère contenu dans la structure interne du câble AFL, et qui est observé expérimentalement.

L’approche 2 sera donc retenue par la suite pour identifier les paramètres d’interfaces des modèles numériques à partir des résultats expérimentaux issus de l’interrogation des FOs pendant les essais d’arrachement.

III.4.3.2. Identification des paramètres d'interfaces des modèles numériques

a. Cas des câbles noyés dans le béton

La détermination des paramètres d'interface est réalisée en calant les résultats numériques sur les profils de déformation expérimentaux obtenus par interrogation des FOs lors des essais d'arrachement à T0 (au premier palier de charge).

Pour chacun des deux câbles à FO, les valeurs des rigidités tangentielles aux interfaces sont identifiées en calant les simulations sur deux profils de déformation expérimentaux obtenus par interrogation des FOs sur une longueur de 9 cm environ. Ces valeurs obtenues sont vérifiées ensuite en comparant des simulations numériques et des profils de déformation expérimentaux acquis à T0 sur des éprouvettes ayant une longueur de contact câble/béton plus grande, de l'ordre de 18,5 cm (voir l'Annexe A-VI.1).

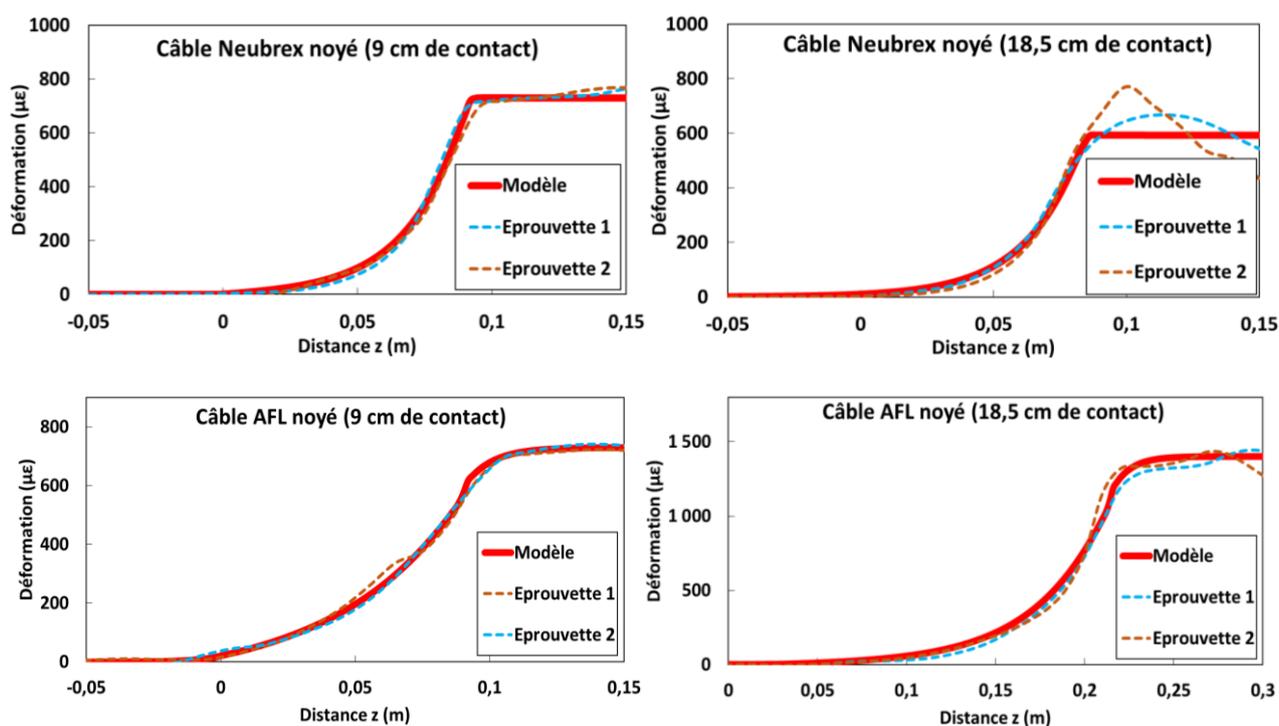


Figure III-49 : Comparaison entre les profils de déformation expérimentaux (épreuves 1 et 2) et numériques (simulations selon l'approche 2) le long des FOs, lors des essais d'arrachement (au premier palier de charge) sur cylindres avec câbles Neubrex et AFL noyés sur des longueurs de 9 cm et 18,5 cm.

Les graphes de la Figure III-49 comparent les profils de déformations théoriques (après calage des paramètres) aux profils expérimentaux enregistrés lors des essais d'arrachement à T0 (au premier palier de charge), pour une configuration par câbles à FO noyés dans le béton et pour deux longueurs de contact : 9 cm et 18,5 cm. On notera que pour les éprouvettes avec longueur de contact de 9 cm, le premier palier de charge est de 20 N pour le câble Neubrex et de 10 N pour le câble AFL. Pour la longueur de contact de 18,5 cm, le premier palier correspond à une charge d'arrachement de 15 N pour les deux câbles.

Nous avons réussi à retranscrire les courbes expérimentales en fixant les rigidités tangentielles de l'interface câble Neubrex/béton à 80 MPa/mm, de l'interface revêtement primaire FO/gaine

du câble Neubrex à 10 MPa/mm, de l'interface câble AFL/béton à 10 MPa/mm et de l'interface revêtement primaire FO/gaine du câble AFL à 15 MPa/mm.

Par ailleurs, Les courbes correspondant au câble Neubrex noyé sur une longueur de 18,5 cm mettent en évidence une longueur d'ancrage inférieure à 10 cm pour ce câble, tandis que cette longueur est supérieure à 10 cm pour le câble AFL. Ce même résultat est présenté dans l'Annexe A-VI.1 et permet de conclure que le câble Neubrex présente une meilleure adhérence dans le béton que l'AFL, ou plutôt un comportement global traduisant une meilleure adhérence et incluant le transfert d'effort entre les différentes couches internes du câble. En effet, la longueur d'ancrage supérieure à 10 cm pour le câble AFL est aussi liée à la présence du gel polymère souple dans la structure interne du câble.

b. Cas des câbles collés en surface du béton

Les résultats de l'interrogation lors des essais d'arrachement sur les prismes avec câbles collés à T0 ont permis de caler les paramètres de l'interface câble/adhésif et de l'interface revêtement primaire FO/gaine. Cela a permis d'obtenir des profils de déformation théoriques (en utilisant les modèles numériques suivant l'approche 2) très similaires aux profils de déformation expérimentaux.

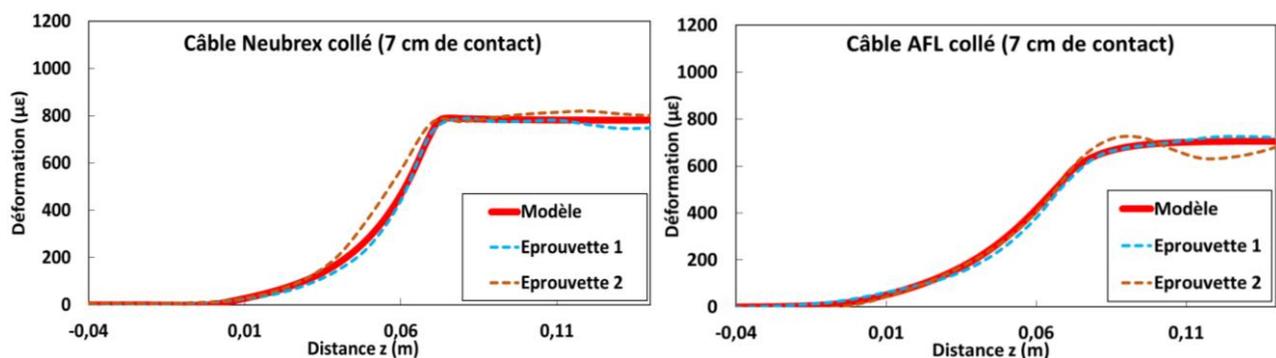


Figure III-50 : Comparaison entre les profils de déformation expérimentaux (épreuves 1 et 2) et numériques (simulations selon l'approche 2) le long des FO, lors des essais d'arrachement (au premier palier de charge) sur prismes avec câbles Neubrex et AFL collés sur des longueurs de 7 cm.

Les graphes de la Figure III-50 comparent ainsi les profils de déformations théoriques (obtenus en calant les paramètres du modèle de manière à faire correspondre au mieux les simulations avec les courbes expérimentales) et les profils expérimentaux issus de l'interrogation des FOs lors des essais d'arrachement à T0 (au premier palier de charge : 20 N pour Neubrex et 10 N pour l'AFL), pour les prismes avec câbles collés sur une longueur de contact de 7 cm. Une bonne correspondance simulations/expériences est obtenue en fixant les rigidités tangentielles de l'interface câble Neubrex/adhésif à 50 MPa/mm, de l'interface revêtement primaire FO/gaine du câble Neubrex à 10 MPa/mm, de l'interface câble AFL/adhésif à 15 MPa/mm et de l'interface revêtement primaire FO/gaine du câble AFL à 15 MPa/mm.

c. Récapitulatifs des paramètres d'entrée des modèles associés aux lois d'interfaces

Le Tableau III-6 récapitule les valeurs des rigidités tangentielles identifiées par calage des simulations théoriques sur les résultats expérimentaux. Il est important de signaler que les valeurs

des rigidités tangentielles aux interfaces déterminées expérimentalement sont beaucoup affectées par les modules des câbles (déplacement supplémentaire suite à la déformation de la gaine au niveau de l'interface, et qui est considéré comme déplacement différentiel par l'AVE de la presse) et par la dégradation du câble lors du son dénudage. Cela explique alors l'écart entre les propriétés d'interface déterminées expérimentalement et celles issues de l'identification avec le modèle.

Tableau III-6 : Valeurs des propriétés aux interfaces issues du calage des résultats numériques sur les données expérimentales.

Interface	Rigidité tangentielle (MPa/mm)			
	Cas des câble noyés		Cas des câbles collés	
	Neubrex	AFL	Neubrex	AFL
Câble/Béton ou Adhésif	80	10	50	15
Revêtement primaire de la FO/Gaine externe du câble	10	15	10	15

III.4.4. Courbes de transfert d'effort

En utilisant les valeurs des rigidités tangentielles d'interfaces précédemment identifiées, et en appliquant les conditions aux limites décrites sur la Figure III-47-b, les différents modèles numériques permettent de déterminer les courbes du transfert d'effort des deux câbles à FO noyés dans le béton et collés en surface, sur une longueur de contact commune câble/béton égale à $L = 9 \text{ cm}$ permettant d'avoir la même base de comparaison pour les deux configurations d'instrumentation. Ces courbes sont présentées sur la Figure III-51.

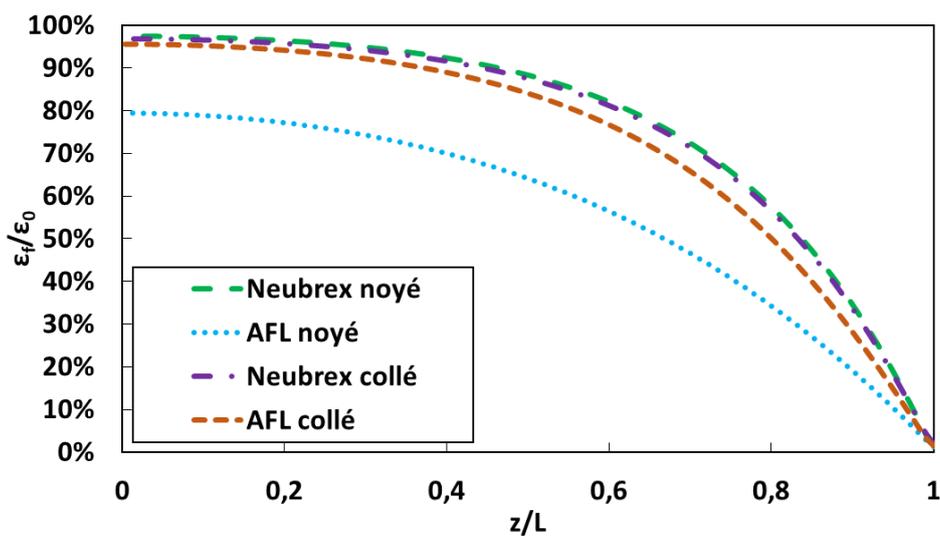


Figure III-51 : Courbes de transfert d'effort le long des câbles à FO noyés ou collés à la surface du béton.

Ces courbes montrent que le transfert d'effort maximal est supérieur à 90 % dans tous les cas d'instrumentation, sauf pour le câble AFL noyé dans le béton. Pour une configuration par câble noyé, le câble AFL adhère donc moins bien dans le béton.

De manière générale, le câble Neubrex semble mieux adhérer au béton (ou à l'adhésif) dans les deux configurations d'instrumentation. La différence est cependant beaucoup plus marquée dans la configuration avec câble noyé.

III.4.5. Influence d'une ouverture de fissure dans le béton

En utilisant les mêmes paramètres d'interfaces (Tableau III-6) et en appliquant les conditions aux limites adaptées à la présence d'une fissure préexistante (Figure III-47-c), les différents modèles numériques permettent de déterminer les profils de déformation le long des FOs au droit de la fissure, pour les deux câbles à FO et pour les deux configurations d'instrumentation. On notera que la largeur de la pré-fissure (entaille) considérée dans les modèles est de 0,5 mm, et les calculs sont effectués en prenant une ouverture de 0,05 mm de cette pré-fissure.

La Figure III.51 présente les profils de déformation théoriques obtenus sur une demi-longueur d'éprouvette.

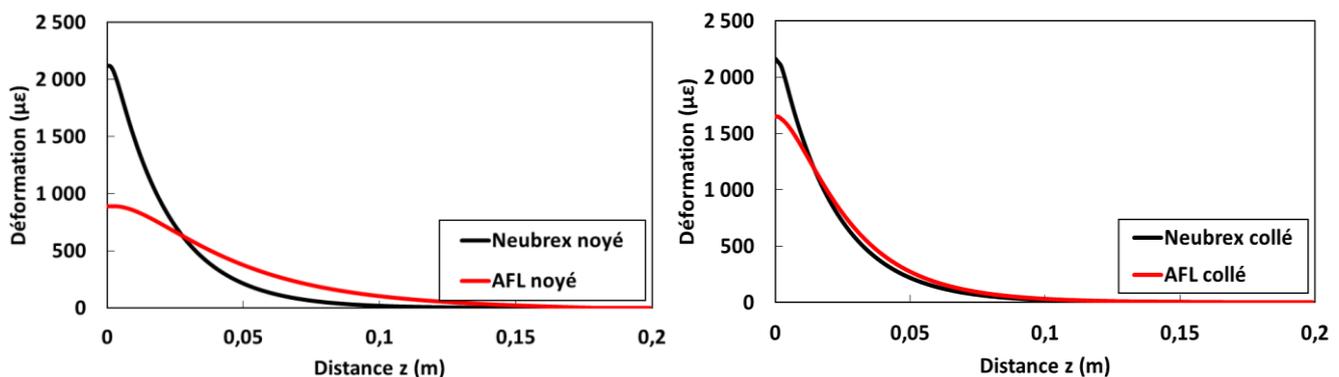


Figure III-52 : Profils de déformation le long des FO au droit d'une fissure, pour les deux câbles à FO noyés ou collés en parement.

A partir de ces profils de déformation qui illustrent l'effort transmis du béton aux FOs des deux câbles, nous remarquons que la longueur d'ancrage est maximale pour la configuration par câble AFL noyé dans le béton. Pour l'instrumentation collée en surface, les réponses des deux câbles sont en revanche relativement proches.

De manière générale, il ressort à nouveau que le mécanisme du transfert d'effort le long du câble Neubrex est plus efficace que celui observé avec le câble AFL dans les deux cas d'instrumentation, par câble noyé dans le béton et par câble collé en surface.

III.4.6. Discussion sur le domaine de validité des paramètres des modèles numériques

Les paramètres d'interfaces ont été précédemment identifiés en calant les modèles numériques sur les profils de déformation expérimentaux des FOs durant les essais d'arrachement

câble/béton au premier palier de charge (correspondant à 20 N de charge appliquée pour le câble Neubrex et à 10 N pour le câble AFL, avec une longueur de contact de 9 cm pour les câbles noyés et de 7 cm pour les câbles collés en surface). Dans la zone où le câble est en traction pure (Z3), ce premier palier de charge correspond à une déformation de traction entre $700 \mu\epsilon$ et $900 \mu\epsilon$.

Or, nous avons vu que les profils de déformation normalisée obtenus aux différents paliers de charge ne sont pas toujours confondus et que des dégradations/décohésions aux interfaces sont à l'origine des évolutions observées lorsque l'on augmente le niveau de charge.

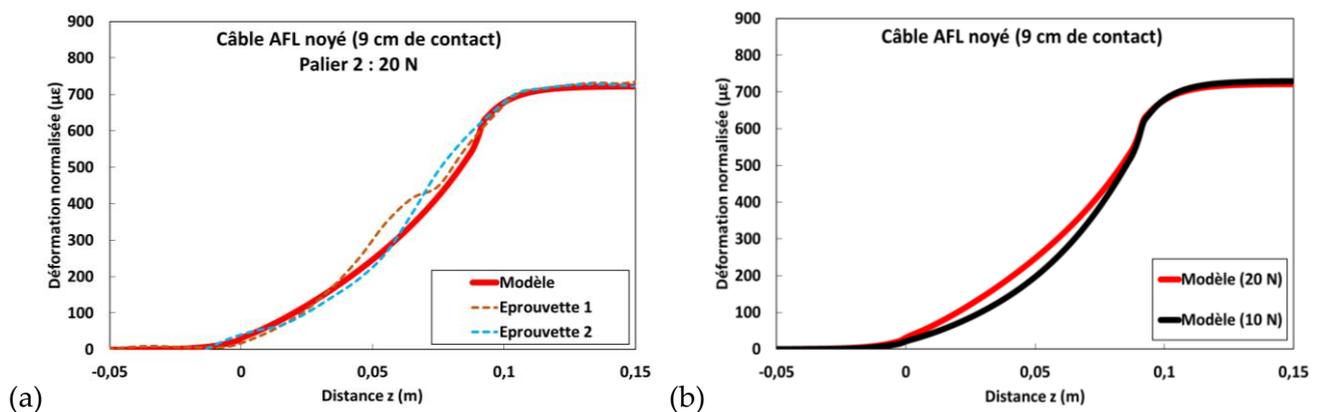


Figure III-53 : Profils de la déformation normalisée le long des FOs du câble AFL noyé dans le béton, lors des essais d'arrachement au deuxième palier de 20 N. Calage du modèle numérique sur les résultats expérimentaux (a) et comparaison entre les profils théoriques aux paliers de charge de 10 et 20 N.

La Figure III-53 montre les profils de déformation expérimentaux le long du câble AFL noyé dans les épreuves 1 et 2 lors des essais d'arrachement au deuxième palier correspondant à 20 N de charge. Pour caler le modèle numérique sur ces profils expérimentaux (courbe rouge), il est nécessaire de modifier certains paramètres d'interfaces qui avaient été identifiés sur les profils obtenus à 10 N, et d'abaisser en particulier la valeur de rigidité tangentielle de l'interface câble/béton de 10 MPa/mm à 2 MPa/mm. Ceci retranscrit une diminution de la cohésion de cette interface liée à des endommagements. La Figure III-53-b permet alors de comparer les profils théoriques obtenus avec les paramètres identifiés aux paliers de charge de 10 N et 20 N, mettant en évidence les modifications induites par l'augmentation de la charge.

De la même façon, il est possible d'évaluer l'influence de cette modification de paramètres d'interface sur la réponse de l'instrumentation (câble AFL noyé) à une ouverture de fissure. Pour ce faire, le modèle numérique est appliqué sur le système contenant une pré-fissure (Cf. conditions aux limites décrites sur la Figure III-47-b), en considérant la nouvelle valeur de rigidité d'interface câble/béton (2 MPa/mm). La Figure III-54 montre la réponse en déformation correspondante fournie par le modèle, ainsi que la courbe précédemment obtenue avec les paramètres identifiés au palier de charge de 10 N.

On note que la modification du paramètre dans le modèle a engendré une augmentation de la longueur d'ancrage et une diminution du pic de déformation au droit de la fissure.

Les résultats précédents montrent qu'il est nécessaire d'analyser les résultats numériques avec précaution. Les comparaisons entre profils de déformation devraient donc être réalisés à niveau

de charge constant pour une configuration d'instrumentation donnée, que ce soit à T0 ou après vieillissement.

De même, dans le cadre d'une instrumentation ou d'un suivi sur ouvrage, l'interprétation des résultats de mesure doit prendre en compte l'évolution du transfert d'effort liée à la dégradation du capteur dans les conditions de service et au niveau de la sollicitation mécanique que subit l'ouvrage.

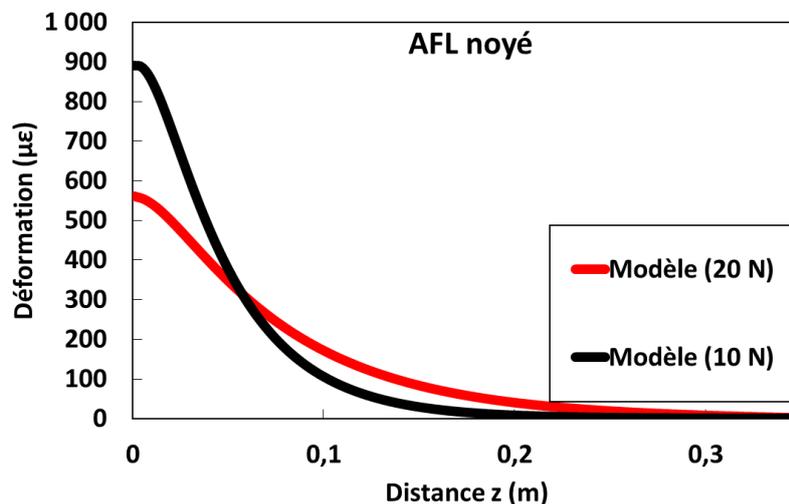


Figure III-54 : Profils de déformation théorique le long de la FO du câble AFL noyé dans le béton, au droit d'une fissure, déterminés numériquement en utilisant les paramètres identifiés sur les résultats expérimentaux obtenus aux paliers de charge de 10 N et 20 N.

Dans le paragraphe suivant, les modèles numériques seront utilisés pour tenter de décrire les profils de déformation des éprouvettes vieilles lors des essais d'arrachement. En effet, nous avons vu dans la partie III.3 que les différents vieillissements accélérés et naturel peuvent conduire à des évolutions de propriétés des matériaux constitutifs des câbles, mais aussi des différentes interfaces en présence (interfaces internes au câble et interfaces entre le câble et la structure hôte), ce qui a naturellement des conséquences sur la réponse métrologique du système d'instrumentation. Il s'agira donc de voir comment les modèles proposés peuvent retranscrire ces évolutions de manière cohérente avec les résultats expérimentaux.

III.4.7. Prise en compte des vieillissements dans les modèles numériques

L'étude de durabilité s'est intéressée à l'influence de différentes conditions de vieillissement sur les propriétés et la réponse des câbles Neubrex et AFL dans les deux configurations d'instrumentation (câbles noyés dans le béton ou collés en parement).

Par souci de concision, on s'intéressera dans cette partie uniquement à la condition de vieillissement en solution alcaline à 60 °C, qui a généré les évolutions les plus importantes lors des différentes caractérisations mécaniques et physico-chimiques, et à la configuration par câble noyé. Cette partie constitue donc essentiellement une étude de faisabilité visant à montrer que les modèles proposés peuvent retranscrire l'effet observé des mécanismes de vieillissement.

Les différentes caractérisations ont montré que le vieillissement en solution alcaline à 60 °C entraîne des dégradations pour les deux câbles noyés dans le béton :

- Pour le câble AFL, on a ainsi constaté une dégradation par hydrolyse alcaline de la gaine hytrel, conduisant à une diminution du module d'Young de la gaine et à une dégradation rapide des propriétés de l'interface câble/béton ;
- Pour le câble Neubrex, l'évolution de la structure cristalline de la gaine EVA au cours du vieillissement (en particulier l'augmentation du taux de cristallinité), s'accompagne d'une augmentation du module d'Young de la gaine. L'infiltration de solution aux niveau des interfaces câble/béton et des interfaces internes conduit également à une diminution rapide des propriétés d'interfaces.

On s'attachera donc à évaluer l'impact des variations de module d'Young de la gaine des câbles et des propriétés d'interfaces sur les résultats des modèles numériques.

III.4.7.1. Influence des évolutions de module d'Young de la gaine externe des câbles

Des simulations ont été réalisées en faisant varier les valeurs du module d'Young de la gaine externe des câbles dans les modèles numériques, afin d'évaluer la sensibilité des profils de déformation vis-à-vis de ce paramètre :

- Pour le câble Neubrex, on a ainsi considéré des valeurs comprises entre 100 % et 150 % de la valeur de module d'Young E_r de la gaine mesurée à T0 (soit E_r , $1,25 \times E_r$ et $1,5 \times E_r$), en accord avec l'augmentation de module observée expérimentalement au cours du vieillissement en solution à 60 °C ;
- De la même façon, pour le câble, AFL on a considéré des variations comprises entre 25 % et 100 % de la valeur de module d'Young E_r de la gaine mesurée à T0 ($0,25 \times E_r$, $0,50 \times E_r$, $0,75 \times E_r$ et E_r), cohérentes avec la diminution de module constatée lors des essais mécaniques sur échantillons de gaines vieilles.

La Figure III-55 présente ainsi les profils de déformation théoriques décrivant les essais d'arrachement pour les deux câbles à FO noyés dans le béton (avec une longueur de contact de 9 cm, au premier palier de charge (10 N pour le câble AFL et 20 N pour le câble Neubrex), obtenus en faisant varier le module d'Young dans les modèles numériques.

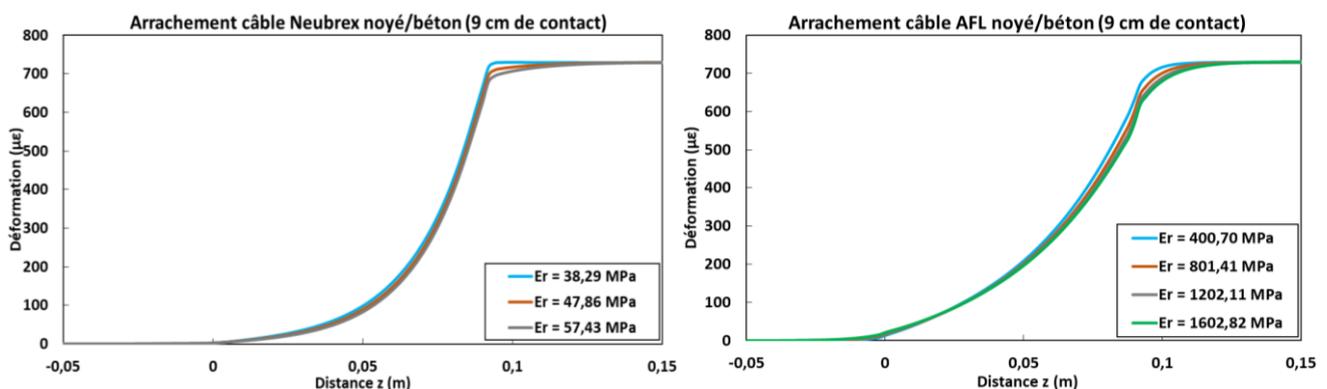


Figure III-55 : Profils de déformations théoriques le long des deux câbles à FO noyés dans le béton, correspondant au premier palier de charge lors d'un essai d'arrachement câble/béton, en considérant différentes valeurs du module d'élasticité E_r de la gaine externe des câbles.

Il ressort que les profils de déformations varient très peu lorsqu'on fait varier la valeur du module d'élasticité de la gaine externe des deux câbles. Quelques modifications mineures de ces profils sont localisées à la frontière entre les zones Z2 (segment du câble en contact avec le béton) et Z3 (segment libre en traction pure).

On peut donc conclure que les évolutions de propriétés mécaniques des gaines des deux câbles au cours du vieillissement ne sont pas directement responsables des changements observés sur les profils de déformation expérimentaux des éprouvettes vieilles. Il n'est donc pas indispensable de faire varier ce paramètre dans les modèles numériques pour retranscrire l'effet des vieillissements.

III.4.7.2. Influence de l'évolution des paramètres d'interfaces

On cherche ensuite à voir si un ajustement de certaines propriétés d'interfaces dans les modèles peut permettre de caler les résultats théoriques sur les profils de déformation expérimentaux enregistrés sur éprouvettes vieilles en solution alcaline à 60 °C lors des essais d'arrachement.

La Figure III-56 montre qu'il est possible d'effectuer ce calage entre les courbes expérimentales et théoriques des deux câbles noyés (aux échéances T3 et T1 pour le Neubrex et l'AFL, respectivement), mais que l'ajustement porte sur des propriétés d'interfaces différentes dans les deux cas :

- Pour le câble Neubrex noyé, une bonne correspondance théorie/expérience peut être obtenue en modifiant la valeur de rigidité tangentielle de l'interface revêtement primaire de la FO/gaine externe du câble (on introduit une valeur de 0,1 MPa/mm à l'échéance T3, contre une valeur d'entrée de 10 MPa/mm à T0). Ce résultat confirme que la dégradation de cette interface interne du câble, liée à l'infiltration de la solution alcaline dans les vides présents au niveau de cette interface, est derrière les modifications constatées sur la réponse en déformation du capteur, et qu'une dégradation de l'interface câble/béton seule ne suffit pas pour expliquer l'augmentation de la longueur de la zone Z2 ;
- Pour le câble AFL noyé, une bonne correspondance est obtenue en modifiant la valeur de rigidité tangentielle de l'interface câble/béton (qui passe à 0,01 MPa/mm à T3, contre 10 MPa/mm à T0). Ceci confirme l'impact majeur de la dégradation par hydrolyse alcaline à la surface de la gaine en hytrel du câble AFL sur le mécanisme de transfert d'effort câble/béton.

Il faut rappeler que l'approche numérique présentée dans cette partie a pour objectif de présenter des modèles simplifiés pour mieux comprendre le mécanisme du transfert d'effort dans les deux câbles à FO et identifier les paramètres qui influencent le plus ce transfert d'effort et qui sont à l'origine des évolutions remarquées lors des essais expérimentaux. Par conséquent, cette première approche qui assume un comportement élastique linéaire de tous les matériaux et une loi d'interface linéaire simplifiée, ne permet donc pas de retranscrire parfaitement les courbes expérimentales après dégradation, qui font apparaître des fluctuations liées à une dégradation non uniforme le long du câble.

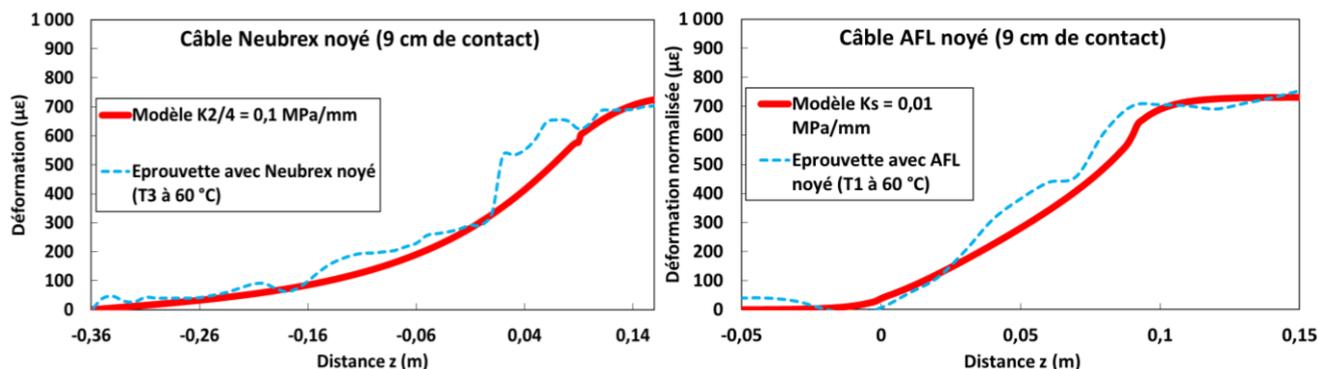


Figure III-56 : Calage des profils théoriques de déformation normalisée sur les données expérimentales obtenues par interrogation des FOs des deux câbles à FO noyés dans les cylindres de béton en solution alcaline à 60 °C, au premier palier de charge ($K2/4$: rigidité tangentielle de l'interface gaine du câble Neubrex/revêtement primaire FO ; Ks : rigidité tangentielle de l'interface câble AFL/béton).

III.5. Conclusion et perspectives du chapitre III

Ce chapitre présente l'ensemble des résultats du programme expérimental visant à étudier la durabilité de deux câbles à FO utilisés pour instrumenter les ouvrages en béton (et en BA). Deux configurations d'installation de ces capteurs sont traitées : câbles à FO noyés dans le béton et câbles collés en surface. Les résultats de cette étude de durabilité ont permis de mieux appréhender le comportement des bétons des deux formulations, des deux câbles à FO noyés et collés et de l'adhésif de collage, et ont également aidé à réexaminer de manière critique les protocoles de vieillissement utilisés et d'en envisager d'autres plus adaptés aux facteurs d'accélération visés. Une première approche numérique a également été développée dans la dernière partie de ce chapitre, afin de mieux comprendre le mécanisme de transfert d'effort dans les deux câbles à FO noyés ou collés, et de confirmer les résultats expérimentaux.

Dans ce paragraphe nous résumerons en premier lieu l'ensemble des tendances majeures apparues aux échéances des différents vieillissements, afin des dresser une liste des recommandations qui permettront aux fabricants des câbles à FO d'améliorer leurs produits et de proposer des références plus adaptées aux utilisations envisagées. Sur la base des comparaisons entre les résultats des vieillissements accélérés et naturel, nous présenterons quelques pistes d'amélioration des protocoles de vieillissement qui pourraient permettre d'aller plus loin dans des études ultérieures consacrées à la durabilité des capteurs à FO noyé ou collé en parement. Dans la dernière partie de ce paragraphe, nous citerons quelques perspectives d'amélioration de l'approche numérique proposée.

Les conditions de conservation des éprouvettes de béton avaient pour objectif de reproduire les vieillissements appliqués sur les blocs ODOBA afin d'étudier la durabilité des câbles à FO destinés à instrumenter ces blocs. Ces protocoles n'ont, néanmoins, pas empêché le développement d'un couplage RAG/RSI (avec une dominance de la RSI) dans les cylindres du béton ZA conservés en solution alcaline. Les résultats des essais expérimentaux (caractérisation mécanique, suivi dimensionnel et massique et observations par MEB-EDX) et les données de la littérature ont permis d'avancer des hypothèses pour expliquer l'absence des gonflements dans les prismes de béton en solution alcaline (une lixiviation prononcée des réactifs qui forment l'ettringite différée, en raison des dimensions modestes de ces prismes de béton).

Les essais de traction et d'arrachement, réalisés sur les échantillons des deux câbles à FO et de l'adhésif, puis sur les éprouvettes de béton instrumentées ont montré des évolutions qui ont permis de cerner les principaux mécanismes gouvernant la durabilité des deux câbles à FO pour les deux configurations d'instrumentation.

- En solution alcaline à haute température, la gaine externe du câble AFL se dégrade sévèrement et le polymère qui la constitue se dissout progressivement par hydrolyse alcaline, causant ainsi une perte de masse et une diminution du diamètre du câble. Les analyses IRTF et DSC ont montré que la couche thermoplastique de ce revêtement est bien constituée d'hytrel. Contrairement aux propos du fournisseur, ce câble n'est pas adapté pour une utilisation en milieu cimentaire ;
- Un gonflement est observé sur la gaine externe du câble Neubrex vieilli en solution alcaline à température élevée et serait expliqué par l'hydrolyse des groupes acétates du copolymère (EVA/PP) qui la constitue ;
- Les vides présents au niveau de l'interface entre la gaine du câble Neubrex et la FO facilitent l'infiltration de la solution alcaline qui dégrade de manière importante la qualité de cette interface. Le mécanisme de transfert d'effort en est, par conséquent, négativement affecté.

Des évolutions mineures sont apparues au niveau du revêtement externe du câble Neubrex à base d'EVA/PP (gonflement du câble) et sont expliquées par l'hydrolyse des groupes acétates de ce copolymère. Ce câble est également muni d'une bonne protection mécanique, assurée par les deux fils métalliques, qui compense l'effet négatif que pourrait avoir la souplesse de la gaine du câble sur le transfert d'effort. On observe également une augmentation du module d'Young de la gaine au cours des vieillissements, qui a été attribuée à des évolutions de la microstructure cristalline du copolymère EVA. En revanche, des petits défauts de fabrication de ce câble au niveau de l'interface câble/FO (présence des vides au niveau de cette interface) permettent une infiltration facile des agents agressifs, accentuée dans notre étude en raison de l'exposition des extrémités des échantillons de ce câble aux agents agressifs. Pour une configuration du câble Neubrex collé en surface, ce dernier semble bien adhérer dans l'adhésif après les premières échéances des essais de vieillissement accéléré. Toutefois, les résultats du vieillissement sur site naturel ont fait apparaître une dégradation de l'interface, qui n'est pas corrélée à l'amélioration des propriétés mécaniques de l'adhésif X120 observée durant cette exposition.

Pour ce qui est du câble AFL, sa dégradation majeure est liée à l'hydrolyse des PET qui composent son revêtement externe en solution alcaline à haute température. Cette dégradation induit une dissolution et une perte de masse de ce revêtement, entraînant une décohésion du câble qui glisse alors facilement dans le béton. L'état lisse de la surface externe du câble et la présence du gel polymère dans la structure interne du câble ne permettent pas d'assurer un transfert d'effort optimal surtout pour la configuration par câble noyé dans le béton. Les interfaces internes du câble AFL sont néanmoins de bonne qualité empêchant l'infiltration de la solution alcaline à partir des extrémités des échantillons vieillis.

A partir de ces résultats, il est possible de lister quelques recommandations en vue d'améliorer la composition des câbles à FO et de leur conférer une meilleure durabilité dans le cadre des applications de génie civil :

-Le copolymère EVA semble offrir une résistance chimique convenable, et sa souplesse permet d'assurer une bonne protection mécanique (résistance aux chocs) des composants internes du capteur, mais cette souplesse peut également limiter le mécanisme de transfert d'effort. Une protection mécanique supplémentaire (comme les fils métalliques dans le cas du câble Neubrex) semble donc indispensable pour garantir un niveau de rigidité mécanique permettant un transfert d'effort efficace ;

-Les revêtements en PET (de type hytrel) sont à proscrire pour l'instrumentation noyée dans le béton, car ils peuvent être sévèrement dégradés sous l'effet de la solution interstitielle du béton. Il avait déjà été préconisé dans la thèse de J.M. Hénault [14] de remplacer ce type de matériau par un polyéthylène haute densité (PEHD) stabilisé, exempt de groupes hydrolysables.

-L'ajout des reliefs en surface du revêtement externe du capteur semblent améliorer son adhérence dans le béton (ou dans l'adhésif). Ces reliefs de surface permettent agissent comme des verrous permettant d'améliorer l'ancrage mécanique, en complément de l'adhésion chimique basée sur la formation de liaisons iono-covalentes ;

-Les interfaces internes des capteurs (l'interface câble/FO en particulier) doivent être de qualité. Une décohésion au niveau de ces interfaces affecte automatiquement le mécanisme du transfert d'effort.

En ce qui concerne les protocoles des vieillissements accélérés adoptés durant cette étude, nous pouvons conclure que pour une configuration par câble noyé, les essais d'immersion en solution alcaline se sont révélés très agressifs, avec un facteur d'accélération d'autant plus grand que la température de la solution alcaline était élevée. L'infiltration de la solution alcaline par les extrémités des câbles à FO contribue également à accentuer l'agressivité de l'essai accéléré. Ces expositions en solution alcaline à haute température sont donc très agressives et les évolutions constatées peuvent ne pas être représentatives des mécanismes intervenant dans les conditions réelles de service, ou alors uniquement à très long terme. Cette conclusion se justifie également par l'absence de dégradations sévères constatée pour les échantillons conservés sur site de vieillissement naturel et en solution alcaline à 20 °C.

En ce qui concerne les vieillissements appliqués sur les prismes instrumentés par câbles collés, les éprouvettes vieilles sur site naturel ont connu des évolutions plus importantes que celles vieilles par cycles d'immersion/séchage et gel/dégel. Ceci pourrait résulter du couplage hygrothermique et de l'action du rayonnement UV qui interviennent dans le vieillissement naturel mais pas dans les protocoles accélérés.

La dernière partie de ce chapitre présente des modèles numériques simplifiés permettant d'étudier le mécanisme de transfert d'effort pour les deux câbles à FO et pour les deux configurations d'instrumentation possibles. Le comportement des matériaux a été considéré linéaire élastique pour cette approche et les interfaces sont considérées parfaites à l'exception des interfaces câble/béton et gaine/FO où des lois de comportement linéaires ont été adoptées. Cette approche a bien permis de valider les résultats expérimentaux et de caler les paramètres des modèles afin de mieux prédire la réponse du câble lors de l'apparition d'une fissure dans une structure instrumentée. Ces modèles ont également permis de rendre compte des

évolutions du transfert d'effort observées expérimentalement dans les conditions de vieillissement accéléré, à travers un ajustement des paramètres d'interface.

Deux pistes d'amélioration peuvent être proposées en perspective de cette approche numérique. Une première voie consisterait à réaliser des essais complémentaires de mesure de l'ouverture des fissures dans des structures instrumentées, afin d'évaluer la réponse des capteurs in situ, de valider les résultats numériques et d'intégrer les phénomènes additionnels qui peuvent apparaître avec des ouvertures de fissures importantes (décollement des capteurs, glissements intercouches, dépassement de la limite élastique du comportement certaines couches).

La deuxième piste d'amélioration concerne les lois de comportement considérées dans les modèles numériques. En effet, que ce soit pour les matériaux ou pour les interfaces entre les différentes couches, il serait plus réaliste de considérer des lois de comportement comprenant une phase initiale linéaire suivie d'une phase de glissement (par exemple, alimenter les modèles avec les valeurs des contraintes d'adhérence déterminées par essais d'arrachement). Cette modification dans les lois de comportement permettra de tenir compte des variations dans les profils de déformation de la FO d'un câble, noyé ou collé, selon l'ordre de grandeur de déformation de la structure instrumentée.

IV. Instrumentation par capteurs à FO des blocs en béton du projet ODOBA

IV.1. Introduction

En complément des différents essais de durabilité menés à l'UGE sur les éprouvettes de laboratoire (chapitre III), plusieurs interventions ont été réalisées à l'IRSN Cadarache, dans le cadre de cette thèse, afin d'instrumenter par capteurs à FO les blocs en béton de grande dimension du projet ODOBA. Comme pour les essais sur éprouvettes décrits au chapitre II, les capteurs à FO équipant les blocs ont été soit noyés dans le béton soit collés en parement. L'instrumentation est effectuée en utilisant les mêmes câbles à FO que ceux dont la durabilité est étudiée à l'UGE. L'objectif principal de ces interventions à l'IRSN est de démontrer la faisabilité de la mise en place et de l'utilisation sur le long terme des FOs pour le suivi, par mesures réparties, des pathologies de gonflement du béton de structures à échelle pleinement représentative. Pour cela, des mesures de profils de déformation ont été réalisées dans ces blocs massifs à plusieurs échéances, afin de suivre l'éventuelle apparition et le développement des pathologies. C'est ensuite à partir de ces mesures, qu'il est possible de conclure sur la réactivité de la composition du béton constitutif des blocs vis-à-vis de deux pathologies en particulier : la RSI et la RAG.

Dans la première partie de ce chapitre, nous précisons le contexte et les objectifs du projet ODOBA. Une deuxième partie sera consacrée à la présentation de la plateforme ODE « Observatoire de la durabilité des enceintes » et plus particulièrement à la description des blocs de béton ainsi que des protocoles et dispositifs expérimentaux destinés à favoriser leurs vieillissements. Le terme « vieillissement » fait référence dans ce chapitre à l'ensemble des évolutions du béton durci, qu'elles soient positives, notamment dues à l'hydratation du ciment ou défavorables car dues à l'évolution des pathologies. Les « protocoles de vieillissement » sont relatifs aux conditions environnementales hygrothermiques subies par les blocs (ou éprouvettes). Ces conditions pouvant être naturelles (exposition à l'air libre) ou imposées par des dispositifs spécifiques (piscine par exemple). Ensuite, une troisième partie permettra de décrire les différentes étapes de l'instrumentation des blocs par capteurs à FO. Ce chapitre se terminera par la présentation des premiers résultats de mesure qui permettront de valider l'instrumentation, de fournir les premières conclusions sur l'état des blocs puis de formuler des hypothèses qui nécessiteront d'être vérifiées lors des échéances de mesure à venir.

IV.2. Présentation du projet ODOBA

IV.2.1. Contexte et objectifs du projet

L'évolution des propriétés mécaniques et physico-chimiques des bétons constitue un point de questionnement essentiel dans les réflexions menées actuellement sur la possibilité de prolonger la durée d'exploitation des centrales nucléaires ainsi que des structures destinées au stockage des déchets radioactifs. Pour les durées de service souhaitées, les propriétés physico-chimiques et mécaniques des bétons de ces ouvrages sont en effet susceptibles d'évoluer significativement. En particulier, trois phénomènes ont été identifiés comme principalement problématiques lors du vieillissement des bétons des ouvrages nucléaires : le retrait, le fluage et les pathologies de gonflement interne. La corrosion des armatures en acier s'ajoute aux pathologies menant à la dégradation de ces ouvrages. Ces différentes pathologies sont

détaillées dans le chapitre de bibliographie (partie I.11). On rappelle cependant que le terme de pathologie (ou réaction) de gonflement interne couvre la RSI et la RAG.

Le projet ODOBA vise principalement à étudier les effets des pathologies de gonflement sur des corps d'épreuve d'échelle représentative. Il complète ainsi les études menées en laboratoire à l'IRSN ou à l'UGE sur des éprouvettes de petites dimensions qui ont tendance à découpler les différents phénomènes, et qui, seules, ne permettent pas d'appréhender les effets d'échelle.

Au travers des multiples essais réalisés, le projet ODOBA ambitionne de mieux comprendre les phénomènes qui initient et accélèrent le développement des pathologies à l'échelle de la structure afin de développer des outils pour la prédiction de l'évolution des caractéristiques des ouvrages atteints de pathologies. Les compositions de béton utilisées pour la fabrication des blocs sont généralement inspirées de formulations des centrales nucléaires déjà existantes. Les résultats des essais sur les blocs ODOBA permettront donc d'apporter des éléments de décisions sur la possibilité de prolonger la durée d'exploitation de ces centrales de 40 à 60 ans.

IV.2.2. Démarche d'étude et dispositifs expérimentaux du projet ODOBA

Les études menées dans le cadre du projet ODOBA nécessitent notamment de développer les pathologies de gonflement interne dans des maquettes de béton voulues représentatives d'un mur d'enceinte, par leurs dimensions et la formulation du béton constitutif. Ces corps d'épreuve de grande taille sont dénommés par la suite « blocs de béton ». L'étude est enrichie par des expérimentations menées à l'IRSN sur des éprouvettes de taille réduite. Des protocoles visant à accélérer, ou simplement déclencher, le développement des pathologies de gonflement ont été appliqués aux blocs. Les éprouvettes sont soumises à des protocoles similaires et les résultats obtenus aux différentes échelles sont comparés puis analysés au regard de la littérature.

D'autres sujets connexes sont abrités dans le projet ODOBA, impliquant différents partenaires et menés le plus souvent dans le cadre de thèses ou de post-doctorats. Le travail de cette thèse fait partie de ces projets et affiche comme objectif l'évaluation de l'aptitude des mesures réparties par capteurs à FO, à détecter et à suivre les pathologies de gonflement dans les blocs en béton du projet, et par extension dans les structures du parc nucléaire.

Des moyens expérimentaux importants sont mis en œuvre dans le cadre du projet ODOBA. Parmi ceux-ci, la plateforme ODE constitue un élément essentiel du projet sur lequel les blocs de béton sont fabriqués, stockés et soumis aux protocoles d'étude. Une description détaillée de cette plateforme est proposée au paragraphe IV.3.1. Les divers blocs sont réalisés en adaptant la formulation du béton et les conditions de conservation aux phénomènes à étudier. Les caractéristiques détaillées des blocs, de leur instrumentation ainsi que des dispositifs expérimentaux destinés à appliquer les protocoles d'essais sont présentés dans le paragraphe IV.3.2.

IV.3. Plateforme ODE et blocs en béton du projet ODOBA

IV.3.1. Plateforme ODE

La plateforme ODE est la dalle expérimentale dédiée à l'étude des blocs de béton du projet ODOBA. C'est en effet sur celle-ci, que les blocs sont fabriqués, soumis au divers protocoles liés aux réactions de gonflement, puis suivis métrologiquement. S'étalant sur une surface de 1700 m², cette dalle est conçue pour contenir un total approximatif de 60 blocs.

La dalle est équipée de locaux annexes permettant de gérer les effluents (dans 2 cuves en sous-sol) ainsi que le stockage du matériel et des matériaux. La plateforme dispose de trois secteurs distincts dont l'un est en partie dédié au vieillissement naturel (voir Figure IV-1 et schéma (b) en particulier).

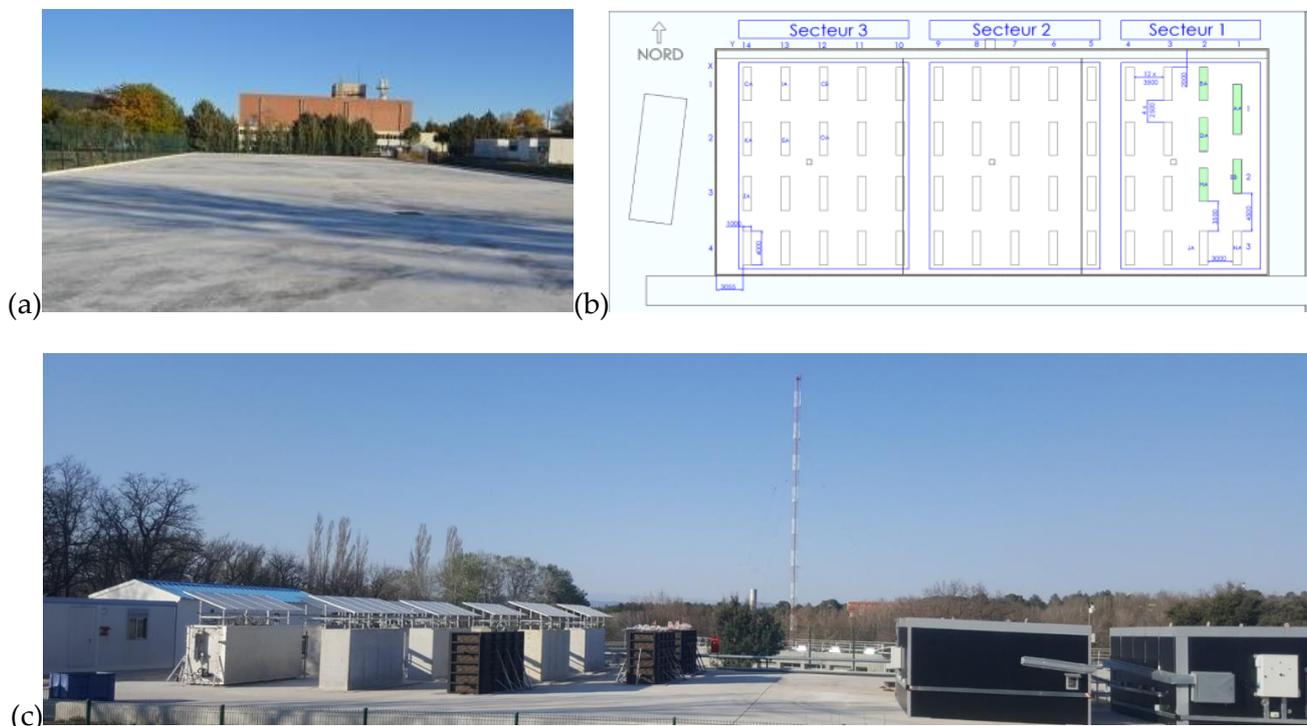


Figure IV-1 : (a) Plateforme ODE avant fabrication des blocs (10/11/2015) ; (b) Plan de localisation des blocs ; (c) Plateforme ODE au 27 mars 2019.

IV.3.2. Blocs de béton

Les blocs de béton sont disposés en rangées sur la plateforme (voir Figure IV-1-b). Le volume de chaque bloc est de $1 \times 2 \times 4 \text{ m}^3$ (Figure IV-2) pour un poids d'environ 20 tonnes. Les blocs sont répertoriés selon trois catégories : des blocs de référence ne devant pas développer de pathologies, des blocs potentiellement pathologiques soumis aux conditions météorologiques de la plateforme (on parle alors de « vieillissement naturel ») et des blocs potentiellement pathologiques soumis à des protocoles expérimentaux visant à accélérer le développement des pathologies (on parle alors de « vieillissement accéléré »). Les pathologies de gonflements visées sont : la RAG, la RSI et leur couplage. Les blocs sont soit ferrillés (blocs de BA) soit non armés (blocs massifs de béton) et sont instrumentés avec divers capteurs noyés permettant de

suivre, à plusieurs emplacements du bloc et de manière continue dans le temps, la température et les déformations.

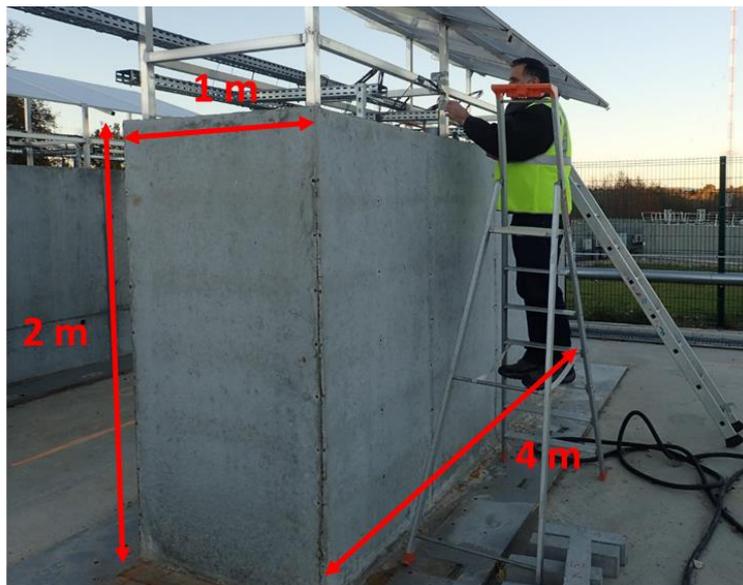


Figure IV-2 : Photo d'un bloc ODOBA prise en novembre 2018.

IV.3.2.1. Instrumentation des blocs

Afin de suivre en permanence la variation de la température dans les blocs ainsi que l'évolution des déformations (et détecter le développement des pathologies de gonflement), des thermocouples ainsi que des cordes vibrantes ont été installés dans les blocs. Pour les blocs non armés, des portiques métalliques ont été utilisés comme supports d'installation des différents capteurs (Figure IV-3-a). Pour les blocs en BA, l'installation des capteurs a été effectuée en s'appuyant directement sur le ferrailage du bloc (Figure IV-3-b).

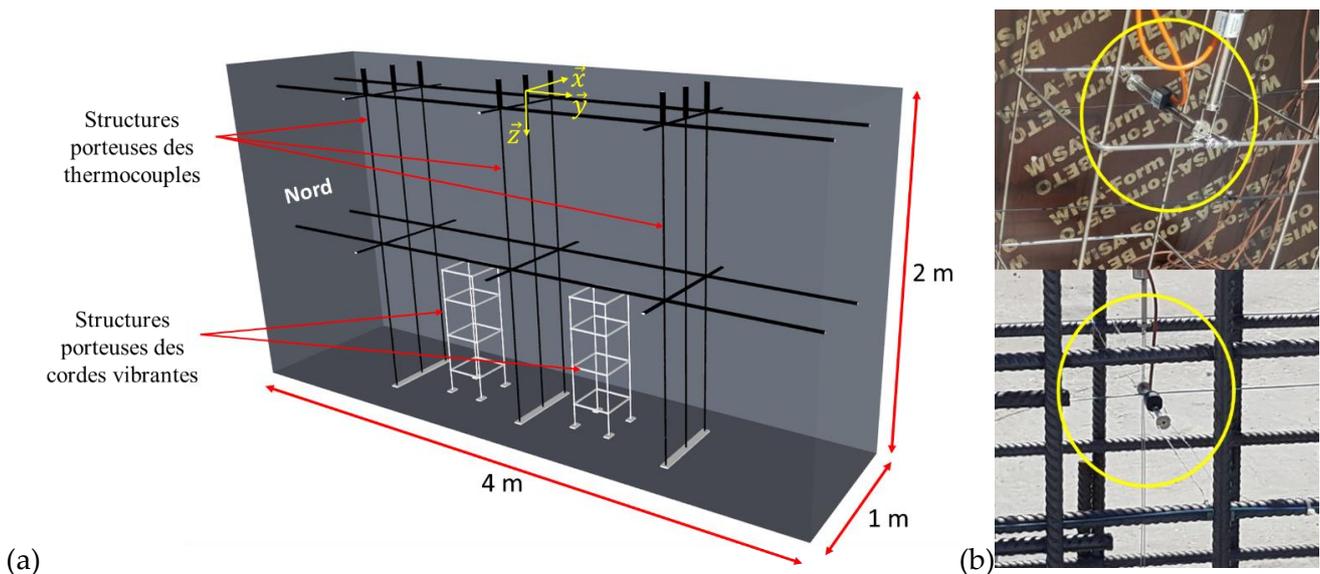


Figure IV-3 : (a) Structures porteuses des capteurs dans un bloc non ferrillé ; (b) Cordes vibrantes installées dans deux blocs (bas : un bloc armé et haut : un bloc non armé).

Comme le montre le plan de la Figure IV-3-a, les structures métalliques support des cordes vibrantes sont placées dans deux régions spécifiques des blocs non ferrillés. Les capteurs à

corde vibrante sont donc localisés dans ces deux uniques régions. Six cordes vibrantes (de longueur 15 cm et de référence MicroVib commandées chez le fournisseur Cementys) ont été installées dans chaque bloc. Pour les blocs non armés, trois cordes ont été positionnées sur chacune des deux structures porteuses suivant les trois directions \vec{x} , \vec{y} et \vec{z} (voir repère de la Figure IV-3-a) permettant ainsi d'obtenir une mesure de déformation suivant les trois directions de l'espace à l'emplacement de chaque structure porteuse. Pour les blocs armés (ne disposant pas de structure porteuse), les cordes vibrantes ont été disposées de manière identique en utilisant le ferrailage (Figure IV-3-b bas).

Les blocs de béton sont de plus équipés de 53 thermocouples de type T (cuivre/constantan pour des mesures de -185 °C à 300 °C). Les thermocouples placés dans les blocs non armés sont installés au niveau des trois structures verticales dessinées en noir dans le schéma (a) de la Figure IV-3. Les thermocouples sont donc placés sur trois plans (\vec{x} , \vec{z}), un plan placé vers le côté nord du bloc, un plan au centre du bloc et un plan placé vers le côté sud du bloc. Cette disposition permet de couvrir ainsi globalement toutes les régions du bloc et permet donc une connaissance raisonnablement détaillée des gradients de température dans chaque bloc. Les positions des différents thermocouples sur les trois structures verticales sont détaillées dans le plan de la Figure IV-4. Les coordonnées indiquées sur la Figure IV-4 sont relatives au repère dessiné Figure IV-3-a et dont l'origine se situe au centre de la face supérieure du bloc. Comme précédemment, les thermocouples ont été disposés aux mêmes emplacements dans les blocs armés en utilisant le ferrailage (les blocs armés ne disposant pas de structure porteuse verticale).

A l'aide des cordes vibrantes et des thermocouples installés dans les blocs, un suivi de température et de déformation est effectué de manière continue dans le temps et une mesure est enregistrée par l'ensemble des capteurs toutes les 15 min.

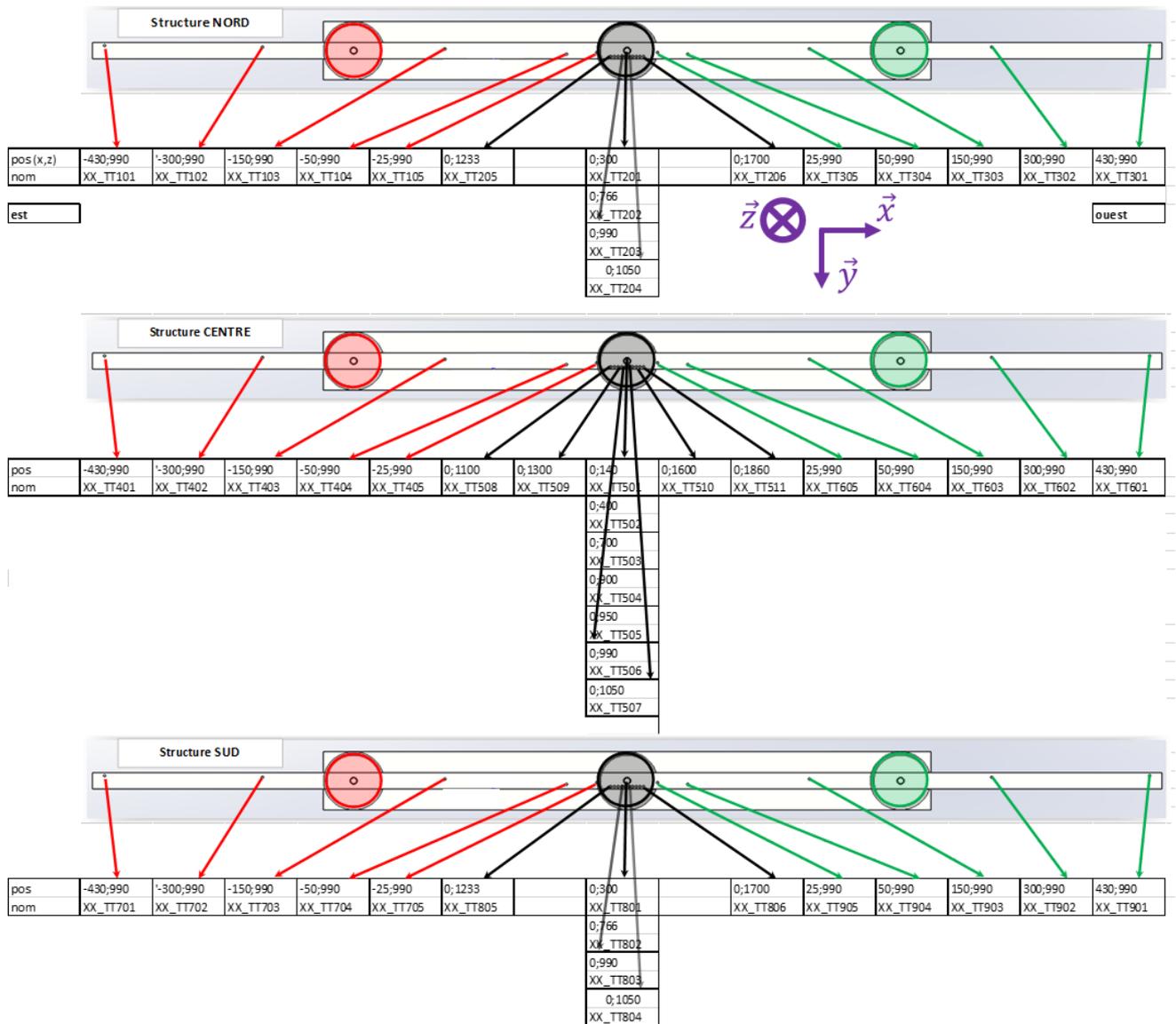


Figure IV-4 : Coordonnées des différents thermocouples dans un bloc de béton non armé pour une origine au centre de la face supérieure du bloc.

IV.3.2.2. Coulage, traitement et conditions de vieillissement des blocs

La composition du béton constitutif de chaque bloc ainsi que le protocole de vieillissement qui lui est appliqué dépendent du type de pathologie que l'on cherche à étudier. Des granulats réactifs sont ainsi utilisés dans les blocs destinés à développer de la RAG. Quant à la RSI, son déclenchement est incité par un traitement thermique appliqué sur le bloc immédiatement après le coulage. Des dispositifs spéciaux sont mis en place pour la réalisation de ces traitements thermiques.

Avant le coulage des blocs non armés, l'instrumentation et les coffrages sont préparés. Dans un premier temps, les structures métalliques destinées au support des capteurs (Figure IV-3-a) sont installées avec une partie du coffrage. Les capteurs sont ensuite mis en place. Une fois l'instrumentation finalisée, la dernière paroi du coffrage est mise en place. Un serrage de l'ensemble du coffrage est finalement effectué préalablement au coulage du béton.

Pour les cas des blocs en BA, la cage d'armature est assemblée en premier. Ensuite, les différents capteurs sont implantés dans le bloc en s'appuyant sur les armatures. Une fois l'installation des capteurs finalisée, le ferrailage instrumenté est déplacé et inséré dans le coffrage préinstallé à l'emplacement prévu pour le bloc. Le coulage du béton est finalement réalisé.

Les photos de la Figure IV-5 illustrent les étapes de fabrication de deux blocs : un premier bloc nommé EB en BA (photos du haut) et un deuxième bloc nommé IB non ferrillé (photos du bas).



Figure IV-5 : Phases de fabrication de deux blocs : bloc EB armé (trois photos du haut) et Bloc IB non armé (trois photos du bas).

La fabrication des blocs en béton étant une étape cruciale du projet ODOBA, différentes opérations sont mises en œuvre pour veiller au bon déroulement du coulage et du décoffrage. Par exemple, le lendemain du coulage d'un bloc non ferrillé et directement après son décoffrage, la cure du béton est optimisée par un dispositif d'isolation thermique (calorifugeage) appliqué sur le bloc et permettant de ralentir les échanges thermiques avec l'extérieur. Ainsi, le bloc est protégé d'une fissuration excessive qui pourrait être induite par un gradient thermique trop important et l'absence de ferrailage.

Pour les blocs destinés à développer de la RSI, un traitement thermique est appliqué sur le bloc directement après coulage afin de favoriser la formation d'ettringite tardive. Ce traitement thermique est réalisé à l'aide d'un dispositif d'étuvage mobile qui vient prendre place, à l'aide d'une grue, directement autour du bloc. Ce local d'étuvage permet d'atteindre une température maximale de 80 °C sous 100 % d'HR pour un volume maximal d'environ 50 m³. Ce dispositif est équipé d'instruments de mesure mais aussi de circuits de ventilation et de brumisation. Le suivi de la température durant le traitement thermique est réalisé en continu au sein du bloc

par les thermocouples noyés (Figure IV-3) afin de comparer la température de la consigne imposée au dispositif d'étuvage aux valeurs réellement atteintes dans les différentes régions du bloc, puis éventuellement moduler cette consigne (la Figure II-13 illustre un exemple des températures mesurées au sein du Bloc ZA durant son traitement thermique). La Figure IV-6 présente le schéma et une photo du local d'étuvage.

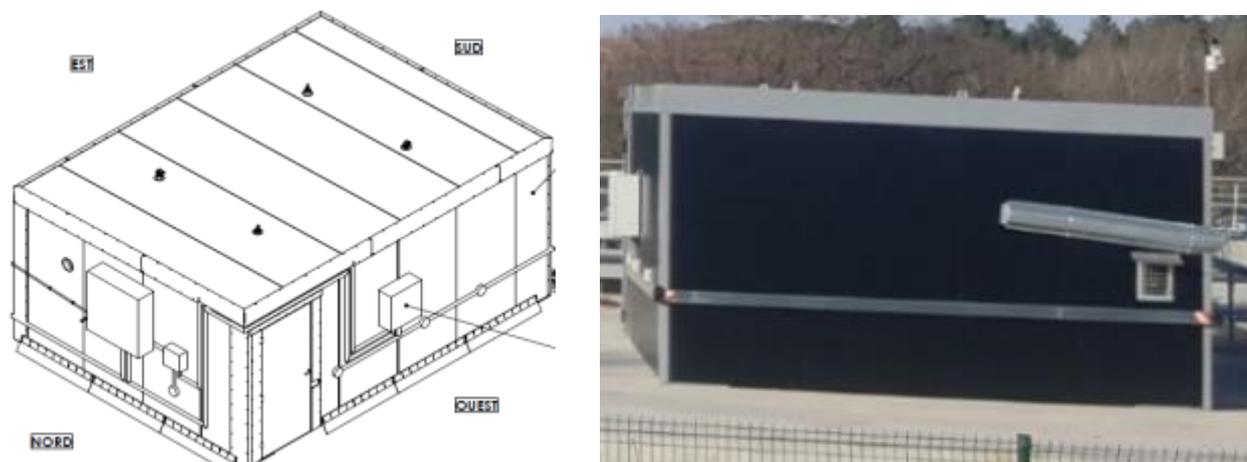


Figure IV-6 : Schéma et photographie du local d'étuvage utilisé pour la réalisation des traitements thermiques sur les blocs.

Une fois le décoffrage, le calorifugeage ou le traitement thermique achevés, les blocs en vieillissement naturel ne sont plus soumis qu'aux conditions climatiques de la plateforme ODE. En revanche, les blocs destinés à être vieillis de manière accélérée sont exposés à des cycles d'imbibition/séchage dans l'eau. Un dispositif spécial a été conçu pour réaliser ces cycles de vieillissement. Ce dispositif est constitué d'une piscine dans laquelle l'eau, qui peut être chauffée jusqu'à 40 °C, circule constamment afin d'en homogénéiser sa température. De la même manière que pour l'acquisition des différents capteurs équipant les blocs, les consignes de la piscine sont programmées et contrôlées en continu à partir d'un système de supervision centralisé. La station de traitement des effluents dont dispose la plateforme ODE permet de contrôler la qualité de l'eau utilisée pour le remplissage des piscines (*pH*, composition chimique).

La durée d'un cycle de vieillissement accéléré par imbibition/séchage est de deux mois. Lors du cycle, le bloc est immergé un mois dans l'eau, puis exposé directement à l'environnement extérieur de la plateforme ODE le mois suivant. Afin de réaliser cette alternance imbibition/séchage, la conception de la piscine permet son démontage et son remontage. En effet, comme le montre le schéma de la Figure IV-7-a, les quatre faces de la piscine sont aisément mises en place pour former un bassin étanche. Une fois remplie, la piscine installe une lame d'eau homogène et chauffée autour du bloc (Figure IV-7).

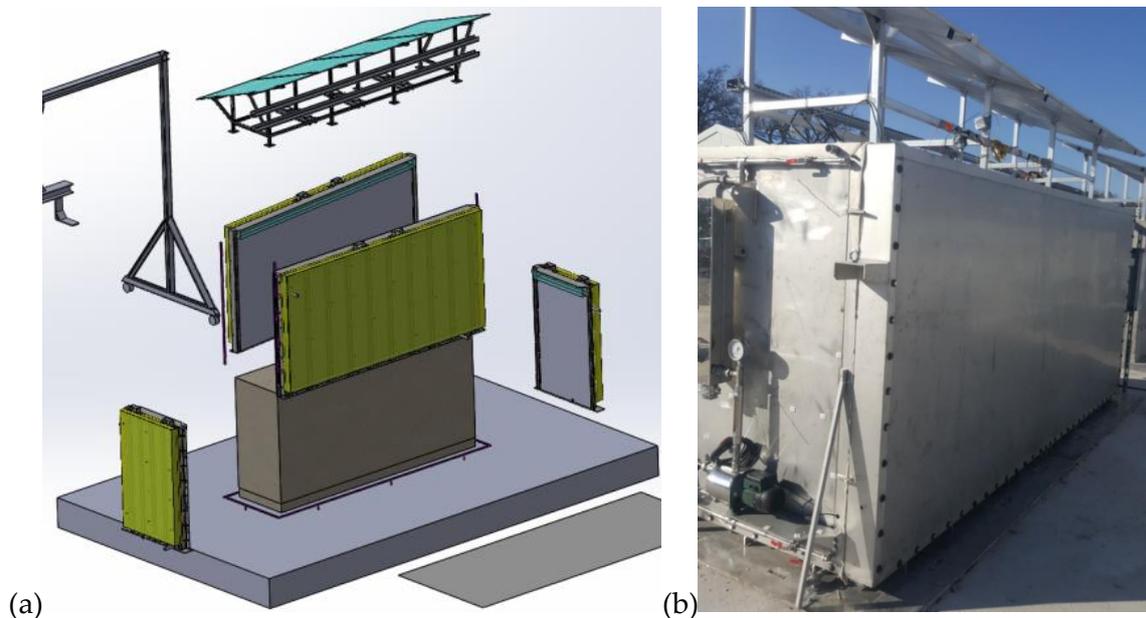


Figure IV-7 : (a) Schéma du montage de la piscine d'imbibition des blocs ; (b) Piscine en fonctionnement.

Les différences d'expansion thermique entre le métal des faces de la piscine et le matériau constitutif de leurs joints, ont entraîné des problèmes d'étanchéité qui sont à l'origine de retards importants vis-à-vis du planning initial d'application des cycles d'imbibition/séchage. Les pathologies attendues dans les blocs n'ont donc pu se développer durant les trois années consacrées à ces travaux de thèse et les instrumentations pourtant effectuées dans ce cadre ne seront utiles que pour des échéances de mesure à réaliser après la thèse. Les résultats de ces échéances ne peuvent donc être présentés dans le présent chapitre.

IV.4. Instrumentation des blocs ODOBA par capteurs à FO

IV.4.1. Objectif de l'instrumentation

L'étude expérimentale menée dans le cadre du projet ODOBA implique le suivi des blocs de béton, notamment pour en comprendre le comportement vis-à-vis des pathologies de gonflement. En plus des capteurs classiques (cordes vibrantes et thermocouples) implantés dans les blocs, une instrumentation par capteurs à FO vient enrichir cette étude en offrant plusieurs avantages spécifiques.

En effet, l'instrumentation des blocs par capteurs à FO à mesure répartie permet d'acquérir un profil continu de déformation suivant plusieurs directions choisies (celles du parcours du capteur) et de comparer ce profil à différentes échéances de mesure. Les capteurs à FO peuvent être noyés dans les blocs ou collés en surface. Selon le parcours du capteur, il est possible de mesurer un profil de déformation qui se rapproche du cœur du bloc ou qui au contraire parcourt un chemin (vertical ou horizontal) à profondeur constante. De plus, comme déjà rapporté dans le chapitre bibliographique (paragraphe I.12.1), les mesures réparties par capteurs à FO permettent aussi de détecter l'apparition des fissures et d'en suivre l'ouverture. Ces capteurs à FO offrent donc la possibilité, non seulement de valider les mesures relevées par les capteurs classiques implémentés dans les blocs, mais aussi de compléter efficacement leurs

acquisitions en détectant des phénomènes locaux que ces capteurs classiques, n'auraient pas détectés du fait de leur localisation ponctuelle.

Le premier objectif de l'instrumentation des blocs ODOBA par capteurs à FO est de développer un protocole de mise en place des capteurs sélectionnés pour l'étude de durabilité présentée au chapitre III puis, avec les premières mesures, de démontrer la faisabilité d'une telle instrumentation sur un ouvrage d'échelle représentative. En deuxième lieu, quand les pathologies de gonflement seront déclenchées et développées au sein des blocs, il sera alors possible de vérifier et de valider l'aptitude de cette technologie à détecter et à suivre le développement de ces pathologies de gonflement interne à une échelle supérieure à celle des éprouvettes de laboratoire. Finalement, à partir i) des profils de déformation mesurés sur les blocs, ii) des mesures des capteurs « traditionnels » et iii) des résultats de l'étude du comportement à long terme des capteurs à FO menée à l'UGE, il devrait être possible de développer une méthode d'interprétation fiable des profils de déformation obtenus tout au long de la durée de service des blocs, et par extension, des futures structures en BA instrumentées par ces capteurs à FO.

IV.4.2. Présentation des plans d'instrumentation des blocs ODOBA

Deux configurations d'instrumentation par FO ont été mises en place sur les blocs ODOBA. En fonction de la date d'instrumentation du bloc (avant ou après la réalisation du coulage du béton d'un bloc), l'installation du capteur à FO a été réalisée soit en le noyant dans le béton soit en le collant sur la surface externe du bloc. Il est à noter que pour les capteurs noyés, selon la nature du bloc, armé ou non, le parcours interne du capteur est différent, car adapté aux supports disponibles et optimisé pour limiter la gêne mais aussi les risques de déplacement du capteur lors de la coulée.

IV.4.2.1. Plan d'instrumentation par capteurs à FO collés en surface

Afin d'instrumenter par FOs les blocs déjà fabriqués (Bloc ZA et Bloc KB), un plan d'instrumentation en surface a été conçu. L'une des deux grandes faces verticales du bloc, de surface $4 \times 2 \text{ m}^2$, a tout d'abord été divisée en quatre zones identiques (zones 1-4, voir Figure IV-8-a), et la zone 2 a été allouée aux travaux d'instrumentation par FO. Le plan d'instrumentation de cette zone comporte deux parcours pour deux câbles à FO. Le premier parcours suit les frontières verticales et la frontière horizontale basse de la zone 2. Il effectue ainsi un aller/retour entre le haut et le bas du bloc avec un cheminement horizontal à mi-parcours. Ce premier parcours permet donc d'obtenir un profil de la déformation verticale au niveau des deux extrémités de la zone instrumentée. Les résultats de ces profils pourront donc être comparés aux mesures relevées par la corde vibrante orientée verticalement dans la zone instrumentée (voir la Figure IV-8-b). En plus de ce premier parcours de câble FO, un deuxième parcours a été établi. Celui-ci comporte plusieurs aller-retours horizontaux à différentes hauteurs, la plus basse se situant à 30 cm environs du sol et la plus haute à 20 cm du haut du bloc. Ce deuxième parcours permet alors de suivre la déformation horizontale au niveau de toute la zone instrumentée et notamment de comparer les valeurs enregistrées avec celles relevées par la corde vibrante parallèle à ce cheminement horizontal et présente dans la zone

instrumentée. La position de cette corde vibrante noyée à 50 cm du parement est rappelée sur la Figure IV-8-b.

Les parcours de principe des câbles à FO parcourant la surface du bloc tels qu'illustrés sur la Figure IV-8-a correspondent à ceux mis en place sur le Bloc ZA côté est. Selon les localisations prévues pour les futurs carottages des blocs ZA et KB, ces plans ont dû être transposés au niveau de la zone 3 (côté ouest). Le plan de localisation des capteurs illustré sur la Figure IV-8-b reste toutefois valide.

L'entrée et la sortie des câbles pour les deux parcours se situe en partie haute du bloc, afin de permettre un accès aux connecteurs et une interrogation des capteurs lorsque le bloc est en imbibition dans la piscine de vieillissement accéléré.

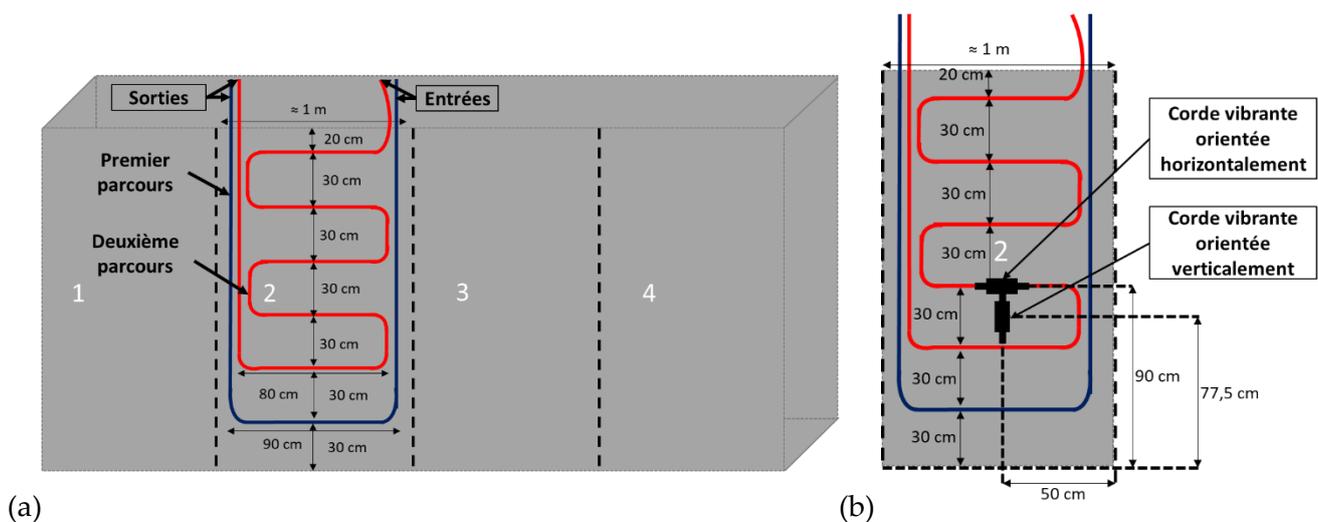


Figure IV-8 : (a) Plan d'instrumentation d'un bloc en surface par capteurs à FO ; (b) Zone d'instrumentation par capteurs à FO collés : localisation des capteurs à FO en surface et vue en projection des capteurs à corde vibrante noyés.

IV.4.2.2. Plan d'instrumentation des blocs non armés par capteur à FO noyés

Plusieurs blocs non armés ont été instrumentés par câbles à FO noyés dans le béton (IB, IA et KB). La réalisation de cette instrumentation a donc eu lieu avant le coulage du bloc. Pour cela, le coffrage n'est tout d'abord monté que sur trois faces afin d'en permettre l'accessibilité. La quatrième face (l'une des deux grandes faces) n'est posée qu'après la finalisation de l'installation des différents capteurs dans le coffrage.

L'entrée du capteur à FO dans le bloc peut alors être réalisée côté nord comme elle peut se situer au côté sud. Le cheminement du capteur suit ensuite un plan précis présenté sur la Figure IV-9. Contrairement au cas du capteur collé en surface, ce plan ne comporte qu'un seul parcours et n'implique donc qu'un unique câble à FO. Identiquement au cas précédent et pour les mêmes raisons, l'entrée et la sortie du capteur sont localisées en partie haute du bloc.

Dans son cheminement, le capteur à FO parcourt, en premier lieu, un plan vertical perpendiculaire aux deux grandes faces du bloc. Pour cela il réalise une descente, une montée puis une seconde descente en s'appuyant sur la première structure métallique (structure dessinée à gauche sur la plan de la Figure IV-9 et sur laquelle sont installés les thermocouples).

Ce premier trajet permet de suivre la déformation verticale au sein du bloc, en interne à plusieurs profondeurs et dans une zone très proche des fines barres métalliques qui composent les structures d'appuis des thermocouples. Les résultats des mesures dans cette zone permettront de comparer le gonflement « à cœur » et proche de la surface. De plus, puisqu'il existe un parcours vertical (à droite sur la plan de la Figure IV-9) assez semblable mais placé dans une zone relativement éloignée de la structure métallique porteuse des thermocouples, les mesures effectués sur ces deux plans verticaux permettront d'identifier un éventuel effet d'opposition des structures métalliques au gonflement du béton. Les acquisitions réalisées par les capteurs à FO sur ces deux trajets verticaux qui permettront donc de suivre l'évolution de la déformation verticale dans les deux extrémités du bloc pourront être comparées aux valeurs enregistrées par les deux cordes vibrantes orientées verticalement (Figure IV-10).

Deux autres plans perpendiculaires aux deux grandes faces du bloc, mais cette fois-ci placés horizontalement, sont instrumentés par le câble à FO. Le premier plan horizontal est situé aux trois quarts de la hauteur du bloc, et comporte un aller (de gauche à droite en se référant à la Figure IV-10), un retour et un deuxième aller. Ce trajet horizontal permet de réaliser des mesures de déformation dans une partie du bloc (partie haute) où elle n'a été placée aucune corde vibrante. Le second plan horizontal est situé au quart de la hauteur du bloc. Ce trajet comporte également deux allers (de droite à gauche) et un retour et permet de connaître le profil de déformation horizontale dans la partie inférieure du bloc. Une comparaison est donc possible entre les mesures acquises par FO le long de ce second plan horizontal et celles relevées par les deux capteurs à corde vibrante orientées dans la même direction et à la même hauteur (voir Figure IV-10). Le câble sort ensuite en haut du bloc après ce dernier parcours horizontal.

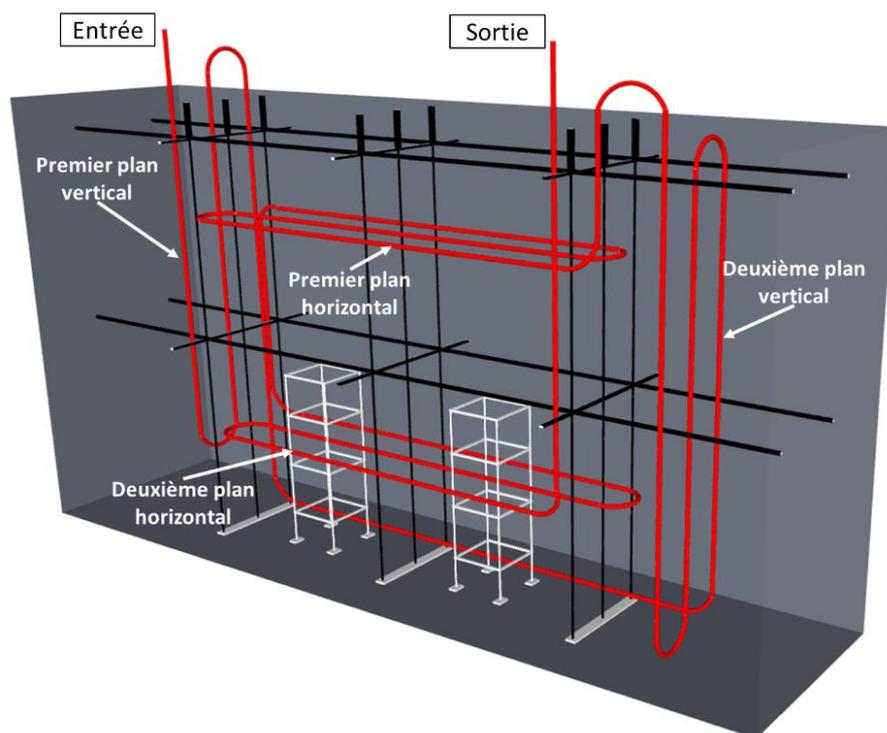


Figure IV-9 : Plan d'instrumentation d'un bloc non armé par capteurs à FO noyé dans le béton.

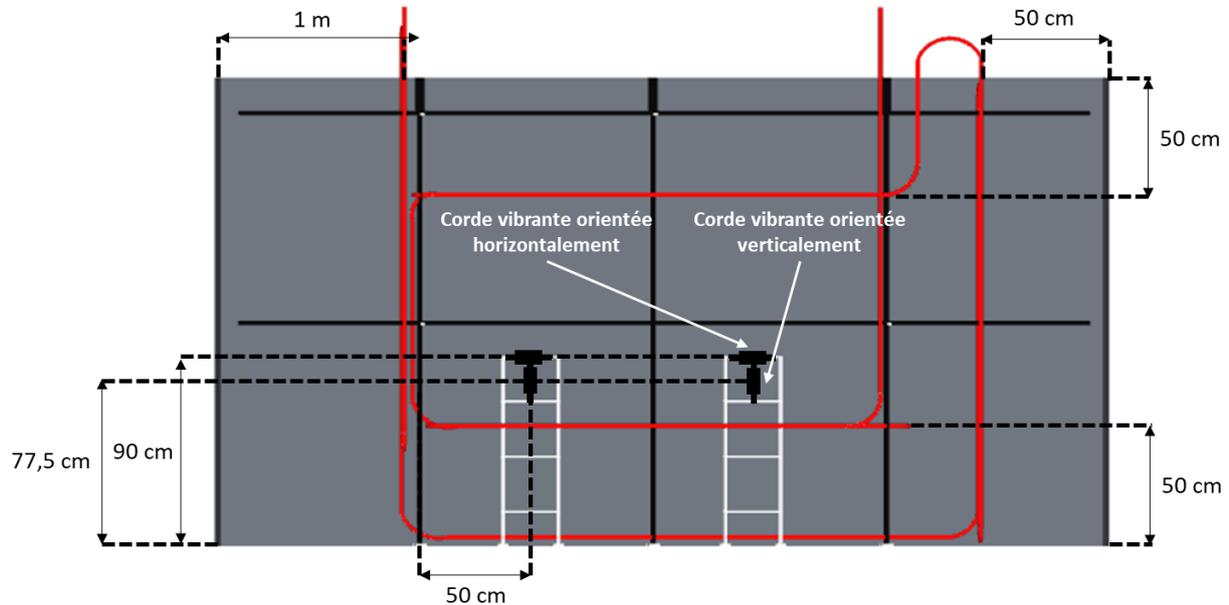


Figure IV-10 : Vue en projection du plan d'instrumentation d'un bloc non armé par capteur à FO et des capteurs à corde vibrante noyés dans le béton.

IV.4.2.3. Plan d'instrumentation des blocs en BA par capteur à FO noyés

Les structures métalliques ont initialement été installées dans les blocs non armés pour fournir un support aux capteurs « traditionnels » (cordes vibrantes et thermocouples). Cependant, elles permettent, aussi une fixation efficace du câble à FO, notamment au niveau du plan vertical proche de ces structures (premier plan vertical de la Figure IV-9) et au niveau des deux plans horizontaux. Ces supports n'étant pas présents dans le bloc armé, il a donc été nécessaire de procéder à une modification du parcours du capteur à FO dans ce bloc afin de garantir une fixation suffisante du câble. Ce nouveau parcours comporte toujours quatre plans d'instrumentation perpendiculaires aux grandes faces du bloc. Comme pour les blocs non armés, deux de ces plans sont verticaux et deux sont horizontaux.

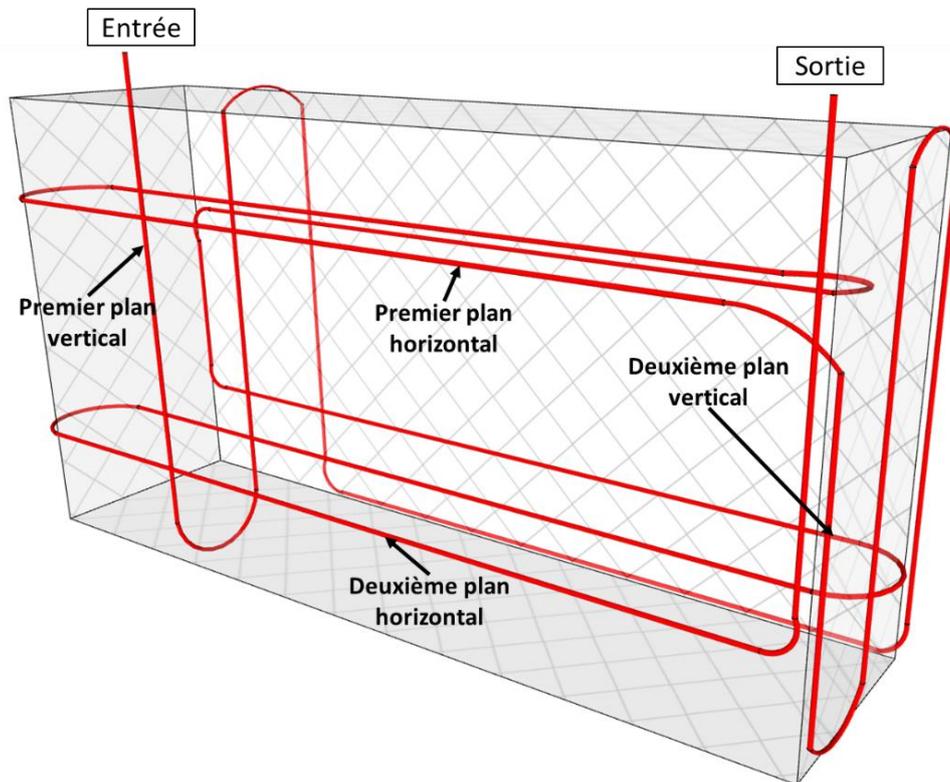


Figure IV-11 : Plan d'instrumentation d'un bloc armé par capteur à FO noyé dans le béton.

Le parcours du capteur à FO pour les blocs en BA est indiqué sur la Figure IV-11.

Directement après l'entrée du bloc, le capteur parcourt le premier plan vertical (voir Figure IV-11). Pour cela, il effectue deux descentes et une montée en s'appuyant directement sur le ferrailage du bloc. Ce premier trajet permettra notamment d'étudier le rôle des armatures, car les deux descentes s'effectuent à proximité du ferrailage vertical alors que le trajet montant (partie verticale du câble située à égale distance des deux montées) est éloigné des armatures.

Le capteur rejoint ensuite le second plan vertical et parcourt deux montées et une descente. Ce cheminement s'effectue entièrement à proximité des armatures. Il permettra de vérifier les symétries de la composante verticale du gonflement du bloc (symétries dans le second plan vertical : haut/bas et droite /gauche du plan mais aussi symétrie dans le bloc entre plan vertical droit et plan vertical gauche). L'influence de la proximité des parois sur le gonflement pourra aussi être étudiée en comparant les mesures des deux parties montantes (proches des parois) à celle de la partie descendante (au cœur du bloc).

Le plan d'instrumentation comporte deux plans horizontaux situés respectivement à une hauteur correspondant à un quart et trois quarts de la hauteur du bloc. Dans chacun de ces plans, le câble circule deux fois de droite à gauche (en se référant à la vue proposée Figure IV-11) et une fois de gauche à droite. Comme dans le cas des blocs non armés, le second plan (le plus bas) permettra une comparaison avec les cordes vibrantes orientées dans la même direction (voir la Figure IV-12-a) alors que le premier plan permettra de souligner les différences entre les deux niveaux de hauteur. Là encore, les trajets horizontaux très complets permettront d'identifier i) l'effet des armatures sur les gonflements pathologiques, ii) les diverses symétries de comportement du bloc et iii) les différences entre le gonflement à cœur et proche des parois.

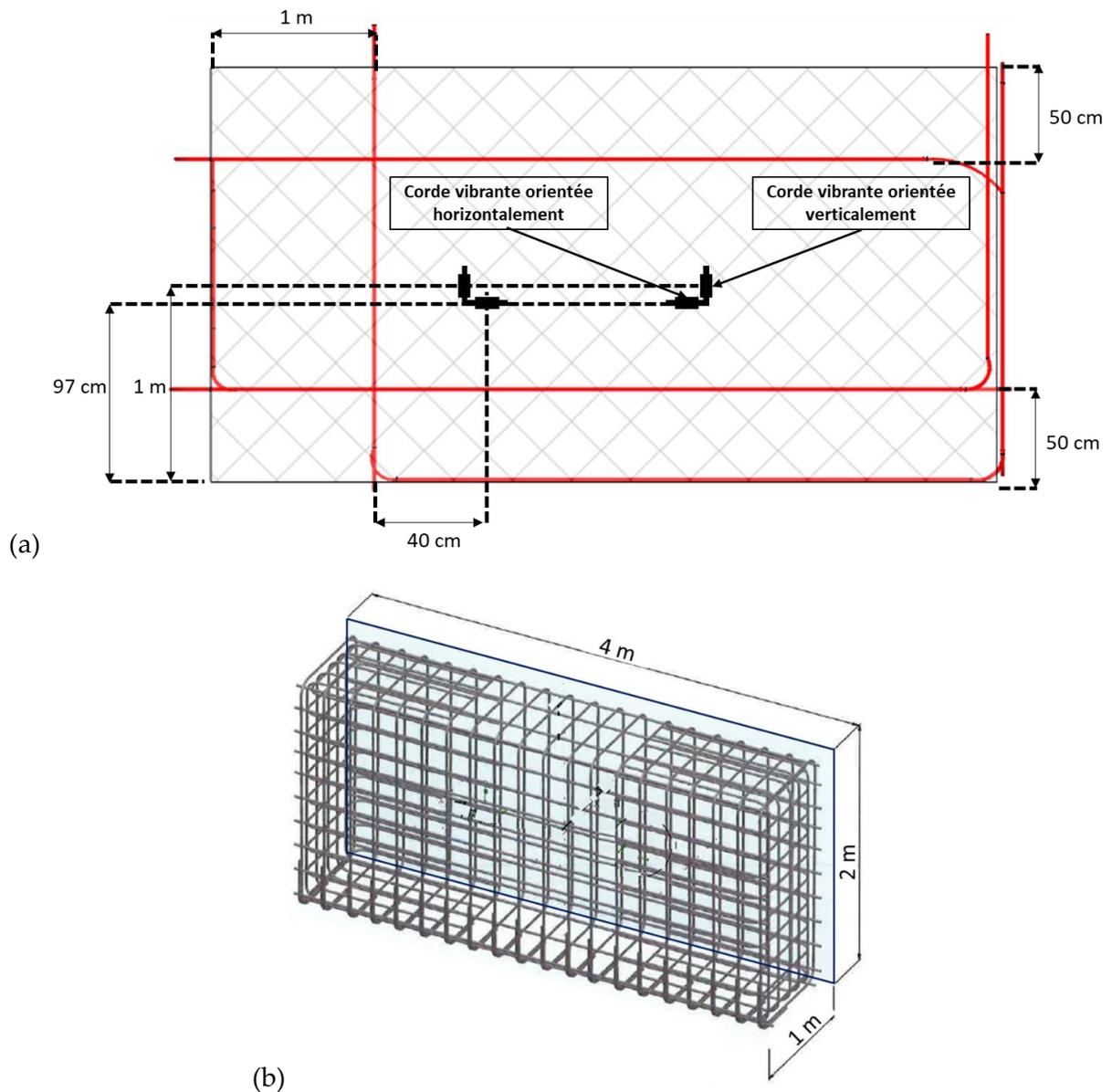


Figure IV-12 : (a) Vue en projection du plan d'instrumentation par capteur à FO et capteurs à corde vibrante noyés dans un bloc en BA ; (b) Positionnement des armatures dans le bloc.

IV.4.3. Instrumentation du bloc ZA

IV.4.3.1. Présentation du bloc

Le Bloc ZA est un bloc non armé, coulé en novembre 2017 et destiné à subir un vieillissement accéléré (cycles d'imbibition/séchage). Les pathologies attendues dans ce bloc sont la RAG et la RSI. La composition du béton de ce bloc (détaillée dans le Tableau II-2 du chapitre II) comporte un dosage en ciment de 400 kg/m^3 et des granulats réactifs (sable et graviers) susceptibles de réagir avec les alcalins de la solution interstitielle du béton. Un traitement thermique a, de plus, été appliqué au bloc directement après le coulage en fin d'année 2017 afin de favoriser la formation tardive de l'ettringite (et donc la RSI).

Le Bloc ZA ayant été coulé avant notre première intervention sur la plateforme ODE, l'instrumentation par FO de ce dernier n'a été réalisée qu'en surface. Deux surfaces du bloc ont

été instrumentées en utilisant les deux câbles à FO sélectionnés pour l'étude de durabilité (soit une surface instrumentée avec le câble Neubrex, l'autre avec le câble AFL). Ces deux surfaces se trouvent sur les deux faces principales du bloc (une surface instrumentée par face). Les protocoles d'instrumentation des deux surfaces avec les deux câbles à FO sont présentés dans les paragraphes suivants.

IV.4.3.2. Instrumentation du Bloc ZA avec le câble AFL collé en surface

Le Bloc ZA a été instrumenté en surface avec le câble AFL lors de notre première intervention sur la plateforme qui a débuté fin juillet 2018. Un protocole précis a été suivi afin de réaliser cette instrumentation.

La première étape des travaux d'instrumentation consiste à tracer, sur la face à instrumenter, les parcours des deux câbles AFL à l'aide d'un marqueur en respectant le plan de la Figure IV-8. Des rainures sont ensuite réalisées sur la surface du béton en suivant ce tracé avec une meuleuse d'angle. Ces rainures présentent une profondeur ($\approx 5 \text{ mm}$) et une largeur (3 mm) suffisantes pour y insérer aisément le câble à FO. L'étape suivante consiste à nettoyer à l'eau l'intérieur des rainures sur l'intégralité de leurs longueurs afin de dégager toutes la poussière de béton et les fins granulats. Cette opération de nettoyage permettra d'assurer une adhérence de qualité entre le câble et le béton au travers de la couche adhésive. Les photos de la Figure IV-13 illustrent ces premières étapes d'instrumentation.

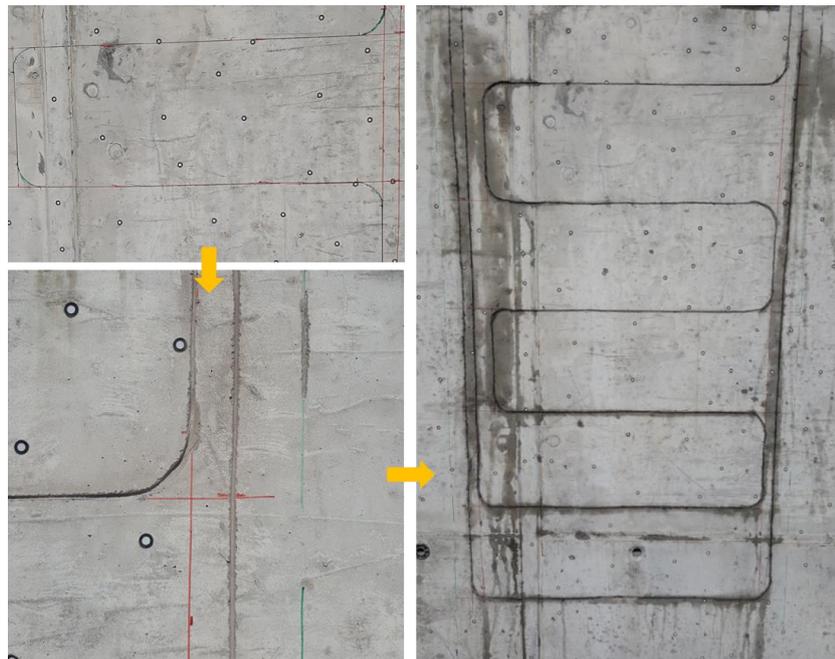


Figure IV-13 : Instrumentation en surface du Bloc ZA avec le câble AFL : parcours tracé, rainuré puis nettoyé.

Une fois les rainures propres et sèches, chaque câble est préinstallé dans sa rainure à l'aide d'un ruban adhésif. Des points de colles peuvent être ajoutés dans les zones critiques du parcours du câble (avant et après les courbures, à l'entrée et à la sortie du parcours) afin de maintenir le câble tendu et immobile dans sa rainure pour la phase de collage. Cette dernière consiste à appliquer une couche généreuse de l'adhésif X120 (voir le paragraphe II.3.2.1) dans la rainure, sur toute sa longueur, afin de générer un contact optimal entre le béton et le câble. L'adhésif est

tout d'abord appliqué dans les régions qui ne sont pas recouvertes par le ruban adhésif. Ensuite, lorsque l'adhésif X120 est polymérisé, le ruban adhésif est retiré et la partie libérée est recouverte d'adhésif X120. La couche d'adhésif est volontairement généreuse pour fournir une protection du câble vis-à-vis des conditions extérieures. Les photos de la Figure IV-14 illustrent ces deux dernières étapes de mise en place du câble AFL en surface.

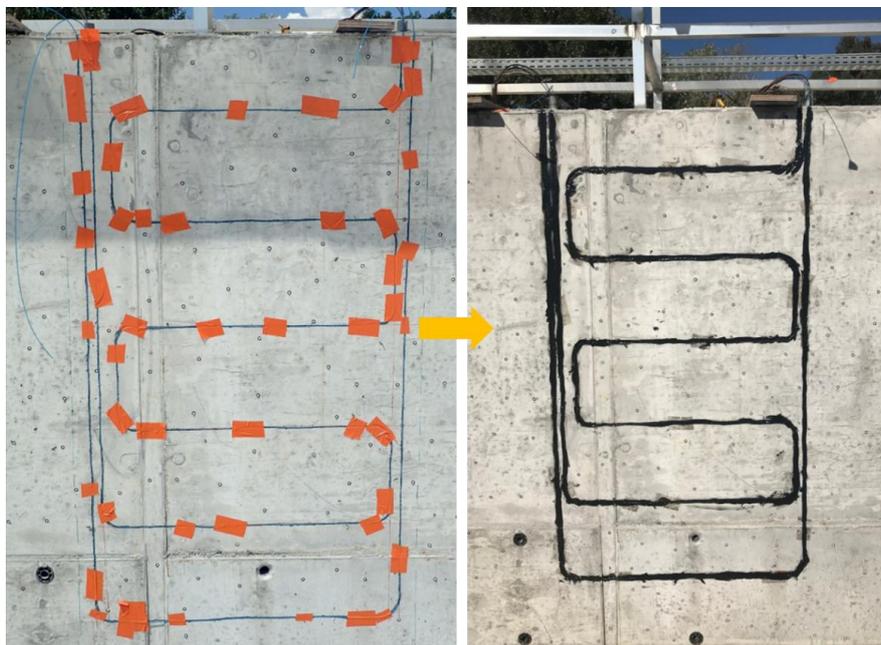


Figure IV-14 : Étapes finales de l'instrumentation en surface de la face est du Bloc ZA avec le câble AFL. Gauche : Câble introduit dans les rainures et tenu par le ruban adhésif. Droite : Câble collé par l'adhésif X120.

IV.4.3.3. Instrumentation du Bloc ZA avec le câble Neubrex collé en surface

Le Bloc ZA a été instrumenté avec le câble Neubrex sur la face du bloc opposée à celle recevant le câble AFL, lors de l'intervention de mars 2019.

Le protocole d'instrumentation en surface avec le câble Neubrex est identique à celui suivi pour le câble AFL (traçage du parcours au marqueur, rainurage puis collage). La rainure est cependant plus profonde que dans le cas précédent, afin de pouvoir y insérer le câble « de profil » (les deux grands côtés de sa section rectangulaire du câble étant ainsi perpendiculaires à la face du bloc comme illustré sur la Figure IV-15). Le choix de ce positionnement du câble dans la rainure est justifié par la plus grande surface de contact qu'il offre entre le câble et le béton, assurant ainsi une meilleure adhérence de l'interface câble/béton. De plus, cette position, présentant la plus petite inertie du câble face aux courbures du tracé, elle permet une insertion plus facile du câble dans les rainures.

Une fois les rainures nettoyées et séchées, le collage est effectué en suivant les étapes précédemment décrites pour la mise en place du câble AFL (préfixation par ruban adhésif et points de colle, puis application de l'adhésif X120). Quelques étapes de cette instrumentation sont présentées dans la Figure IV-16.

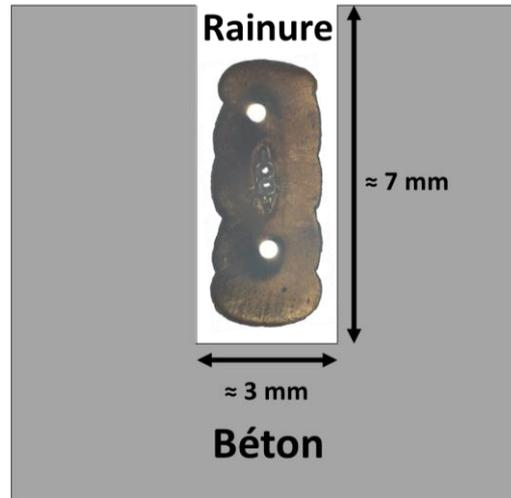


Figure IV-15 : Principe d'insertion du câble Neubrex dans une rainure.

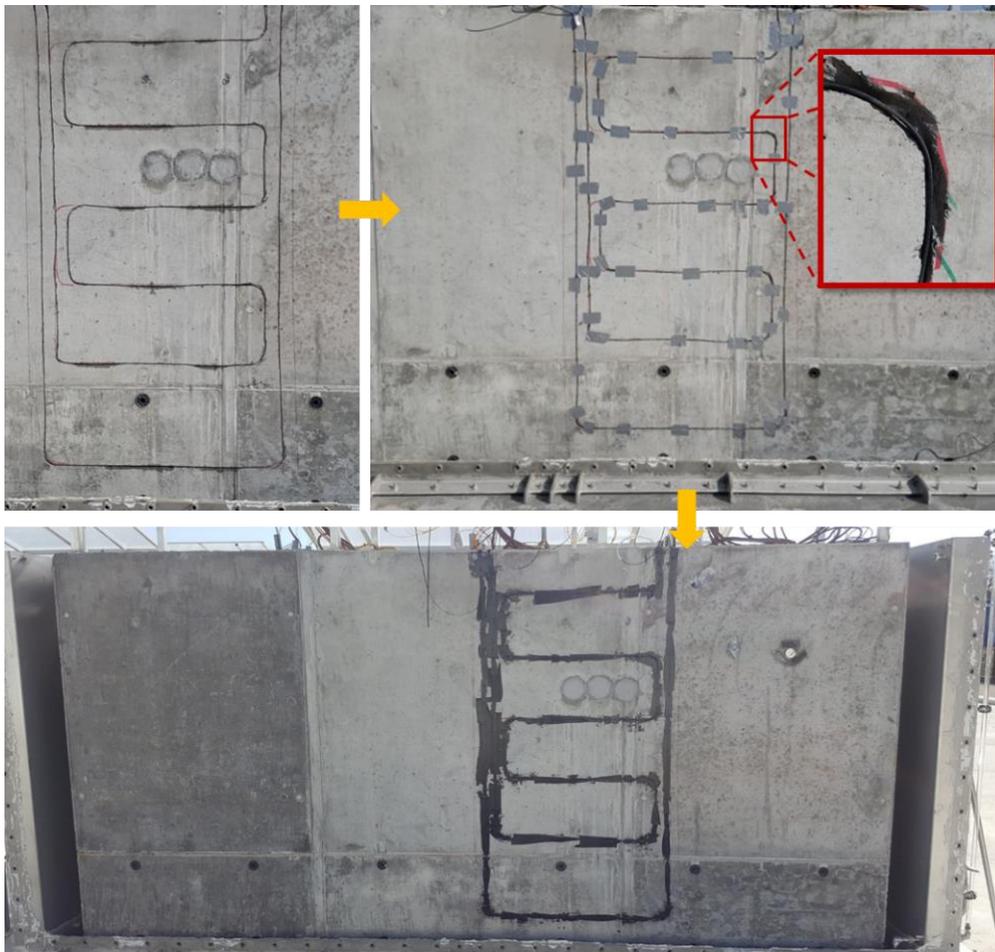


Figure IV-16 : Photos illustrant les étapes de l'instrumentation en surface de la face ouest du Bloc ZA avec le câble Neubrex : Parcours rainuré, préfixation du câble par ruban adhésif puis câble collé avec l'adhésif X120.

IV.4.4. Instrumentation du Bloc IB

IV.4.4.1. Présentation du bloc

Le Bloc IB est un bloc non armé, destiné à développer la RSI et dosé en ciment à 400 kg/m³. Ce bloc doit subir un vieillissement accéléré par cycles d'imbibition/séchage afin de favoriser la formation d'ettringite tardive. Un traitement thermique lui a été appliqué en septembre 2018, en utilisant le local d'étuvage, directement après le coulage du bloc. Les données de la température au cœur du bloc attestent du bon déroulement de ce traitement thermique avec des températures voisinant 80 °C au cœur du bloc (dans la partie haute du bloc en particulier). Ces différents conditionnements visent à faire du Bloc IB l'un des blocs ODOBA les plus réactifs.

Avant son coulage, le bloc a été instrumenté en interne par le câble Neubrex à FO. Le détail de cette instrumentation est présenté dans le paragraphe suivant.

IV.4.4.2. Instrumentation du Bloc IB par câble Neubrex noyé

L'instrumentation du Bloc IB a été réalisée lors de la première intervention sur la plateforme ODE qui a eu lieu en juillet 2018. Ce bloc n'étant pas armé, le parcours du câble, conforme au plan d'instrumentation de la Figure IV-9, prend appuis sur la structure métallique porteuse des thermocouples. Au niveau du premier plan vertical, le câble est directement fixé sur les barres verticales de la structure porteuse qui sont à sa proximité. Cette fixation est réalisée à l'aide de ruban adhésif ou de colliers de serrage. Au niveau des autres plans principaux de parcours du câble (le deuxième plan vertical et les deux plans horizontaux), celui-ci est, le plus souvent, relativement éloigné des barres métalliques. Le câble est alors soit fixé à des fils en nylon tendus dans le coffrage soit aux structures métalliques qui se présentent à proximité de son du trajet. Dans cette mise en place, une attention particulière a été accordée aux courbures du câble. En effet, afin d'éviter des pertes optiques majeures occasionnées par de trop importantes courbures du câble, des guides métalliques courbés ont été fabriqués au préalable. Le câble, lorsqu'il doit se courber pour suivre son trajet, s'appuie directement sur ces guides afin d'éviter tout pincement lors de la poussée induite par le coulage. Des photos de l'instrumentation du Bloc IB sont présentées dans Figure IV-17.



Figure IV-17 : Instrumentation du Bloc IB non armé avec le câble Neubrex noyé.

Avant le coulage du bloc et directement après l'installation du câble, un relevé de cotes a été réalisé afin de positionner dans la géométrie 3D du bloc tout point de parcours du câble. En effet, chacun de ces points ne sera ensuite défini, lors de l'interrogation de la FO, qu'à partir de sa coordonnée 1D repérée comme sa distance au point d'entrée ou de sortie du bloc. Autrement dit, considérant que les mesures réalisées à l'aide de l'interrogateur permettent d'obtenir un profil de déformation sur toute la longueur du câble, il est alors impératif d'effectuer un tel relevé des cotes pour positionner dans le bloc le profil de déformation acquis.

IV.4.4.3. Coulage du Bloc IB

La coulée du Bloc IB a été réalisée en septembre 2018. Durant celui-ci, le câble Neubrex est demeuré immobile à l'exception de la partie parcourant le second plan vertical. Au niveau de ce plan, le câble est éloigné des tiges métalliques verticales. Il est donc attaché à un fil en nylon vertical lui-même fixé aux tiges métalliques horizontales. Il s'agit donc d'un système assez souple. En plus de ce système de positionnement, le capteur n'est attaché à la plateforme (qui sert de base du coffrage) qu'à l'aide d'une fixation adhésive (points de colle et ruban adhésif, voir zoom en bas à droite de la Figure IV-17). Lors de la coulée du bloc, le câble s'est détaché de ce point de fixation. Par conséquent, au fur et à mesure du remplissage du coffrage, la moitié basse du plan vertical s'est de plus en plus soulevée lors de la montée du niveau de béton. Une photo de ce mouvement non désiré du câble est présentée sur la Figure IV-18.

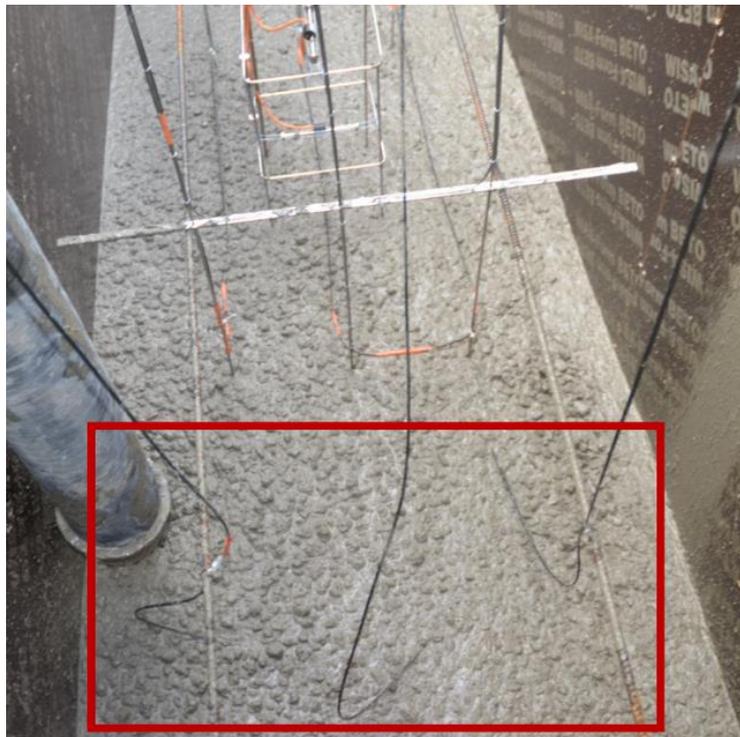


Figure IV-18 : Détachement d'une partie de l'instrumentation lors du coulage du Bloc IB.

Une partie des mesures effectuées par le capteur à FO ne sera donc pas exploitable, le mouvement du câble ne permettant plus de connaître la position exacte de la partie qui s'est déplacée dans le bloc. Cependant, cette partie n'impliquant que le second plan vertical d'instrumentation par FO, l'analyse des profils acquis sur les trois autres plans ne souffrira pas de cet incident de coulage.

IV.4.5. Instrumentation du Bloc IA

IV.4.5.1. Présentation du bloc

Le Bloc IA est, comme le Bloc IB, un bloc non armé, coulé en mai 2019 et destiné à développer la RSI de manière accélérée, et devant donc subir un échauffement au jeune âge suivi de cycles d'imbibition/séchage. Ce bloc est cependant moins dosé en ciment que les autres blocs instrumentés (350 kg/m^3 contre 400 kg/m^3).

Un traitement thermique a été appliqué au bloc directement après son coulage afin de favoriser la formation tardive de l'ettringite.

Le bloc a été instrumenté en mars 2019 par câble Neubrex destiné à être noyé dans le béton. Les étapes de l'instrumentation de ce bloc sont détaillées par la suite.

IV.4.5.2. Instrumentation du Bloc IA par câble Neubrex noyé

Le Bloc IA n'étant pas armé, la mise en place de son instrumentation interne par câble Neubrex est assez similaire à celle suivie pour le Bloc IB. Le parcours du câble comporte ainsi toujours deux plans verticaux et deux plans horizontaux et des guides ont de nouveau été utilisés afin

de contrôler les courbures du câble. Toutefois, afin d'éviter les problèmes de déplacement du câble rencontrés lors du coulage du Bloc IB, trois tiges métalliques horizontales ont été ajoutées dans le coffrage afin de servir d'appui au second plan vertical en partie basse du coffrage. Des photos de l'instrumentation du Bloc IA sont présentées dans la Figure IV-19, avec notamment un zoom sur cette modification du dispositif d'appuis du câble FO (zoom en partie droite de la Figure IV-19).

Lors du coulage du bloc, il a été constaté que la solution d'ajout des trois tiges métalliques a bien permis de maintenir le câble immobile pendant le bétonnage.

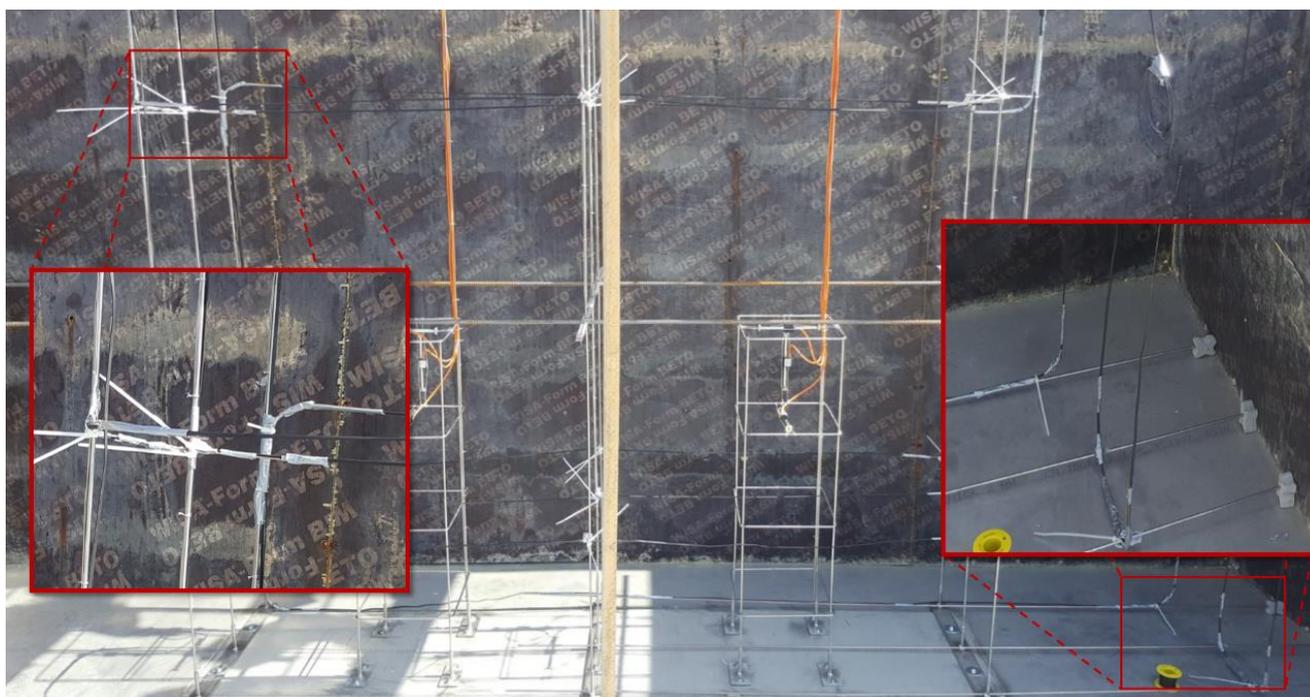


Figure IV-19 : Instrumentation du Bloc IA par câble Neubrex noyé dans le béton.

De la même manière que pour le Bloc IB, un relevé minutieux de cotes a été réalisé directement après la mise en place du câble Neubrex.

IV.4.6. Instrumentation du Bloc KB

IV.4.6.1. Présentation du Bloc KB

Le Bloc KB est un bloc en BA, coulé en mai 2019 et destiné à développer de la RSI. La composition du béton du bloc est identique à celle du Bloc IB (dosé en ciment à 400 kg/m³). Ce bloc a également subi un traitement thermique directement après son coulage et des cycles d'imbibition/séchage lui sont appliqués afin de déclencher les réactions de gonflement interne. Les blocs KB et IB sont supposés être les plus réactifs des blocs ODOBA déjà fabriqués.

L'instrumentation du bloc comprend un câble noyé et des câbles collés en surface. Elle est détaillée dans les paragraphes suivants.

IV.4.6.2. Instrumentation du Bloc KB par câble Neubrex noyé

L'instrumentation par câble noyé du Bloc KB a été réalisée lors de l'intervention de mars 2019. Le parcours du câble est conforme au plan de la Figure IV-11 et comporte donc deux plans verticaux et deux plans horizontaux. Le câble se fixe directement sur le ferrailage du bloc. Afin de contrôler les courbures du câble Neubrex dans sa partie noyée et éviter des pertes optiques liées à des pincements, des guides ont de nouveau été utilisés. Cependant, pour ce bloc, les guides ont été réalisés à partir de gaine en plastique permettant de garantir un rayon de courbure du câble supérieur à 4 cm (on rappelle que précédemment, ce sont des guides métalliques courbés qui avaient été mis en place). La Figure IV-20 présente quelques photos prises lors de l'instrumentation du bloc ferrailé, dont un zoom sur les courbures de câble (partie droite de la Figure IV-20). À nouveau, un relevé minutieux des cotes du parcours du câble a été réalisé après la finalisation de sa pose.



Figure IV-20 : Instrumentation du Bloc KB par câble Neubrex noyé dans le béton.

IV.4.6.3. Instrumentation du Bloc KB par câble Neubrex collé en surface

Après le coulage du Bloc KB, ce dernier a été instrumenté en surface avec le câble Neubrex lors de l'intervention de juillet 2019.

Le protocole d'instrumentation en surface de ce bloc est strictement identique à celui adopté pour le Bloc ZA, instrumenté lui aussi en surface avec le câble Neubrex (traçage du parcours au marqueur, rainurage puis collage). Les photos de la Figure IV-21 illustrent quelques étapes de l'instrumentation de ce bloc en surface.

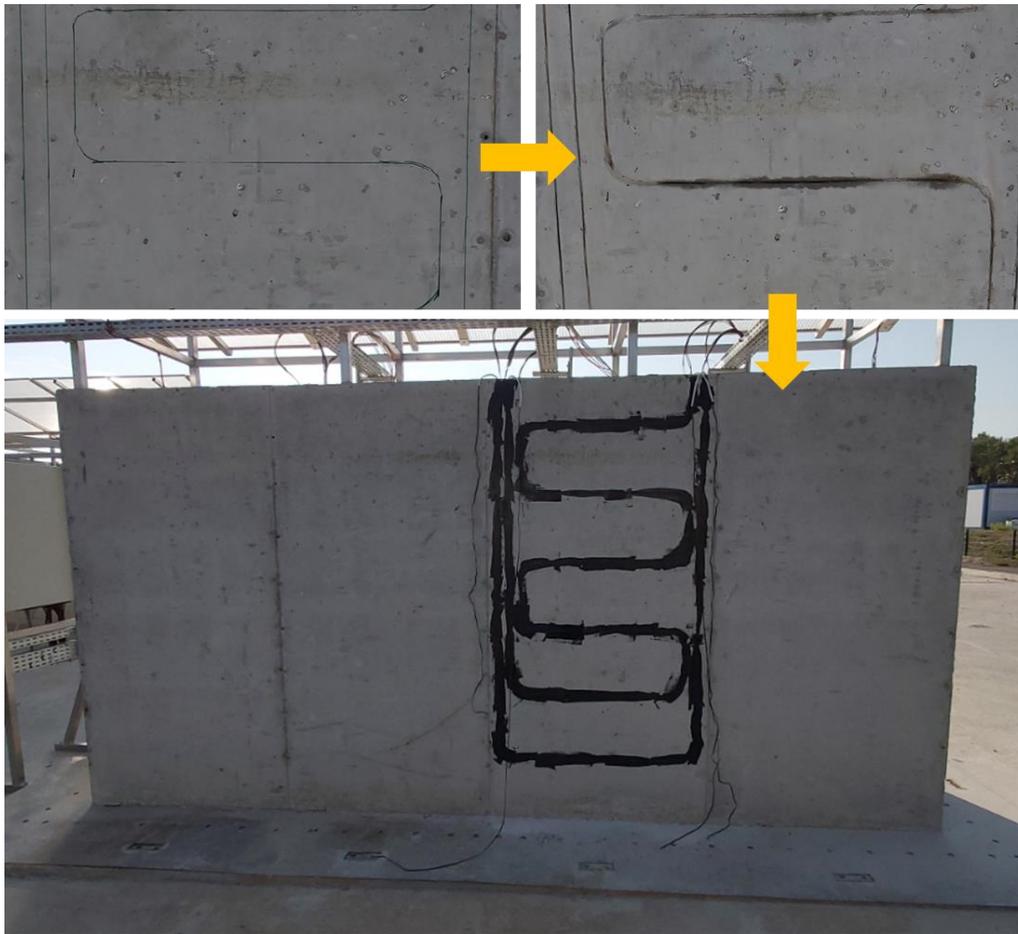


Figure IV-21 : Instrumentation du Bloc KB en surface avec le câble Neubrex : parcours tracé, parcours rainuré et câble collé.

IV.4.7. Réalisation des connexions optiques et prise des mesures de référence

IV.4.7.1. Connexions optiques

Après l'instrumentation des blocs par câbles à FO, noyés et collés en surface, l'étape suivante a consisté à établir les connexions optiques nécessaires au branchement de l'appareil chargé d'interroger les FOs. Ces interrogations sont réalisées à différentes échéances mais sont interprétées par rapport à une unique mesure de référence spécifique à chaque parcours de câble. Il est donc essentiel que le chemin optique reste strictement le même durant la période de suivi métrologique des blocs. La connexion optique étant partie intégrante du chemin optique, il est nécessaire de réaliser des connexions optiques de qualité qui continueront à parfaitement fonctionner dans le temps malgré les conditions climatiques sévères qui peuvent régner à certaines périodes de l'année sur la plateforme ODE.

Suite à la constatation d'une dégradation notable des sorties des câbles AFL collés en surface du Bloc ZA après 4 mois d'exposition aux conditions climatiques de la plateforme, une attention particulière a été accordée aux sorties des câbles Neubrex collés en surface des blocs ZA et KB. Une gaine en PVC a ainsi été insérée autour des sorties des câbles afin de les protéger d'une éventuelle courbure trop importante due à la poussée du vent et provoquant un pincement en sortie de bloc. La Figure IV-22 présente un exemple de sortie protégée. Le système de protection par gaine a été mis en place autour des sorties dégradées du câble AFL en surface du Bloc ZA, afin de ne pas perdre toutes les connexions optiques et donc les mesures réalisées précédemment.



Figure IV-22 : Protection des sorties du câble Neubrex collé en surface du Bloc ZA à l'aide de gaines en PVC.

Une connexion optique est réalisée en soudant une extrémité d'un connecteur avec l'extrémité d'une des fibres que contient le câble. Par mesure de sécurité, nous avons systématiquement connecté les deux extrémités des câbles à FO (i.e. l'entrée et la sortie des parcours) afin de générer deux parcours optiques pour une même fibre. Cette mesure qui est redondante lorsque le parcours optique est sain, mais devient indispensable i) lorsqu'une connexion devient défaillante (un seul parcours est alors possible) ou ii) lorsque le câble rompt à l'intérieur du bloc (deux demi-parcours seraient alors possibles).

Les soudures sont réalisées à l'aide d'une soudeuse optique (Figure IV-23-b). Une fois la fibre connectée, plusieurs protections sont mises en place. Une première couche de protection est ajoutée à l'aide d'une gaine thermorétractable 3/1 mm (celle-ci a comme rôle principal d'isoler la soudure). Une deuxième gaine, en plastique rigide, est ensuite placée autour de la première gaine afin de protéger mécaniquement la soudure. Finalement, une dernière gaine 6/2 mm vient envelopper l'ensemble afin d'assurer une continuité mécanique entre la gaine en plastique rigide, le connecteur et le câble à FO. De plus, dans le but d'éviter une infiltration d'eau dans le connecteur, induite par les conditions climatiques ou bien par le protocole de vieillissement accéléré appliqué aux blocs, les connecteurs sont insérés, avant la réalisation de la soudure,

dans des boîtiers étanches et ces derniers sont fixés sous les toitures des blocs. Les photos de Figure IV-23 illustrent ces étapes.

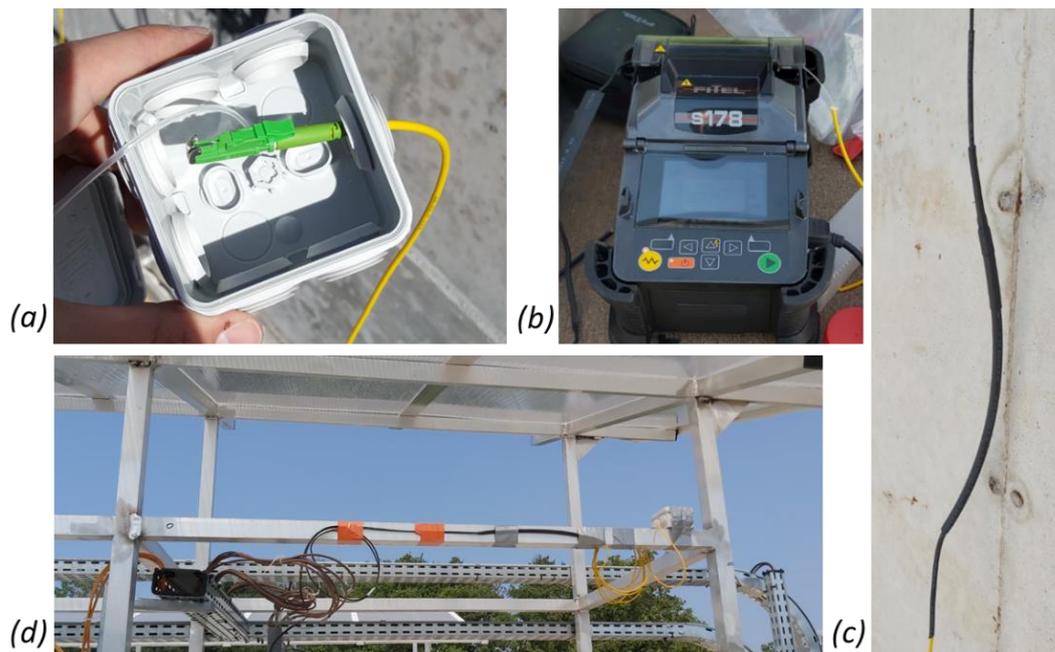


Figure IV-23 : Réalisation et protections des connexions : (a) Protection du connecteur dans une boîte étanche ; (b) Soudeuse optique ; (c) Protection des soudures à l'aide des gaines thermorétractables ; (d) Fixation de la soudure et du connecteur sous la toiture d'un bloc.

IV.4.7.2. Mesures de référence et échéances du suivi des déformations

Les blocs n'étant pas fabriqués à la même date, leur instrumentation a été effectuée lors de plusieurs interventions. Les mesures de référence n'ont donc, par conséquent, pas été prises aux mêmes dates. Le Tableau IV-1 indique l'ensemble des dates liées à l'instrumentations et la prise de mesure par FO sur la période couvrant les trois années de thèse. Nous avons essayé de réaliser une intervention (et donc une mesure) tous les 4 ou 5 mois. Toutefois, en raison de la crise sanitaire de la Covid-19, l'intervention prévue initialement en mars 2020 n'a pas pu être réalisée et 7 mois séparent donc les deux dernières mesures effectuées. La photo de la Figure IV-24, prise lors de l'interrogation du câble Neubrex collé en surface du Bloc KB, illustre les conditions de réalisation d'une telle intervention.



Figure IV-24 : Photo prise lors d'une interrogation du câble Neubrex en surface du Bloc KB .

Tableau IV-1 : Tableau récapitulatif des différentes échéances d'instrumentation et de mesure pour chaque bloc.

Bloc et type d'instrumentation	Date de l'intervention					
	juil-18	nov-18	mars-19	juil-19	déc-19	juil-20
ZA : AFL collé	Instrumentation du bloc	Connexions optiques	Mesure de référence	Echéance 1	Echéance 2	Echéance 3
ZA : Neubrex collé	X	X	Instrumentation du bloc + connexions optiques + mesures de référence	Echéance 1	Echéance 2	Echéance 3
IB : Neubrex noyé	Instrumentation du bloc	Connexions optiques	Mesures de référence	Echéance 1	Echéance 2	Echéance 3
IA : Neubrex noyé	X	X	Instrumentation du bloc	Connexions optiques + mesures de référence	Echéance 1	Echéance 2
KB : Neubrex noyé	X	X	Instrumentation du bloc	connexions optiques + mesures de référence	Echéance 1	Echéance 2
KB : Neubrex collé	X	X	X	Instrumentation du bloc + connexions optiques + mesures de référence	Echéance 1	Echéance 2

IV.5. Premières mesures par capteurs à FO et validation de l'instrumentation des blocs

IV.5.1. Historique des mesures de la température par capteurs à FO dans les blocs ODOBA

La Figure IV-25 présente un historique du suivi de la température des thermocouples de référence 510 situés dans la partie inférieure des blocs ODOBA instrumentés par capteur à FO (voir plan de la Figure IV-4). Les courbes de la Figure IV-25 indiquent la température à l'intérieur des blocs, à partir du début du traitement thermique (pour les blocs destinés à développer de la RSI : ZA, IB, IA et KB). Il est donc possible de suivre le profil de la température à l'intérieur des blocs durant le traitement thermique ainsi que la valeur maximale de la

température atteinte. Deux plateaux de température apparaissent pour les blocs IA et KB et correspondent aux cycles de vieillissement des blocs en piscine à température contrôlée. Ces cycles ont été appliqués entre décembre 2019 et mars 2020. Pour les périodes courantes (hors traitement thermique au jeune âge et cycles de vieillissement), l'alternance jour/nuit, se manifeste par de sensibles variations de la température, sur des cycles d'une durée de 24 heures. L'allure générale des différentes courbes fait de plus apparaître les cycles de température dus à la succession des saisons.

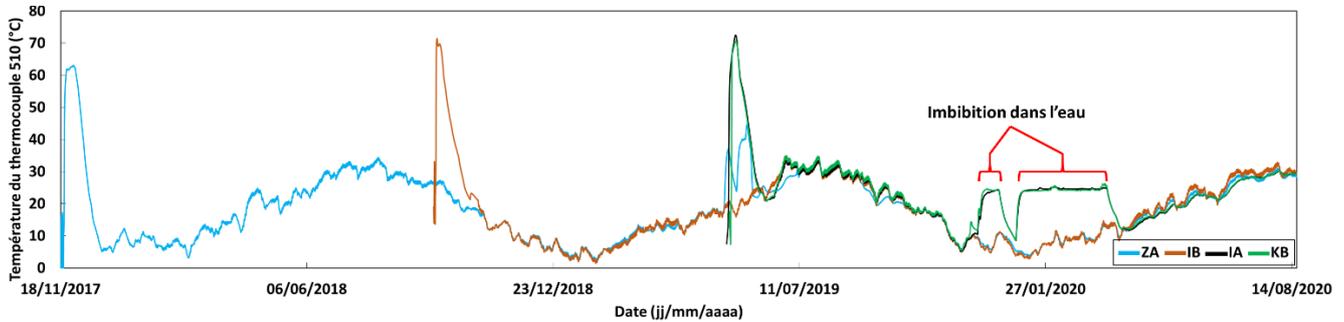


Figure IV-25 : Historique des mesures de température au cœur des blocs ODOBA instrumentés (thermocouple 510).

IV.5.2. Décorrélacion température/déformation

IV.5.2.1. Effets de la température

Comme le montre le Tableau IV-1, les échéances de mesure des déformations dans les blocs ont eu lieu aux quatre saisons. La température sur la plateforme ODE pouvait donc descendre en-dessous de 0 °C en hiver et atteindre les 40 °C en été. Bien que des déformations importantes soient attendues dans les blocs, du fait des pathologies de gonflement interne, l'effet du gradient de température, lorsque ce gradient est aussi fort, doit être pris en compte pour interpréter correctement la mesure du capteur à FO et évaluer ainsi précisément la déformation. De plus, l'effet de la température peut se révéler très important lors de la prise des premières mesures (i.e. avant le développement des pathologies) lorsque les déformations dans les blocs sont faibles et sont essentiellement liées à l'expansion ou la contraction thermique ainsi qu'au gonflement hydrique.

Comme déjà expliqué dans le paragraphe I.4.5 du chapitre I, le décalage spectral ($\Delta\nu_R$) mesuré par un interrogateur à mesure répartie par rétrodiffusion Rayleigh dépend de la variation de déformation ($\Delta\varepsilon$) et de la variation de température (ΔT) suivant :

$$\Delta\nu_R = C_\varepsilon\Delta\varepsilon + C_T\Delta T \quad (\text{IV-1})$$

où :

C_ε : Coefficient de sensibilité à la déformation (exprimé en $\text{GHz}/(\mu\text{m}/\text{m})$) ;

C_T : Coefficient de sensibilité à la température (exprimé en $\text{GHz}/^\circ\text{C}$).

La variation de la déformation de la FO ($\Delta\varepsilon$) se compose d'une partie ($\Delta\varepsilon_m$) liée à la sollicitation mécanique du milieu hôte transmise à la FO et d'une partie ($\Delta\varepsilon_T$) liée i) à la dilatation thermique du milieu hôte (coefficient de dilatation thermique du milieu hôte noté α_m) transmise au capteur et ii) à la dilatation thermique de la fibre en silice (coefficient de dilatation de la fibre en verre noté α_f) qu'il est possible de négliger car $\alpha_f \ll \alpha_m$ [170].

Le rapport entre les deux constantes (C_T/C_ε) est de l'ordre de 8,3 environ pour les FO standards, pour des valeurs de la température exprimées en °C et de la déformation en $\mu\varepsilon$. Cette valeur signifie que s'il survient une variation de température de 10 °C entre deux mesures, ne pas tenir compte de l'effet de la température tel qu'indiqué dans l'Equation IV-1 (terme $C_T\Delta T$), entraîne une erreur de 83 $\mu\varepsilon$ dans l'estimation de la déformation. L'effet de la température est donc tout particulièrement sensible lors des premières mesures de déformation (lorsque la déformation de gonflement étant extrêmement faible, voire nulle). Une fois les pathologies de gonflements internes déclenchées, les déformations induites par ces pathologies peuvent atteindre et même dépasser 1 % (10 000 $\mu\varepsilon$). L'effet de la température devient alors négligeable.

Acheminer deux appareils de mesures (Raman et Rayleigh) sur la plateforme ODE aurait permis d'effectuer deux mesures indépendantes sur chaque câble et donc de réaliser aisément la décorrélation. Pour des raisons pratiques (liées à la difficulté d'acheminer un interrogateur Raman), il a été décidé d'utiliser les données enregistrées par les thermocouples au moment de l'interrogation des FOs. Ces valeurs permettront d'évaluer, avec une précision jugée suffisante, le profil de température le long du câble à FO, d'en déduire $C_T\Delta T$ pour enfin calculer le profil de déformation.

Trois aspects importants doivent être détaillés dans la démarche de séparation des effets de la température :

- Le premier aspect est lié au profil de température estimé dans la FO. La détermination de ce profil se fonde sur une sélection précise des thermocouples pour chaque bloc instrumenté et pour chaque cas d'instrumentation (en interne ou en surface des blocs). Le détail de cette démarche est présenté dans le paragraphe I.4.5.3 ;
- Le deuxième aspect précise comment différencier i) les effets thermiques entraînant une variation de la déformation ($\Delta\varepsilon_T$) de la FO et ii) les effets thermiques entraînant une variation de la température dans la FO (sans lien avec sa dilatation thermique) et donc un décalage spectral (le terme $C_T\Delta T$ de l'Equation IV-1) ;
- Le dernier aspect concerne la validation de la technique de séparation des effets de la température dans la mesure des déformations telle que présentée dans ce chapitre. Cette validation se fonde sur la comparaison entre les valeurs de déformation déduites de la méthode proposée et celles enregistrées par les cordes vibrantes.

Concernant le deuxième aspect, il est nécessaire de différencier les effets globaux de la température sur la mesure du décalage spectral ($C_\varepsilon\Delta\varepsilon_T + C_T\Delta T$) et les effets de la température sur cette mesure liés uniquement à la variation de la température de la silice et donc à la manière dont la lumière se propage dans cette silice ($C_T\Delta T$).

Pour supprimer les effets globaux de la température, une première démarche proposée par Butler *et al.* [171] consiste à utiliser deux groupes de capteurs (par exemple des capteurs à réseaux de Bragg) positionnés dans deux zones de l'ouvrage : une zone sollicitée mécaniquement et thermiquement et une zone uniquement sollicitée thermiquement (mais de manière identique à la zone sollicitée mécaniquement et thermiquement). En adoptant cette technique, les déformations dans le milieu hôte induites par le gradient de température peuvent être supprimées et les auteurs analysent uniquement la déformation du milieu hôte induite par la sollicitation mécanique.

Dans notre étude, nous cherchons à mesurer la déformation de la fibre en verre ($\Delta\varepsilon$) qui est la somme des deux composantes $\Delta\varepsilon_m$ et $\Delta\varepsilon_T$ (soit la déformation subie du fait des contraintes mécaniques et la déformation subie du fait de la dilatation/contraction thermique des matériaux) et ne cherchons qu'à supprimer l'influence du terme $C_T\Delta T$.

Concernant les cordes vibrantes, le coefficient de dilatation thermique de l'acier de la corde vibrante (α_a) étant très proche de celui du béton, les deux matériaux se dilatent/contractent de la même manière sous l'effet d'une variation de température. La dilatation/contraction thermique du milieu hôte (béton) n'induit donc pas de contrainte supplémentaire à la corde dont l'intensité de la tension reste donc uniquement due à la contrainte mécanique subie par le béton. Pour obtenir la déformation réelle du milieu hôte ($\Delta\varepsilon_{réel}$), c'est-à-dire la somme de la déformation du béton due à la sollicitation mécanique et de la dilatation/contraction thermique du béton, il convient donc de rajouter à la mesure acquise par la corde ($\Delta\varepsilon_{brut}$) la valeur de déformation due à sa dilatation/contraction thermique [19] suivant l'Equation IV-2.

$$\Delta\varepsilon_{réel} = \Delta\varepsilon_{brut} + \alpha_a\Delta T \quad (IV-2)$$

En pratique, cette correction n'est pas toujours réalisée pour des ouvrages instrumentés par cordes vibrantes, dont on souhaite connaître seulement les sollicitations mécaniques.

Dans notre étude, le calcul de ΔT se fait en considérant les valeurs de température enregistrées par le thermocouple le plus proche de chacune des cordes vibrantes.

IV.5.2.2. Sélection des thermocouples

A partir des coordonnées des thermocouples dans les blocs (voir Figure IV-4) et du parcours du câble dans chaque bloc, des thermocouples ont été sélectionnés afin d'estimer le profil de température le long du câble à FO, ceci pour chaque date de prise de mesure. Pour les câbles noyés, les thermocouples sélectionnés sont situés au milieu de chaque structure métallique (ou sont appuyés sur le ferrailage) à différentes hauteurs. Ce choix permet d'estimer la température du câble à FO au niveau des différents plans (verticaux et horizontaux).

Pour les câbles collés en surface, seuls les thermocouples les plus proches des surfaces instrumentées sont sélectionnés, car ils permettent de rendre précisément compte de la température de surface due à l'exposition au soleil de la face instrumentée. Ces thermocouples sont situés à une seule hauteur (mi-hauteur du bloc), mais en choisissant seulement ces thermocouples (et non aussi d'autres situés plus profondément) il est possible de limiter les erreurs liées à un éventuel gradient de température entre la face exposée à l'environnement

extérieur et le cœur du bloc, surtout quand l'interrogation est réalisée en été sur des blocs exposés au soleil au moment de la prise des mesures. Le Tableau IV-2 et le Tableau IV-3 regroupent les valeurs des températures des thermocouples sélectionnés aux moments des interrogations pour chaque bloc instrumenté.

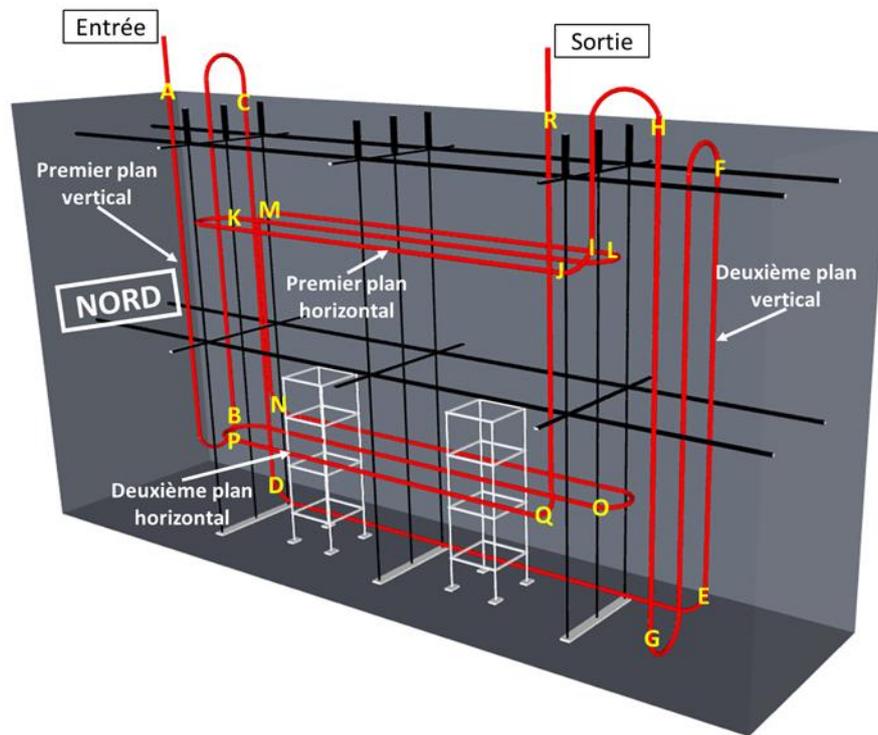
Tableau IV-2 : Données de température des thermocouples sélectionnées pour les blocs instrumentés par câbles noyés (dates grisées correspondant à une période d'immersion du bloc en piscine).

	Thermocouple sélectionné (°C)														
	801	802	803	804	805	806	501	502	510	201	202	203	204	205	206
Date de l'interrogation	Température du thermocouple sélectionné (°C)														
Neubrex noyé dans IB															
Mars 2019	12,8	14,6	14,6	14,7	14,6	14,4	11,4	13,6	14,3	12,8	14,4	14,4	14,3	14,2	13,9
Juillet 2019	32,6	33,2	33	33	32,8	32,3	32	33,1	32,2	32,9	33,4	33,2	33,1	33,9	32,3
Décembre 2019	11,3	10,2	10	10	9,8	9,4	11,7	10,6	9,2	11	9,9	9,6	9,6	9,5	9,2
Juillet 2020	28,8	30,1	30	30	30	29,5	28,2	29,8	29,9	29,2	30,5	30,4	30,4	30,3	29,8
Neubrex noyé dans IA															
Juillet 2019	33	33	32,7	32,7	32,6	32,2	33,1	33,2	32	32,7	32,7	32,5	32,4	32,3	31,7
Décembre 2019	21,7	24,8	25,2	25,1	25,1	23,6	19,1	22,6	24,2	21,7	24,9	25,1	25,2	25,1	23,7
Juillet 2020	30	29,7	29,2	29,1	28,8	28,2	28,7	30,3	28	29,7	29,6	29,1	29	28,7	27,7
Neubrex noyé dans KB															
Juillet 2019	33,1	33,9	33,8	33,9	33,7	33	33,9	33,7	32,9	33,1	33,7	33,6	33,5	33,3	32,6
Décembre 2019	21,3	24,4	24,8	24,7	24,8	23,8	19,3	22,4	24,2	21,5	24,4	24,8	24,8	24,6	24,0
Juillet 2020	29,0	29,6	29,2	29,2	28,8	27,8	28,5	29,9	27,9	29,7	29,8	29,3	29,2	28,8	27,9

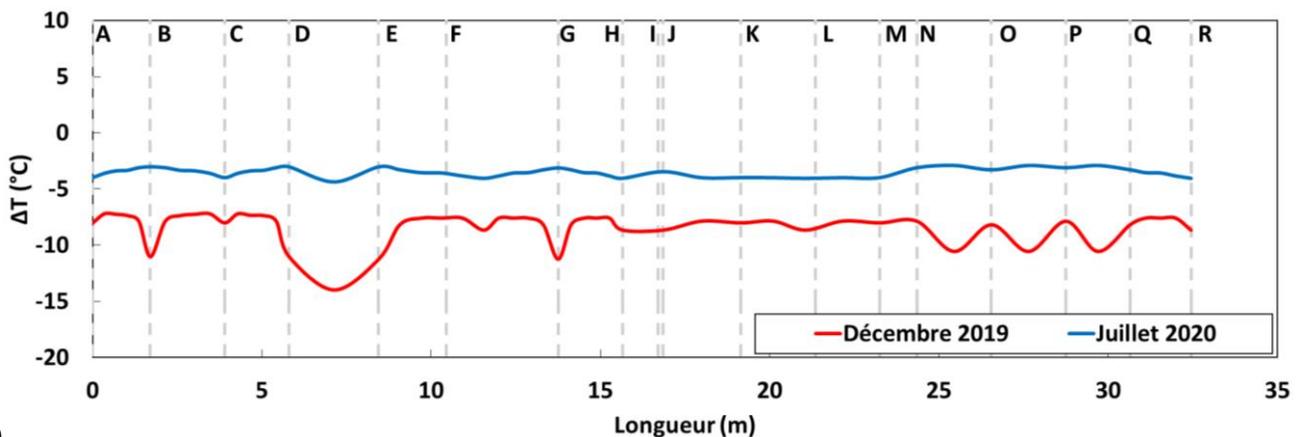
Tableau IV-3 : Données de température des thermocouples sélectionnées pour les blocs instrumentés en surface (dates grisées correspondant à une période d'immersion du bloc en piscine).

	Thermocouple sélectionné (°C)			
	901	701	601	401
Date de l'interrogation	Température du thermocouple sélectionné (°C)			
AFL collé sur ZA				
Mars 2019	22,9	-	22	-
Juillet 2019	32	-	32	-
Décembre 2019	10,5	-	10,8	-
Juillet 2020	26,5		26,7	
Neubrex collé sur ZA				
Mars 2019	-	13,6	-	13,5
Juillet 2019	-	31,0	-	31,7
Décembre 2019	-	10	-	10,1
Juillet 2020		26,1		27
Neubrex collé sur KB				
Juillet 2019	-	39,3	-	39,1
Décembre 2019	-	25,4	-	25,4
Juillet 2020	-	28,4	-	28,5

Les valeurs répertoriées dans le Tableau IV-2 et le Tableau IV-3 permettent de tracer les profils de variation de température entre la mesure de référence et les différentes échéances d'interrogation des câbles à FO noyés et collés dans les blocs. Nous présentons sur la Figure IV-26, à titre d'exemple, le profil de température du câble Neubrex noyé dans le Bloc IA.



(a)



(b)

Figure IV-26 : (a) Plan d'instrumentation du Bloc IA par câble Neubrex noyé et définition des points de repère sur le parcours du câble ; (b) Profil estimé de la variation de la température entre les échéances de mesures le long du câble.

IV.5.3. Premières mesures de déformation dans les blocs

Dans ce paragraphe nous présentons l'ensemble des profils de déformation obtenus par interrogation des câbles à FO noyés dans les blocs ODOBA ou collés sur leur surface. Ceux-ci sont obtenus après séparation des effets de la température agissant sur le terme $C_T \Delta T$ de l'Equation IV-1. Ces résultats seront comparés avec les mesures des cordes vibrantes, là encore après correction des effets dus à la dilatation (ou contraction) thermique de ces dernières. Pour

chaque tronçon du câble noyé ou collé, les résultats des déformations sont comparés aux données corrigées de la corde vibrante la plus proche.

Pour cette comparaison, la résolution (i.e. longueur d'intégration) choisie pour les mesures par capteurs à FO est de 5 cm. Cette longueur est suffisante pour déduire un profil quasi-continu sur les parcours des câbles qui mesurent plusieurs mètres (pour le cas du câble collé en surface) et plusieurs dizaines de mètres (pour le cas du câble noyé dans les blocs).

Rappelons que les câbles à FO sont interrogés par les deux extrémités quand cela est possible. Cependant, les profils de déformations présentés dans ce paragraphe sont ceux issus de l'interrogation réalisée sur seule extrémité (l'entrée des câbles indiquée dans les plans) lorsqu'il est possible d'obtenir un profil sur toute la longueur du câble à FO. En revanche, quand une perte optique importante se produit localement sur le parcours du capteur (concentration importante des contraintes entre deux échéances de mesures ou pincement du capteur lors de la fabrication du bloc), nous utilisons les données obtenues par interrogation du câble à FO de la deuxième extrémité (la sortie des câbles indiquée dans les plans) afin de reconstituer les profils de déformation sur toute la longueur du capteur.

IV.5.3.1. Premières mesures effectuées sur le Bloc ZA

La Figure IV-27 présente les premiers résultats des mesures de déformation par capteurs à FO effectuées sur le Bloc ZA instrumenté par câble AFL collé en surface.

Trois échéances de mesure de déformation ont pu être effectuées sur le Bloc ZA avec câble AFL collé en surface. Toutefois, dans la zone 2 du bloc (Figure IV-27-a), la corde vibrante la plus proche destinée à mesurer les déformations verticales ne fonctionne pas. Par conséquent, sur la Figure IV-27, il n'est possible d'indiquer la comparaison entre les FOs et les cordes vibrantes que pour les mesures de déformation horizontales (Figure IV-27-c). Nous rappelons que la mesure par corde vibrante est fournie par la corde vibrante noyée à 50 cm du parement.

Les profils de déformation acquis sur les deux parcours de câble (Figure IV-27-b et Figure IV-27-c), illustrent clairement l'avantage des mesures par capteurs à FO. En effet, ceux-ci ont permis d'obtenir des mesures continues sur toute la longueur du câble en mettant en évidence les variations de la déformation dans un milieu hétérogène qu'est le béton. Les profils font apparaître également des pics de déformations dus à des concentrations de contrainte ainsi que des zones en compression (valeurs négatives de la déformation) qui se confirment sur les différentes échéances de mesure. En revanche, la tendance générale des profils indique une amplitude très faible des déformations réfutant ainsi l'hypothèse d'un début de développement des pathologies dans le bloc. Toutefois, les variations d'amplitude des déformations relevées par les FO entre les échéances et validées par les enregistrements de la corde vibrante (CV) confirment le fait que ces déformations sont liées à l'expansion thermique du bloc. En effet, le profil de l'échéance 3 (juillet 2020) se situe entre les profils des échéances 1 (juillet 2019) et 2 (décembre 2019). L'échéance 1 correspond à une période où les valeurs enregistrées par les thermocouples dépassaient les 31 °C, alors que les températures ne dépassaient pas les 11 °C lors de l'échéance 2 et demeuraient en dessous de 27 °C lors de l'échéance 3.

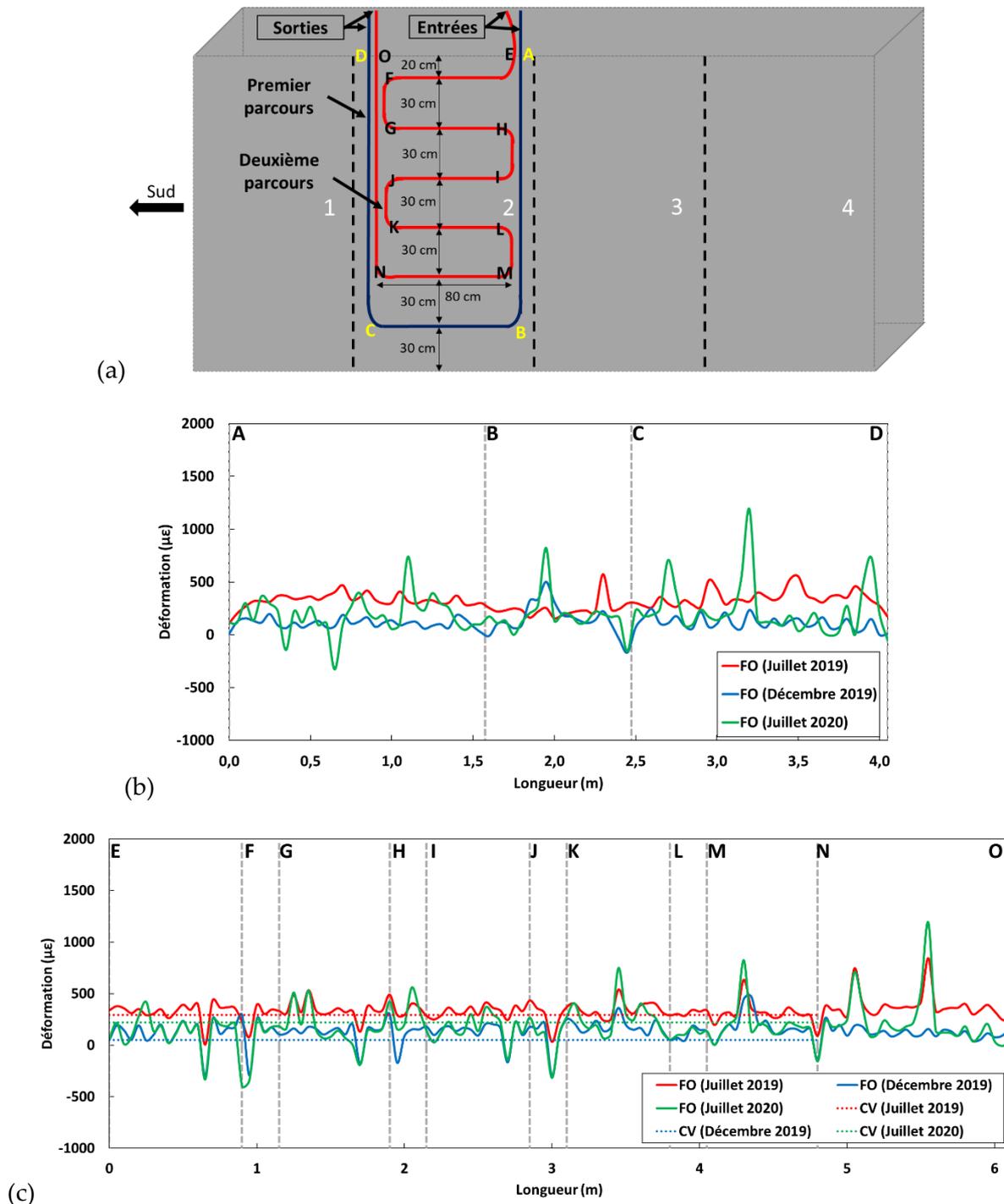


Figure IV-27 : (a) Plan d'instrumentation du Bloc ZA par câble AFL collé et indication des points de repère sur le parcours du câble ; Profils de déformation mesurés par les câbles à FO comparés aux mesures des cordes vibrantes (CV) pour (b) le premier parcours et (c) le second parcours.

Nous présentons également dans la Figure IV-28 les profils de déformation obtenus par interrogation des deux câbles à FO Neubrex collés en surface du Bloc ZA. Identiquement au cas précédent, les courbes de la Figure IV 29 font apparaitre des concentrations de contrainte et il est possible, comme précédemment, de conclure que les faibles déformations enregistrées sont dues à l'expansion thermique du béton qui prend sa valeur maximale à la première échéance en été 2019 et sa valeur minimale en décembre 2019. Il convient de noter que c'est la même corde vibrante qui a été utilisée pour comparer les mesures par FO avec câble AFL précédentes (Figure IV-27) et celles par câbles à FO Neubrex (Figure IV-28). C'est à partir des mesures de

cette corde que nous avons validé l'hypothèse précédemment formulée d'une déformation uniquement due à l'expansion thermique.

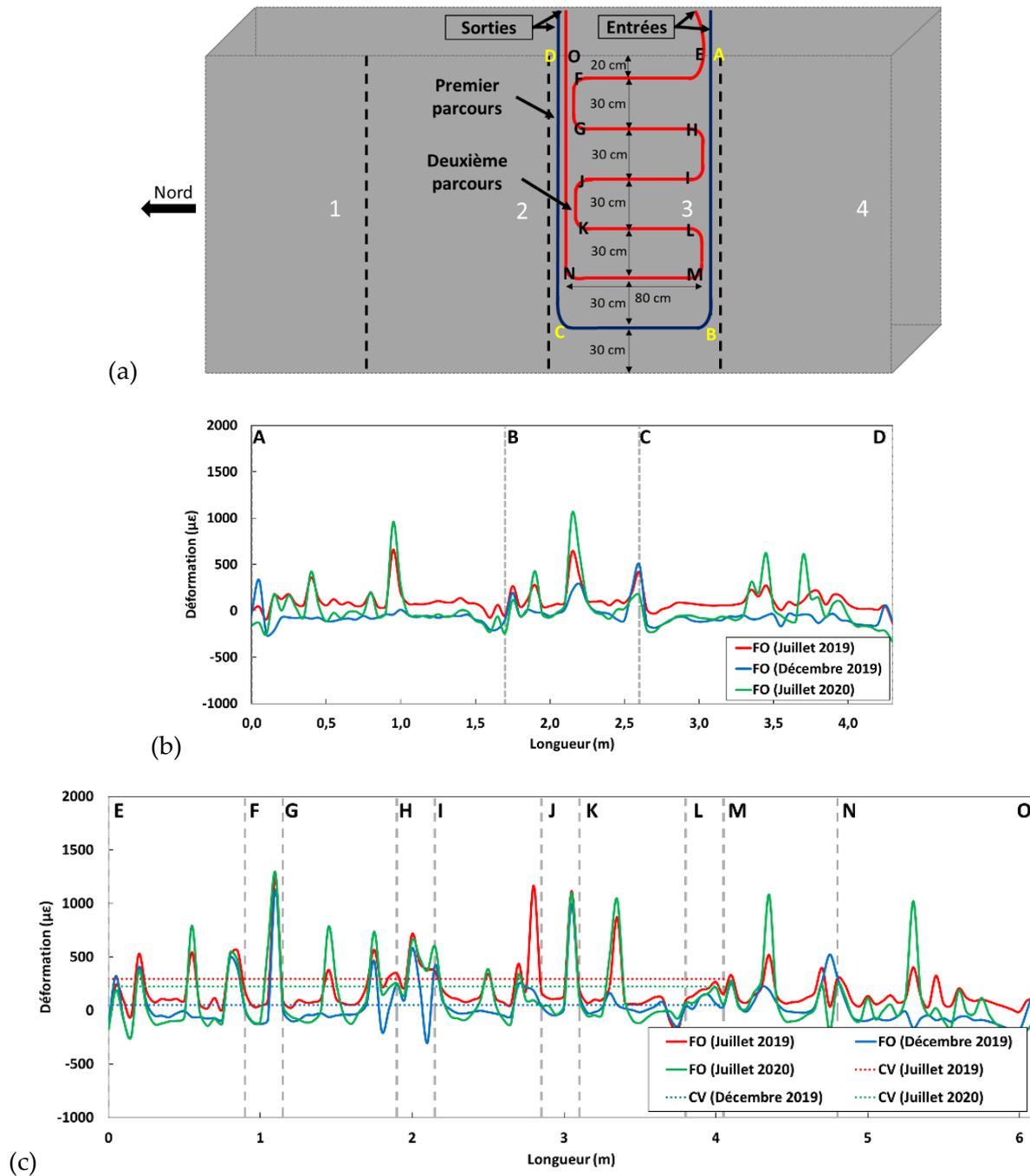


Figure IV-28 : (a) Plan d'instrumentation du Bloc ZA par câble Neubrex collé et indication des points de repère sur le parcours du câble ; Profils de déformation mesurés par les câbles à FO comparés aux mesures des cordes vibrantes (CV) pour (b) le premier parcours et (c) le second parcours.

IV.5.3.2. Premières mesures effectuées sur le Bloc IB

Le Bloc IB a été le premier bloc ODOBA instrumenté par câble à FO noyé dans le béton. Les profils de déformation enregistrés par ce capteur sont présentés sur la Figure IV-29.

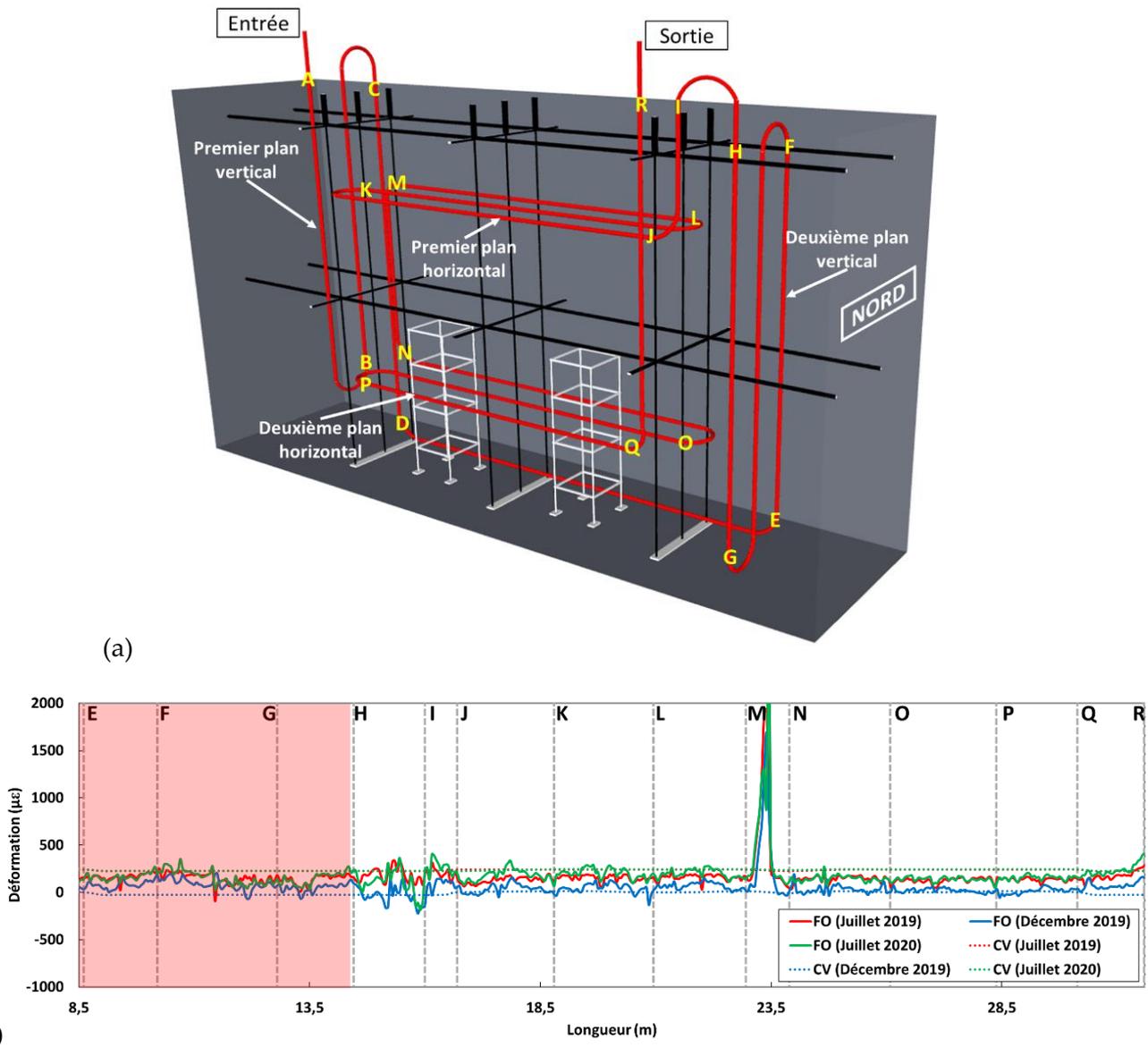


Figure IV-29 : (a) Plan d'instrumentation du Bloc IB par câble Neubrex noyé et indication des points de repère sur le parcours du câble ; (b) Profils de déformation mesurés par les câbles à FO comparés aux mesures des cordes vibrantes (CV).

Les profils de la Figure IV-29-b sont obtenus par interrogation du capteur FO depuis la seule extrémité où l'établissement d'une connexion optique était possible, du côté nord du bloc (point R). Ils s'affichent en partie sur une zone au fond rose afin de rappeler que cette zone (E-F-G-H, correspondant au second plan vertical d'instrumentation par FO voir Figure IV-29-a) s'est déplacée lors du coulage du bloc et n'est donc plus parfaitement localisée dans la géométrie 3D du bloc. Les mesures dans cette zone sont donc inexploitable.

De plus, les profils de la Figure IV-29-b n'indiquent pas de mesure sur le segment de parcours A-B-C-D (correspondant au premier plan vertical voir Figure IV-29-a) car des pertes optiques importantes y ont été mesurées par l'OBR. Le traitement des données n'a donc pas été possible pour ce segment. Ces pertes sont probablement dues à un pincement du câble à proximité du point E survenu suite au déplacement accidentel du second plan vertical d'instrumentation lors du coulage.

Dans ce bloc, si l'ensemble des mesures par FO est exploitable sur les plans horizontaux, seuls quelques segments verticaux offrent des mesures de déformation (segment M-N et segment Q-R). Identiquement à ce qui a été observé pour le Bloc ZA, les profils de déformation dans le Bloc IB ne font pas apparaître de déformations importantes pouvant être liées à un déclenchement de la pathologie de gonflement dans le bloc. Les faibles déformations mesurées et validées par les cordes vibrantes (CV) semblent plutôt, de nouveau, liées aux phénomènes de dilatation/contraction thermique du bloc (profils sensiblement équivalents entre juillet 2019 et juillet 2020, mais nettement plus faibles en décembre 2020).

Une fissure du béton au jeune âge apparaît à proximité du premier plan vertical (segment M-N). Si celle-ci s'ouvre de manière significative dans le futur, elle entraînera une rupture en traction du câble, ou des phénomènes générant d'importantes pertes optiques. Toute mesure sur le segment M-H deviendra alors impossible.

Des prélèvements de petite taille (carottes de 10 cm de diamètre) ont été réalisés par l'IRSN sur la partie haute du bloc et des essais de vieillissement accéléré ont été réalisés sur ces éprouvettes pour valider la réactivité du béton du bloc. Les résultats ont montré des signes nets de déclenchement de la RSI et confirment donc la réactivité du Bloc IB. Celui-ci devrait alors développer une pathologie de gonflement après que les cycles de vieillissement accéléré en piscine lui aient été appliqués.

IV.5.3.3. Premières mesures effectuées sur le Bloc IA

Le Bloc IA est un bloc non armé instrumenté avec le câble Neubrex noyé. La fixation du câble dans le coffrage a profité de l'expérience acquise lors du coulage du bloc IB et a donc été renforcée par des tiges métalliques afin d'éviter tout mouvement du second plan vertical lors du coulage. Les profils de déformation enregistrés par le capteur à FO sont comparés aux valeurs des cordes vibrantes (CV) sur la Figure IV-30.

Les profils de déformation aux deux échéances de mesure ont permis d'obtenir un profil continu sur toute la longueur du câble noyé, assurant ainsi une mesure des déformations horizontales et verticales. Les améliorations apportées lors de l'installation du câble avant le coulage ont permis d'éviter les mouvements importants du câble durant le coulage et ont donc permis d'éviter tout questionnement concernant la position du câble dans le bloc.

Les valeurs des déformations enregistrées par le capteur à FO sont validées par celles enregistrées par les quatre cordes vibrantes (sur chaque tronçon du câble à FO, les valeurs de déformation sont comparées aux valeurs de la corde vibrante la plus proche).

Bien que la mesure de référence ait été réalisée en plein été (juillet 2019) et la première échéance en décembre 2019, le premier profil de déformation (profil rouge de la Figure IV-30) ne fait pas apparaître de contraction due à la baisse de température entre ces deux périodes sur la plateforme ODOBA. Ce résultat s'explique par le fait que la mesure de la première échéance (décembre 2019) a été prise alors que le Bloc IA était en piscine (phase humide du cycle d'imbibition/séchage) à une température au sein du bloc avoisinant 25 °C (voir le Tableau IV-2 et la Figure IV-25). Cette immersion réduit ainsi la valeur du gradient thermique entre la mesure de référence (approx. 32 °C voir le Tableau IV-2) et celle de la première échéance. De plus, le

gonflement hydrique du bloc en immersion dans l'eau vient également compenser la faible contraction thermique pouvant avoir eu lieu entre ces deux périodes des mesures. A la deuxième échéance de mesure en juillet 2020, les déformations dans le bloc demeurent très faibles et sont liées aux faibles différences de températures entre la mesure de référence effectuée en juillet 2019 (25 °C) et la mesure de juillet 2020 (approx. 29 °C, voir le Tableau IV-2).

De façon similaire à ce qui avait été conclu pour les blocs ZA et IB, il apparaît qu'aucune pathologie de gonflement ne s'est encore développée dans le Bloc IA en juillet 2020.

Des essais d'expansion sur éprouvettes carottées sont prévus pour ce bloc, mais le carottage n'a été réalisé par l'IRSN qu'en septembre 2020 et les résultats des essais ne seront disponibles qu'en mars 2022.

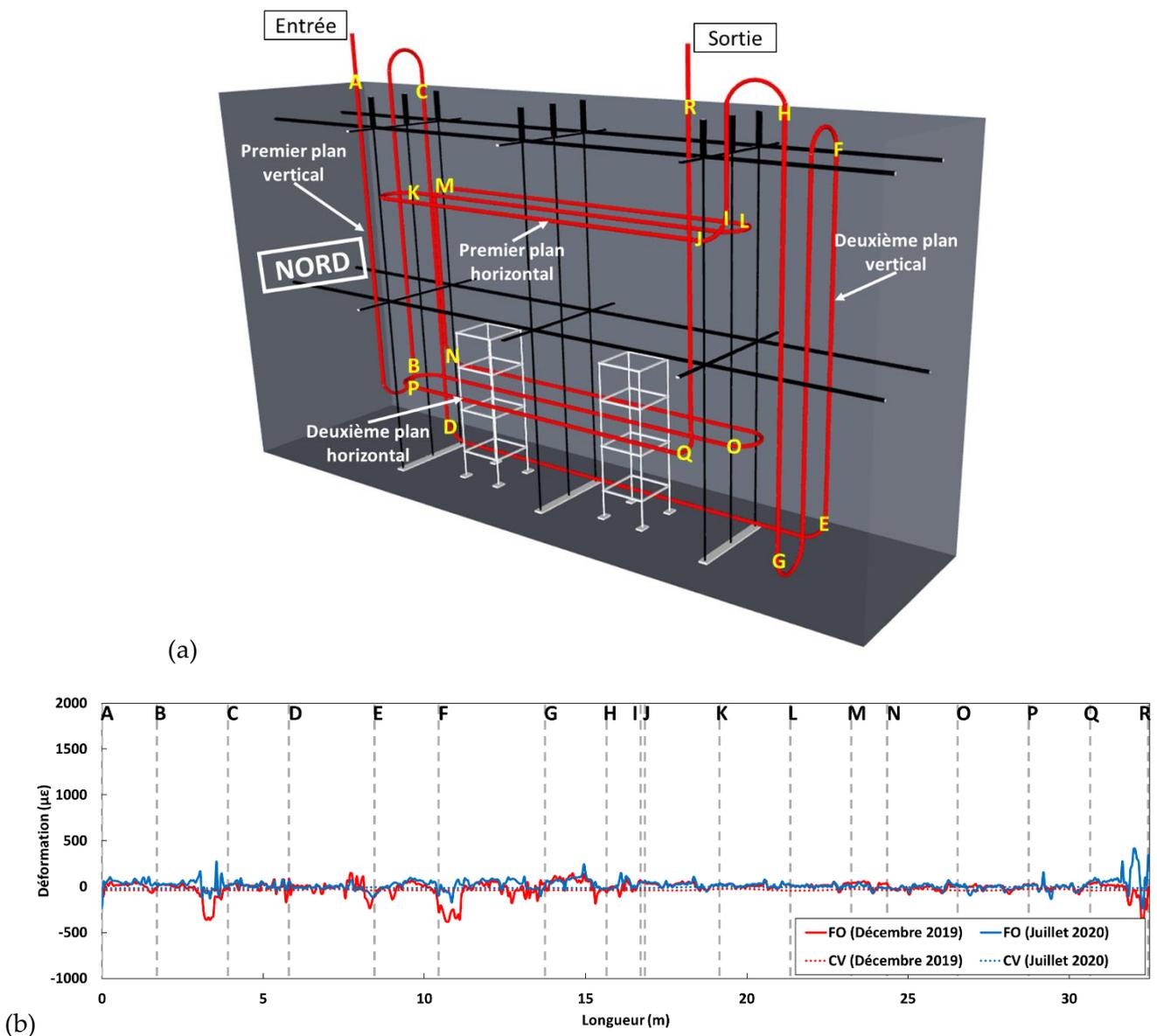


Figure IV-30 : (a) Plan d'instrumentation du Bloc IA par câble Neubrex noyé et indication des points de repère sur le parcours du câble ; (b) Profils de déformation mesurés par les câbles à FO comparés aux mesures des cordes vibrantes (CV).

IV.5.3.4. Premières mesures effectuées sur le Bloc KB

Ce paragraphe s'intéresse aux premiers résultats acquis pour le Bloc KB avec les capteurs à FO noyés et collés en surface. Rappelons que le Bloc KB est le seul bloc ODOBA ferrillé à avoir été instrumenté par FOs.

La Figure IV-31 présente les profils de déformation enregistrés par les capteurs à FO noyés, comparés aux valeurs enregistrées par les 3 cordes vibrantes (CV1, CV2 et CV3, voir Figure IV-12-a) opérationnelles au moment des mesures et situées à proximité des câbles.

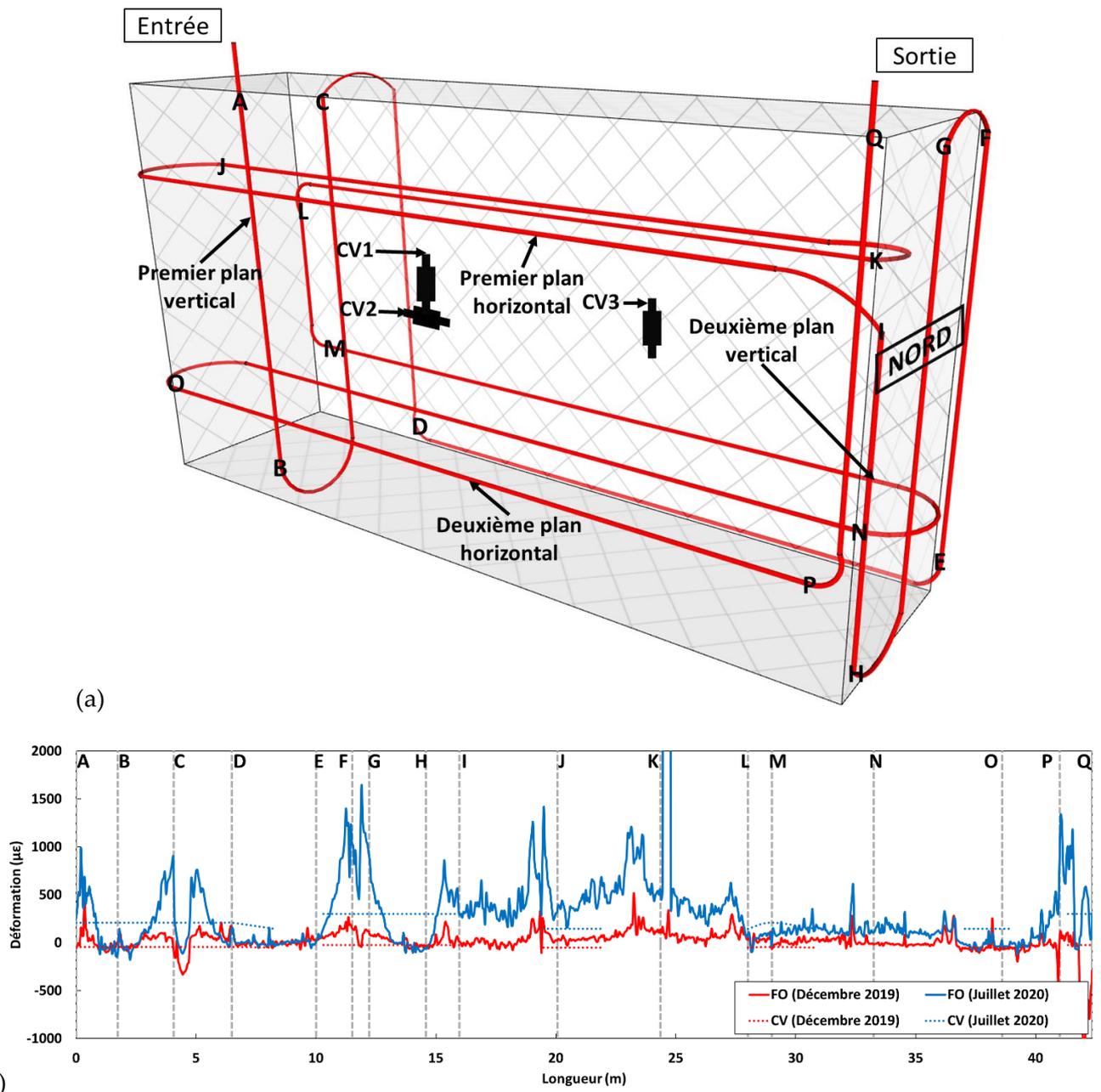


Figure IV-31 : (a) Plan d'instrumentation du Bloc KB par câble Neubrex noyé et indication des points de repère sur la longueur du parcours du câble ; (b) Profils de déformation mesurés par les câbles à FO comparés aux mesures des cordes vibrantes (CV).

Les résultats présentés sur la Figure IV-31 font apparaître une concordance satisfaisante entre les mesures des capteurs à FO et les valeurs enregistrées par les cordes vibrantes. Nous

rappelons que la mesure de référence dans ce bloc a été réalisée en juillet 2019 (approx. 33 °C voir Tableau IV-2) et que lors de la réalisation de la mesure à la première échéance (en décembre 2019), le Bloc KB était en cycle d'imbibition (approx. 25 °C). Par conséquent, nous obtenons pour cette première échéance des mesures indiquant les mêmes tendances que celles observées pour le Bloc IA : aucune contraction notable en raison du faible gradient de température et du gonflement hydrique du béton du bloc.

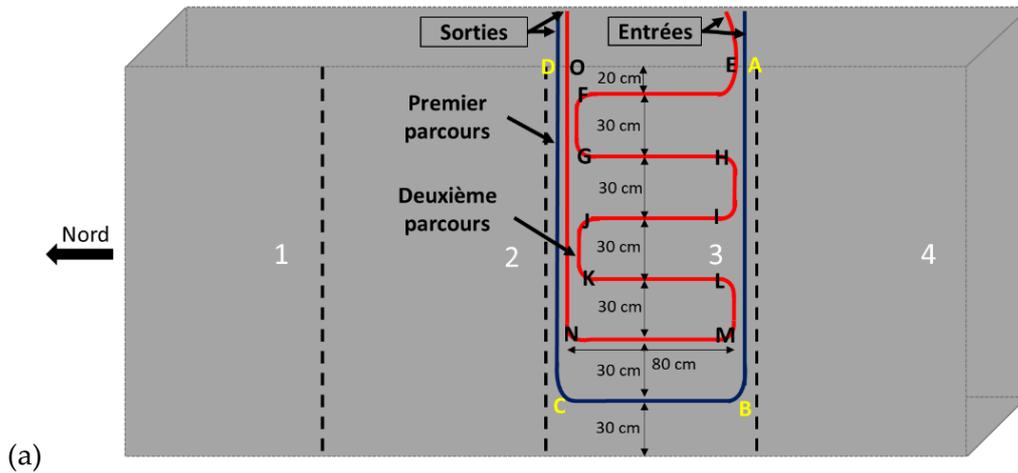
A la deuxième échéance de mesure (juillet 2020), les capteurs à FO et les cordes vibrantes indiquent des déformations plus importantes avec quelques pics enregistrés par les FOs. Ces pics de déformations sont principalement concentrés au niveau du segment I-J-K-L, donc au niveau du premier plan horizontal situé à 3/4 de la hauteur du bloc. Ces déformations augmentent également au voisinage des points A, C, F, G, P, Q c'est à dire aux points de courbure du câble, plutôt en partie verticale et souvent dans la partie supérieure du bloc.

Les valeurs moyennes des déformations étant de l'ordre de 300 $\mu \epsilon$ (0,03 %) et atteignant 1000 - 1500 $\mu \epsilon$ (0,1 - 0,15 %) dans quelques zones de concentration de contraintes, ne permettent pas de conclure à ce stade, sur l'initiation d'une pathologie de gonflement dans le bloc. Toutefois, on peut confirmer que ces déformations ne sont pas liées à une expansion thermique du bloc.

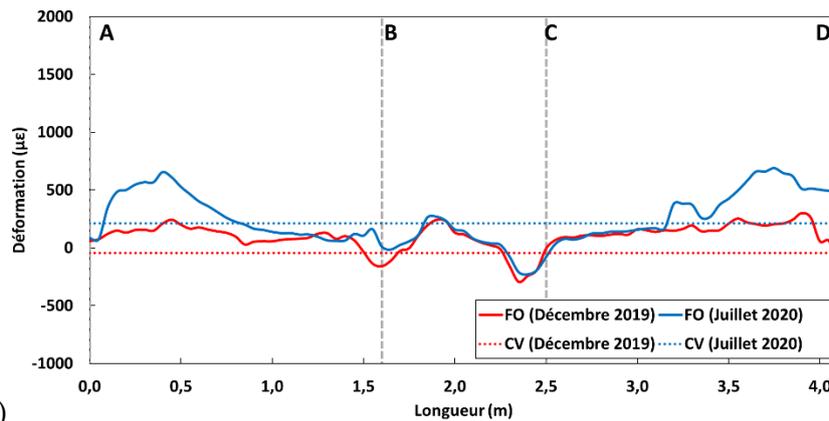
La Figure IV-32 livre les profils de déformation obtenus par interrogation du câble à FO Neubrex collé sur la surface du bloc ferrailé KB. Les courbes affichées confirment les tendances observées pour le capteur noyé dans ce même bloc :

- Aucun contraction du bloc n'apparaît sur les résultats de la première échéance de mesure de décembre 2019. Ce résultat est lié à l'imbibition du bloc dans l'eau à 25 °C lors de cette première échéance ;
- Des déformations sensibles du bloc sont observées à la deuxième échéance de mesure. Celles-ci sont légèrement plus intenses dans le sens vertical et dans la partie haute du bloc. Elles ne sont pas liées à une expansion thermique.

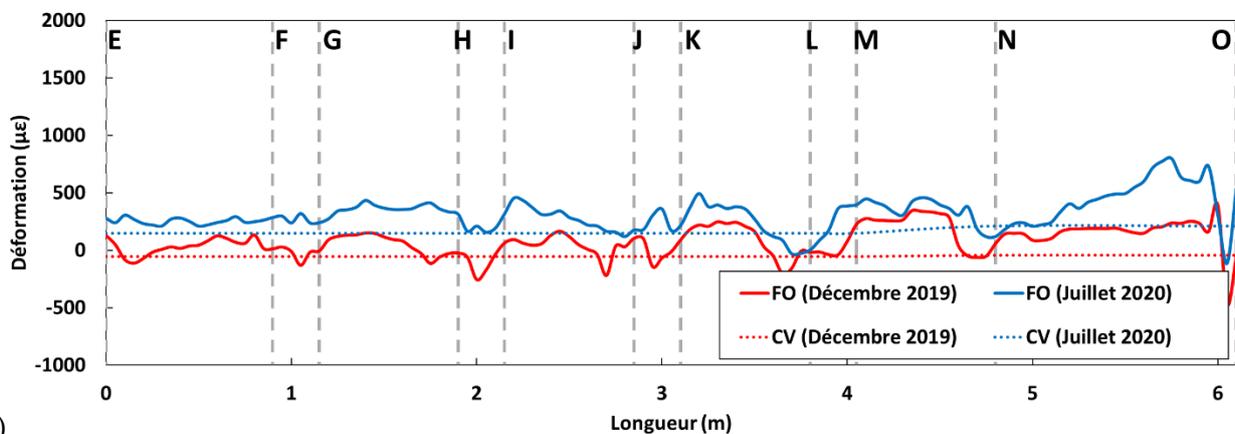
Le profil du second parcours semble indiquer que l'intensité de la déformation horizontale est globalement constante sur toute la longueur instrumentée et pour toutes les hauteurs.



(a)



(b)



(c)

Figure IV-32 : (a) Plan d'instrumentation du Bloc KB par câble Neubrex collé et indication des points de repère sur le parcours du câble ; Profils de déformation mesurés par câbles à FO comparés aux mesures des cordes vibrantes (CV) pour (b) le premier parcours et (c) le second parcours.

Rappelons que :

- la formulation du béton du Bloc KB (bloc armé) est tout à fait semblable à celle du Bloc IB (bloc non armé) ;
- ces deux blocs ont subi un traitement thermique directement après coulage puis, plus tard, seul le bloc KB a subi des cycles d'imbibition/séchage ;
- les essais sur les éprouvettes carottées du Bloc IB ayant subi un vieillissement accéléré ont indiqué une grande réactivité de la composition du béton de ces deux blocs.

Bien que nous ayons précédemment indiqué que l'intensité des déformations enregistrées en juillet 2020 ne permette pas d'affirmer qu'une pathologie de gonflement ait été initiée, il est toutefois possible qu'une telle pathologie se soit déclenchée après l'immersion du bloc (en décembre 2019) et que ces effets deviennent observables lors d'une prochaine échéance de mesure. En extrapolant sur les mesures de juillet 2020, et en admettant l'hypothèse qu'elles reflètent un début de comportement de gonflement, il est donc possible de se risquer aux conjectures suivantes concernant le développement des pathologies dans le Bloc KB, celles-ci étant destinées à être confrontées aux résultats des prochaines échéances de mesures :

- La direction des mesures n'a pas d'effet flagrant sur le développement des gonflements (surtout au cœur du bloc) ;
- Les zones de la moitié supérieure du bloc semblent avoir débuté leur expansion en premier. Ce résultat est cohérent avec le gradient vertical de température mesuré dans le bloc durant le traitement thermique au jeune âge (voir Figure IV-33) et donc du gradient d'énergie thermique utile (énergie thermique en dessus d'un seuil de température T_0 responsable du développement de la RSI [148]) ainsi créé. Autrement dit, la température maximale atteinte durant l'étuvage étant plus faible dans la partie inférieure du bloc, il semble raisonnable de prévoir que la pathologie se développe en premier dans la partie supérieure du bloc.

En ce qui concerne les mesures en surface, les valeurs de température et les énergies utiles durant le traitement thermique sont assez homogènes et sont assez élevées. On peut donc en conclure que si le gonflement s'initie et se développe, celui-ci sera plus homogène en surface qu'en interne (bien entendu, le gonflement interne aura des conséquences sur la déformation de surface).

L'effet du ferrailage sur le Bloc KB pourrait être étudié par la suite en s'appuyant sur les mesures réalisées par capteurs à FO noyés dans le Bloc IB après les cycles de vieillissement (pour rappel, le Bloc IB est un bloc non armé mais dont le béton et le traitement thermique sont identiques à ceux du Bloc KB).

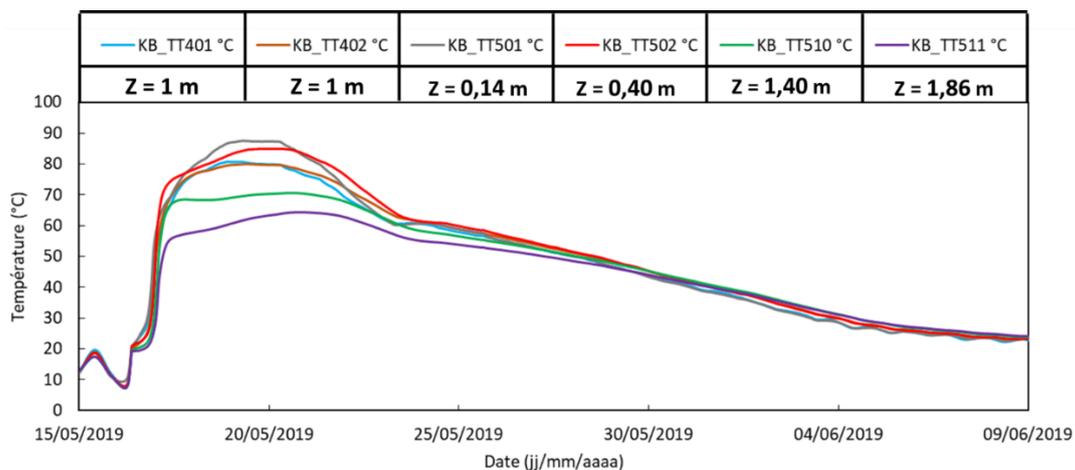


Figure IV-33 : Températures enregistrées par quelques thermocouples au sein du Bloc KB durant le traitement thermique (l'origine de l'axe \bar{z} se situe au centre de la face supérieure du bloc).

IV.6. Conclusion et perspectives du chapitre IV

Suite à de multiples interventions à l'IRSN Cadarache durant les trois années du présent travail de thèse, nous avons pu nous coordonner avec les collaborateurs du projet afin de planifier l'instrumentation par câbles à FO noyés (avant le coulage) et collés (après le coulage) de plusieurs blocs de béton : des blocs ferraillés et non ferraillés, des blocs destinés à développer simultanément deux pathologies de gonflement (la RAG et la RSI) ainsi que des blocs destinés à développer uniquement la RSI.

Le deux câbles Neubrex et AFL ont été utilisés pour instrumenter les blocs lors de la première intervention. Cette première expérience nous a convaincu ensuite de n'utiliser que le câble Neubrex lors des interventions d'installation de capteurs à FO suivantes. Cette décision a été motivée par la résistance constatée en laboratoire du revêtement externe du câble Neubrex en milieu alcalin. La distance importante entre l'UGE Marne-la-Vallée et l'IRSN Cadarache n'a pas facilité le transport de deux interrogateurs (Rayleigh et Raman) qui auraient permis de décorréler précisément la mesure de température et la mesure de déformation en permettant d'interroger chaque fibre avec un capteur dédié. Il a donc été décidé de mettre en place une technique de décorrélation simplifiée se basant sur la mesure de température fournie par les thermocouples noyés dans les blocs. Cette méthode a permis de prendre en considération des gradients thermiques parfois importants entre des échéances des mesures qui ont eu lieu aux différentes saisons de l'année. Les résultats de cette décorrélation ont été validés par les données des cordes vibrantes dans les blocs et la précision obtenue a été jugée satisfaisante compte tenu des déformations importantes attendues dans les blocs destinés à développer des pathologies.

Les premières mesures par capteurs à FO collés en surface des blocs n'ont pas fait apparaître de différences majeures dans le comportement des deux câbles à FO. Ce résultat atteste de la qualité du transfert d'effort mécanique des deux câbles et confirme les résultats de laboratoire présentés dans le chapitre précédent.

Les divers aspects du comportement des blocs révélés par les profils acquis par les câbles collés en surface ont été confirmés par les mesures des capteurs noyés. Ce résultat atteste de la capacité d'une mesure de surface répartie à capter les caractéristiques essentielles du comportement du bloc instrumenté. L'instrumentation de surface a été apte à fournir un profil de mesure de déformation continu dans deux directions (verticale suivant l'axe \vec{z} et horizontale suivant l'axe \vec{y}) permettant d'identifier précisément le comportement du bloc, tandis que les cordes vibrantes ont montré leur limites liées à l'aspect ponctuel de leur mesure. Ces profils continus très sensibles aux petites déformations ont permis de localiser les zones de concentration de contraintes et des fissurations au jeune âge du béton des blocs. En plus, toujours grâce à la grande sensibilité de ces capteurs, il a été possible i) de mesurer les faibles expansions et contractions thermiques qu'ont subies les blocs de béton du fait des températures différentes aux échéances de mesure, ii) de repérer le probable effet du gonflement hydrique des blocs en cycles d'imbibition et ii) d'acquérir très tôt des profils de déformations pouvant être liés à un début de gonflement du bloc suite à un déclenchement de l'une des deux pathologies attendues.

Grâce au câbles à FO noyés parcourant de manière tridimensionnelle le volume des blocs, il a été possible d'identifier des différences de comportement entre les différentes zones ou

directions instrumentées. Si ces différences se confirment lors des prochaines échéances, et notamment si elles s'amplifient, l'analyse permettra de mieux comprendre les conséquences structurales des pathologies de gonflement. Les effets de caractéristiques telles que la présence des armatures, la proximité des structures métalliques porteuses des thermocouples, les conditions de cure (notamment liées au gradients de températures) pourront être quantifiés et permettront une analyse complexe et complète des mécanismes de gonflement pathologiques et leurs conséquences sur le comportement structurel.

V. Approche expérimentale et numérique de l'effet de l'adhésif d'application d'une FO monomode en surface du béton sur sa réponse au droit d'une fissure

V.1. Introduction

La surveillance de la santé des structures est une approche cruciale dans le cadre de la gestion de la maintenance / sécurité des structures du génie civil et des centrales nucléaires. Elle reste également un domaine actif de recherche et de développement. La mesure des déformations par capteurs distribués à FO, la détection et la localisation des anomalies (mécaniques et même thermiques) permettent de conclure sur l'état général de la structure instrumentée [82] [77] [134] [172] [173].

Comme évoqué dans l'étude bibliographique, les techniques SHM basées sur l'utilisation des capteurs distribués à FO permettent, en plus du suivi des déformations, la détection précoce des fissures avant même qu'elles ne deviennent visibles à l'œil nu [174]. En effet, l'initiation et le développement des fissures entraînent l'apparition et la croissance de pics sur les profils de déformation enregistrés le long de la FO, et la localisation des pics est directement corrélée aux positions des fissures dans la structure [2] [172] [175]. Cependant, les ouvertures de fissures induisent une concentration de contrainte élevée sur une longueur de fibre très courte [136], ce qui peut entraîner la rupture prématurée de la FO qui constitue l'élément « sensible » de l'instrumentation. L'acquisition des mesures est alors perdue dès le premier stade de développement de la fissure dans la structure instrumentée. Les mesures ne peuvent alors plus être réalisées dans le cas de configurations de capteurs en boucle (rétrodiffusions Brillouin et Raman stimulées) et ne s'effectuent que partiellement jusqu'à la région des pertes optiques dans le cas d'une instrumentation par rétrodiffusion Rayleigh. C'est pourquoi les FO nues (avec leur revêtement primaire), qui sont très fragiles, ne sont généralement pas utilisées directement sur le terrain pour les opérations à long terme. Cependant, il est à noter que l'installation des FOs nues dans des structures en BA est possible lorsqu'elles sont collées à des barres d'armature [176] [177].

En pratique, la plupart des produits commerciaux comportent des couches de revêtement supplémentaires qui protègent le cœur de la FO contre les dégradations mécaniques / les attaques chimiques et empêchent une rupture prématurée du capteur [5] [9] [10]. Bien que ces câbles commerciaux soient plus robustes, la contrainte mesurée par la FO en silice peut être différente de la contrainte réelle dans la structure hôte, en raison de la déformation par cisaillement du revêtement du câble. Pour pallier ce biais et produire des mesures quantitatives de déformation, une méthodologie générale a été introduite dans une précédente étude [178] et s'est avérée efficace pour les câbles noyés dans le béton [14] et les câbles collés à la surface des structures en béton existantes [55]. Cette méthodologie est basée sur une modélisation du mécanisme de transfert d'effort à travers le revêtement du câble (et à travers la couche adhésive dans le cas de câbles collés), et permet de déterminer une FTM, qui relie la contrainte mesurée à la contrainte réelle dans la structure hôte. Toutefois, sa mise en œuvre nécessite une connaissance précise des propriétés mécaniques des différentes couches de matériaux constituant le revêtement et la détermination du comportement des différentes interfaces, ce qui peut être difficile à obtenir à partir d'expériences simples, en particulier pour les câbles présentant une structure interne complexe. En outre, la présence du revêtement de protection tend à augmenter la longueur d'ancrage du câble (appelée également longueur effective ou longueur de transfert), réduisant ainsi sa sensibilité vis-à-vis de la détection de fissures. Dans ce contexte, la conception d'un revêtement externe capable d'assurer à la fois une bonne

protection de la FO en silice et un impact limité sur les performances de détection des fissures est une tâche difficile.

Une autre voie, qui est explorée dans ce chapitre, consiste à utiliser des FOs monomodes (SMF) collées sur la structure hôte et à optimiser les propriétés mécaniques de la couche d'adhésif polymère, de manière à atténuer les concentrations de contraintes locales induites sur le capteur par les fissures du béton, tout en maintenant un bon niveau de détection de ces fissures. Dans cette configuration, la contrainte de la structure hôte est transférée uniquement par la couche adhésive, qui se déforme principalement sous l'effet d'une contrainte de cisaillement [55] [179]. Par conséquent, la sensibilité de mesure du capteur collé dépend fortement des caractéristiques de cette couche adhésive.

Ce type d'approche et l'influence des propriétés de l'adhésif sur le profil de déformation enregistré par le capteur n'ont été étudiés que par très peu de chercheurs dans la littérature. Par exemple, Glisic *et al.* ont intégré une FO dans un ruban et ont sélectionné avec soin l'adhésif afin de permettre une délamination partielle du ruban collé [180]. Au fur et à mesure que la fissure se développait dans la structure sous chargement, un décollement partiel du ruban était constaté au droit de la zone fissurée, et la contrainte maximale était alors redistribuée sur toute la longueur décollée, protégeant ainsi l'élément de détection contre une défaillance précoce.

Barrias *et al.* ont évalué les performances de différents adhésifs (époxy, silicone, polyester et cyanoacrylate) pour le collage d'une FO monomode sur la surface inférieure de poutres en BA soumises à des essais de flexion 3-points. Sous chargement statique et en fatigue mécanique, le capteur collé au moyen de l'adhésif époxy a permis d'obtenir les mesures de déformation les plus conformes à celles des jauges de déformation [134]. Cependant, après le régime élastique (lorsque la poutre est fissurée et la charge augmente jusqu'à la rupture), seul le capteur collé avec un adhésif en silicone (avec le module de cisaillement le plus faible) a donné des résultats réalistes [16].

Le présent travail s'appuie sur des investigations à la fois théoriques et expérimentales. Dans une partie préliminaire, un modèle simple aux éléments finis est proposé pour décrire le mécanisme de transfert d'effort dans une configuration spécifique où la fibre est insérée dans une rainure à la surface du béton, puis scellée au moyen d'un adhésif polymère. Ce modèle est ensuite utilisé pour évaluer la sensibilité du signal de déformation mesuré par le capteur à une variation de rigidité de l'adhésif, et ces résultats sont également comparés à ceux de modèles analytiques simples tirés de la littérature.

Deux essais mécaniques sont présentés dans la deuxième partie de ce chapitre : un essai de compression sur cylindre en béton et un essai de flexion 3-points sur éprouvette prismatique pré-entaillée en béton fibré. Des FOs monomodes avec revêtement primaire en polyimide sont collées sur la surface de ces éprouvettes en béton en utilisant plusieurs adhésifs de rigidités différentes, puis interrogées avec un réflectomètre à rétrodiffusion optique (OBR) basé sur la rétrodiffusion Rayleigh. Les mesures enregistrées par les capteurs à FO sont comparées avec les valeurs enregistrées à l'aide de capteurs de déformation classiques (jauges de déformations et capteurs LVDT).

Dans une dernière partie de ce chapitre, l'approche numérique sera étendue pour décrire la réponse du capteur collé lorsqu'une fissure se produit dans le béton et traverse son parcours. L'objectif est d'établir une fonction analytique permettant de relier les caractéristiques du pic de déformation mesuré par le capteur à l'ouverture de la fissure, et tenant compte de la configuration géométrique réelle du système.

V.2. Analyse théorique du transfert d'effort du béton vers la FO collée en surface

Dans cette partie, une analyse numérique du transfert d'effort est présentée puis comparée avec différents modèles analytiques disponibles dans la littérature.

V.2.1. Schéma d'instrumentation par FO collée à la surface du béton

La configuration expérimentale d'installation du capteur adoptée dans cette étude consiste à coller une FO monomode (présentant un diamètre extérieur de $160\ \mu\text{m}$ avec son revêtement en polyimide) dans une engravure (de largeur et de profondeur $2\ \text{mm}$) réalisée à la surface du béton au moyen d'une scie à béton. La FO est ensuite introduite dans l'engravure et un adhésif polymère est appliqué pour sceller la FO et assurer l'adhérence entre cette dernière et la structure en béton. La Figure V-1 montre la géométrie 2D simplifiée du capteur installé en surface (coupe transverse) sur une coche d'adhésif de hauteur HA , à partir de laquelle a été établi un modèle aux éléments finis destiné à étudier le transfert d'effort.

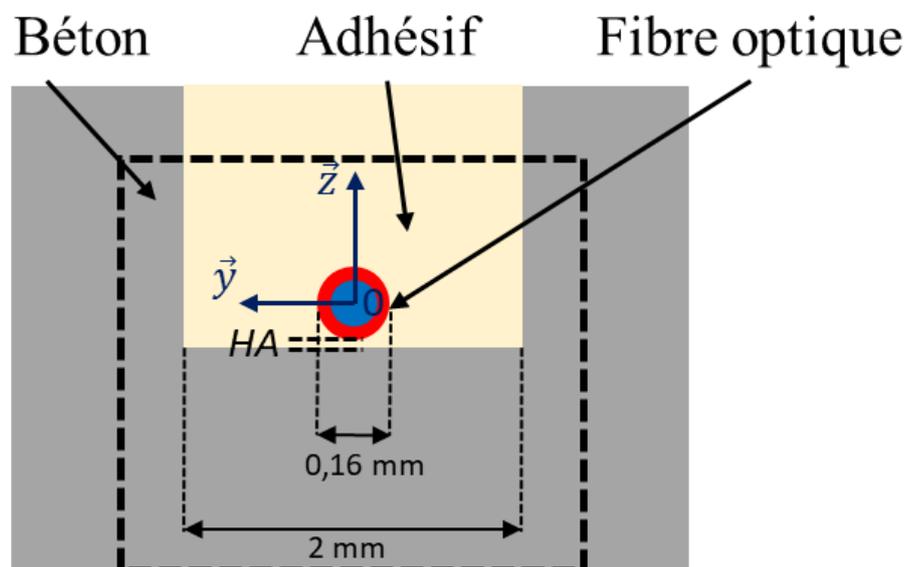


Figure V-1 : Schéma simplifié en 2D d'une FO collée dans une engravure en surface du béton.

V.2.2. Approche numérique de l'étude du mécanisme de transfert d'effort

La Figure V-2 illustre le modèle 3D simplifié adopté pour cette approche numérique en vue de décrire le transfert d'un effort de traction appliqué sur un élément en béton de longueur L_b vers le cœur en silice de la FO. Un déplacement imposé (\vec{DI}) est alors appliqué sur une extrémité du bloc de béton suivant l'axe \vec{x} tandis qu'un encastrement suivant ce même axe est appliqué au niveau de l'extrémité opposée. En considérant les symétries géométriques par rapport aux axes \vec{x} et \vec{z} , nous avons modélisé la moitié du système présenté sur la Figure V-2.

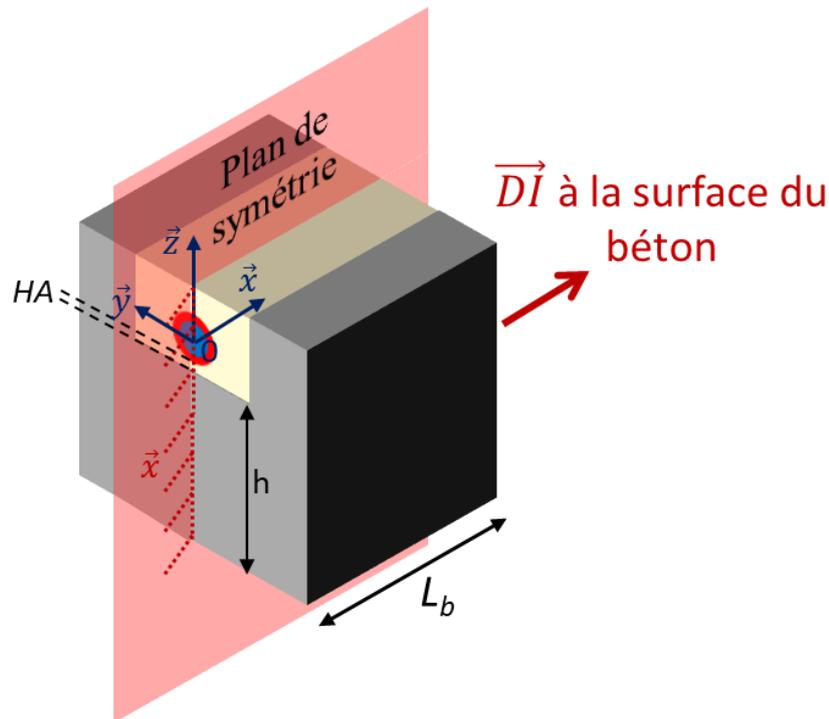


Figure V-2 : Modèle simplifié en 3D pour l'étude par éléments finis du mécanisme de transfert d'effort et les conditions aux limites adoptées.

Le modèle aux éléments finis est développé à l'aide du code de calcul Cast3m [169] en utilisant des éléments tétraédriques linéaires. Une analyse de convergence du maillage est réalisée et plusieurs tailles de maille sont testées (un exemple est présenté dans la Figure V-3). Le nombre de nœuds est donc optimisé de manière à minimiser les erreurs numériques et le temps de calcul (ce dernier augmente très significativement en affinant le maillage dans les modèles 3D).

Par ailleurs, le comportement des différents matériaux est supposé élastique linéaire et une adhérence parfaite est considérée au niveau de toutes les interfaces.

Afin de fournir des données comparatives, une analyse complémentaire a été réalisée à l'aide de modèles analytiques provenant de la littérature et présentés dans le paragraphe suivant.

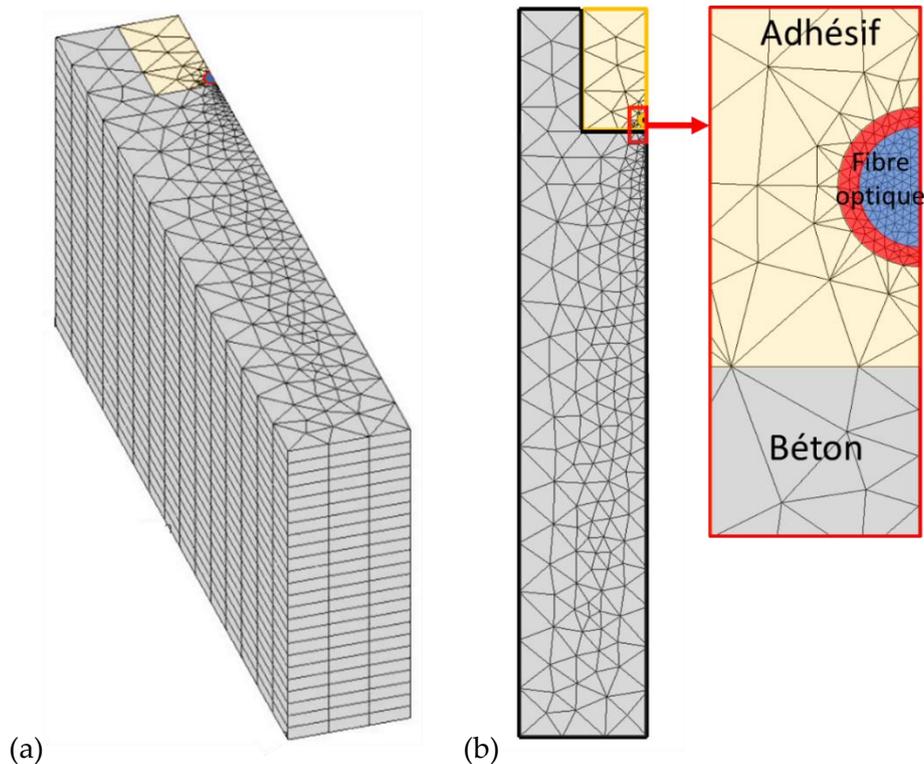


Figure V-3 : Maillage par éléments finis de (a) la géométrie 3D et (b) vue en coupe transversale du système.

V.2.3. Modèles analytiques du transfert d'effort

La mesure répartie de la déformation par capteur à FO peut généralement être effectuée avec une très grande précision. Cependant, lorsque la FO est noyée dans le béton, la couche du revêtement primaire absorbe une partie de la déformation transmise vers le cœur en silice. L'étude du transfert d'effort consiste à intégrer les géométries et les propriétés mécaniques des différents matériaux en présence (cœur en silice, matériau de revêtement de la fibre et béton) afin de développer une formule analytique reliant la déformation effective dans le matériau hôte (béton) (ε_0) à la déformation mesurée au niveau du cœur en silice de la FO (ε_f). Plusieurs modèles mathématiques sont disponibles dans la littérature et ont été validés expérimentalement (voir la partie I.5 de la bibliographie). Le développement de ces formules mathématiques dans une configuration géométrique multicouche nécessite de faire certaines hypothèses sur le type de comportement des différents matériaux et sur l'adhérence aux interfaces. Le calcul analytique s'effectue alors sur une surface 2D en considérant la symétrie de révolution autour de l'axe longitudinal de la FO.

Dans le cas d'une FO collée à la surface d'un élément en béton, la transmission d'effort est encore plus faible que dans la configuration précédente, en raison de la déformation par cisaillement de la couche d'adhésif intermédiaire. Le développement d'une formule analytique du transfert d'effort est également rendu plus délicat en raison de l'absence de symétrie du système par rapport à l'axe central de la FO.

Deux formules analytiques, introduites dans des recherches précédentes, sont présentées ci-dessous et les résultats fournis par ces modèles seront ensuite comparés à ceux obtenus par l'approche numérique proposée.

Kim *et al.* [53] ont développé un modèle analytique du transfert des contraintes dans le cas d'une FO collée sur une surface de béton, basé sur les hypothèses suivantes :

- Tous les matériaux présentent un comportement élastique linéaire ;
- L'adhésion est considérée parfaite à toutes les interfaces ;
- La couche adhésive n'est déformée que par cisaillement ;
- Le noyau en verre de la FO (cœur et gaine optique) se déforme uniquement sous l'effet de la contrainte axiale.

Le schéma de la configuration considérée est illustré sur la Figure V-4:

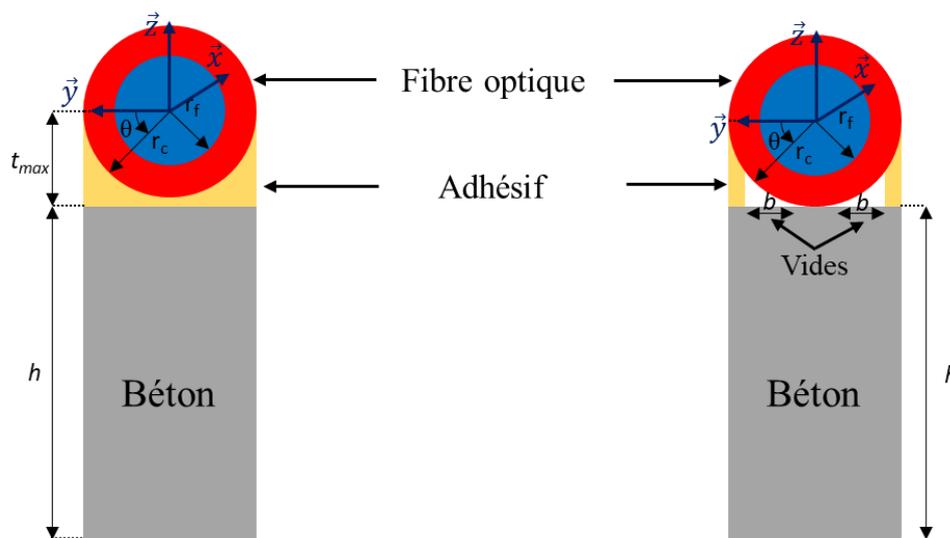


Figure V-4 : Schémas des modèles théoriques développés par Kim *et al.* [53] (gauche) et Her *et al.* [181] (droite).

Le profil de déformation dans le noyau de la FO peut alors être exprimé par les Equations suivantes (les paramètres utilisés dans ces Equations et leurs significations sont résumés dans le Tableau V-1) :

$$\varepsilon_f = \frac{r_c \sigma_0 \text{Const}B}{E_f E_h \lambda^2} \int_0^\pi f(\theta) d\theta \left[1 - \frac{\cosh(\lambda x)}{\cosh(\lambda L_b)} \right] \quad (\text{V-1})$$

Avec :

$$\lambda = \sqrt{\frac{r_c \text{Const}B \cdot (\text{Const}C \cdot E_f + E_h)}{E_f E_h} \int_0^\pi f(\theta) d\theta} \quad (\text{V-2})$$

$$\text{Const}B = \left\{ \pi r_f^2 - r_c \int_0^\pi f(\theta) \cdot \frac{E_c}{2E_f G_c} \left[r_c^2 \ln\left(\frac{r_c}{r_f}\right) + \frac{r_f^2 - r_c^2}{2} \right] d\theta + \frac{\pi E_c}{E_f} (r_c^2 - r_f^2) \right\}^{-1} \quad (\text{V-3})$$

$$ConstC = \frac{\pi \left[r_f^2 + \frac{E_c}{E_f} (r_c^2 - r_f^2) \right]}{2hr_c} \quad (V-4)$$

$$f(\theta) = \frac{G_a G_c}{r_c G_a \ln\left(\frac{r_c}{r_f}\right) + G_c (t_{max} - r_c \sin\theta)} \quad (V-5)$$

$$t(\theta) = t_{max} - r_c \sin\theta \quad (V-6)$$

Un deuxième modèle analytique, proposé par Her *et al.* [181], suppose l'existence de vides entre la FO et le béton, non remplis par l'adhésif polymère (voir le schéma de la Figure V-4).

Les hypothèses du modèle sont :

- Tous les matériaux présentent un comportement élastique linéaire ;
- Toutes les interfaces sont parfaites ;
- Le revêtement primaire et la couche de l'adhésif ne sont soumis qu'à des contraintes de cisaillement ;
- Il existe des vides de largeur b non remplis par l'adhésif.

Dans ces conditions, la déformation dans la FO en silice est donnée par l'Equation V-7 :

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_0}{E_f \left(\frac{\pi r_f^2}{2hr_c E_h} + \frac{1}{E_f} \right)} \left[1 - \frac{\cosh(\lambda_1 x)}{\cosh(\lambda_1 L_b)} \right] \quad (V-7)$$

Avec :

$$\lambda_1 = \sqrt{\left[\frac{2r_c}{\pi r_f^2} \left(\frac{\pi r_f^2}{2hr_c E_h} + \frac{1}{E_f} \right) \int_0^{\cos^{-1}\left(\frac{b}{r_c}\right)} \frac{1}{\frac{r_c(1 - \sin\theta)}{G_a} + \frac{r_c}{G_c} \ln\left(\frac{r_c}{r_f}\right)} d\theta \right]} \quad (V-8)$$

Les variables utilisées dans cette étude sont également définies dans le Tableau V-1.

Tableau V-1 : Caractéristiques géométriques / mécaniques utilisées dans les modèles analytiques et numériques.

Désignation	Notation	Valeur
Rayon de la fibre en silice	r_f	0,06 mm
Rayon extérieur de la fibre	r_c	0,08 mm
Longueur de l'élément en béton	L_b	6 mm
Hauteur du matériau hôte (béton) en dessous de la FO	h	10 mm
Module d'Young de la silice	E_f	72 GPa
Coefficient de Poisson de la silice	-	0,17
Module d'Young du revêtement primaire	E_c	3 GPa
Coefficient de Poisson du revêtement primaire	-	0,4
Module de cisaillement du revêtement primaire	G_c	1,43 GPa
Module d'Young du béton	E_h	30 GPa
Coefficient de Poisson du béton	-	0,2
Module d'Young de l'adhésif	E_a	Variable (10, 100, et 1000 MPa)
Coefficient de Poisson de l'adhésif	-	0,48
Module de cisaillement de l'adhésif	G_a	Variable (selon la valeur de E_a)

V.2.4. Comparaison des approches numérique et analytiques

La Figure V-5 décrit la courbe de transfert d'effort (σ/ε_0) le long de la FO collée à la surface du béton, pour différentes valeurs du module d'Young de l'adhésif dans le domaine 10-1000 MPa. Les résultats fournis par les deux formules analytiques sont comparés aux simulations issues du modèle aux éléments finis. Il faut souligner que les approches analytiques s'affranchissent de la présence de la rainure, tandis que le modèle numérique tient compte de la géométrie réelle du système.

Pour que la comparaison entre les deux approches soit pertinente, nous avons considéré une situation commune où la fibre est collée directement au contact de la surface du béton, et où la hauteur d'adhésif HA est nulle (Cf. Figure V-2). Cela correspond à une valeur de t_{max} égale à r_c dans l'Equation V-6 et une constante b qui vaut r_c dans l'Equation V-8.

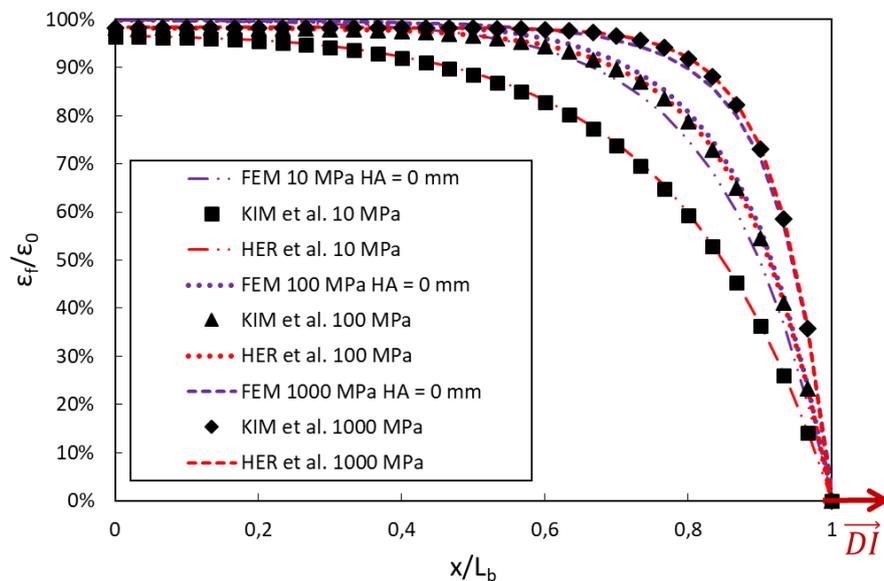


Figure V-5 : Courbes du transfert d'effort suivant les deux approches (théorique et numérique) et pour différentes valeurs du module élastique de l'adhésif.

La Figure V-5 montre que les résultats des deux modèles analytiques sont identiques. Les simulations numériques sont également très proches de celles des modèles analytiques tant que la rigidité de l'adhésif est élevée, mais révèlent un écart significatif dans le cas d'un adhésif plus souple ($E_a = 10$ MPa). Une telle différence peut être attribuée au fait que la présence de la rainure est prise en compte dans le modèle numérique, ce qui augmente la surface de contact entre l'adhésif et le substrat en béton, entraînant une meilleure transmission des efforts par rapport à la configuration géométrique sans rainure. Le transfert d'effort est ainsi moins affecté par la diminution de rigidité de l'adhésif dans le modèle aux éléments finis que dans les approches analytiques.

De manière générale, les approches analytiques et numérique s'accordent à montrer que la diminution de la rigidité de l'adhésif réduit la déformation transférée au noyau en silice du capteur. Des résultats similaires ont été rapportés par Zhou *et al.* [58].

Dans une instrumentation réelle mettant en œuvre une FO scellée dans une engravure à la surface d'une structure en béton, la hauteur HA est généralement non nulle (une couche d'adhésif polymère est présente entre le bas du capteur à FO et la surface en béton) et sa valeur réelle dépend beaucoup de la viscosité initiale de l'adhésif polymère au moment de son application dans la rainure. Une simulation numérique complémentaire a donc été réalisée pour étudier l'effet du paramètre HA sur le mécanisme de transfert d'effort, en considérant une valeur fixe de la rigidité de l'adhésif (100 MPa). Les résultats sont présentés sur la Figure V-6 et montrent que le mécanisme du transfert d'effort est affecté négativement par une augmentation de HA (une tendance similaire a été rapportée par Zhou *et al.* [58]). Cependant, cet effet diminue considérablement lorsque HA dépasse une valeur de 0,5 mm.

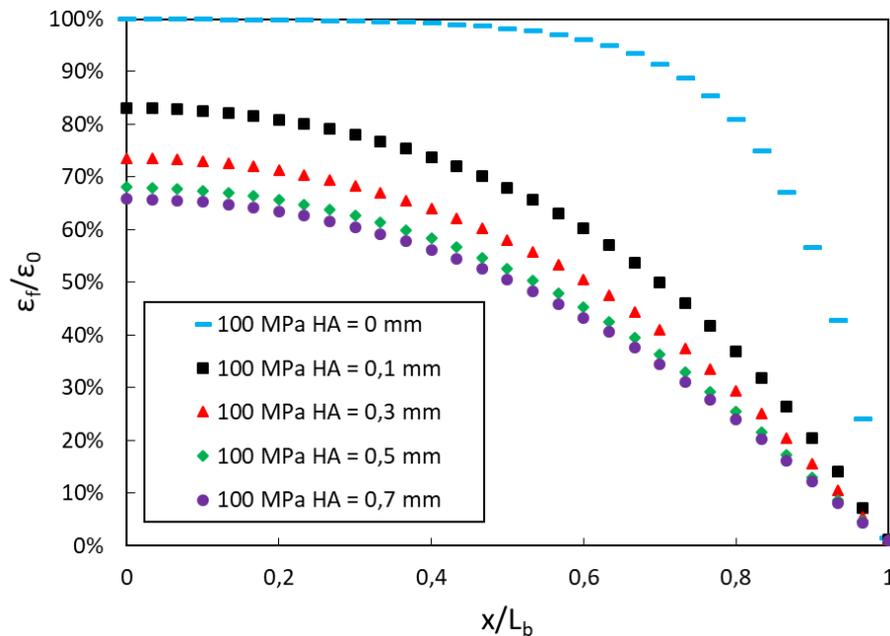


Figure V-6 : Courbes du transfert d'effort suivant l'approche numérique pour différentes hauteurs d'adhésif (HA).

La dépendance du mécanisme du transfert d'effort vis-à-vis de la rigidité de l'adhésif, qui a été précédemment mise en évidence par les différentes approches théoriques, suggère qu'il pourrait être avantageux d'utiliser un adhésif avec un faible module d'élasticité pour le suivi (détection, localisation et mesure quantitative) de l'ouverture des fissures dans le béton. En effet, l'ouverture des fissures génère une concentration de contraintes dans le matériau hôte générant un pic de déformation localisé dans la FO [182] [183]. Ce pic de déformation se diffuse sur une longueur plus importante du capteur à FO quand l'adhésif utilisé présente un module élastique faible, réduisant ainsi l'amplitude du pic et donc le risque de défaillance de la FO, ce qui garantit une meilleure durabilité de l'instrumentation. Cette piste sera explorée dans la partie expérimentale suivante.

V.3. Approche expérimentale sur éprouvettes en béton instrumentées par FOs collées

Dans cette partie, deux expériences différentes sont menées pour confirmer l'influence de la rigidité de l'adhésif polymère utilisé pour coller la FO à la surface d'un élément en béton sur le profil de déformation mesuré le long du capteur. Un premier essai de compression sur un cylindre en béton et un essai de flexion 3-points sur un prisme en béton entaillé permettront respectivement d'effectuer une surveillance des fissures dans les cas de développement de fissures multiples et uniques.

V.3.1. Caractérisation mécanique préliminaire des adhésifs utilisés

Différents adhésifs polymères présentant une large gamme de rigidité ont été sélectionnés pour coller la FO sur les échantillons de béton. Les valeurs de leurs modules d'élasticité ont été soit fournies par le fabricant, soit déterminées expérimentalement par des essais de traction suivant la norme EN ISO 527-2 [142]. Ces essais ont été effectués sur des séries d'éprouvettes de type haltère (Figure V-7-a) avec une vitesse de déplacement de 1 mm/min, en utilisant une machine d'essai universelle (Instron 5969) équipée d'un extensomètre vidéo sans contact (AVE) qui mesure le déplacement différentiel entre deux marques blanches à la surface de l'échantillon (Figure V-7-b).

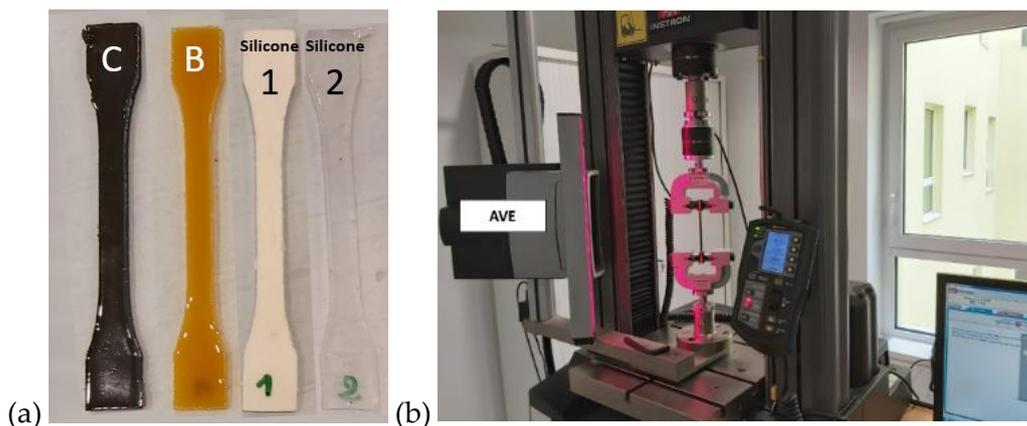


Figure V-7 : (a) Échantillons utilisés pour la caractérisation mécanique des adhésifs ; (b) Essai de traction sur un échantillon d'adhésif.

Le Tableau V-2 fournit une liste des différents types d'adhésifs ainsi que leurs caractéristiques. Les noms commerciaux / marques des produits ne sont pas explicitement cités pour des raisons de confidentialité.

Il est important de mentionner qu'à l'exception de l'adhésif B, tous les adhésifs testés ont montré un comportement quasi-élastique (silicones 1 et 2 pour des valeurs de déformation jusqu'à 8 %) ou parfaitement élastique (adhésif C, même pour des valeurs de déformation supérieures à 10 %) (voir la Figure V-8). Ces informations seront utiles pour valider les hypothèses du modèle aux éléments finis présenté dans la partie V.4.

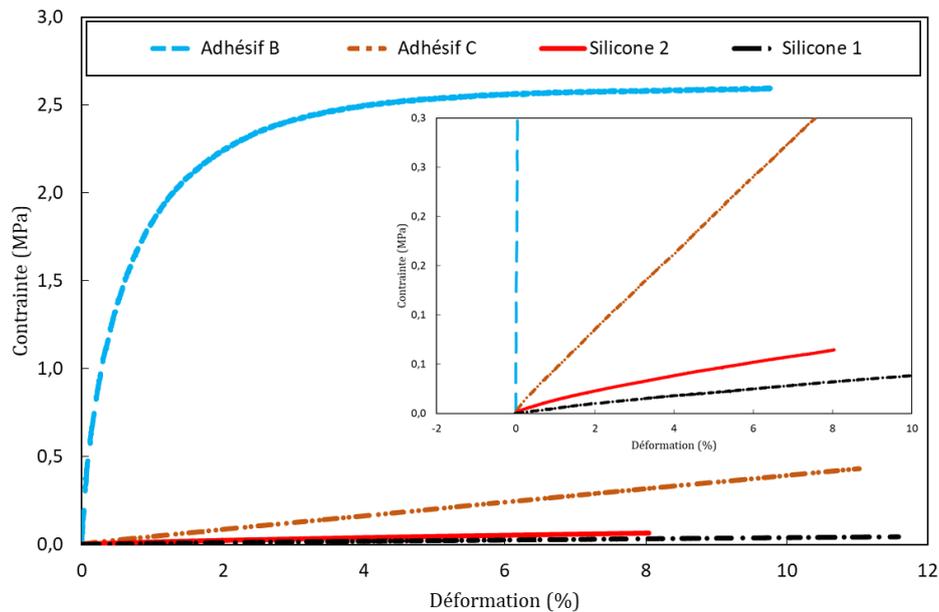


Figure V-8 : Courbes expérimentales de contrainte/déformation recueillies pour des échantillons des différents adhésifs testés en traction.

Tableau V-2 : Caractéristiques des différents adhésifs polymères utilisés dans ce chapitre.

Désignation	Nature et usage préconisé de l'adhésif	Module d'Young (MPa)	Ecart type (MPa)
<i>Adhésif A</i>	Système époxy bi-composant utilisé dans la construction (pâte hautement thixotropique)	11200*	-
<i>Adhésif B</i>	Système époxy bi-composant adapté au collage de divers matériaux (adhésif liquide à haute viscosité)	205	5
<i>Adhésif C</i>	Système époxy bi-composant adapté au collage d'une grande variété de matériaux (adhésif à durcissement rapide)	4,8	1,3
<i>Silicone 1</i>	Silicone mono-composant utilisé pour des applications d'étanchéité et de collage	0,7	0,3
<i>Silicone 2</i>	Silicone mono-composant utilisé pour protéger les installations de jauges de contrainte	1,1	0,4

*Valeur fournie par le fabricant sur la fiche technique (voir l'Annexe F-VI.6.6)

V.3.2. Essai de compression sur cylindre de béton

Nous présentons dans cette partie le premier essai mécanique réalisé sur un cylindre en béton instrumenté par FO monomode engravée en surface.

V.3.2.1. Protocole expérimental

Une éprouvette de béton cylindrique $\varnothing 16 - 32$ cm (résistance à la compression de 46 MPa) comportant trois rainures à mi-hauteur, espacées de 1 cm chacune, a été utilisée pour cet essai. Une FO monomode avec un revêtement en polyimide est introduite dans les trois rainures puis collée à l'aide de trois adhésifs différents (adhésifs A, B et C ; un type d'adhésif par rainure). Le schéma d'instrumentation de l'éprouvette cylindrique est présenté sur la Figure V-9-a. Le cylindre en béton a été ensuite soumis à une charge de compression jusqu'à sa rupture au moyen d'une presse hydraulique universelle de capacité 5000 kN (Figure V-9-b). Cet essai a été contrôlé en déplacement afin d'assurer une déformation constante de l'éprouvette à certains niveaux de déplacement sélectionnés (voir le graphe de la Figure V-10). Les mesures de déformation ont été collectées à chaque niveau de déplacement en interrogeant le capteur avec le dispositif OBR basé sur la rétrodiffusion optique de Rayleigh (OBR-4600 commercialisé par Luna Technologies), comme illustré sur la Figure V-9-b. Cette chaîne métrologique donne accès aux profils de déformation répartis le long du capteur à FO avec une résolution spatiale millimétrique. Trois jauges de déformation, de 6 cm de long chacune, ont également été collées sur l'éprouvette et pourront servir d'instrumentation de référence pour la comparaison avec les mesures des FOs.

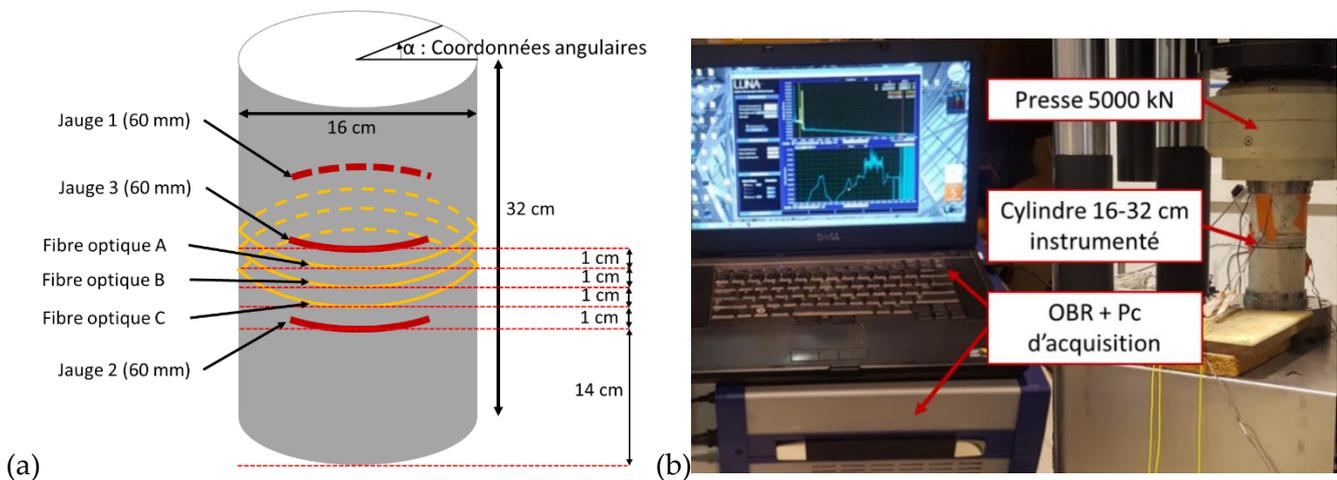


Figure V-9 : (a) Schéma de l'éprouvette instrumentée en surface pour l'essai de compression ; (b) Dispositif expérimental de l'essai de compression.

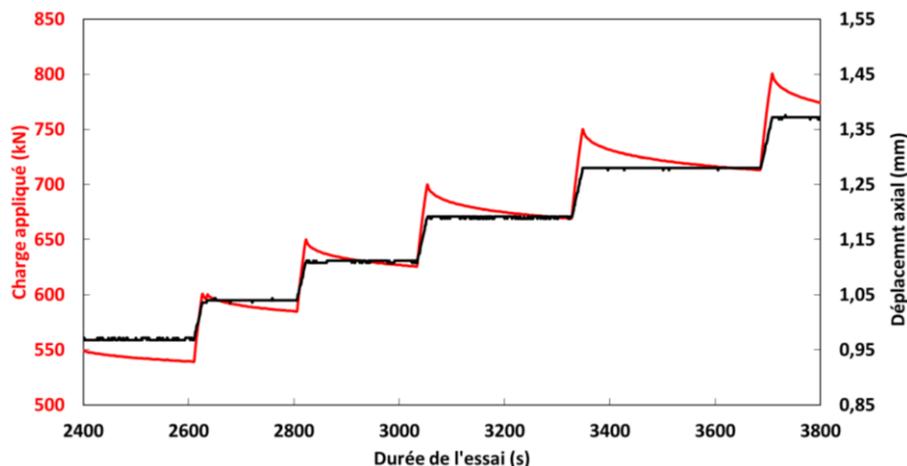


Figure V-10 : Évolutions de la charge appliquée et du déplacement de la traverse de la presse lors de l'essai de compression.

V.3.2.2. Comparaison avec les mesures des jauges de déformation

Afin de comparer les déformations mesurées par les FOs avec les mesures des jauges, les valeurs de déformation enregistrées le long de chaque FO sont moyennées sur la longueur de 6 cm couvrant les mêmes coordonnées angulaires que les jauges. La résolution spatiale de l'interrogation est définie à 1 cm. La valeur de déformation moyenne est donc calculée à partir de 6 points de mesure pour chaque FO.

La Figure V-11 affiche les valeurs de déformation des jauges en fonction du niveau de déplacement appliqué, ainsi que les valeurs de déformation moyennes des FOs. On rappelle que les jauges de déformation 2 et 3 sont collées aux mêmes coordonnées polaires, mais à des hauteurs différentes du cylindre de béton (Cf. Figure V-9-a).

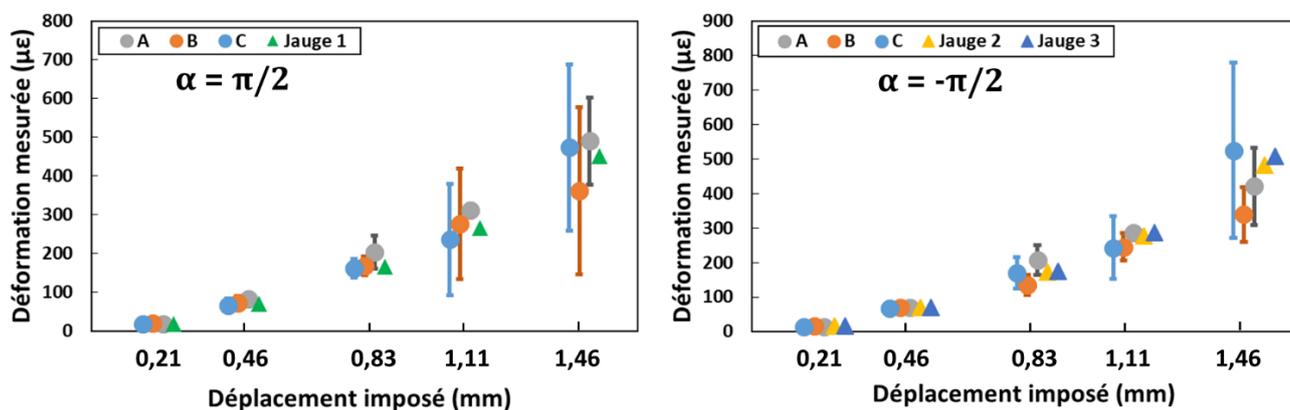


Figure V-11 : Comparaison des mesures des jauges de déformation et des FOs.

Les résultats de la Figure V-12 montrent que globalement, un bon accord est obtenu entre les deux techniques de mesure. Cependant, comme le béton est un matériau hétérogène, on observe une grande dispersion sur la longueur de 6 cm de la FO (comme le montrent les grands écarts types, en particulier pour les niveaux de déplacement supérieurs à 0,83 mm). Une telle dispersion ne peut être détectée qu'en utilisant des capteurs répartis à haute résolution spatiale, comme dans la présente étude. En dessous de 1,46 mm de déplacement, on remarque que, lorsque la rigidité de l'adhésif utilisé pour coller le capteur augmente, la moyenne des mesures de déformation augmente également. Ce résultat est probablement dû à l'atténuation plus importante des contraintes transférées au capteur avec les adhésifs plus souples. Pour un déplacement appliqué de 1,46 mm, les très grands écarts types ne permettent pas de conclure sur l'effet de l'adhésif.

V.3.2.3. Analyse des profils de déformation

La Figure V-12 présente les profils de déformation orthoradiale (déformation axiale mesurée sur toute la circonférence du cylindre en béton), à mi-hauteur du cylindre, enregistrés par les FOs collées en surface avec les trois adhésifs. Les profils de déformation sont obtenus avec une résolution spatiale de 2 mm à différents niveaux de déplacement appliqué.

Notons que le connecteur reliant la FO collée avec l'adhésif B à l'interrogateur OBR était légèrement endommagé, ce qui a induit des pertes optiques et rendu le traitement des données

impossible au-delà de 1,57 mm de déplacement appliqué. Compte tenu de ce dysfonctionnement, et afin de mieux analyser les résultats en fonction de la rigidité de l'adhésif, seules les courbes obtenues avec les adhésifs A et C seront comparées par la suite (c'est-à-dire l'adhésif le plus rigide et l'adhésif le plus souple).

Bien que les FOs collées avec les adhésifs A et C ne soient pas situées exactement à la même hauteur du cylindre, les résultats de la Figure V-12 permettent de tirer les premières conclusions sur la réponse des FOs lors du développement des fissures :

-Pour un niveau de charge donné, l'amplitude moyenne des pics de déformation mesurée augmente avec le module d'élasticité de l'adhésif. Par exemple, à la charge correspondant à un déplacement appliqué de 1,70 mm, davantage de pics de déformation dépassant 2000 $\mu\epsilon$ (niveau matérialisé par le cercle rouge) sont détectés le long de la FO collée avec l'adhésif A (6 pics) par rapport à celle collée avec l'adhésif C (2 pics seulement) ;

-Les largeurs des pics à mi-hauteur diminuent quand le module élastique de l'adhésif augmente, traduisant une moindre diffusion des déformations le long de la fibre. Les pics les plus larges sont observés avec l'adhésif C le moins rigide.

On peut donc conclure que le transfert d'effort du béton vers le cœur en silice de la FO s'effectue sur une longueur de fibre d'autant plus grande que le module d'Young de l'adhésif est faible. De plus, en présence de fissures qui se développent dans le béton et croisent le trajet de la FO, les concentrations de contraintes locales sont également réparties sur une longueur de fibre plus grande, et l'amplitude du pic de déformation mesuré diminue lorsque l'on utilise un adhésif de faible rigidité. Cette répartition plus diffusée des efforts peut alors permettre d'assurer une meilleure protection du capteur dans les cas d'instrumentation réels sur ouvrages en béton, où des fissures se développent irrémédiablement pendant la durée de service de la structure.

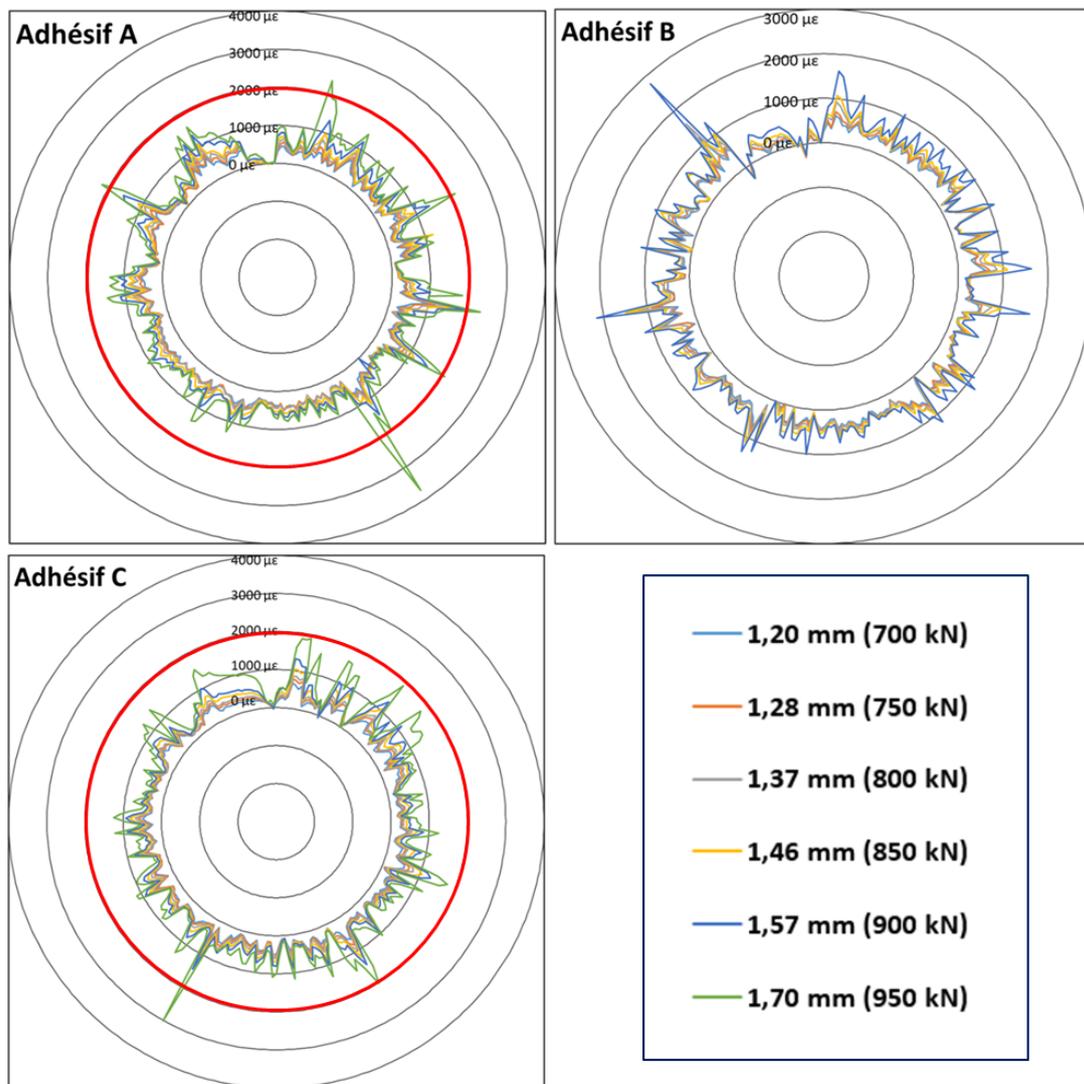


Figure V-12 : Profils de déformation orthoradiale autour du cylindre de béton enregistrés le long des FOs collées à l'aide des trois adhésifs (A, B et C).

Ce premier essai mécanique a permis d'étudier l'influence de l'adhésif sur la diffusion des contraintes de la structure hôte vers la FO collée en surface du béton, en analysant l'allure des profils de déformation. Ces premiers résultats expérimentaux, validés par des mesures de référence (provenant des jauges de déformation), ont permis de confirmer les tendances prévues par les calculs numériques, et nous conduisent à proposer un deuxième essai mécanique.

V.3.3. Essai de flexion 3-points sur prisme entaillé en béton fibré

Dans ce paragraphe, et suite aux résultats du premier essai mécanique, nous présenterons le deuxième essai mécanique de flexion réalisé sur une éprouvette prismatique entaillée.

V.3.3.1. Protocole d'essai

Afin d'évaluer plus précisément l'effet de la rigidité de l'adhésif sur la réponse mécanique du capteur lorsqu'une fissure unique se développe dans le béton, l'adhésif C, le silicone 1 et le silicone 2 (voir le Tableau V-2) sont utilisés pour le collage de la même FO monomode dans trois rainures réalisées sur la face inférieure d'une éprouvette prismatique entaillée (de dimension $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$ et une résistance à la traction par essai de flexion de 6,8 MPa) en béton fibré (des fibres métalliques sont ajoutées à la formulation de béton). L'entaille a été dimensionnée de manière à respecter les proportions définies dans la norme NF EN 14651 [184] par rapport à la taille de l'éprouvette. Un essai de flexion 3-points est réalisé durant lequel l'ouverture de l'entaille est mesurée par deux capteurs de déplacement (LVDT) avec une résolution spatiale micrométrique du système d'acquisition de données, fixés aux deux faces latérales de l'échantillon à l'aide de supports métalliques, comme le montre la Figure V-13-b. Les FOs sont interrogées au moyen du même interrogateur OBR avec une résolution spatiale de 6 mm.

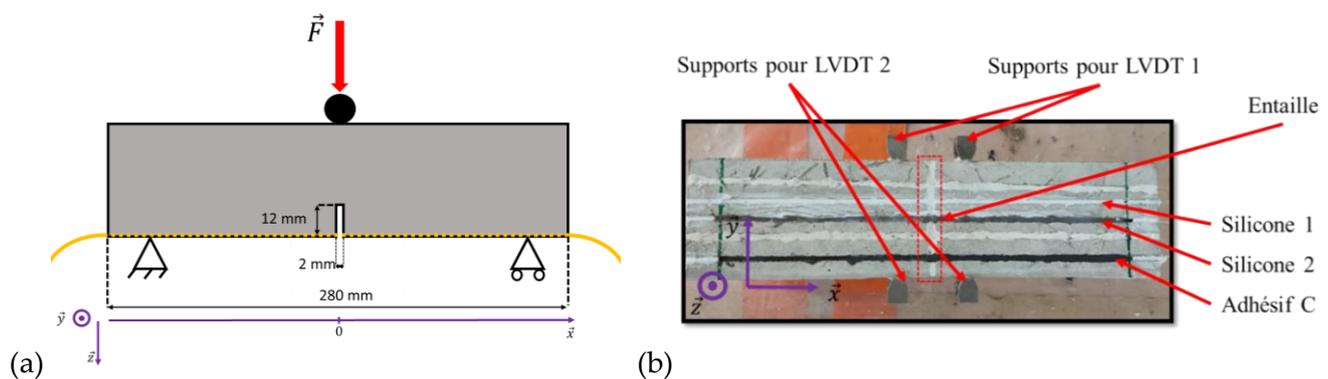


Figure V-13 : (a) Schéma de la configuration de l'essai de flexion ; (b) Vu de dessous de l'éprouvette prismatique montrant les supports des capteurs LVDT et les FOs collées avec les différents adhésifs.

L'essai de flexion a été réalisé à l'aide d'une machine d'essai universelle de capacité 100 kN sous contrôle de déplacement de l'actionneur (voir Figure V-14-a). Le déplacement a été arrêté tous les 0,1 mm pour garantir que le profil de déformation reste constant le long des FOs durant chaque palier (Figure V-14-b).

Il faut souligner que le même essai a d'abord été réalisé en collant les FOs avec les adhésifs A, B et C (A et B étant beaucoup plus rigides). Les résultats de ce premier essai, présentés dans l'Annexe E-VI.5, affichaient des largeurs très petites des pics de déformation obtenus au niveau de l'entaille en raison de la rigidité importante des adhésifs. Les effets intrinsèques de l'interrogateur influençaient par conséquent les résultats des mesures (comme détaillé dans la partie I.5.5 de la bibliographie) et ne permettaient donc pas de comparer le comportement des trois adhésifs. Il a donc été décidé de réitérer l'essai en utilisant des adhésifs de plus faibles rigidités (Silicones 1 et 2, et adhésif C).

L'ajout des fibres métalliques dans le béton permet de conférer une meilleure résistance de l'éprouvette à la flexion, une meilleure ductilité et donc de retarder la rupture.

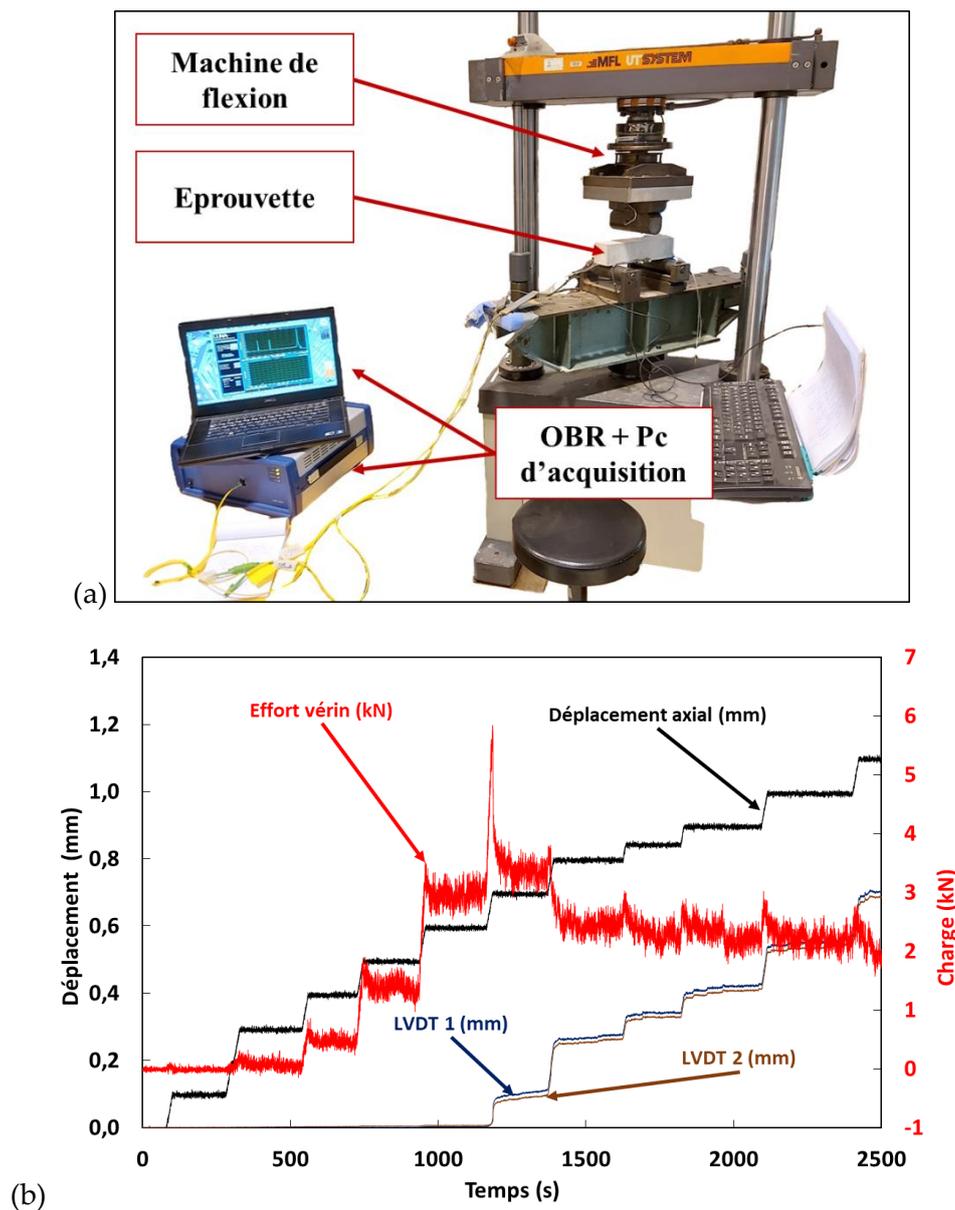


Figure V-14 : (a) Dispositif expérimental de l'essai de flexion, (b) graphe illustrant les déplacements de la traverse de la presse et des capteurs LVDTs et la charge appliquée sur l'éprouvette durant l'essai de flexion.

V.3.3.2. Analyse des profils de déformation des FOs

A partir du graphe de la Figure V-14-b, on remarque que les capteurs LVDTs détectent clairement une ouverture au niveau de l'entaille à partir du 6^{ème} palier correspondant à 0,7 mm de déplacement de la traverse. Au niveau de ce palier, l'effort appliqué chute brusquement suite à la fissuration de l'éprouvette. On remarque aussi que les mesures de l'ouverture de l'entaille enregistrées par les LVDTs sont quasiment identiques.

Les profils de déformation fournis par les FOs jusqu'au 5^{ème} palier (correspondant à 0,6 mm de déplacement vertical de la traverse) sont illustrés sur les graphes de la Figure V-15. Contrairement aux capteurs LVDT, les capteurs à FOs détectent l'ouverture de l'entaille bien

avant le 6^{ème} palier, ce qui se traduit par l'apparition précoce et la croissance d'un pic sur les profils de déformation, dont le sommet est situé à la position précise de l'entaille (abscisse $x = 0$). Ce phénomène est nettement plus marqué pour la FO collée avec l'adhésif C, le plus rigide des trois. Le capteur collé avec les 2 adhésifs en silicone ne montre pas le développement d'un pic très distinct, mais plutôt la formation de profils triangulaires dont le sommet est situé au niveau de l'abscisse de l'entaille, et qui sont visibles à partir du troisième niveau de déplacement de la traverse de la presse (0,3 mm). En effet, la très faible rigidité de ces adhésifs en silicone (environ 5 fois inférieure à celle de l'adhésif C) favorise une meilleure diffusion des contraintes locales (induites par l'ouverture de l'entaille) sur toute la longueur du capteur collé, produisant ainsi ce type de profil de déformation triangulaire, avec une réduction considérable de la valeur de déformation maximale au sommet.

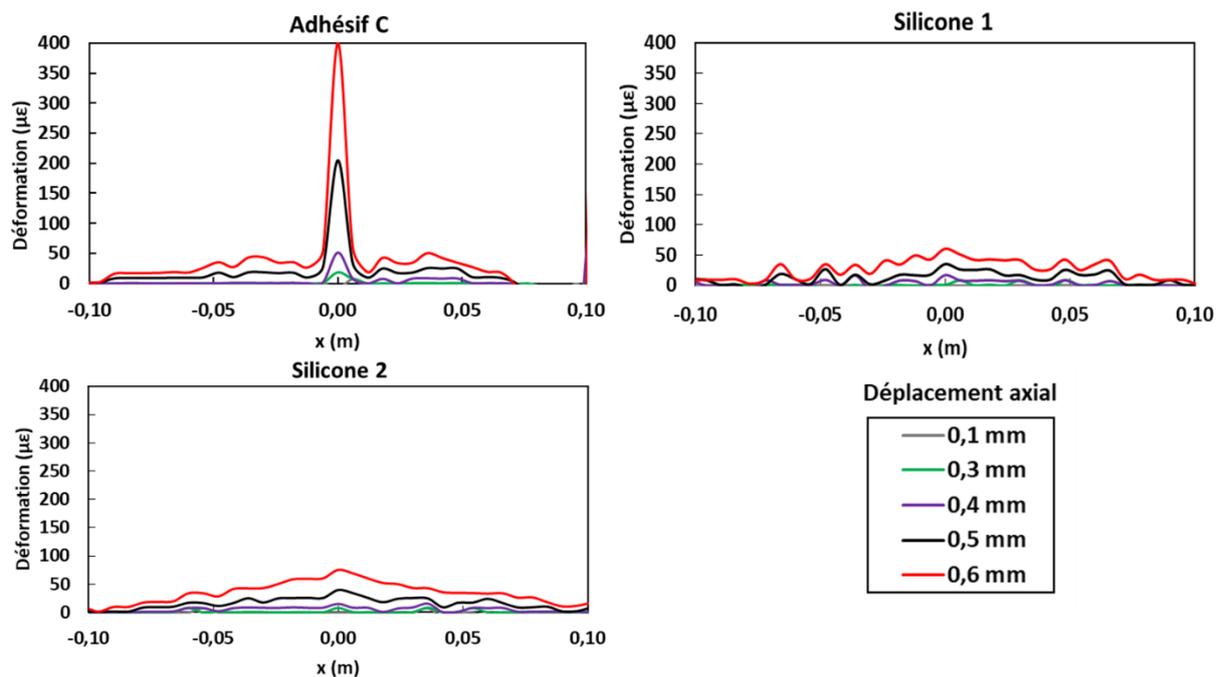


Figure V-15 : Profils de déformation enregistrés par les 3 FOs engravées à la surface du prisme en béton à l'aide des 3 différents adhésifs, sur les 5 premiers paliers de déplacement de la traverse (longueur de jauge = 6 mm).

Au niveau du 6^{ème} palier (0,7 mm de déplacement), les pics de déformation au niveau de l'entaille apparaissent clairement pour les FOs collées avec les 3 adhésifs (Figure V-16-a). Les conclusions précédemment établies lors de l'essai de compression restent valables ici : l'amplitude du pic de déformation au niveau de l'ouverture de fissure augmente avec le module d'élasticité de l'adhésif, tandis que l'effort est réparti sur une longueur plus importante de la FO quand le module d'élasticité diminue. Au niveau de ce 6^{ème} palier, une fissure devient clairement visible à l'œil nu au niveau de l'entaille, parcourant une distance assez importante sur la hauteur du prisme en béton (Figure V-16-b).

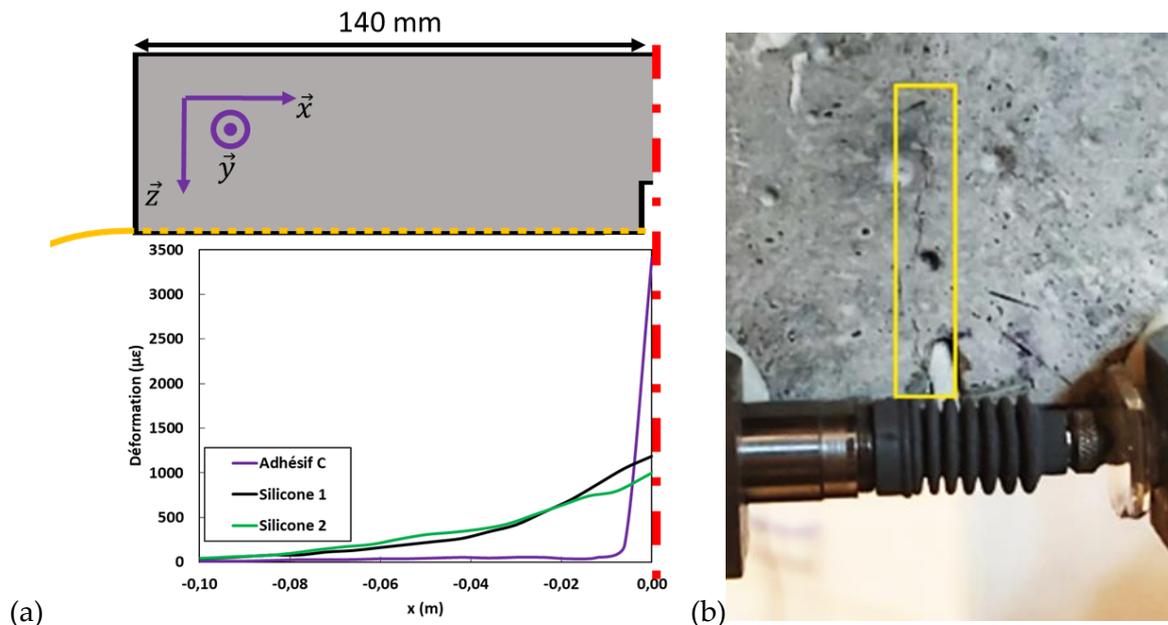


Figure V-16 : (a) Profils de déformation enregistrés par les 3 FOs aux 6^{ème} palier (sur la demi-longueur de l'éprouvette) ; (b) Apparition d'une fissure au niveau de l'entaille.

En résumé, l'utilisation d'adhésifs souples pour sceller / coller le capteur à la surface de la structure hôte en béton permet de réduire l'amplitude du pic de déformation local induit par l'ouverture des fissures. Cet effet d'atténuation semble très dépendant du module d'Young de la couche adhésive intermédiaire. Par conséquent, le capteur peut être protégé contre une rupture précoce tout en conservant sa capacité à détecter / localiser une fissure avant qu'elle ne soit décelable à l'œil nu ou par des capteurs traditionnels. Cependant, dans le cas d'adhésifs très souples (comme les systèmes en silicone dans la présente étude), les concentrations de contrainte sont redistribuées sur une grande longueur du capteur (parfois sur toute la longueur collée), et le pic de contrainte est donc peu marqué en début de l'investigation. Par conséquent, un adhésif trop souple peut limiter la sensibilité à la détection de fissures des capteurs collés, particulièrement lorsque de nombreuses fissures se développent sur une courte distance. La rigidité de l'adhésif doit donc être optimisée afin d'assurer un bon compromis entre la fonction de protection et la performance de surveillance des fissures du capteur collé, en adéquation avec l'environnement de service de la structure hôte.

V.4. Modèle numérique généralisé du transfert d'effort incluant l'effet de l'ouverture des fissures

Dans cette dernière partie de l'étude, le modèle numérique simplifié présenté précédemment pour décrire le mécanisme du transfert d'effort entre la structure hôte en béton et les capteurs collés dans les rainures à la surface du béton sera généralisé pour tenir compte du développement des fissures. Ce modèle sera ensuite confronté aux résultats expérimentaux de l'essai de flexion 3-points, et servira à établir une loi analytique simple permettant de quantifier l'ouverture des fissures dans cette configuration spécifique.

V.4.1. Géométrie du modèle aux éléments finis

Dans ce modèle généralisé, les principales hypothèses restent inchangées : tous les matériaux présentent un comportement élastique linéaire et l'adhérence est toujours considérée parfaite à toutes les interfaces.

La Figure V-17 fournit une description schématique de la géométrie utilisée pour construire le modèle numérique avec une ouverture d'une fissure. Le modèle considère la présence d'une fissure préexistante (ou d'une entaille), et des déplacements relatifs opposés (\overline{DI}) sont imposés aux blocs de béton adjacents à la fissure afin de simuler le développement de la fissure (ou l'ouverture de l'entaille).

Les paramètres géométriques qui doivent être définis dans les conditions aux limites sont : l'ouverture initiale de la fissure (notée OI) et l'épaisseur de la couche adhésive entre le dessous de la FO et la surface du béton (HA). Ce modèle a de nouveau été implémenté dans le code d'éléments finis Cast3m en utilisant des éléments tétraédriques linéaires.

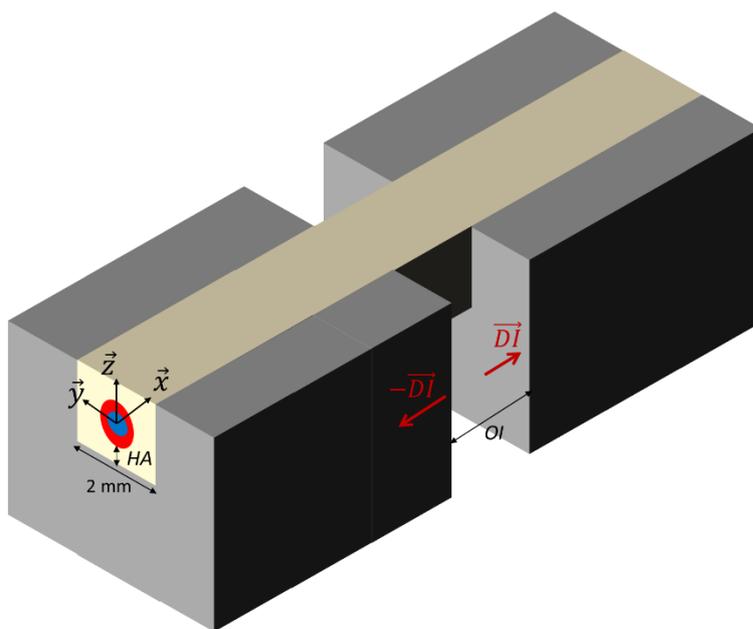


Figure V-17 : Géométrie du modèle aux éléments finis pour l'étude de l'ouverture de l'entaille.

V.4.2. Validation expérimentale du modèle numérique

Une comparaison peut alors être effectuée entre les données numériques issues du modèle et les données expérimentales obtenues lors de l'essai de flexion au 6^{ème} palier de déplacement (déplacement de la traverse de 0,7 mm). En effet, c'est à partir de ce palier que les capteurs LVDTs ont commencé à mesurer une ouverture importante de l'entaille (voir la Figure V-14-b).

Les paramètres géométriques du modèle sont fixés conformément à la configuration expérimentale réelle : OI est fixée à 2 mm (largeur de l'entaille) et la valeur de HA a été évaluée par observations en microscopie optique. Les micrographies des sections de l'éprouvette prismatique montrent que HA varie entre 0,3 mm et 0,9 mm. (un exemple est illustré sur la Figure V-18). Différentes valeurs de HA dans cette gamme ont été testées numériquement, mais 0,5 mm a semblé être la meilleure valeur d'ajustement et cette dernière a donc été retenue dans les simulations numériques.

Le déplacement ($\overline{D_I}$) considéré dans le calcul numérique correspond à l'ouverture de fissure effective mesurée au moyen des capteurs LVDT.

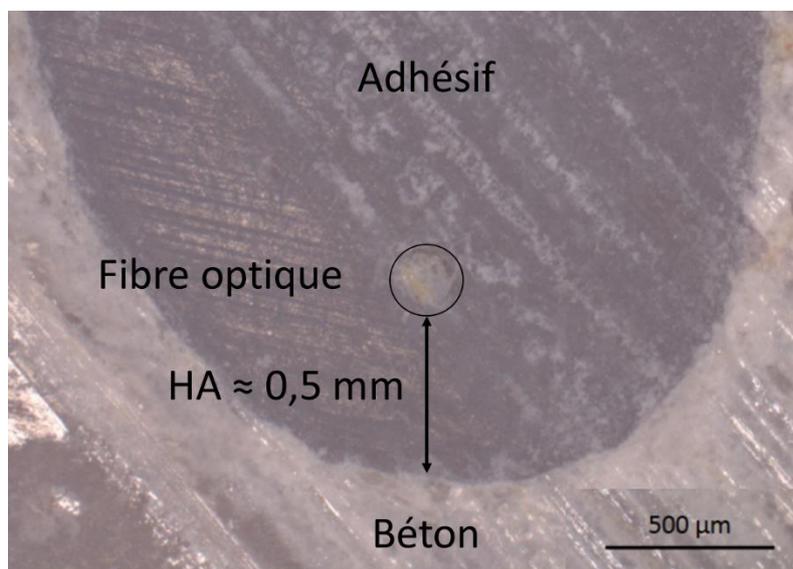


Figure V-18 : Exemple de micrographie de la section d'éprouvette prismatique montrant une FO enfoncée en surface.

Comme les modules d'Young expérimentaux des différents adhésifs présentait des écarts types relativement importants (Cf. Tableau V-2), des simulations numériques ont été réalisées en considérant les valeurs extrêmes des modules (minimum et maximum) obtenues pour chaque adhésif.

La Figure V-19 compare les simulations numériques aux profils de déformation expérimentaux enregistrés par la FO collée, pour un niveau de déplacement global de 0,7 mm de la traverse pendant l'essai de flexion (6^{ème} palier de déplacement), et pour les différents adhésifs polymères (système C, silicones 1 et 2).

Dans l'ensemble, les résultats numériques sont en bon accord avec les données expérimentales. Toutefois, dans le cas du capteur collé avec l'adhésif C, le modèle surestime la largeur du pic

de déformation par rapport à l'expérience. Une telle différence peut résulter d'un effet de glissement à l'interface adhésif/FO des deux côtés de l'entaille, qui pourrait être significatif dans le cas de l'adhésif C et beaucoup moins prononcé pour les systèmes en silicone très souples. En effet, pour des charges opposées appliquées aux blocs de béton adjacents à la fissure, la valeur maximale de la contrainte de cisaillement σ_{xz} à l'interface adhésif/DOFS ($z = -r_c$) diminue pour les adhésifs les plus souples mais s'étend sur une plus grande longueur (voir la Figure V-20).

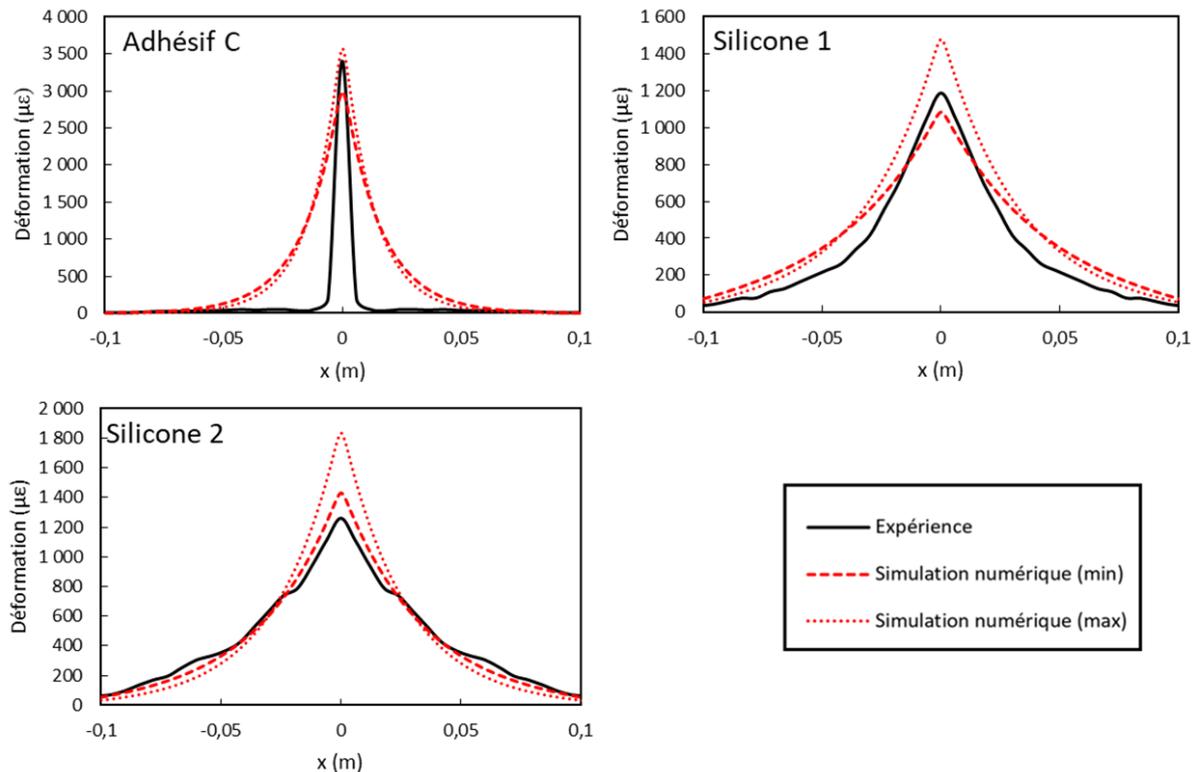


Figure V-19 : Graphes illustrant les courbes enregistrées par les capteurs à FO durant l'essai de flexion au 6^{ème} palier et les résultats des simulations numériques pour l'adhésif C, et les silicones 1 et 2 (en considérant les valeurs extrêmes du module d'Young de ces adhésifs- min et max).

Quoi qu'il en soit, on peut conclure de cette partie, que l'amplitude du pic de déformation est globalement bien prédite par le modèle, pour les trois adhésifs considérés.

En outre, la contrainte maximale dans la couche adhésive a également été évaluée en utilisant la même approche numérique, afin de vérifier que le polymère reste en phase élastique pendant l'essai de flexion. Il a été constaté que la déformation maximale dans l'adhésif près de l'interface avec la FO (à $x = 0$ et $HA = 0,5 \text{ mm}$) au 6^{ème} plateau de déplacement est d'environ 2 % pour les trois adhésifs souples utilisés dans l'essai de flexion. En plus, la valeur de déformation diminue en dessous de cette valeur lorsqu'on s'éloigne de l'origine de l'axe x au centre de l'entaille. Les essais de traction ont montré précédemment que les adhésifs souples sont toujours dans le domaine élastique linéaire à ce niveau de déformation (Figure V-8). Dans ce contexte, les hypothèses formulées dans le modèle aux éléments finis, c'est-à-dire le comportement élastique linéaire des matériaux et les interfaces parfaites, peuvent être considérées comme pertinentes.

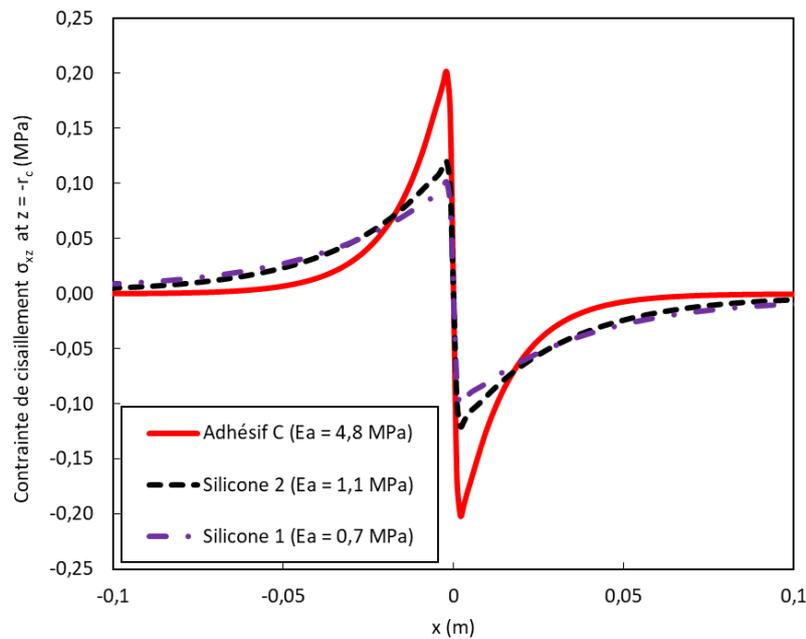


Figure V-20 : Simulations numériques de la contrainte de cisaillement $\sigma_{xz}(x)$ à l'interface adhésif/FO ($z = -r_c$) en considérant des charges opposées (0,045 MPa) appliquées aux deux blocs de béton adjacents à la fissure.

V.4.3. Application du modèle à l'évaluation des ouvertures des fissures

La comparaison entre l'essai expérimental de flexion et les simulations aux éléments finis nous a permis de montrer que le modèle numérique peut être généralisé pour prédire l'amplitude du pic de déformation induit par la présence d'une fissure, lorsque différents adhésifs sont utilisés pour le collage des capteurs.

Cette généralisation est gouvernée par trois paramètres principaux : le module d'Young de l'adhésif utilisé pour le scellement de la FO dans l'engravure (dont l'effet a été démontré à travers les résultats de la Figure V-16), la hauteur HA de l'adhésif (qui peut varier en fonction de la viscosité initiale de l'adhésif et du protocole d'installation du capteur) et l'ouverture initiale de l'entaille OI .

Dans le cadre de l'instrumentation d'un ouvrage par capteurs à FOs collés en parement, des fissures peuvent déjà préexister à la surface du béton et même traverser le parcours de la FO. Chaque fissure représente donc une petite entaille à la surface du béton. La largeur initiale de cette fissure correspond à la donnée d'entrée OI du modèle numérique (ouverture initiale de l'entaille OI) et l'ouverture de la fissure est traduite dans le modèle à travers le déplacement imposé $\vec{D_I}$ appliqué sur les faces en béton adjacentes à la fissure (Cf. Figure V-17).

V.4.3.1. Rappel bibliographique

Plusieurs modèles analytiques ont été proposés dans la littérature pour prédire la forme de la réponse d'une FO en présence de fissures. Feng *et al.* [52] ont développé un modèle théorique permettant d'analyser le mécanisme de transfert d'effort dans les zones de singularités de

déformation (fissures), dans une configuration de FO collée en surface. Ce modèle, tenant compte des stades élastiques et plastique des déformations du revêtement de la FO, a montré que l'apparition des fissures induit de grandes déformations au cœur de la FO. Le revêtement polymère de cette dernière est sollicité principalement en cisaillement et absorbe par conséquent une partie de la déformation transmise à la fibre en silice. La validation du modèle théorique s'est appuyée sur une comparaison avec des données expérimentales acquises au moyen d'un interrogateur Brillouin et a nécessité la prise en compte de la résolution spatiale spécifique à ce système de mesure.

On retrouve également dans le modèle numérique de Hénault [14] ce profil de déformation sous forme d'une fonction exponentielle induite dans la FO en silice. Son approche consiste à considérer une distribution de Dirac pour modéliser le profil de déformation dans le béton fissuré. Le modèle aux éléments finis permet finalement de déterminer les paramètres d'ajustement afin de retranscrire les courbes obtenues expérimentalement. Pour un type de câble à FO particulier, Hénault a utilisé une loi linéaire d'interface faisant apparaître un déplacement tangentiel entre le revêtement externe du câble et le béton. Dans les travaux de Billon *et al.* [183] on retrouve également cette forme de profil de déformation pour un câble du commerce collé en surface du béton au droit d'une fissure.

La même distribution exponentielle est également présente dans le modèle analytique développé par Imai *et al.* [185] qui adopte l'hypothèse proposée par Duck *et al.* [186], considérant l'effet d'une discontinuité (vide ou fissure) dans le matériau hôte à travers une distribution gaussienne de la déformation à l'interface de contact avec le revêtement primaire de la FO.

A partir de ce qui précède, l'Equation V-9 présente une fonction simplifiée décrivant le profil de déformation induit dans la FO en silice suite à l'apparition d'une fissure dans le milieu hôte.

$$\varepsilon(x) = \frac{Ouv}{2} k e^{-k|x-x_f|} \quad (\text{V-9})$$

Ouv est l'ouverture de la fissure.

x_f est l'abscisse à laquelle la fissure traverse la FO.

Cette fonction fait apparaître un paramètre k qui correspond au « shear lag parameter » qu'on retrouve souvent dans la littérature ([14] [47] [48] [49] [183]). Ce paramètre dépend des propriétés mécaniques, des caractéristiques géométriques et des comportements des différents matériaux en présence (situés entre le béton et le cœur en silice de la FO), ainsi que des propriétés des différentes interfaces.

Une fonction similaire a été présentée dans les travaux de Bassil *et al.* [54] [140], et a permis de décrire la réponse de câbles à FO du commerce installés sur des structures en béton, suite à l'apparition et au développement de fissures.

D'après l'Equation V-9, et en se plaçant au sommet du pic de déformation, à $x = x_f$, la valeur de déformation maximale dans la fibre au droit de la fissure est une fonction linéaire de l'ouverture de fissure pour un paramètre k fixe. Ce résultat de la littérature est confirmé par les

simulations numériques, comme illustré sur le graphe de la Figure V-21. En effet, la déformation maximale au sommet du pic varie de manière linéaire avec l'ouverture de l'entaille, pour une valeur donnée du module d'Young de l'adhésif (E_a) et dans la configuration géométrique considérée (FO scellée dans une rainure, ouverture de fissure initiale IO de 2 mm, hauteur HA de 0,5 mm) qui est représentative de l'essai de flexion décrit au paragraphe V.3.3.

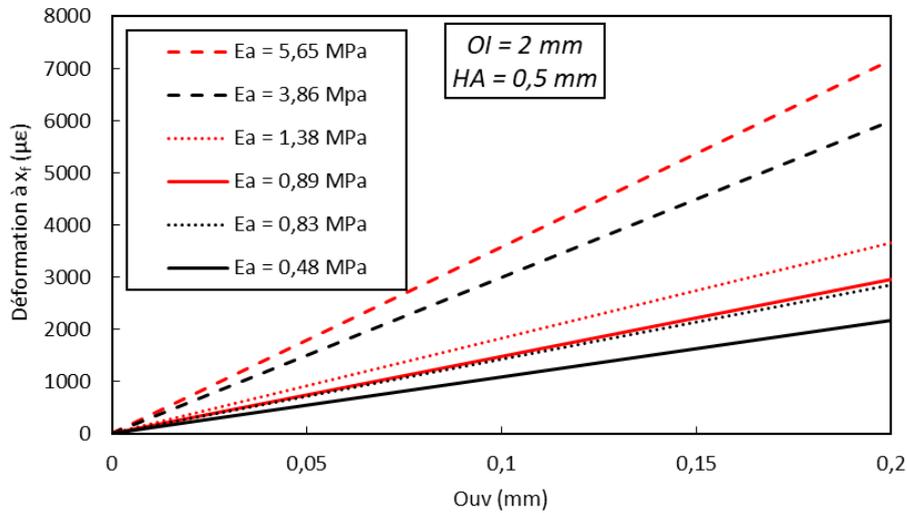


Figure V-21 : Déformation maximale dans la FO (= amplitude du pic de déformation) prédite par le modèle numérique, versus ouverture de l'entaille (Ouv), pour différentes valeurs du module d'Young de l'adhésif.

V.4.3.2. Détermination du paramètre k

A partir des résultats de la Figure V-21, il est possible d'étudier la variation du paramètre k en fonction du module d'Young de l'adhésif. La Figure V-22 illustre cette variation dans la configuration considérée (ouverture initiale de l'entaille OI égale à 2 mm et une hauteur de colle HA égale à 0,5 mm) en utilisant l'approche numérique et les résultats expérimentaux (obtenus à partir du présent essai de flexion à un déplacement de 0,7 mm et 0,6 mm de l'actionneur, et du premier essai de flexion impliquant l'adhésif B et présenté dans l'Annexe E-VI.5).

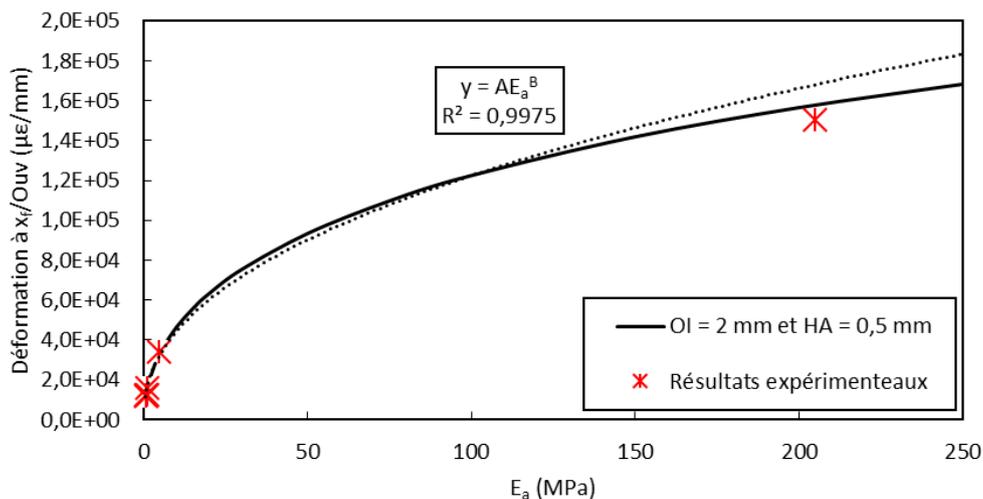


Figure V-22 : Courbe d'évolution du paramètre k (à $x = x_f$) en fonction du module d'élasticité de l'adhésif E_a : simulation numérique (ligne continue) avec régression exponentielle (ligne pointillée) et résultats expérimentaux.

A partir des résultats de la Figure V-22, une première proposition du paramètre k peut être établie. Ce dernier s'écrit donc suivant l'Equation suivante :

$$k = A \cdot E_a^B \quad (V-10)$$

Les paramètres A et B sont des constantes et dépendent des caractéristiques mécaniques et géométriques des différents matériaux (sauf l'adhésif) et des propriétés d'interfaces. Il est à mentionner que la comparaison avec les résultats expérimentaux dans la Figure V-22 reste limitée et qu'il serait nécessaire de réaliser des essais supplémentaires (avec une gamme plus étendue de module d'Young de l'adhésif) pour une meilleure validation de l'Equation V-10.

Afin d'établir une formule générale de la fonction de transfert pour le cas d'une instrumentation par capteur à FO engravé en surface, il reste à étudier l'effet de deux paramètres : la hauteur de l'adhésif HA et l'ouverture de fissure initiale OI .

V.4.3.3. Effet de l'ouverture initiale (OI)

Dans le cadre de l'essai de flexion décrit au paragraphe V.3.3, le choix d'une éprouvette entaillée (avec une ouverture initiale OI de 2 mm) avait pour objectif de favoriser l'apparition d'une fissure unique au niveau de l'entaille, et de pouvoir quantifier ainsi facilement son développement pendant l'essai à l'aide de capteurs LVDT fixes.

Dans le cas d'une instrumentation réelle sur ouvrage, la valeur de OI est nulle si aucune fissure ne traverse le parcours de la FO au moment de l'instrumentation ou non-nulle si des fissures sont préexistantes et traversent le parcours du capteur.

Afin de mettre en évidence l'éventuelle influence de cette ouverture initiale de fissure sur le mécanisme de transfert d'effort entre la structure hôte et le capteur collé en engravure, nous pouvons évaluer l'influence d'une variation de OI sur le paramètre k .

La Figure V-23 présente les courbes d'évolution du paramètre « shear-lag » k en fonction du module d'Young de l'adhésif, pour différentes valeurs de OI (la valeur de HA est quant à elle considérée constante, égale à 0,5 mm). Ces courbes ont été obtenues au moyen du modèle aux éléments finis (traits pleins) ou identifiées par régression selon l'Equation V-10 (traits pointillés).

La courbe d'évolution (paramètre B de l'Equation V-10 versus OI), interpolée au moyen d'une fonction polynomiale de degré deux, est présentée en encart sur la Figure V-23.

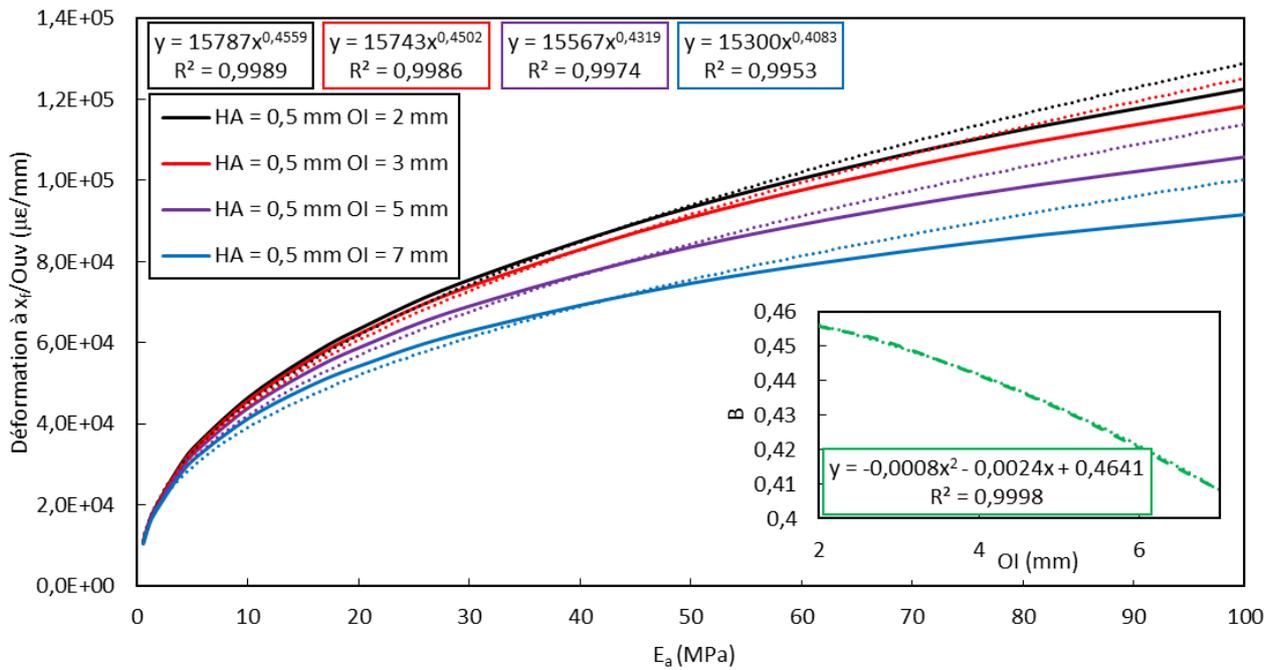


Figure V-23 : Courbes d'évolutions du paramètre k en fonction du module élastique de l'adhésif E_a pour différentes valeurs de l'ouverture initiale de fissure OI , déterminées à partir du modèle numérique (traits pleins) ou identifiées à partir de l'Equation V-10 (pointillés) ; En encart, évolution du paramètre B de l'Equation V-10 en fonction de OI (interpolation des valeurs au moyen d'une fonction polynomiale).

Les résultats montrent que la variation de OI affecte davantage le paramètre B que le paramètre A , ce dernier restant quasi-constant (variation de moins de 2 % pour une augmentation de OI de 2 mm).

Dans ce petit intervalle de variation de OI (de 0 à 3 mm), on peut considérer que les deux paramètres A et B demeurent quasi-constants et que le transfert d'effort est indépendant de OI .

V.4.3.4. Effet de la hauteur de l'adhésif (HA)

De la même manière, il est nécessaire d'évaluer l'influence de la hauteur d'adhésif (HA) sur le mécanisme de transfert d'effort entre la structure hôte fissurée et la FO. La Figure V-24 illustre les évolutions du paramètre k en fonction du module d'Young de l'adhésif, pour différentes valeurs de HA . Ces courbes ont également été obtenues au moyen du modèle aux éléments finis (traits pleins) ou identifiées par régression selon l'Equation V-10 (traits pointillés).

La courbe d'évolution (paramètre A de l'Equation V-10 versus HA), interpolée au moyen d'une fonction exponentielle, est présentée en encart sur la Figure V-24.

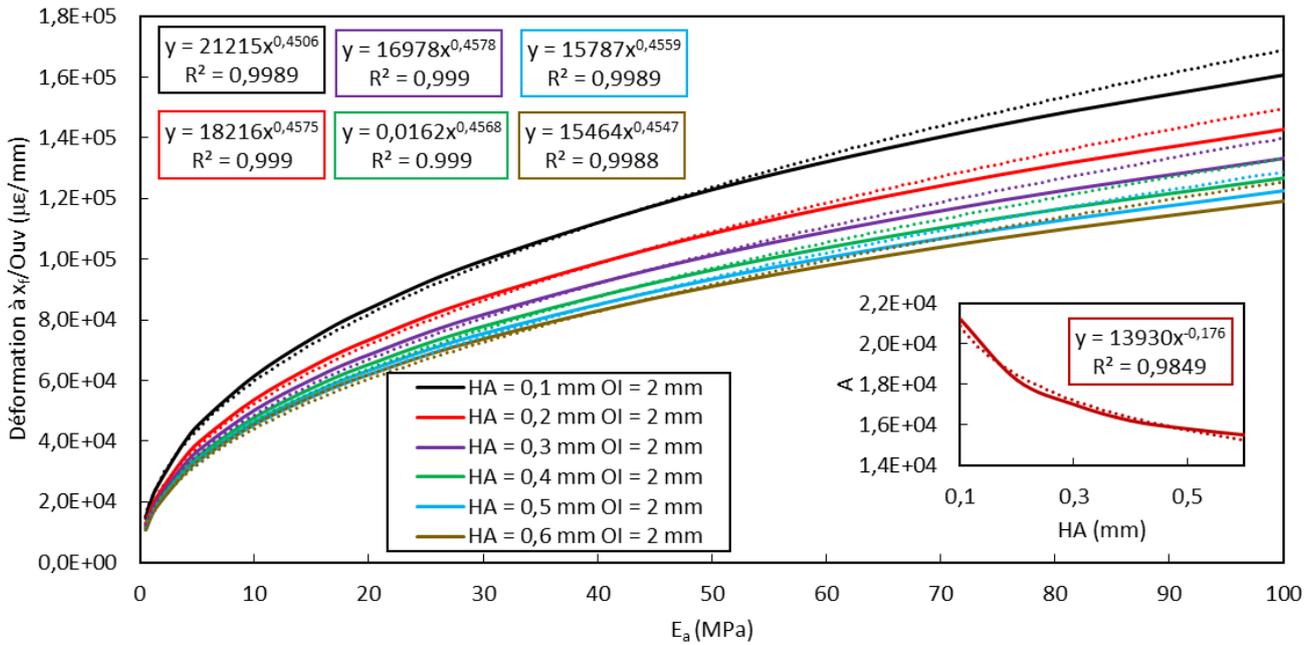


Figure V-24 : Courbes d'évolution du paramètre k en fonction du module élastique de l'adhésif, pour différentes valeurs de la hauteur de l'adhésif, déterminées à partir du modèle numérique (traits pleins) ou identifiées à partir de l'Equation V-10 (pointillés) ; En encart, évolution du paramètre A de l'Equation V-10 en fonction de HA (interpolation des valeurs au moyen d'une fonction polynomiale).

A partir des résultats de la Figure V-24, il apparait ici que le paramètre A qui est affecté par la hauteur de l'adhésif, tandis que le paramètre B reste quasi-constant.

Néanmoins, lorsque la hauteur de l'adhésif dépasse les 0,4 mm, l'évolution du paramètre A avec HA ralentit considérablement ; les deux paramètres A et B deviennent alors quasi-constants et le paramètre k ne dépend presque plus de la hauteur de l'adhésif.

V.4.3.5. Effet du coefficient de Poisson de l'adhésif

Dans ce paragraphe, nous cherchons à évaluer l'influence du coefficient de Poisson de l'adhésif sur le mécanisme du transfert d'effort entre la structure hôte fissurée et la FO scellée en engravure. En effet, dans tout ce qui précède, nous avons supposé que ce paramètre restait constant à une valeur de 0,48. Or cette valeur, proche de 0,5 est surtout représentative de celle des matériaux élastomères, comme les silicones par exemple [187]. Les adhésifs rigides, comme les systèmes époxydes, présentent plutôt des coefficients de Poisson autour de 0,4 [188].

La Figure V-25 illustre les profils de déformation obtenus au moyen du modèle numérique, pour différentes valeurs du coefficient de Poisson de l'adhésif (ν) comprises entre 0,3 et 0,48, et pour un adhésif de type élastomère ($E_a = 5 MPa$) et un adhésif de type époxy ($E_a = 3 GPa$) (les autres paramètres du modèle HA et OI étant considérés constants).

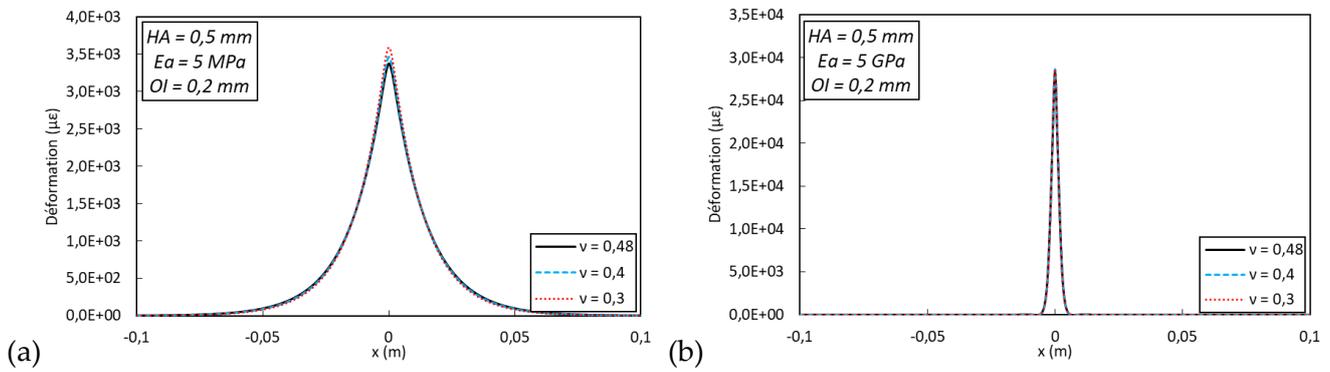


Figure V-25 : Profils de déformation le long de la FO simulés au moyen du modèle numérique, pour différentes valeurs du coefficient de Poisson (a) d'un adhésif de type élastomère et (b) d'un adhésif de type époxy.

Les résultats de la Figure V-25 montrent que les profils de déformation sont très similaires sur la plage de variation de ν considérée, en dehors de légers écarts sur les amplitudes aux sommets des pics (écarts inférieurs à 3 % lorsque ν varie de 0,48 à 0,4).

V.4.3.6. Formule générale

Cette étude a montré que l'approche numérique proposée est cohérente avec les résultats expérimentaux de l'essai de flexion 3 points sur éprouvette entaillée.

Elle a également permis de proposer une formule simplifiée décrivant le profil de déformation le long d'une FO engravée à la surface d'une structure en béton fissurée. Cette formule générale fait intervenir le module d'Young de l'adhésif utilisé, ainsi que 2 paramètres A et B qui dépendent respectivement de la hauteur de l'adhésif HA et de l'ouverture initiale de la fissure OI (ou de l'entaille dans l'essai de flexion).

Une formulation mathématique générale est proposée à travers le système d'Equations suivant :

$$\begin{cases} \varepsilon(x) = O\nu\nu A . E_a^B e^{-2A.E_a^B|x-x_f|} \\ A = C . (HA)^D \\ B = a(OI)^2 + b.OI + c \end{cases} \quad (V-11)$$

où C, D, a, b et c sont des constantes.

A partir des résultats du paragraphe V.4.3.5, le coefficient de Poisson de l'adhésif peut être considéré constant dans cette approche, avec $\nu \approx 0,48$.

Soulignons que cette formule pourrait encore être simplifiée dans le cas d'une instrumentation sur ouvrage réel. En effet, dans ce cas :

- les ouvertures de fissures initiales OI (préexistant à l'installation des capteurs, si elles existent), sont généralement très petites et le paramètre B peut alors être considéré constant (Cf. paragraphe V.4.3.3)

-lorsque la hauteur de l'adhésif HA dépasse 0,4 mm (dans la pratique, cela est possible en appliquant une première couche d'adhésif dans la rainure avant d'introduire la FO), le paramètre A devient lui aussi quasi-constant.

La formule décrivant le profil de déformation dans la FO devient alors :

$$\varepsilon(x) = Ouvv A. E_a^B e^{-2A.E_a^B|x-x_f|} \quad (V-12)$$

où A et B sont des constantes.

Cette formule peut permettre d'optimiser le choix de l'adhésif (selon un critère de rigidité) en fonction des ouvertures des fissures attendues sur l'ouvrage instrumenté. Il est ainsi possible de protéger le capteur contre une rupture précoce et de maîtriser le mécanisme de transfert d'effort afin de localiser et suivre les ouvertures de fissures qui traversent le parcours du capteur. En revanche, il est important de préciser que cette approche est simplifiée et ne tient pas compte de deux aspects importants :

-le comportement mécanique non linéaire de certains adhésifs au-delà d'un seuil de déformation et les interfaces non parfaites (endommagement et glissement à partir d'un seuil de la contrainte de cisaillement) ;

-Problématiques de durabilité environnementale liées à l'exposition des adhésifs dans l'environnement de service qui peut être agressif.

Concernant le premier aspect, une première amélioration du modèle consistera à considérer une loi linéaire d'interface entre l'adhésif et la FO en définissant une contrainte d'adhérence à partir de laquelle un glissement se produit entre les deux matériaux. Des essais d'arrachement FO/adhésif pourraient être réalisés dans ce sens afin d'alimenter le modèle avec les paramètres de cette loi d'interface.

En ce qui concerne la durabilité de l'instrumentation, cet aspect constitue la partie fondamentale de ce travail de thèse et les chapitres II et III présentent le détail d'une campagne expérimentale pour l'étude de la durabilité de deux capteurs à FO par essais de vieillissement.

V.5. Conclusion du Chapitre V

Des investigations numériques et expérimentales ont été menées pour identifier les principaux paramètres affectant le signal de déformation fourni par une FO collée en parement d'une structure existante en béton, dans le cadre d'applications de mesures réparties des déformations et de contrôle des fissures. Une attention particulière a été portée à l'influence de la rigidité (module d'Young) de l'adhésif polymère utilisé pour coller / sceller le capteur, sur le processus de transfert d'effort entre la structure hôte en béton et le cœur en silice de la FO.

Une approche numérique prenant en compte la configuration réelle du capteur (FO scellée dans une rainure à la surface de la structure en béton) montre que plus l'adhésif est souple, plus la contrainte transférée au noyau en silice de la FO est faible en raison de la répartition des efforts sur une longueur plus grande du capteur. La même tendance a été observée expérimentalement dans le cadre d'un test de compression effectué sur un cylindre en béton instrumenté, au cours duquel l'instrumentation a permis de suivre le développement de fissures multiples. Il est notamment apparu que l'amplitude des pics de déformation induits par les fissures est d'autant plus grande que la rigidité de l'adhésif est élevée, suggérant ainsi que le choix d'un adhésif souple peut permettre de réduire les concentrations locales de contraintes exercées sur le capteur.

À la lumière de ces premiers résultats, un essai de flexion a ensuite été effectué sur un prisme de béton entaillé, afin d'étudier de manière plus précise l'effet de la rigidité de l'adhésif sur la réponse du capteur en présence d'une fissure unique. Cet essai a confirmé que la déformation maximale du capteur (au sommet du pic) induite par l'ouverture de la fissure peut être considérablement réduite en utilisant des adhésifs souples, ce qui permet d'éviter une défaillance précoce du capteur et d'allonger potentiellement sa durée de vie dans le cadre des applications SHM sur des structures en béton. Cependant, l'utilisation d'adhésifs trop souples (comme le silicone) tendrait à réduire la sensibilité des capteurs collés, compromettant alors la détection précoce des fissures. La rigidité de l'adhésif doit donc être optimisée de manière à assurer un compromis entre la fonction de protection du capteur et les performances de ce dernier en termes de détection des fissures, tout en tenant compte de l'environnement de service de la structure hôte.

Enfin, l'approche numérique par éléments finis a été étendue à la description du mécanisme du transfert d'effort en présence d'une fissure se développant dans le béton et croisant le parcours du capteur. Ce modèle a permis de proposer une expression analytique simplifiée reliant la déformation maximale du capteur à la largeur de la fissure à la surface de la structure en béton. Cette relation permet d'optimiser la rigidité de l'adhésif en fonction de la largeur de fissure attendue, afin d'assurer une meilleure protection du capteur. Elle permet également d'évaluer les ouvertures de fissures à partir de profils de déformation collectés par le capteur. En revanche, sa validité reste limitée au domaine du comportement élastique linéaire de tous les matériaux et pour des interfaces parfaites. D'autres essais complémentaires doivent être réalisés en utilisant une gamme plus étendue de module d'Young de l'adhésif pour mieux confirmer le modèle numérique et les Equations simplifiées déduites.

Conclusions et perspectives

Les ouvrages de génie civil sont exposés à une multitude de risques et à l'usure du temps. L'optimisation de leur maintenance nécessite donc une connaissance constante de leur état général. Pour répondre à ce besoin, les systèmes de surveillance de la santé structurale ont pour objectif la réalisation d'un suivi permanent d'indicateurs fiables. Ces indicateurs sont choisis pour témoigner du comportement mécanique de l'ouvrage et permettre de détecter d'éventuelles anomalies ainsi que le développement de pathologies. Parmi les systèmes de surveillances, ceux basés sur les capteurs à FO rencontrent un intérêt croissant. Capables de réaliser des mesures réparties de déformation et de température, ils offrent plusieurs avantages en termes de précision, de déport de la mesure sur de longues distances, d'insensibilité au champ électromagnétique et de faible intrusivité comparativement aux capteurs traditionnels. Ces systèmes de mesure utilisent des câbles à FO pouvant être noyés dans le béton au moment de la construction de l'ouvrage, ou être collés en surface des structures existantes. Selon la configuration de mise en œuvre (câbles noyés ou collés en parement), les câbles à FO sont soumis à l'environnement alcalin de la matrice cimentaire ou exposés aux conditions climatiques de l'ouvrage. Leurs caractéristiques physiques et mécaniques sont, par conséquent, susceptibles d'évoluer dans le temps. L'objectif de cette thèse était donc d'étudier la durabilité de ces câbles à FO destinés aux mesures réparties de déformation dans les ouvrages en béton pour les deux configurations d'installation possibles.

Le premier volet de ce travail de thèse a été mené aux laboratoires EMGCU et Navier de l'UGE (Campus Marne-la-Vallée) et se fonde sur une vaste campagne expérimentale de durabilité. Deux câbles à FO du commerce ont été sélectionnés (Neubrex FN-SILL-3 et AFL DNS-5553) pour être noyés dans des cylindres de béton ou collés en surface de prismes en béton. Pour ce second cas de mise en œuvre, le collage a été réalisé à l'aide d'un adhésif en résine époxydique bi-composant. Deux formulations de béton ont été adoptées pour la réalisation des éprouvettes de cette campagne expérimentale : une formulation non pathologique et une formulation susceptible de développer la RSI et la RAG. L'ensemble des éprouvettes de béton (instrumentées ou non par FO) ainsi que des échantillons des deux câbles à FO et de l'adhésif ont été exposés à des conditions de vieillissement accéléré. Les attaques envisagées lors de ces vieillissements (cycles d'humidité/séchage, milieu basique, gel/dégel, ...) ont été mis en relation avec les types de mise en œuvre considérés pour ces câbles (collés ou noyés). Un vieillissement naturel sur site extérieur a aussi été appliqué aux différentes éprouvettes. Les effets de ces vieillissements sur les échantillons ont été suivis en réalisant, à différentes échéances, des essais de traction, de compression et d'arrachement ainsi que des caractérisations physico-chimiques et géométriques. Ces essais ont permis de mesurer l'évolution des propriétés mécaniques des différents matériaux en présence (modules d'Young des bétons, des revêtements des câbles, de leurs renforcements et de l'adhésif de collage). La dégradation des interfaces a aussi été suivie au travers de la mesure de différents paramètres caractéristiques (contrainte d'adhérence de l'interface câble/béton ainsi que la rigidité tangentielle des interfaces gaine/renforcement et gaine/FO pour les deux câbles). Les investigations sur l'évolution de la géométrie et de la physico-chimie des bétons durcis et des gaines externes des câbles à FO ont permis de formuler des interprétations argumentées permettant d'expliquer les résultats mécaniques et de conclure sur le développement des pathologies de gonflement dans les éprouvettes. Ces investigations ont de plus fourni des indications essentielles sur la durabilité des deux câbles à FO mis en œuvre suivant les deux configurations d'instrumentation d'ouvrages envisagées, que ces ouvrages en béton soient atteints ou non de pathologies de gonflement interne.

A partir des résultats expérimentaux issus de la campagne de durabilité et des interprétations qui en ont été proposées, une approche numérique a été proposée afin d'évaluer finement le mécanisme de transfert d'effort pour les deux câbles à FO et pour les deux configurations d'instrumentation. Dans cette simulation aux éléments finis qui a été voulue simple, des lois de comportement linéaires ont été considérées pour tous les matériaux ainsi que pour décrire les lois d'interface câble/béton et gaine/FO. Les paramètres des modèles ont été identifiés sur les résultats expérimentaux. Les calculs ont ainsi été en mesure de fournir une simulation représentative du transfert d'effort dans les deux câbles et de leur réponse au droit d'une fissure.

Les protocoles de fabrication et de conservation des éprouvettes de béton avaient pour objectif de reproduire les protocoles de vieillissement des blocs ODOBA, afin d'étudier la durabilité des câbles à FO noyés et collés dans ces blocs. Il ne s'agissait donc pas d'une étude spécifique de la pathologie dans les bétons AA et ZA. Les résultats de la campagne expérimentale consolidés par les simulations numériques ont cependant permis de dresser un bilan du comportement des deux types de béton vis-à-vis du développement des pathologies de gonflement interne. De plus, il est notamment apparu un couplage des deux pathologies RAG/RSI dans les éprouvettes de béton de formulation ZA immergées en solution alcaline à différentes températures, avec cependant une dominance sensible de la RSI.

Les résultats des essais mécaniques, du suivi dimensionnel et massique et des observations par MEB-EDX ont permis d'avancer les premières explications relatives au développement des pathologies dans les bétons de formulation AA et ZA :

- Le développement de la RSI est déclenché directement après le traitement thermique et la période de conservation en eau a favorisé une lixiviation des alcalins et donc une désorption des sulfates ;
- La conservation en solution alcaline a permis une initiation de la RAG dans les éprouvettes ZA et a peut-être limité la poursuite du développement de la RSI sans pour autant l'arrêter complètement ;
- L'absence d'expansion (de RSI) dans les éprouvettes prismatiques en cycle d'immersion/séchage peut être due à une lixiviation prononcée des réactifs qui forment l'ettringite différée, en raison des dimensions modestes de ces prismes.

L'ensemble des essais de traction et d'arrachement, réalisés sur les éprouvettes de béton instrumentées ainsi que sur les échantillons des deux câbles à FO et de l'adhésif de collage, a permis de dégager quelques conclusions sur la durabilité des deux câbles à FO pour les deux configurations d'instrumentation :

- En solution alcaline à haute température, la gaine externe du câble AFL se dégrade sévèrement et le polymère qui la constitue se dissout progressivement par hydrolyse alcaline en induisant une perte de masse et une diminution du diamètre du câble. Les analyses IRTF et DSC ont montré que la couche thermoplastique de ce revêtement est constituée d'hytrel. Contrairement aux propos du fournisseur, ce câble n'est pas adapté pour une utilisation en milieu cimentaire ;
- Un gonflement est observé pour câble Neubrex vieilli en solution alcaline à température élevée et pourrait s'expliquer par l'hydrolyse des groupes acétates du copolymère (EVA/PP) qui constitue sa gaine externe ;

- Les vides présents au niveau de l'interface entre la gaine du câble Neubrex et la FO facilitent l'infiltration de la solution alcaline qui dégrade de manière importante la qualité de cette interface. Le mécanisme de transfert d'effort en est, par conséquent, négativement affecté.

Les résultats du programme expérimental de durabilité ont permis d'établir une liste de recommandations susceptibles d'améliorer les câbles à FO destinés au suivi des ouvrages de génie civil. Ces améliorations portent sur la durabilité des câbles et la qualité du transfert d'effort de la structure hôte vers l'élément sensible du câble (la fibre de silice). Plus particulièrement, ces recommandations concernent trois aspects :

- La gaine externe du câble à FO doit assurer à la fois une bonne protection chimique et une adhérence optimale dans le béton. Puisque le polyester de la gaine du câble AFL s'est dégradé dans l'environnement alcalin de nos essais, ce matériau ne semble adapté que pour les gaines de câbles destinés aux instrumentations en parement, car le câble est alors scellé dans une rainure au moyen d'un adhésif polymère et ne se trouve pas en contact direct avec le béton ;
- Les caractéristiques mécaniques des renforts du câble à FO (rigidité et résistance) doivent offrir un compromis entre la protection mécanique du câble (i.e. renforts rigides et résistant), le transfert d'effort de la structure en béton vers la FO en silice (i.e. renforts souples) et la facilité de manipulation du câble (i.e. renforts souples). Les renforts métalliques ne semblent offrir un compromis parfait, car trop rigides, que lorsqu'ils sont insérés dans des câbles à FO avec des gaines souples (câble Neubrex). Les renforts en matériau composite à fibres de verre peuvent également assurer une bonne protection mécanique du câble (i.e. renforts rigides) mais offrent moins de facilité pour la manipulation du câble. D'autre part, le gel polymère contenu dans le câble AFL n'a pas permis de bien évaluer l'effet de ce type de renfort sur le transfert d'effort ;
- L'interface gaine/FO du câble joue un rôle crucial dans le mécanisme de transfert d'effort, au même titre que l'interface béton (ou adhésif)/gaine. Il est donc important d'assurer une bonne adhérence de manière à ce que cette interface ne soit pas glissante.

A l'issue de cette étude expérimentale et des premiers travaux numériques qui y sont adossés, plusieurs perspectives d'améliorations peuvent être proposées pour de futures investigations :

- L'agressivité importante de l'essai d'immersion en solution alcaline à haute température associé à la durée limitée de l'essai de vieillissement naturel ne permet pas d'estimer de façon fiable la valeur du facteur d'accélération des essais de laboratoire. Il serait donc intéressant de réaliser des essais de vieillissement sur site naturel sur une durée beaucoup plus longue et incluant de multiples échéances de caractérisation afin de mieux évaluer le facteur d'accélération ;
- Des essais accélérés couplant des cycles d'immersion/séchage, des cycles thermiques et des essais d'exposition aux ultraviolets, appliqués sur les éprouvettes instrumentées en surface pourraient permettre de mieux comprendre les évolutions constatées suite au vieillissement naturel ;
- L'approche numérique peut être enrichie, pour chaque couche, de lois d'interface faisant intervenir des contraintes seuils d'adhérence au-delà desquels surviendrait le glissement, éventuellement avec des frottements. Le modèle pourrait alors permettre une prédiction améliorée de la réponse de la FO, en tenant compte de l'intensité de la

sollicitation du milieu hôte. Des lois d'évolutions des paramètres du modèle avec le temps (en lien avec les conditions d'exposition), permettraient, de plus, de tenir compte des conséquences du vieillissement du câble à FO sur le transfert d'effort et donc sur la qualité de l'interprétation de sa mesure.

En parallèle à l'étude menée en laboratoire, plusieurs interventions ont été effectuées à Cadarache (Bouches du Rhône) sur les corps d'épreuve du projet ODOBA piloté par l'IRSN. Ces blocs en béton et en béton armé sont destinés à subir des vieillissements visant à déclencher et accélérer deux pathologies potentiellement présentes dans les ouvrages nucléaires : la RSI, la RAG et le couplage RSI/RAG. Quatre blocs de béton (ZA, IB, IA, KB) ont été instrumentés au moyen des deux câbles à FO précédemment testés en laboratoire. Ces câbles ont été noyés dans le béton avant la coulée des blocs ou collés en surface des blocs déjà construits. Ces deux méthodes de mise en œuvre correspondent à celles étudiées à l'UGE sur les petites éprouvettes. Le suivi des déformations dans les différentes zones des blocs a été possible en proposant une démarche simple et originale pour la décorrélation entre les mesures de température et de déformation. Il a donc été possible d'obtenir des profils de déformation continus sur le chemin des câbles et de suivre leurs évolutions entre mars 2019 et juillet 2020 pour les premiers blocs instrumentés (ZA et IB) et entre juillet 2019 et juillet 2020 pour les autres blocs restants (IA et KB). Les premiers cycles de vieillissement accéléré ont été appliqués sur les blocs entre décembre 2019 et mars 2020. La dernière échéance de mesure réalisée en juillet 2020 n'a pas relevé de manifestations des deux pathologies dans trois des quatre blocs instrumentés. Néanmoins, ces interventions sur site ont confirmé la faisabilité de l'instrumentation sur des corps d'épreuve d'échelle pleinement représentative. Cette constatation a été confortée par la remarquable concordance des mesures relevées par les capteurs à FO avec les données enregistrées par les cordes vibrantes noyées dans les blocs. Les premières mesures ont ainsi permis de suivre les cycles de contraction/dilatation thermique des blocs induits par la variation des conditions climatiques au moment de la réalisation des mesures sur la plateforme ODE. De plus, de faibles gonflements hydriques provoqués par l'immersion des blocs KB et IA (blocs RSI) durant l'application du protocole de vieillissement accéléré, ont également pu être détectés. Il est à noter que le bloc KB, dont la formulation de béton est considérée comme la plus potentiellement réactive vis-à-vis les pathologies recherchées, a montré des signes d'initiation du gonflement interne de sa moitié supérieure (là où l'énergie utile du traitement thermique est maximale). Ces résultats préliminaires sont cohérents avec les résultats expérimentaux obtenus sur des petites éprouvettes extraites des blocs et testées à l'IRSN. Les pathologies des blocs KB et IB pourraient être confirmées lors des prochaines échéances de mesures par capteur à FO.

La dernière partie de ce rapport concerne les recherches menées à l'UGE sur l'instrumentation par FO. Elle n'est cependant pas en lien direct avec la campagne de durabilité. Ces recherches, qui comportent des investigations expérimentales et numériques, visent à analyser le profil de déformation obtenu par une FO standard monomode collée en surface d'une éprouvette en béton. Il ne s'agit donc plus d'un câble à FO. Cependant le mode de fixation est assez similaire à celui suivi pour l'instrumentation de surface des blocs et comprend la réalisation préalable d'une engravure, remplie de colle, dans laquelle le capteur est inséré. Une attention particulière a été accordée à l'effet de la rigidité (module d'Young) de l'adhésif sur la réponse de la FO qui se situe au droit d'une fissure. Pour cela, différents adhésifs ont été utilisés. Deux essais de configurations géométriques différentes ont été effectués puis simulés aux éléments finis. Ces

travaux ont permis de mieux appréhender l'effet de la rigidité de l'adhésif sur le mécanisme de transfert d'effort du béton vers la FO en silice, mais aussi sur la protection que peut fournir la couche adhésive, si elle est souple, contre une rupture précoce en traction lors de l'ouverture d'une fissure sous la fibre. A la lumière des différentes investigations présentées dans ce chapitre, nous avons pu conclure (ou confirmer) que :

- Les adhésifs les plus souples transfèrent moins de déformation à la FO en silice. Lors de l'apparition d'une fissure dans le béton, les pics de déformation induits dans la FO sont diffusés sur une longueur plus grande de la FO lorsque l'adhésif est souple. L'intensité du pic de déformation de la FO diminue avec module d'Young de l'adhésif ;
- L'étude paramétrique, utilisant le modèle aux éléments finis validé avec les résultats expérimentaux, a permis de proposer une expression analytique simplifiée qui relie la déformation maximale de la FO (valeur au sommet du pic) à l'ouverture de la fissure située au droit de la FO. Cette expression pourra aider à optimiser le choix de l'adhésif de collage de la FO afin d'assurer une meilleure protection du capteur sans affecter excessivement son aptitude à détecter de manière précoce le développement des fissures dans la structure hôte.

Que ce soit pour l'approche théorique ou pour les investigations expérimentales présentées dans ce dernier chapitre, plusieurs pistes d'améliorations peuvent déjà être proposées et pourront faire l'objet d'études futures visant à améliorer le modèle numérique :

- Comme imaginé précédemment pour le cas du câble, il semblerait intéressant d'enrichir les lois d'interfaces. Ici, les interfaces béton/adhésif et/ou adhésif/FO pourraient ne plus être supposées parfaites, puisque, par exemple, un glissement dû à un décollement reste possible. Là encore, l'introduction d'une contrainte seuil d'adhérence pourrait permettre de rendre compte d'un tel glissement. Des essais d'arrachement béton/adhésif et adhésif/FO aideront à identifier les paramètres des nouvelles lois d'interfaces ;
- Une deuxième piste d'amélioration du modèle numérique concerne la loi de comportement linéaire de l'adhésif adoptée en première approche. Il pourrait être pertinent d'utiliser des lois qui décrivent plus précisément le comportement des différents types d'adhésifs (élastomère, époxyde, ...). Cette amélioration qui permettrait vraisemblablement d'obtenir un modèle numérique plus fidèle aux résultats de l'expérience, complexifierait cependant notablement l'établissement de relations analytiques. Il conviendrait bien entendu de réaliser des essais de caractérisation sur une gamme plus étendue d'adhésif afin d'identifier/valider le modèle numérique pour l'ensemble des adhésifs envisagés ;
- Les investigations expérimentales et numériques présentées dans le dernier chapitre ne prennent pas en considération les aspects de durabilité de l'instrumentation en fonction de l'environnement auquel elle est exposée. Une étude des évolutions des propriétés des différents matériaux et des interfaces les séparant devrait être menée pour intégrer les paramètres décrivant ces évolutions dans l'approche numérique (cette piste a été précédemment mentionnée pour le cas de l'interprétation de la mesure des câbles soumis au vieillissement) ;
- La dernière piste d'amélioration concerne l'appareil d'interrogation ayant permis la prise de mesure lors des essais présentés dans ce manuscrit. L'OBR utilisé permet d'effectuer une interrogation en quelques secondes et n'est donc adapté qu'aux essais où la vitesse de variation des déformations à mesurer est relativement lente. Par exemple,

il convient parfaitement au suivi des blocs ODOBA. Cependant pour réaliser les essais présentés dans le dernier chapitre du manuscrit, le temps d'acquisition des mesures de l'OBR a imposé des paliers de déplacement garantissant un profil de déformation constant au long de la FO durant son interrogation. Le choix du nombre de paliers de déplacement a été optimisé de manière à limiter la durée de l'essai (i.e. réaliser le moins de mesures) tout en permettant d'obtenir suffisamment de mesures (i.e réaliser le plus de mesure) afin d'éviter une variation trop importante de la déformation dans la FO entre deux prises de mesure. En effet, une variation trop importante est susceptible d'induire des pertes optiques notables et donc un traitement de données bruts de l'OBR délicat, voire impossible. Il convient d'indiquer de plus, que des phénomènes de relaxation du béton ont été observés durant les paliers. Ces phénomènes perturbent donc le résultat de l'essai. Pour pallier à toutes ces difficultés, il existe des interrogateurs à mesure dynamique répartie permettant d'interroger les FOs à haute fréquence durant l'essai.

Références

-
-
- [1] Y. Lecieux, E. Rozière, V. Gaillard, C. Lupi, D. Leduc, J. Priou, R. Guyard, M. Chevreuil, et F. Schoefs, « Monitoring of a reinforced concrete wharf using structural health monitoring system and material testing », *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 7, n° 4, p. 1-26, 2019.
- [2] J. M. Hénault, M. Quiertant, S. Delepine-Lesoille, J. Salin, G. Moreau, F. Taillade, et K. Benzarti, « Quantitative strain measurement and crack detection in RC structures using a truly distributed fiber optic sensing system », *Constr. Build. Mater.*, vol. 37, p. 916-923, 2012.
- [3] C. Servant, « L'instrumentation du viaduc de Millau », in *Colloque CFBR*, 2012, p. 1-17.
- [4] R. Fortunier, « Comportement Mécanique des Matériaux », Ecole Nationale Supérieure des Mines. [En ligne]. Disponible sur : https://www.emse.fr/~fortunier/cours/Constitutive_Equations/poly.pdf
- [5] F. Elias, « Elasticité », Université Paris-Diderot. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.msc.univ-paris-diderot.fr/~elias/ENSEIGNEMENT/Elasticite.pdf>
- [6] M. Aufray, « Adhésion et Adhérence des Matériaux », 2009. [En ligne]. Disponible en ligne : <http://maelenn.aufray.free.fr/cours/adhesion-adherence-2009.pdf>
- [7] S. Imen, « Comportement des interfaces et modélisation des pieux sous charge axiale », Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 2006.
- [8] B. Delobelle, F. Thiebaud, D. Chapelle, D. Perreux, V. Placet, et R. Ferrière, « Insertion d'une fibre optique dans une structure composite = Embedment of optical fibre into a composite structure », *JNC 16*, 2009.
- [9] I. Severin, R. El Abdi, G. Corvec, et M. Caramihai, « Optical fiber embedded in epoxy glass unidirectional fiber composite system », *Materials (Basel)*, vol. 7, n° 1, p. 44-57, 2014.
- [10] D. Duhamel *et al.*, « Cours metrologie », 2005. [En ligne]. Disponible sur : http://hanquier.m.free.fr/Worcester/references/Others%20papers/poly_metrologie_2005.pdf
- [11] GRIESP, « La mesure : vocabulaire et notations à partir du VIM Mesurer », 2009. [En ligne]. Disponible sur : https://www.pedagogie.ac-aix-marseille.fr/upload/docs/application/pdf/2011-09/la_mesure_vocabulaire_notations.pdf.
- [12] L. Marchand, « Caractéristiques métrologiques du mesurage », 2011. [En ligne]. Disponible : https://cours.polymtl.ca/mec6405/A2012/Cours%205/Cours5_MEC6405_Chapitre%204_A12.pdf
- [13] C. Marion et D. Julie, « Mesure de température par SONDE PT100 ». [En ligne]. Disponible sur : https://cira-descartes.etab.ac-lyon.fr/spip/IMG/pdf/Affiche_Pt100v3.pdf
- [14] J. M. Hénault, « Approche méthodologique pour l'évaluation des performances et de la durabilité des systèmes de mesure réparties de déformation : application à un câble à fibre optique noyé dans le béton », Thèse de l'Université Paris-Est, 2013.

- [15] L. Daret et E. Collombat, « Mesure de temperature par thermocouple ». [En ligne]. Disponible sur : https://cira-descartes.etab.ac-lyon.fr/spip/IMG/pdf/Daret_Colombat3-thermocouple.pdf.
- [16] « La fabrication de la fibre optique ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.lafibrelyonnaise.fr/fabrication-de-la-fibre-optique>
- [17] A. Courtois, J. M. Hénault, A. Simon, Y.-L. Beck, et J. Salin, « La surveillance en exploitation des enceintes de confinement et des aéroréfrigérants à tirage naturel du parc nucléaire d'EDF », *ResearchGate*, n° March, p. 1-16, 2011.
- [18] IFSTTAR et CEREMA, « Mesure de Déformation par Corde Vibrante (ou témoin sonore) », in *Méthodes d'Auscultation de la Structure Mesures Locales de Fonctionnement*, 2015.
- [19] N. Rosin-Corre et C. Noret, « L'auscultation par capteurs à corde vibrante, 80 ans de retour d'expérience », in *Thème 2 – Auscultation et suivi des ouvrages*, 2012, p. 1-15.
- [20] Sensorex, « Capteurs de déplacement LVDT ». [En ligne]. Disponible sur : https://www.sensorex.fr/upload/fiches_techniques/81-fr-BD-LVDT_FR.pdf
- [21] AFNOR, « NF EN 61757-1 Fibre optic sensors - Part 1 : generic spécification ». 2012.
- [22] P. Ferdinand, « Capteurs à fibres optiques : principes, technologies et applications en surveillance des structures », Cours à l'Institut Optique Paris-Tech, 2019.
- [23] « Matériaux fibrés, fibre optique », 2017. [En ligne]. Disponible sur: <http://coursenvrac eklablog.com/materiaux-fibres-fibre-optique-a130124540>.
- [24] H. Nagata, « Thermal Analysis of Jacketing Materials for Commercial Optical Fibers », *Opt. Fiber Technol.*, vol. 3, p. 87-89, 1997.
- [25] « Les différents types de fibre ». [En ligne]. Disponible sur: http://igm.univ-mlv.fr/~dr/XPOSE2009/Transmission_sur_fibre_optique/types.html.
- [26] « Fibre optique biréfringente ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.optique-ingenieur.fr/>.
- [27] IFSTTAR et CEREMA, « Mesure de Déformation par Fibre Optique (extensomètre à interférométrie de Michelson) », in *Méthodes d'Auscultation de la Structure Mesures Locales de Fonctionnement*, 2015.
- [28] C. Davis, C. Edward, W. Martin, E. Shaoul, et E. Robert, *Fiberoptic Sensor Technology Handbook*. 1982.
- [29] CEA, « Capteur optique Fabry Perot destiné à la mesure d'élongation en réacteur ». [En ligne]. Disponible sur : <https://cadarache.cea.fr/cad/Documents/Entreprises/Valorisation/techno-industriels/23-FM-f-Capteur%20optique%20Fabry%20Perot.pdf>
- [30] P. Lecoy, « Les fibres optiques en capteurs et en instrumentation », *La Rev. 3E. I*, n° 85,

2016.

- [31] J. Dupont, « Comportements de Capteurs à fibres a Fibres Optiques, noyés ou fixés en surface d'ouvrages en béton », Thèse de l'Ecole des Ponts ParisTech, 2002.
- [32] A. Motil, A. Bergman, et M. Tur, « State of the art of Brillouin fiber-optic distributed sensing », *Opt. Laser Technol.*, vol. 78, p. 81-103, 2016.
- [33] A. Barrias, J. Casas, et S. Villalba, « A Review of Distributed Optical Fiber Sensors for Civil Engineering Applications », *Sensors*, vol. 16, n° 5, p. 748, 2016.
- [34] Y. S. Mamdem, « Capteurs à fibres optiques répartis par effet Brillouin : Séparation de la dépendance à la température et à la déformation », Thèse de Télécom Paris Tech, 2012.
- [35] E. Boldyreva, « Mesures réparties par réflectométrie fréquentielle sur fibre optique », Thèse de l'Université de Toulouse, 2014.
- [36] K. Yuksel, M. Wuilpart, V. Moeyaert, et P. Mégret, « Optical Frequency Domain Reflectometry : A Review », in *11th International Conference on Transport Optical Networks*, 2009.
- [37] A. Khadour et J. Waeytens, « Monitoring of concrete structures with optical fiber sensors », in *Eco-Efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*, 2018, p. 97-121.
- [38] Luna Technologies Inc., « Optical Backscatter Reflectometer 4600 User Guide », 2013.
- [39] N. Lalam, W. P. Ng, X. Dai, Q. Wu, et Y. Q. Fu, « Analysis of brillouin frequency shift in distributed optical fiber sensor system for strain and temperature monitoring », in *Photoptics 2016 - 4th International Conference on Photonics, Optics and Laser Technology*, 2016, n° January 2017, p. 335-342.
- [40] N. Müller, P. Kraemer, D. Leduc, et F. Schoefs, « Fiber bragg grating sensors and signal based detection method for failure detection of an offshore wind turbine grouted connection », in *The International Offshore and Polar Engineering Conference*, 2017, p. 330-337.
- [41] G. B. Torres, I. Payá-Zaforteza, P. A. Calderón García, et S. Sales Maicas, « New fiber optic sensor for monitoring temperatures in concrete structures during fires », *Sensors Actuators, A Phys.*, vol. 254, p. 116-125, 2017.
- [42] M. Iten, « Novel Applications of Distributed Fiber-optic Sensing in Geotechnical Engineering », thèse de l'Eth Zurich, 2011.
- [43] M. N. Alahbabi, Y. T. Cho, et T. P. Newson, « Simultaneous temperature and strain measurement with combined spontaneous Raman and Brillouin scattering », *Opt. Lett.*, vol. 30, n° 11, p. 1276-78, 2005.
- [44] « Neubrescope ». [En ligne]. Disponible sur : <https://www.neubrex.com/htm/products/pro-nbx6000.htm>.

- [45] X. Bao, Q. Yu, et L. Chen, « Simultaneous strain and temperature measurements with polarization-maintaining fibers and their error analysis by use of a distributed Brillouin loss system. », *Opt. Lett.*, vol. 29, n° 12, p. 1342-4, 2004.
- [46] Q. Yu, X. Bao, et L. Chen, « Strain dependence of Brillouin frequency, power, and bandwidth in panda, bow-tie, and tiger polarization-maintaining fibers. », *Opt. Lett.*, vol. 29, n° 1, p. 17-19, 2004.
- [47] F. Ansari et Y. Libo, « Mechanics of Bond and Interface Shear Transfer in Optical Fiber Sensors », *J. Eng. Mech.*, vol. 124, n° 4, p. 385-394, 1998.
- [48] H. Li, G. Zhou, L. Ren, et D. Li, « Strain Transfer Coefficient Analyses for Embedded Fiber Bragg Grating Sensors in Different Host Materials », *J. Eng. Mech.*, vol. 135, n° 12, p. 1343-1354, 2009.
- [49] H. Wang et Z. Zhou, « Advances of strain transfer analysis of optical fibre sensors », *Pacific Sci. Rev.*, vol. 16, n° 1, p. 8-18, 2014.
- [50] R. E. Goodman, R. L. Taylor, et T. L. Brekke, « A Model for the Mechanics of Jointed Rock », *J. Soil Mech. Found. Div.*, vol. 94, n° 3, p. 637-659, 1968.
- [51] M. LeBlanc, « Interaction mechanics of embedded single-ended optical fibre sensors using novel in situ measurement techniques », Thèse de l'Université de Toronto, 1999.
- [52] X. Feng, J. Zhou, C. Sun, X. Zhang, et F. Ansari, « Theoretical and experimental investigations into crack detection with BOTDR-distributed fiber optic sensors », *J. Eng. Mech.*, vol. 139, n° 12, p. 1797-1807, 2013.
- [53] S. W. Kim, M. S. Jeong, I. Lee, E. H. Kim, I. B. Kwon, et T. K. Hwang, « Determination of the maximum strains experienced by composite structures using metal coated optical fiber sensors », *Compos. Sci. Technol.*, vol. 78, p. 48-55, 2013.
- [54] A. Bassil, X. Wang, X. Chapeleau, E. Niederleithinger, O. Abraham, et D. Leduc, « Distributed fiber optics sensing and coda wave interferometry techniques for damage monitoring in concrete structures », *Sensors*, vol. 19, n° 2, 2019.
- [55] A. Billon, J. M. Hénault, M. Quiertant, F. Taillade, , A. Khadour, R. P. Martin, et K. Benzarti, « Quantitative Strain Measurement with Distributed Fiber Optic Systems : Qualification of a Sensing Cable Bonded to the Surface of a Concrete Structure », in *7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, 2014.
- [56] L. Dongsheng, R. Liang, et L. Hongman, « Mechanical Property and Strain Transferring Mechanism in Optical Fiber Sensors », in *Fiber Optic Sensors*, 2012, p. 439-457.
- [57] A. Billon, « Détermination de la fonction de transfert mécanique d'un câble à fibre optique en parement de structures en béton : étude du câble FutureNeuro™ de Neubrex Co. », 2013.
- [58] J. Zhou, Z. Zhou, et D. Zhang, « Study on strain transfer characteristics of fiber Bragg

- grating sensors », *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 21, n° 11, p. 1117-1122, 2010.
- [59] J. Matthewson, « Fiber Optics Reliability and Testing », *Crit. Rev. Opt. Sci. Technol.*, vol. CR50, p. 33-55, 1993.
- [60] P. Antunes, F. Domingues, M. Granada, et P. André, « Mechanical Properties of Optical Fibers », in *Selected Topics on Optical Fiber Technology*, 2012, p. 537-550.
- [61] F. Mallinder et B. . Proctor, « Elastic constants of fused silica as a function of large tensile strain », *Phys. Chem. Glas.*, vol. 5, n° 4, p. 91-103, 1964.
- [62] J. T. Krause, L. . Testardi, et R. . Thurston, « Deviations from linearity in the dependence of elongation upon force for fibres of simple glass formers and of glass optical lightghides », *Phys. Chem. Glas.*, vol. 20, p. 135-139, 1979.
- [63] R. El Abdi, A. D. Rujinski, M. Poulain, et I. Severin, « Damage of Optical Fibers Under Wet Environments », *Exp. Mech.*, vol. 50, n° 8, p. 1225-1234, 2010.
- [64] N. Evano, R. El Abdi, et M. Poulain, « Lifetime modeling of silica optical fiber in static fatigue test », *J. Appl. Res. Technol.*, vol. 14, n° 4, p. 278-285, 2016.
- [65] M. Komachiya, R. Minamitani, T. Fumino, T. Sakaguchi, et S. Watanabe, « Proof-testing and probabilistic lifetime estimation of glass fibers for sensor applications », *Appl. Opt.*, vol. 38, n° 13, p. 2767-74, 1999.
- [66] Y. Mitsunaga, Y. Katsuyama, H. Kobayashi, et Y. Ishida, « Failure prediction for long length optical fiber based on proof testing », *J. Appl. Phys.*, vol. 53, n° 7, p. 4847-4853, 1982.
- [67] M. Muraoka et H. Abe, « Subcritical crack growth in silica optical fibers in a wide range of crack velocities », *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 79, n° 7. p. 51-57, 1996.
- [68] T. A. Michalske, W. L. Smith, et B. C. Bunker, « Fatigue Mechanisms in Highin High-Strength Silica-Glass Fibers », *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 74, n° 8, p. 1993-1996, 1991.
- [69] S. M. Wiederhorn et L. H. Bolz, « Stress Corrosion and Static Fatigue of Glass », *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 53, n° 10, p. 543-548, 1970.
- [70] Y. S. Shiue et M. J. Matthewson, « Apparent activation energy of fused silica optical fibers in static fatigue in aqueous environments », *J. Eur. Ceram. Soc.*, vol. 22, p. 2325-2332, 2002.
- [71] B. Delobelle, V. Placet, D. Chapelle, D. Perreux, et R. Ferriere, « Analysis of the Failure Probability of an Optical Fiber Under Tensile Loading », in *13th European Conference on Composite Materials*, 2008.
- [72] S. N Kukureka et R. C. Darran, « A comparison of the distribution of estimated Weibull parameters from optical fiber strength measurements and Monte Carlo simulations », *Opt. Fiber Fiber Compon. Mech. Reliab. Test.*, vol. 4215, p. 90-97, 2000.
- [73] C. R. Kurkijian, J. T. Krause, et M. J. Matthewson, « Strength and Fatigue of Silica Optical Fibers », *J. Light. Technol.*, vol. 7, n° 9, p. 1360-1370, 1989.

- [74] W. R. Habel et H. Polster, « Influence of cementitious building materials on polymeric surfaces of embedded optical fibers for sensors », *J. Light. Technol.*, vol. 13, n° 7, p. 1324-1330, 1995.
- [75] W. R. Habel, D. Hofmann, et B. Hillemeier, « Deformation measurements of mortars at early ages and of large concrete components on site by means of embedded fiber-optic microstrain sensors », *Cem. Concr. Compos.*, vol. 19, n° 1, p. 81-102, 1997.
- [76] K. T. Wan et C. K. Y. Leung, « Durability tests of a fiber optic corrosion sensor », *Sensors*, vol. 12, n° 3, p. 3656-3668, 2012.
- [77] T. H. Loutas, P. Charlaftis, A. Airoidi, P. Bettini, C. Koimtzoglou, et V. Kostopoulos, « Reliability of strain monitoring of composite structures via the use of optical fiber ribbon tapes for structural health monitoring purposes », *Compos. Struct.*, vol. 134, p. 762-771, 2015.
- [78] C. Davis, M. Knowles, N. Rajic, et G. Swanton, « Evaluation of a Distributed Fibre Optic Strain Sensing System for Full-Scale Fatigue Testing », *Procedia Struct. Integr.*, vol. 2, p. 3784-3791, 2016.
- [79] A. Sounthararajah, L. Wong, N. Nguyen, H. H. Bui, et J. Kodikara, « Evaluation of flexural behaviour of cemented pavement material beams using distributed fibre optic sensors », *Constr. Build. Mater.*, vol. 156, p. 965-975, 2017.
- [80] S.-W. Kim, M.-S. Jeong, I. Lee, et I.-B. Kwon, « Static mechanical characteristics of tin-coated fiber Bragg grating sensors », *Sensors Actuators A Phys.*, vol. 214, p. 156-162, 2014.
- [81] N. Gougeon, R. El Abdi, et M. Poulain, « Mechanical reliability of silica optical fibers », *J. Non. Cryst. Solids*, vol. 316, n° 1, p. 125-130, 2003.
- [82] W. R. Habel et A. Bismarck, « Optimization of the adhesion of fiber-optic strain sensors embedded in cement matrices; a study into long-term fiber strength », *J. Struct. Control*, vol. 7, n° 1, p. 51-76, 2000.
- [83] E. Lassere, « Initiation au béton armé : Détermination de ferrailage complet d'une poutre en flexion simple (à l'état limite ultime) ». [En ligne]. Disponible sur : www.coinduprojeteur.com
- [84] S. Laldji, « Caractéristiques fondamentales du béton », 2015. [En ligne]. Disponible sur : https://ena.etsmtl.ca/pluginfile.php/125475/mod_resource/content/1/Cours-B%C3%A9tonETS.pdf
- [85] « Les bétons : formulation, fabrication et mise en œuvre », 2013. [En ligne]. Disponible sur : <https://mediatheque.snbpe.org/userfiles/file/mediatheque/public/CT-G11.pdf>
- [86] Ginger CEBTP, « La pathologie du béton », 2016. [En ligne]. Disponible sur : https://www.experts-cebtpi.org/uploads/event/file/16/Pathologieb_ton07112016.pdf
- [87] O. Gragliardini, « Cours de béton armé », IUP Génie Civil et Infrastructures, Grenoble I.

- [En ligne]. Disponible sur : http://pp.ige-grenoble.fr/pageperso/gagliaro/enseignement/polyBA_IUP3.pdf
- [88] B. Abdelhak, « Cours du béton armé I », Centre Universitaire de Béchar Département de Génie Civil et d'Architecture, 2006.
- [89] E. Guillon, « Durabilité des matériaux cimentaires: modélisation de l'influence des équilibres physico-chimiques sur la microstructure et les propriétés mécaniques résiduelles », Thèse de l'Ecole Normale Supérieure de Cachan, 2004.
- [90] F. Adenot et M. Buil, « Modelling of the corrosion of the cement paste by deionized water », *Cem. Concr. Res.*, vol. 22, n° 2-3, p. 489-496, 1992.
- [91] M. Mainguy, C. Tognazzi, J. M. Torrenti, et F. Adenot, « Modelling of leaching in pure cement paste and mortar », *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, n° 1, p. 83-90, 2000.
- [92] D. Planel, J. Sercombe, P. Le Bescop, F. Adenot, et J. M. Torrenti, « Long-term performance of cement paste during combined calcium leaching-sulfate attack: Kinetics and size effect », *Cem. Concr. Res.*, vol. 36, n° 1, p. 137-143, 2006.
- [93] S. Kamali, B. Gérard, et M. Moranville, « Modelling the leaching kinetics of cement-based materials - Influence of materials and environment », *Cem. Concr. Compos.*, vol. 25, p. 451-458, 2003.
- [94] C. Carde, R. François, et J. M. Torrenti, « Leaching of both calcium hydroxide and C-S-H from cement paste: Modeling the mechanical behavior », *Cem. Concr. Res.*, vol. 26, n° 8, p. 1257-1268, 1996.
- [95] T. Van Gerven, D. Van Baelen, V. Dutré, et C. Vandecasteele, « Influence of carbonation and carbonation methods on leaching of metals from mortars », *Cem. Concr. Res.*, vol. 34, n° 1, p. 149-156, 2004.
- [96] E. Rozière, « Etude de la durabilité des bétons par une approche performancielle », Thèse de l'Université de Nantes, 2007.
- [97] S. K. Roy, K. B. Poh, et D. o. Northwood, « Durability of concrete—accelerated carbonation and weathering studies », *Build. Environ.*, vol. 34, n° 5, p. 597-606, 1999.
- [98] C. Perlot, J. Verdier, et M. Carcasses, « Influence of cement type on transport properties and chemical degradation: Application to nuclear waste storage », *Mater. Struct.*, vol. 39, n° 5, p. 511-523, 2006.
- [99] H. Y. Moon, H. S. Kim, et D. S. Choi, « Relationship between average pore diameter and chloride diffusivity in various concretes », *Constr. Build. Mater.*, vol. 20, n° 9, p. 725-732, 2006.
- [100] L. Linger, M. Carcasses, C. Frank, F. Cussigh, P. Rougeau, J. Mai-Nhu, et P. E Denis, « Influence de la porosité des granulats sur les propriétés de durabilité des bétons - Investigations menées dans le cadre de la construction de la NRL sur l'île de La

- Réunion », in *Journées GC'2017*, 2017.
- [101] T. S. Nguyen, S. Lorente, et M. Carcasses, « The influence of temperature levels on chloride diffusion through mortar », *Adv. Cem. Res.*, vol. 19, n° 1, p. 17-24, 2007.
- [102] IFSTTAR et CEREMA, « Diagnostic de la Gélivité d'un Béton », in *Diagnostic de L'Etat des Matériaux Béton*, 2017, p. 1-7.
- [103] A. Fabbri, « Physico-mécanique des matériaux cimentaires soumis au gel-dégel », Thèse de l'Université de Marne-La-Vallée, 2006.
- [104] R. Gagné, M. Pigeon, et P.-C. Aitcin, « Durabilité au gel des Mtons de hautes performances mécaniques », *Mater. Struct.*, vol. 23, p. 103-109, 1990.
- [105] C. Girodet, « Endommagement des mortiers sous sollicitations thermo-mécaniques : influence des caractéristiques des matériaux sur la résistance au gel interne des bétons », Thèse de l'Institut National Des Sciences Appliquées De Lyon, 1996.
- [106] AFNOR, « NF P18-424 Concrete - Freeze test on hardened concrete - Freeze in water - Thaw in water ». 2008.
- [107] AFNOR, « NF P18-425 Concrete - Freeze test on hardened concrete - Freeze in air - Thaw in water ». 2008.
- [108] R.-P. Martin, « Analyse sur structures modèles des effets mécaniques de la réaction sulfatique interne du béton », Thèse de l'Université Paris-Est, 2011.
- [109] V. Turchin, L. Yudina, et A. Sattarova, « Research sulfate resistance of cement-containing composition », *Procedia Eng.*, vol. 57, p. 1166-1172, 2013.
- [110] M. Al Shamaa, « Etude du risque de développement d'une réaction sulfatique interne et de ses conséquences dans les bétons de structure des ouvrages nucléaires », Thèse de l'Université Paris-Est, 2012.
- [111] X. Brunetaud, « Etude de l'influence de différents paramètres et de leurs interactions sur la cinétique et l'amplitude de la réaction sulfatique interne au béton », Thèse de l'Ecole Centrale de Paris, 2005.
- [112] P. Tepponen et B.-E. Eriksson, *Damages in Concrete Railway Sleepers in Finland*. Nordic concrete research, p. 199-209, 1987.
- [113] Y. Fu, « Delayed Ettringite Formation in Portland Cement Products », Thèse au CNRC, Ottawa, Canada, 1996.
- [114] D. Michael, « Principales agressions et attaques du béton », Centre d'études techniques de l'Équipement, Lyon, 2011.
- [115] A. Poole, « Alkali silica reactivity mechanisms of gel formation and expansion », in *9th international conference on alkali-aggregate reaction in concrete*, 1992.

- [116] R. Dron et F. Brivot, « Thermodynamic and Kinetic Approach To the Alkali- Silica Reaction. Part 2: Experiment », *Cem. Concr. Res.*, vol. 23, n° 1, p. 93-103, 1993.
- [117] Y. M. D. Bulteel E. Garcia-Diaz, and P. Degrugilliers, « New Contribution in the Testing Methodology to Characterize Concrete Attacked by Alkali-Silica Reaction », *ACI Struct. J.*, vol. 234, p. 485-494, 2006.
- [118] S. Diamond, R. S. J. Barneyback, et L. J. Struble, « On the Physics and Chemistry of Alkali-Silica Reactions », in *5th Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, 1981, p. 1-11.
- [119] B. Mu et Z. Li, « Mechanical properties and microstructures of alkali-silica reacted concrete with fly ash , silica fume and calcium nitrite salt », *Concr. Sci. Eng.*, vol. 2, p. 2-7, 2000.
- [120] S. Poyet, « Etude de la dégradation des ouvrages en béton atteints par la réaction alcali-silice - approche expérimentale et modélisation numérique des dégradations dans un environnement hydro-chemo-mécanique variable », Thèse de l'Université de Marne-La-Vallée, 2003.
- [121] Z. Shi, C. Shi, J. Zhang, S. Wan, Z. Zhang, et Z. Ou, « Alkali-silica reaction in waterglass-activated slag mortars incorporating fly ash and metakaolin », *Cem. Concr. Res.*, vol. 108, n° March, p. 10-19, 2018.
- [122] F. Saint-Pierre, P. Rivard, et G. Ballivy, « Measurement of alkali-silica reaction progression by ultrasonic waves attenuation », *Cem. Concr. Res.*, vol. 37, n° 6, p. 948-956, 2007.
- [123] C. F. Dunant et K. L. Scrivener, « Effects of aggregate size on alkali – silica-reaction induced expansion », *Cem. Concr. Res.*, vol. 42, n° 6, p. 745-751, 2012.
- [124] H. W. Reinhardt et O. Mielich, « A fracture mechanics approach to the crack formation in alkali-sensitive grains », *Cem. Concr. Res.*, vol. 41, n° 3, p. 255-262, 2011.
- [125] C. Zhang, A. Wang, M. Tang, B. Wu, et N. Zhang, « Influence of aggregate size and aggregate size grading on ASR expansion », vol. 29, p. 1393-1396, 1999.
- [126] J. Hong-gang, N. Yu-feng, et L. Jun-lin, « Effects of Aggregate Shapes and Other Factors on ASR-Induced Anisotropic Expansions in Concrete », *Arab. J. Sci. Eng.*, vol. 41, n° 4, p. 1473–1481, 2015.
- [127] E. Grimal, « Caractérisation des effets du gonflement provoqué par la réaction alcali-silice sur le comportement mécanique d'une structure en béton », Thèse de l'Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2007.
- [128] A. Shayan et G. W. Quick, « Alkali-Aggregate Reaction in Concrete Railway Sleepers from Finland », in *16th Intl. Conference on Cement Microscopy*, 1994, p. 69-79.
- [129] A. Shayan et I. Ivanusec, « An experimental clarification of the association of delayed ettringite formation with Alkali-aggregate reaction », *Cem. Concr. Compos.*, vol. 18, n° 3, p.

- 161-170, 1996.
- [130] S. Diamond, « Delayed ettringite formation - Processes and problems », *Cem. Concr. Compos.*, vol. 18, n° 3, p. 205-215, 1996.
- [131] O. R. Batic, C. A. Milanese, P. J. Maiza, et S. A. Marfil, « Secondary ettringite formation in concrete subjected to different curing conditions », *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, n° 9, p. 1407-1412, 2000.
- [132] Z. Owsiak, « The effect of delayed ettringite formation and alkali-silica reaction on concrete microstructure », *Ceram. - Silikaty*, vol. 54, n° 3, p. 277-283, 2010.
- [133] I. Alj, M. Quiertant, A. Khadour, Q. Grando, B. Terrade, J. C. Renaud, et K. Benzarti, « Experimental and Numerical Investigation on the Strain Response of Distributed Optical Fiber Sensors Bonded to Concrete : Influence of the Adhesive Stiffness on Crack Monitoring Performance », *Sensors*, vol. 20, p. 5144, 2020.
- [134] A. Barrias, J. R. Casas, et S. Villalba, « Fatigue performance of distributed optical fiber sensors in reinforced concrete elements », *Constr. Build. Mater.*, vol. 218, p. 214-223, 2019.
- [135] X. Zhao, P. Gong, G. Qiao, J. Lu, X. Lv, et J. Ou, « Brillouin corrosion expansion sensors for steel reinforced concrete structures using a fiber optic coil winding method », *Sensors*, vol. 11, n° 11, p. 10798-10819, 2011.
- [136] M. Davis, N. A. Hoult, et A. Scott, « Distributed strain sensing to assess corroded RC beams », *Eng. Struct.*, vol. 140, p. 473-482, 2017.
- [137] W. Li, C. Xu, S. C. M. Ho, B. Wang, et G. Song, « Monitoring concrete deterioration due to reinforcement corrosion by integrating acoustic emission and FBG strain measurements », *Sensors*, vol. 17, n° 3, p. 1-12, 2017.
- [138] W. Li, S. Chun, M. Ho, et G. Song, « Corrosion detection of steel reinforced concrete using combined carbon fiber and fiber Bragg grating active thermal probe », *Smart Mater. Struct.*, vol. 25, n° 45017, 2016.
- [139] X. Zhao, X. Lv, L. Wang, Y. Zhu, H. Dong, W. Chen, J. Li, B. Ji, et Y. Ding, « Research of concrete residual strains monitoring based on WLI and FBG following exposure to freeze-thaw tests », *Cold Reg. Sci. Technol.*, vol. 116, p. 40-48, 2015.
- [140] A. Bassil, X. Chapeleau, D. Leduc, et O. Abraham, « Concrete crack monitoring using a novel strain transfer model for distributed fiber optics sensors », *Sensors*, vol. 20, n° 8, p. 1-17, 2020.
- [141] J. Jabbour, « Méthodes d'essais de vieillissement accéléré des bétons à l'échelle des ouvrages », Thèse de l'Université Paris-Saclay, 2018.
- [142] AFNOR, « NF EN ISO 527-2 Plastics - Determination of tensile properties - Part 2 : test conditions for moulding and extrusion ». 2012.
- [143] AFNOR, « NF EN 12390 Testing hardened concrete », 2019.

- [144] « Météo-France ». [En ligne]. Disponible sur : <http://www.meteofrance.com/>.
- [145] Y. Perrot, C. Baley, et P. Davies, « Influence of Low Styrene Emission Polyester Resins on the Aging Behaviour of Composites in A Marine Environment », in *Journées Nationales sur les Composites 15*, 2007.
- [146] A. Apicella et L. Nicolais, « Effect of water on the properties of epoxy matrix and composite », *Epoxy Resins Compos. I. Adv. Polym. Sci.*, vol. 72, p. 69-77, 1985.
- [147] M.-A. Bruneaux, « Durabilité des assemblages collés : modélisation mécanique et physico-chimique », Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées et de l'Université de Rome II, 2004.
- [148] B. Kchakech, « Etude de l'influence de l'échauffement subi par un béton sur le risque d'expansions associées à la Réaction Sulfatique Interne », Thèse de l'Université Paris-Est, 2015.
- [149] Y. Gu, R. P. Martin, O. Omikrine Metalssi, T. Fen-Chong, et P. Dangla, « Pore size analyses of cement paste exposed to external sulfate attack and delayed ettringite formation », *Cem. Concr. Res.*, vol. 123, n° May, p. 1-11, 2019.
- [150] D. Damidot et F. P. Glasser, « Thermodynamic Investigation of the CaO-Al₂O₃-CaSO₄-H₂O System at 50°C and 85°C », *Cem. Concr. Res.*, vol. 22, n° 1, p. 1179-1191, 1992.
- [151] S. Diamond, « Relevance of laboratory studies on delayed ettringite formation to DEF in field concretes », *Cem. Concr. Res.*, vol. 30, n° 12, p. 1987-1991, 2000.
- [152] M. Salgues, « Modélisation des effets structuraux des réactions sulfatiques internes : Application aux barrages en béton », Thèse de l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2013.
- [153] C. K. Rust, « Role of Relative Humidity in Concrete Expansion due to Alkali-Silica Reaction and Delayed Ettringite Formation: Relative Humidity Thresholds, Measurement Methods, and Coatings to Mitigate Expansion », Thèse de l'Université de Texas at Austin, 2009.
- [154] N. Leklou, « Contribution à la connaissance de la réaction sulfatique interne », Thèse de l'Université Paul-Sabatier Toulouse III, 2008.
- [155] C. Famy, K. L. Scrivener, A. Atkinson, et A. R. Brough, « Influence of the storage conditions on the dimensional changes of heat-cured mortars », *Cem. Concr. Res.*, vol. 31, n° 5, p. 795-803, 2001.
- [156] M. Cervera, R. Faria, J. Oliver, et T. Prato, « Numerical modelling of concrete curing, regarding hydration and temperature phenomena », *Comput. Struct.*, vol. 80, n° 18-19, p. 1511-1521, 2002.
- [157] A. M. Henderson, « Ethylene-Vinyl Acetate (EVA) Copolymers: A General Review », *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 9, n° 1, p. 30-38, 1993.
- [158] A. Badiie, « An examination of the response of ethylene-vinyl acetate film to changes in

- environmental conditions », Thèse de l'Université de Nottingham, 2016.
- [159] D. E. Mansour, C. Barretta, L. P. Bauermann, G. Oreski, A. Schueler, D. Philipp, et P. Gebhardt, « Effect of backsheet properties on PV encapsulant degradation during combined accelerated aging tests », *Sustainability*, vol. 12, n° 12, p. 5208, 2020.
- [160] M. Giurginca, L. Popa, et T. Zaharescu, « Thermo-oxidative degradation and radio-processing of ethylene vinyl acetate elastomers », *Polym. Degrad. Stab.*, vol. 82, n° 3, p. 463-466, 2003.
- [161] M. Tang, J. Hou, L. Lei, X. Liu, S. Guo, Z. Wang, et K. Chen, « Preparation, characterization and properties of partially hydrolyzed ethylene vinyl acetate copolymer films for controlled drug release », *Int. J. Pharm.*, vol. 400, n° 1-2, p. 66-73, 2010.
- [162] L. Vouyovitch Van Schoors, « Hydrolytic aging of polyester (polyethylene terephthalate) geotextiles : state of the art assessment », *Bull. des Lab. des Ponts Chaussées*, p. 133-154, 2007.
- [163] P. Bartolomeo, « Vers une prévision de la durée de vie des polymères géosynthétiques. Principes de bases - État de l'art », *Bull. des Lab. des Ponts Chaussees*, n° 243, p. 47-69+96, 2003.
- [164] V. Elias, A. Salman, et D. Goulias, *The effect of pH, resin properties, and manufacturing process on laboratory degradation of polyester geosynthetics*, vol. 5, n° 5. 1998.
- [165] K. Agroui et G. Collins, « Determination of thermal properties of crosslinked EVA encapsulant material in outdoor exposure by TSC and DSC methods », *Renew. Energy*, vol. 63, n° 2014, p. 741-746, 2014.
- [166] D. G. Dikobe et A. S. Luyt, « Morphology and properties of polypropylene/ethylene vinyl acetate copolymer/wood powder blend composites », *Express Polym. Lett.*, vol. 3, n° 3, p. 190-199, 2009.
- [167] J. Brandrup, E. H. Immergut, et E. A. Grulke, *Polymer Handbook*, 4th éd. New York: Wiley-Interscience, 1999.
- [168] G. Bouvet, « Relations entre microstructure et propriétés physico-chimiques et mécaniques de revêtements époxy modèles », Thèse de l'Université de La Rochelle, 2014.
- [169] « Cast3m ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www-cast3m.cea.fr/>.
- [170] X. Feng, C. Sun, X. Zhang, et F. Ansari, « Determination of the coefficient of thermal expansion with embedded long-gauge fiber optic sensors », *Meas. Sci. Technol.*, vol. 21, n° 6, 2010.
- [171] L. J. Butler, J. Xu, P. He, N. Gibbons, S. Dirar, C. R. Middleton, et M. Z.E.B. Elshafie, « Robust fibre optic sensor arrays for monitoring early-age performance of mass-produced concrete sleepers », *Struct. Heal. Monit.*, vol. 17, n° 3, p. 635-653, 2018.
- [172] G. Rodríguez, J. R. Casas, et S. Villaba, « Cracking assessment in concrete structures by

- distributed optical fiber », *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, n° 3, p. 35005, 2015.
- [173] X. W. Ye, Y. H. Su, et J. P. Han, « Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: A comprehensive review », *Sci. World J.*, p. 652329, 2014.
- [174] M. Imai, R. Nakano, T. Kono, T. Ichinomiya, S. Miura, et M. Mure, « Crack Detection Application for Fiber Reinforced Concrete Using BOCDA-Based Optical Fiber Strain Sensor », *J. Struct. Eng.*, vol. 136, n° 8, p. 1001-1008, 2010.
- [175] S. Villalba et J. R. Casas, « Application of optical fiber distributed sensing to health monitoring of concrete structures », *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 39, n° 1-2, p. 441-451, 2013.
- [176] M. Quiertant, F. Baby, A. Khadour, P. Marchand, P. Rivillon, F. Toutlemonde, A. Simon, J. Cordier, J. Billon, R. Lapeyrer, et J. C. Renaud, « Deformation monitoring of reinforcement bars with a distributed fiber optic sensor for the SHM of reinforced concrete structure », in *9th Int. Conf. on NDE in Relation to Structural Integrity for Nuclear and Pressurized Components Seattle, Washington, USA*, 2012.
- [177] A. Rolland, P. Argoul, K. Benzarti, M. Quiertant, S. Chataigner, et A. Khadour, « Analytical and numerical modeling of the bond behavior between FRP reinforcing bars and concrete », *Constr. Build. Mater.*, vol. 231, p. 117160, 2020.
- [178] J. M. Hénault, J. Salin, G. Moreau, M. Quiertant, F. Taillade, K. Benzarti, et S. Delepine-Lesoille, « Analysis of the strain transfer mechanism between a truly distributed optical fiber sensor and the surrounding medium », in *the 3rd International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR 2012*, 2012, n° September, p. 733-739.
- [179] S. Her et C. Huang, « Thermal Strain Analysis of Optic Fiber Sensors », *Sensors*, vol. 13, p. 1846-1855, 2013.
- [180] B. Glisic et D. Inaudi, « Development of method for in-service crack detection based on distributed fiber optic sensors », *Struct. Heal. Monit.*, vol. 11, n° 2, p. 161-171, 2011.
- [181] S. C. Her et C. Y. Huang, « Effect of coating on the strain transfer of optical fiber sensors », *Sensors*, vol. 11, n° 7, p. 6926-6941, 2011.
- [182] A. Barrias, J. R. Casas, et S. Villalba, « Distributed optical fibre sensors in concrete structures: Performance of bonding adhesives and influence of spatial resolution », *Struct. Control Heal. Monit.*, vol. 26, n° 3, p. 1-16, 2019.
- [183] A. Billon, J. M. Hénault, M. Quiertant, F. Taillade, A. Khadour, R. P. Martin, et K. Benzarti, « Qualification of a distributed optical fiber sensor bonded to the surface of a concrete structure: A methodology to obtain quantitative strain measurements », *Smart Mater. Struct.*, vol. 24, n° 11, p. 115001, 2015.
- [184] AFNOR, « NF EN 14651 Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit or proportionality (LOP), residual) ». 2007.

- [185] M. Imai et M. Feng, « Sensing optical fiber installation study for crack identification using a stimulated Brillouin-based strain sensor », *Struct. Heal. Monit.*, vol. 11, n° 5, p. 501-509, 2012.
- [186] G. Duck et M. LeBlanc, « Arbitrary strain transfer from a host to an embedded fiber-optic sensor », *Smart Mater. Struct.*, vol. 9, n° 4, p. 492-497, 2000.
- [187] V. Gârlescu, « Caractérisation Statique et Dynamique des Polymères Electroactifs Diélectriques pour Applications Mécanique », Thèse de l'Université Technique "GHEORGHE ASACHI" DE IAȘI, 2013.
- [188] R. Nouri, A. Bahlaoui, M. Sammouda, et S. Belhouideg, « Comportement Mecanique D'Un Composite Verre Epoxy Utilises Dans Les Pales Eoliennes : Comparaison De Modeles Theoriques », *13ème Congrès de Mécanique*, vol. 2017, p. 13-15, 2017.

VI. Annexes

VI.1. Annexe A : Longueurs d'ancrage des deux câbles à FO noyés dans le béton

VI.1.1. Objectif de l'essai

L'objectif principal de cet essai est d'estimer la longueur d'ancrage pour les deux câbles à FO noyés dans le béton. Les notions des longueurs d'ancrage sont souvent utilisées dans le contexte du BA pour déterminer une longueur suffisante pour ancrer une armature dans le béton de manière qu'elle puisse travailler en traction à sa limite élastique. Dans notre cas d'étude, lorsqu'un câble à FO noyé dans une éprouvette de béton sur une longueur suffisamment importante est sous effort d'arrachement, l'interrogation d'une FO de ce câble fait apparaître une longueur minimale au niveau de l'interface câble/béton où la déformation diminue de sa valeur maximale à la sortie de l'ancrage jusqu'à devenir nulle à un endroit dans la zone de contact câble/béton.

Afin de fournir une première estimation de cette longueur pour les deux câbles à FO et proposer une longueur de contact câble/béton optimale pour l'ensemble des échantillons destinés aux essais de durabilité (voir le chapitre II), 6 cylindres \varnothing 11 - 22 cm en béton avec câbles noyés (3 cylindres avec câble Neubrex noyé : Neubrex 1, Neubrex 2 et Neubrex 3 et 3 cylindres avec câble AFL noyé : AFL 1, AFL 2 et AFL 3) ont été préparés. Les sorties des câbles à FO ont été protégées avec la gaine en PVC avant le coulage du béton à l'exception d'une longueur de 18,5 cm gardée en contact direct avec le béton (voir le schéma de la Figure VI-1).

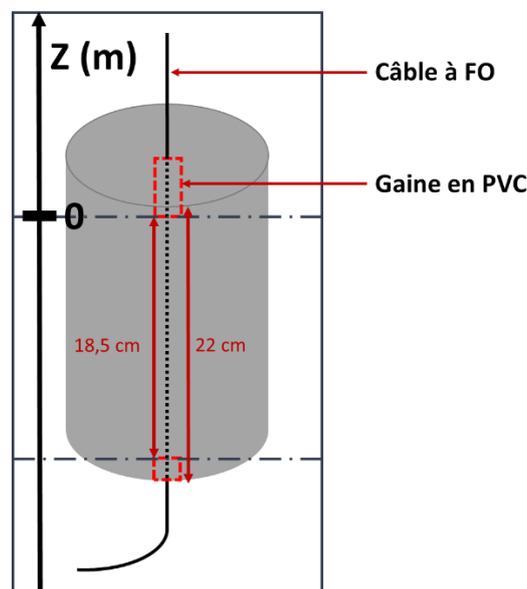


Figure VI-1 : Schéma d'un cylindre de béton avec câble à FO noyé (longueur de contact câble/béton de 18,5 cm).

VI.1.2. Déroulement et résultats de l'essai

A l'aide de la même machine d'essai Instron 5969 équipée de l'AVE, deux incréments de charge d'arrachement (15 N et 30 N) sont appliqués aux 6 cylindres de béton avec câbles noyés. Lors des paliers, le déplacement de la traverse de la presse est bloqué et une FO du câble est

interrogée en utilisant l'OBR afin d'obtenir un profil de déformation sur toute la longueur du câble avec une résolution spatiale de l'interrogation fixée à 1 cm.

Les résultats de l'essai sont présentés dans les graphes de la Figure VI-2. Chaque graphe présente les profils des déformations au long d'une FO d'un câble noyé dans un cylindre de béton aux deux incréments de charge : 15 N et 30 N.

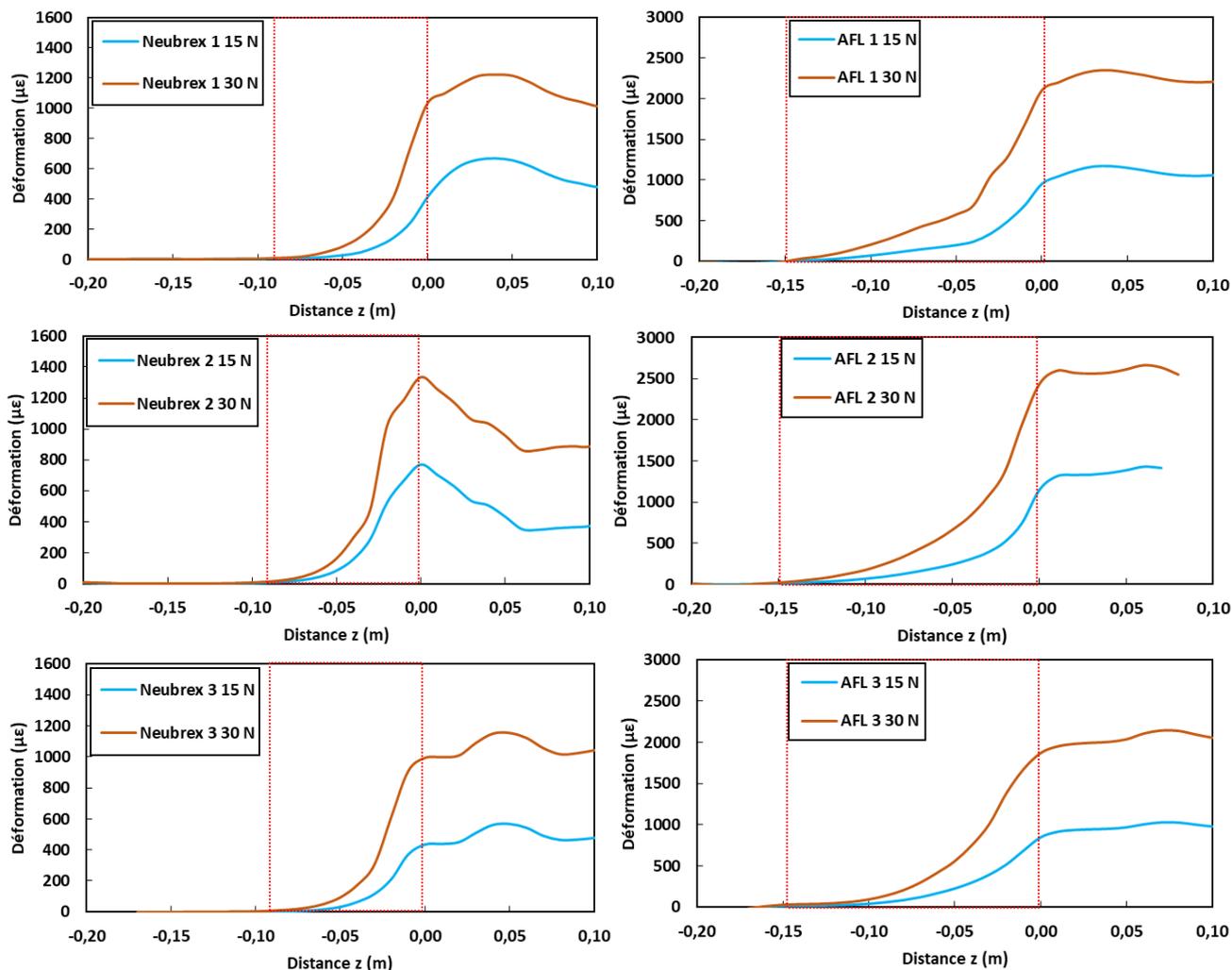


Figure VI-2 : Profils de la déformation enregistrés lors des essais d'arrachement réalisés sur les cylindres de béton avec les câbles Neubrex et AFL noyés (longueur de contact 18,5 cm). Les profils sont donnés pour deux niveaux de charge (15 N et 30 N).

A partir de la Figure VI-2, on peut conclure que le câble Neubrex est plus rigide que le câble AFL. En effet, pour la même valeur de charge appliquée et dans la zone où le câble est en traction pure (la zone des abscisses positives), le câble AFL a enregistré des valeurs de déformation plus importantes.

En ce qui concerne la longueur d'ancrage, que ce soit en comparant les profils obtenus par les deux câbles pour une même valeur de charge appliquée ou pour une même déformation de traction dans la zone des abscisses positives (déformation de traction du câble Neubrex à 15 N avec la déformation de traction du câble AFL à 30 N), la longueur d'ancrage du câble Neubrex est inférieure à celle du câble AFL. Cette longueur est comprise entre 7 cm et 10 cm pour le câble Neubrex noyé dans le béton tandis que celle du câble AFL noyé dans le béton est située entre 12 et 15 cm.

VI.2. Annexe B : Essais préliminaires pour la détermination d'une longueur de contact câble/béton

VI.2.1. Objectif des essais

Avant vieillissement, puis ensuite à plusieurs échéances de vieillissement, l'interface câble/béton est caractérisée par essais d'arrachement, pour le cas d'un câble noyé dans le béton comme pour celui du câble collé en surface (chapitre II). L'objectif de ces essais d'arrachement est de suivre les modifications du comportement mécanique de l'interface câble/béton et non l'évolution de la résistance en traction du câble sous l'effet des vieillissements. Il est donc nécessaire de munir les éprouvettes d'une longueur de contact câble/béton adéquate, qui favorise une rupture au niveau de l'interface câble/béton lors des essais d'arrachement plutôt qu'une rupture du câble en traction. Cette longueur de contact (longueur d'encastrement pour les cylindres et longueur de collage pour les prismes) ne peut donc être très grande, de manière à éviter une « accroche » trop importante du câble avec le béton, qui risquerait de conduire à une rupture précoce du câble par traction en fin d'essai. De même, afin d'éviter une rupture d'interface trop brusque qui ne permettrait pas d'observer efficacement les différents comportements (linéaire, non linéaire, puis décollement) de cette interface avant glissement du câble, cette longueur de contact ne doit pas être trop petite non plus. Des essais préliminaires ont donc été réalisés (pour les deux situations : câble noyé et câble collé), afin d'optimiser le choix de cette longueur de contact avant de fabriquer l'ensemble des éprouvettes.

VI.2.2. Cas du câble Neubrex noyé

Afin de déterminer la longueur optimale de contact entre le câble et le béton pour le cas des câbles à FO noyées dans les cylindres en béton, trois longueurs de contact ont été testées pour le câble Neubrex. Ces trois longueurs sont : 4,5 cm, 7 cm et 11 cm. Une éprouvette est testée pour chacune de ces longueurs.

La liaison câble/béton est testée lors d'essais d'arrachement. Les résultats de ces essais sont présentés sur le graphe de la Figure VI-3 qui décrit les évolutions de la charge appliquée en fonction du déplacement différentiel, pour les trois longueurs de contact testées.

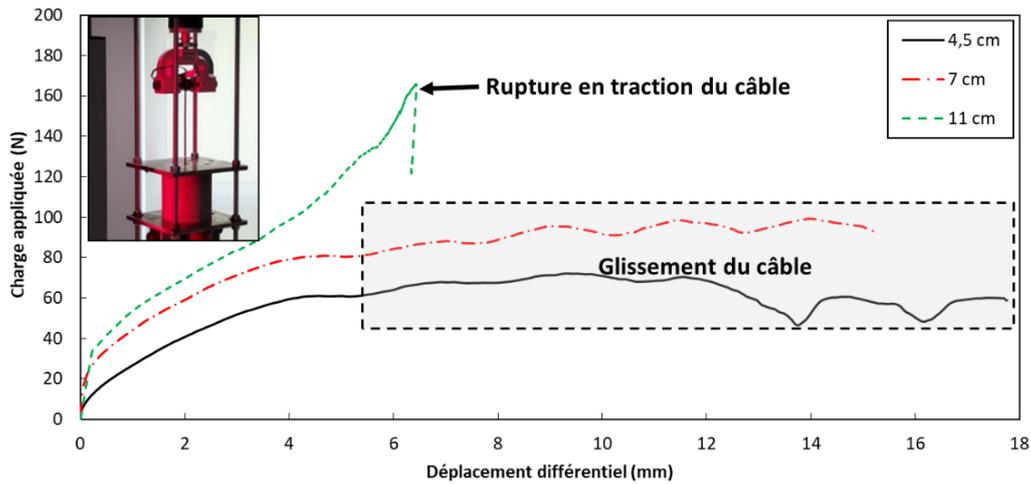


Figure VI-3 : Courbes charge appliquée/déplacement différentiel correspondant aux trois essais d'arrachement avec trois longueurs de contact différentes.

A partir des résultats de la Figure VI-3, il semble possible de conclure que pour une longueur de contact inférieure ou égale à 7 cm, l'essai d'arrachement s'achève par un glissement du câble pour des valeurs de charge ne dépassant pas les 90 N environ. Comme attendu, la charge de rupture associée à la longueur de contact de 7 cm est supérieure à celle obtenue pour la longueur de 4,5 cm. Pour une longueur de contact égale à 11 cm, le câble se casse en traction avant de glisser. Par conséquent une longueur comprise entre 7 cm et 11 cm semble adéquate pour étudier la liaison entre le câble et le béton. Partant de ce constat, les éprouvettes équipées de câbles Neubrex noyés et destinées aux essais d'arrachement ont donc ensuite été fabriquées avec une longueur de contact de 9 cm.

Une comparaison des longueurs d'ancrage des deux câbles à FO a été également réalisée et les résultats sont présentés dans l'Annexe VI.1.

VI.2.3. Cas du câble AFL noyé

Un exemple de résultat d'essai d'arrachement câble/béton effectué avec une éprouvette équipée de la version précédente du câble AFL (AFL DNS-0470) est présenté sur la Figure VI-4. Durant cet essai réalisé dans le cadre de la thèse de J. M. Hénault [14], le câble est interrogé avec un OBR à différentes étapes du chargement. Les résultats présentés sont ceux des profils de déformation du câble normalisés par la charge (i.e. déformation/charge). Les deux niveaux de charges mentionnés dans la légende du graphe pour chaque profil correspondent au niveau de charge de l'interrogation et la charge de départ (i.e. : niveau de charge du palier précédent). Différentes portions du câble sont considérées pour l'analyse de ces profils :

L1 : longueur en dessus de la partie du câble serrée dans le mors ;

L2 : longueur du câble serrée par le mors ;

L3 : longueur du câble entre la marque supérieure et la portion *L2* ;

L4 : longueur du câble entre la marque supérieure (sur le câble) et la portion *L5* ;

$L5$: Longueur du câble entre la portion $L4$ et la marque inférieure (sur l'éprouvette) en contact avec le béton ;

$L6$: Longueur du câble entre les portions $L5$ et $L7$ en contact avec le béton. La somme $L5 + L6$ est la longueur totale de contact béton/câble est vaut 14 cm ;

$L7$: Longueur du câble sortant de l'éprouvette.

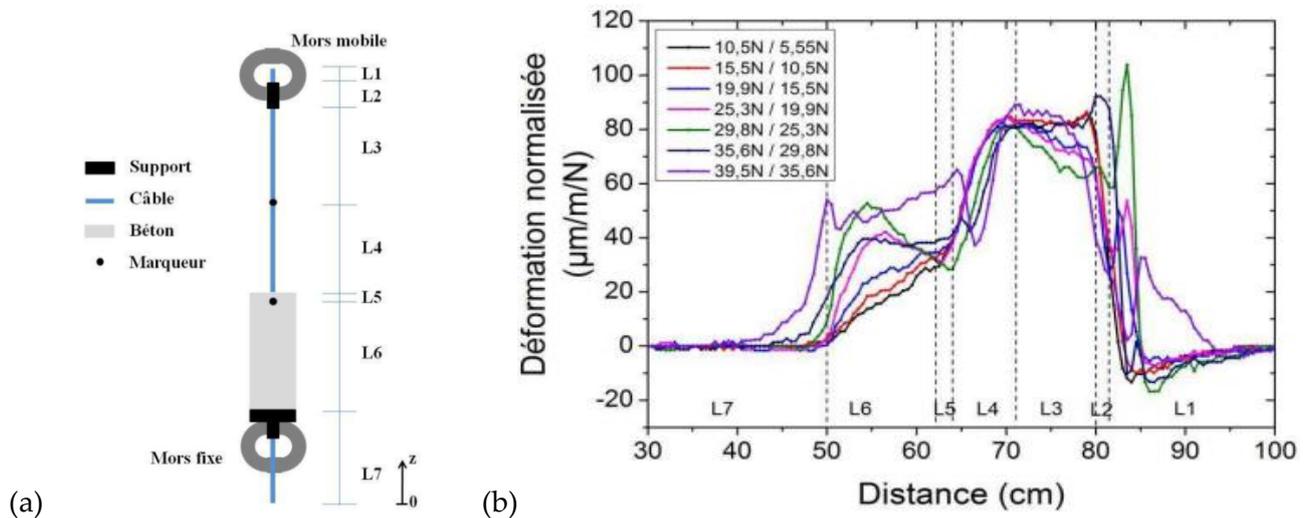


Figure VI-4 : (a) Schéma de l'essai d'arrachement câble AFL noyé/béton ; (b) Profils de déformation obtenus par interrogation du câble durant l'essai à différentes valeurs de charge appliquée [14].

Dans [14], J. M. Hénault a rapporté que les FOs contenues dans le câble AFL (modèle DNS-0470) se comportent de manière linéaire durant l'intégralité du chargement en traction et se cassent brusquement à 38 N environ [14]. Durant les essais d'arrachement identiques à ceux ayant produit les résultats de la Figure VI-4, ce même auteur a observé à l'aide de la caméra AVE un comportement quasi-linéaire de l'évolution de l'effort en fonction du déplacement relatif des marqueurs jusqu'à une valeur de charge de l'ordre de 35 N - 40 N. Pour des valeurs de charge supérieures à 40 N la pente de la courbe représentative de cette évolution n'était plus linéaire [14]. L'auteur indique que cette non-linéarité peut être due à l'endommagement de l'interface câble/béton comme elle peut être due à l'endommagement du câble en traction.

Toutefois, les résultats présentés sur la Figure VI-4-b, montrent que dès le début du chargement, toute la longueur de contact ($L6 + L5 = 14 \text{ cm}$) travaille (i.e. les déformations ne sont pas nulles) et qu'à partir d'une charge appliquée approximativement égale à 20 N (profil 25,3 N/19,9 N), le comportement de l'interface n'est plus linéaire (i.e. les profils normalisés ne sont plus identiques). Cela signifie que, même si le câble se rompt en traction avant qu'il ne soit possible de détecter de manière claire avec l'AVE le début du glissement, dès 20 N survient un endommagement de l'interface qui indique l'initiation d'un futur glissement. Par conséquent, une longueur de contact légèrement inférieure à 14 cm choisie pour les essais de J. M. Hénault semble adéquate pour générer le comportement d'interface souhaité.

Afin de pouvoir comparer le comportement de l'interface câble noyé/béton pour les deux types de câbles, même si ce n'est pas le principal objectif de cette étude, une longueur de contact câble/béton identique de 9 cm a finalement été sélectionnée.

VI.2.4. Cas des câbles collés

Concernant les câbles collés en surface du béton, plusieurs longueurs de contact ont été testées pour chacun des deux câbles. Ces essais ont aussi été l'occasion de comparer deux protocoles de collage. Pour mener ces expérimentations, tous les câbles ont été collés à la surface de deux éprouvettes cylindriques $\varnothing 11 - 22$ cm munies de nombreuses engravures parallèles à l'axe du cylindre (chaque engravure suit donc une génératrice du cylindre). Les longueurs des engravures réalisées sont de 2 cm, 4 cm, 6 cm, 8 cm, 10 cm, 12 cm et 14 cm (Figure VI-5-a). Les protocoles de collage sont les suivants :

- Protocole I : insertion du câble dans l'engravure et application de l'adhésif X120 par-dessus, en couche suffisamment généreuse pour qu'elle pénètre sur les côtés ;
- Protocole II : application d'une première couche d'adhésif dans l'engravure, insertion du câble dans cette première couche puis application d'une deuxième couche (dite couche de fermeture) suffisamment épaisse pour recouvrir complètement le câble et remplir en excès l'engravure (voir la Figure VI-5-c).

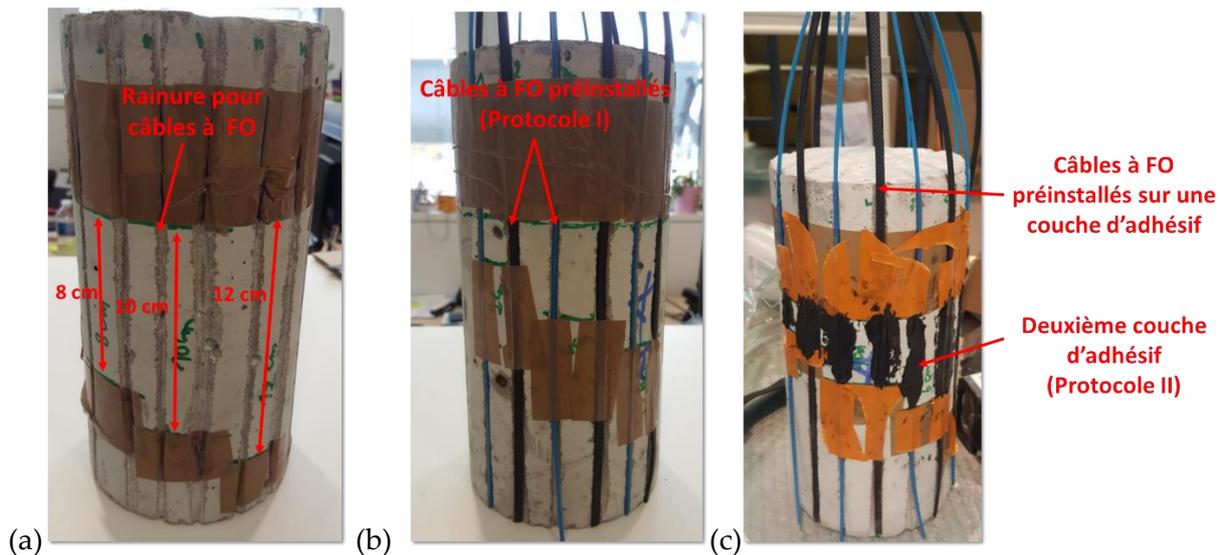


Figure VI-5 : (a) Epreuve engravée ; (b) Epreuve avec câbles préinstallés avant l'application de l'adhésif (suivant le protocole I) ; (c) Epreuve avec câbles préinstallés sur une première couche d'adhésif et une deuxième couche appliquée (suivant le protocole II).

Les essais d'arrachement (Figure VI-6) sont arrêtés une fois que la charge se stabilise ou bien varie très lentement. Toutefois, le mors est déplacé manuellement après chaque essai pour s'assurer que le câble n'est plus adhérent (et était donc bien en train de glisser en fin d'essai), ou constater la rupture du câble au niveau du mors, ou bien dans la partie collée sur le béton.

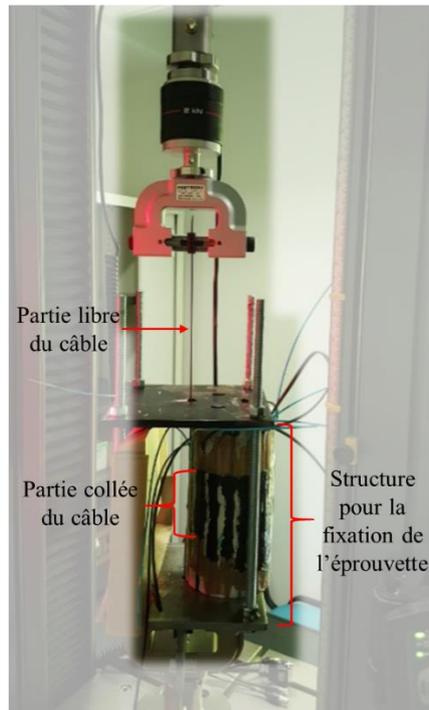


Figure VI-6 : Essai d'arrachement d'un câble collé en surface d'un cylindre de béton.

Les résultats des essais d'arrachement sont présentés dans les deux graphes de la Figure VI-7 (Figure VI-7-a pour le câble Neubrex et Figure VI-7-b pour le câble AFL). Sur ces graphes, les valeurs en ordonnées correspondent, pour chaque essai, à la valeur approximative de la charge d'initiation d'un mécanisme de rupture : soit le glissement du câble dans l'engravure soit l'apparition d'une déformation plastique de l'enrobage du câble. Pour chaque câble et chaque protocole de collage, les zones marquées par un fond rouge (collage suivant le protocole I) ou gris (protocole II) correspondent aux longueurs de contact où il n'a pas été possible d'identifier clairement le mode de rupture (glissement ou plastification de la partie libre du câble). A droite de ces zones d'incertitude (donc pour des longueurs de contact plus grandes), le câble se casse en traction. En revanche, à gauche de ces zones d'incertitude (pour des longueurs de contact plus petites), le câble glisse en fin d'essai.

Les résultats de ces essais préliminaires nous permettent de tirer différentes conclusions :

- Tout d'abord, il apparaît que le protocole de collage II permet une meilleure adhérence pour les deux câbles. En effet, les ruptures en traction du câble sont observées pour des longueurs de contact câble/béton plus petites lorsque le collage est effectué suivant ce protocole ;
- Une longueur de collage de 7 cm (soit inférieure à 8 cm, assurant ainsi un glissement du câble) et effectuée suivant le protocole II semble parfaitement adaptée à l'étude de durabilité de l'interface câble/béton envisagée pour les deux câbles.

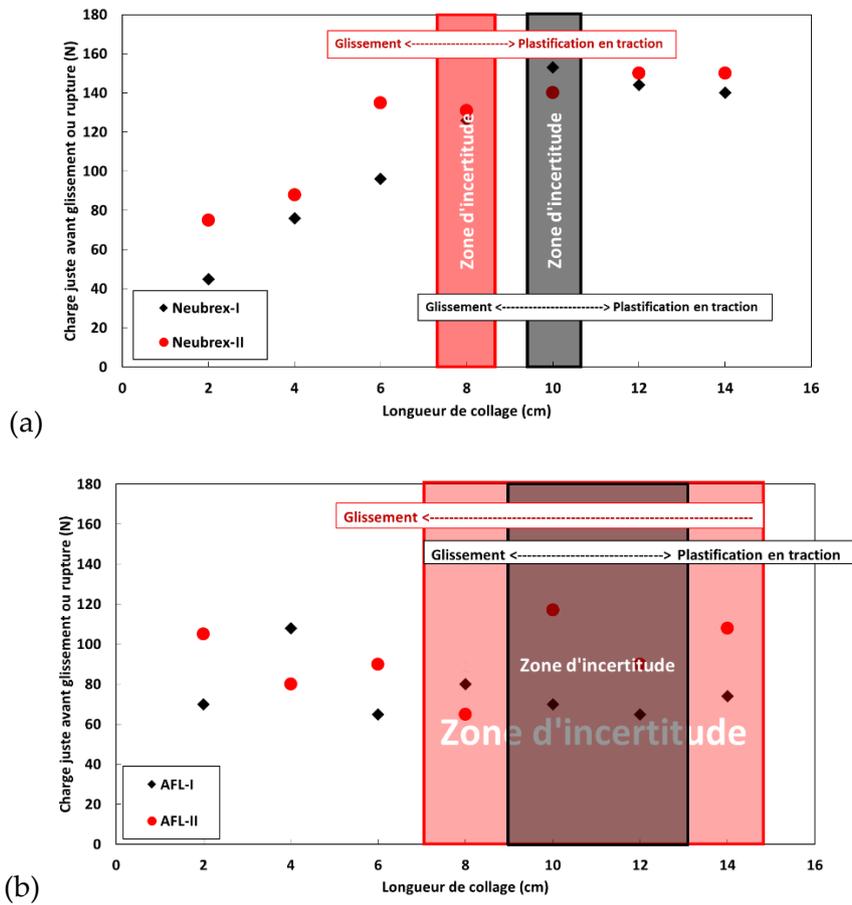


Figure VI-7 : Résultats des essais d'arrachement câble collé/béton pour différentes longueurs de collage (a) du câble Neubrex et (b) du câble AFL.

VI.3. Annexe C : Résultats expérimentaux des essais mécaniques réalisés sur les éprouvettes cylindriques de béton à différentes échéances des vieillissements

Le Tableau VI-1 et le Tableau VI-2 regroupent les résultats des essais mécaniques réalisés sur les bétons des deux formulations AA et ZA aux différentes échéances du vieillissement en solution alcaline.

Tableau VI-1 : Résultats des essais de caractérisation mécanique des bétons AA aux différentes échéances du vieillissement en solution alcaline.

AA								
Solution alcaline à 20 °C		28 jours	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Résistance à la compression Ø 11 - 22 cm (MPa)	Moyenne	63,7	79,1	80,1	81,4	85,0	84,9	83,7
	Ecart Type	0,8	6,6	4,3	4,4	2,0	1,5	0,6
Module d'Young (GPa)	Moyenne	40,8	42,1	43,7	44,5	45,4	45,0	45,2
	Ecart Type	0,2	0,9	0,2	0,5	0,2	0,2	1,2
Coefficient de Poisson	Moyenne	0,252	0,309	0,266	0,238	0,278	0,268	0,261
	Ecart Type	0,019	0,076	0,004	0,018	0,022	0,003	0,009
Solution alcaline à 40 °C		28 jours	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Résistance à la compression Ø 11 - 22 cm (MPa)	Moyenne	63,7	78,1	82,9	82,3	85,4	83,7	83,2
	Ecart Type	0,8	2,8	0,9	4,4	0,0	3,6	6,5
Module d'Young (GPa)	Moyenne	40,8	41,7	44,0	43,4	46,3	46,7	45,2
	Ecart Type	0,2	0,5	0,7	2,8	1,1	0,2	0,6
Coefficient de Poisson	Moyenne	0,252	0,255	0,265	0,279	0,281	0,279	0,265
	Ecart Type	0,019	0,011	0,005	0,021	0,006	0,010	0,005
Solution alcaline à 60 °C		28 jours	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Résistance à la compression Ø 11 - 22 cm (MPa)	Moyenne	63,7	67,9	69,5	72,6	75,8	72,0	71,8
	Ecart Type	0,8	2,1	4,7	2,5	1,2	1,1	1,1
Module d'Young (GPa)	Moyenne	40,8	41,3	43,6	43,0	44,3	43,8	43,8
	Ecart Type	0,2	0,7	0,4	1,5	1,4	0,8	1,1
Coefficient de Poisson	Moyenne	0,252	0,255	0,253	0,251	0,268	0,264	0,258
	Ecart Type	0,019	0,011	0,005	0,003	0,016	0,004	0,015

Tableau VI-2 : Résultats des essais de caractérisation mécanique des bétons ZA aux différentes échéances du vieillissement en solution alcaline.

ZA								
Solution alcaline à 20 °C		28 jours	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Résistance à la compression Ø 11 - 22 cm (MPa)	Moyenne	33,2	51,6	50,9	50,8	44,0	41,3	36,4
	Ecart Type	0,9	3,5	3,6	1,9	2,2	2,9	3,5
Module d'Young (GPa)	Moyenne	33,4	36,3	34,4	31,4	22,1	18,5	18,6
	Ecart Type	0,1	0,1	4,1	1,1	1,3	1,1	1,1
Coefficient de Poisson	Moyenne	0,217	0,235	0,236	0,214	0,174	0,163	0,124
	Ecart Type	0,045	0,021	0,004	0,020	0,009	0,021	0,052
Solution alcaline à 40 °C		28 jours	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Résistance à la compression Ø 11 - 22 cm (MPa)	Moyenne	33,2	52,7	54,3	55,0	56,3	57,0	49,3
	Ecart Type	0,9	1,9	0,9	0,5	2,0	1,7	2,6
Module d'Young (GPa)	Moyenne	33,4	36,5	37,5	35,9	37,1	37,2	36,1
	Ecart Type	0,1	0,7	0,2	1,0	0,1	0,7	0,6
Coefficient de Poisson	Moyenne	0,217	0,246	0,251	0,243	0,280	0,235	0,245
	Ecart Type	0,045	0,001	0,007	0,009	0,000	0,002	0,013
Solution alcaline à 60 °C		28 jours	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Résistance à la compression Ø 11 - 22 cm (MPa)	Moyenne	33,2	46,9	49,3	47,8	49,0	39,4	40,6
	Ecart Type	0,9	1,9	0,3	3,7	1,8	3,5	3,1
Module d'Young (GPa)	Moyenne	33,4	33,6	34,3	36,6	35,3	28,1	28,0
	Ecart Type	0,1	0,2	1,7	1,8	0,3	0,8	0,0
Coefficient de Poisson	Moyenne	0,217	0,227	0,246	0,250	0,257	0,214	0,213
	Ecart Type	0,045	0,006	0,012	0,006	0,000	0,025	0,001

VI.4. Annexe D : Profils de la déformation enregistrés au cours d'essais d'arrachement sur éprouvettes de béton comportant les câbles à FO noyés et collés

Dans le paragraphe III.3.4.1 du chapitre III, nous avons présenté quelques profils de la déformation enregistrés au cours d'essais d'arrachement sur les éprouvettes de béton comportant les câbles à FO noyés et collés. Les courbes présentées dans le chapitre III ont fait apparaître des évolutions du comportement des câbles à FO et leur adhérence dans le béton ou dans l'adhésif X120. Nous présenterons dans cette annexe l'ensemble des profils de la déformation obtenus (et non présentées dans le chapitre III).

VI.4.1. Caractérisation avant vieillissement (T0)

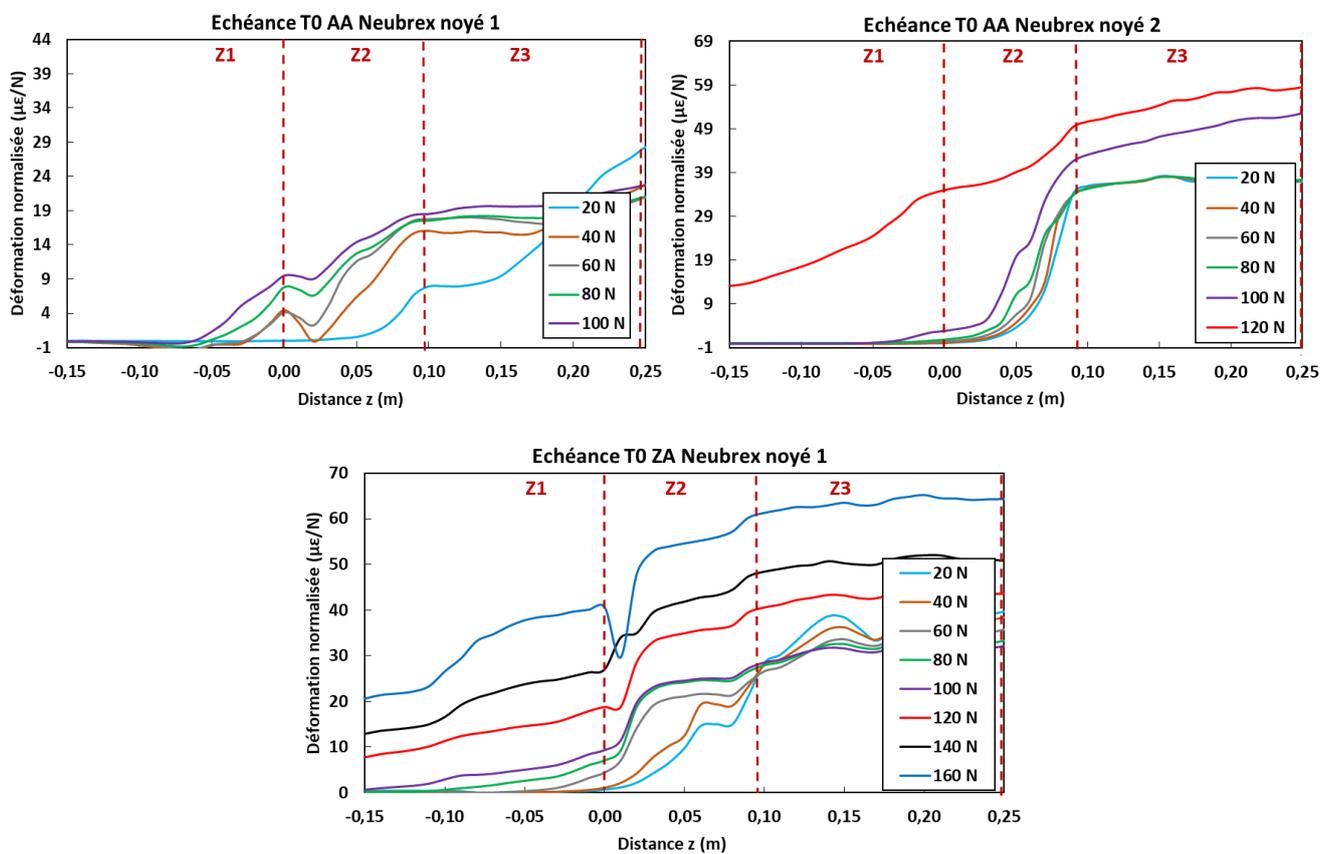


Figure VI-8 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans les cylindres de béton, avant vieillissement (T0). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

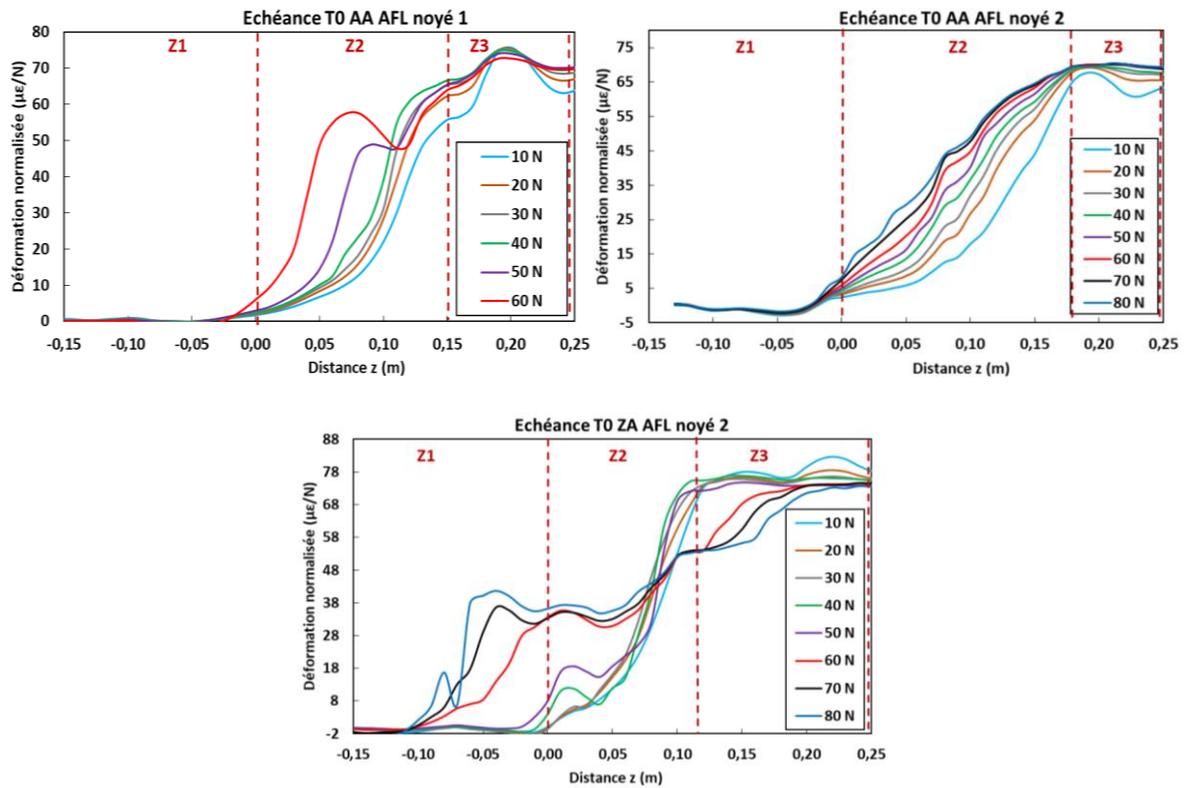


Figure VI-9 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL noyé dans les cylindres de béton, avant vieillissement (T0). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

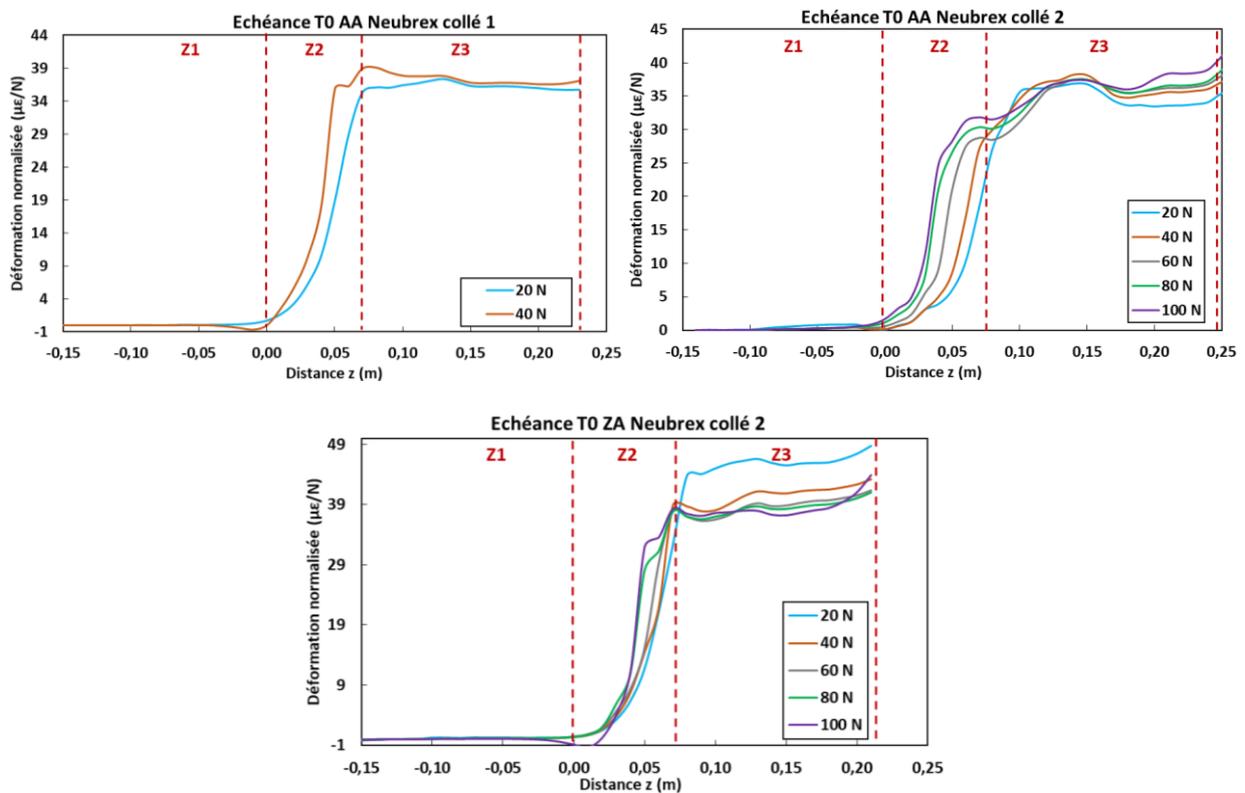


Figure VI-10 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement des prismes en béton, avant vieillissement (T0). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

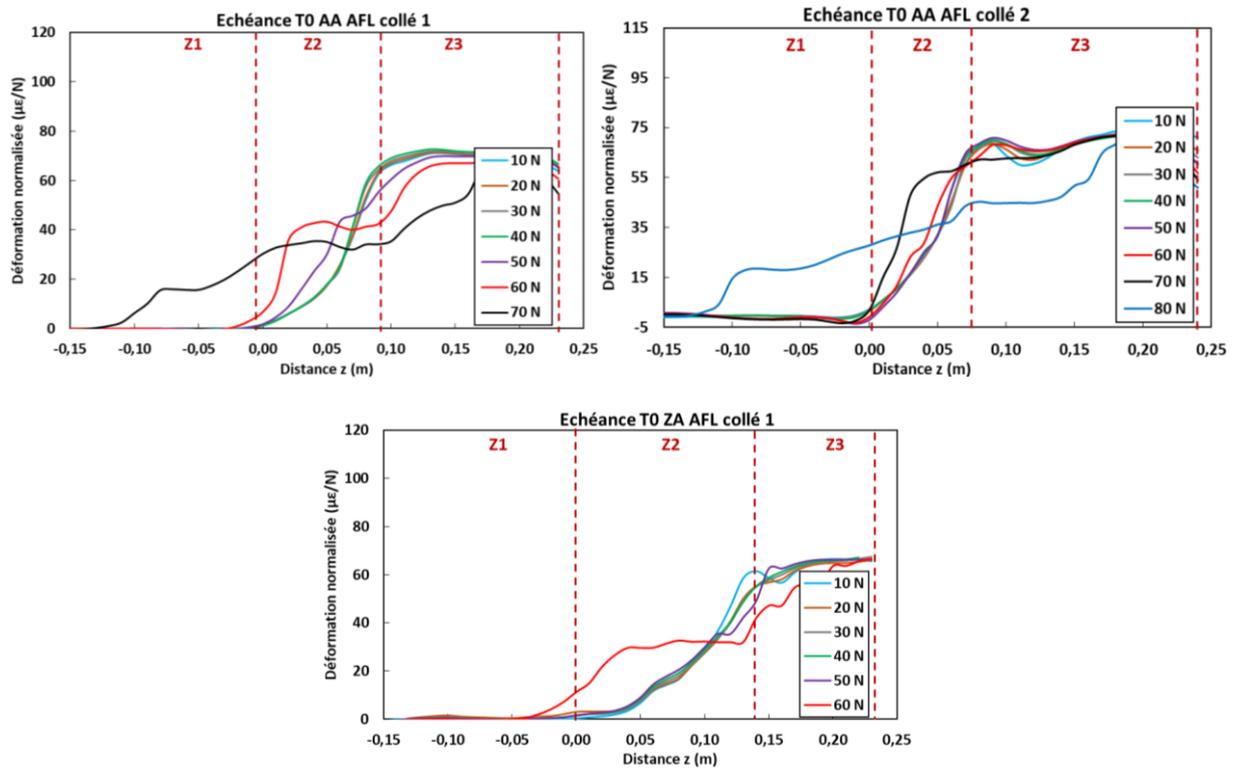


Figure VI-11 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement des prismes en béton, avant vieillissement (T0). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

VI.4.2. Caractérisation après 3 mois de vieillissement accéléré

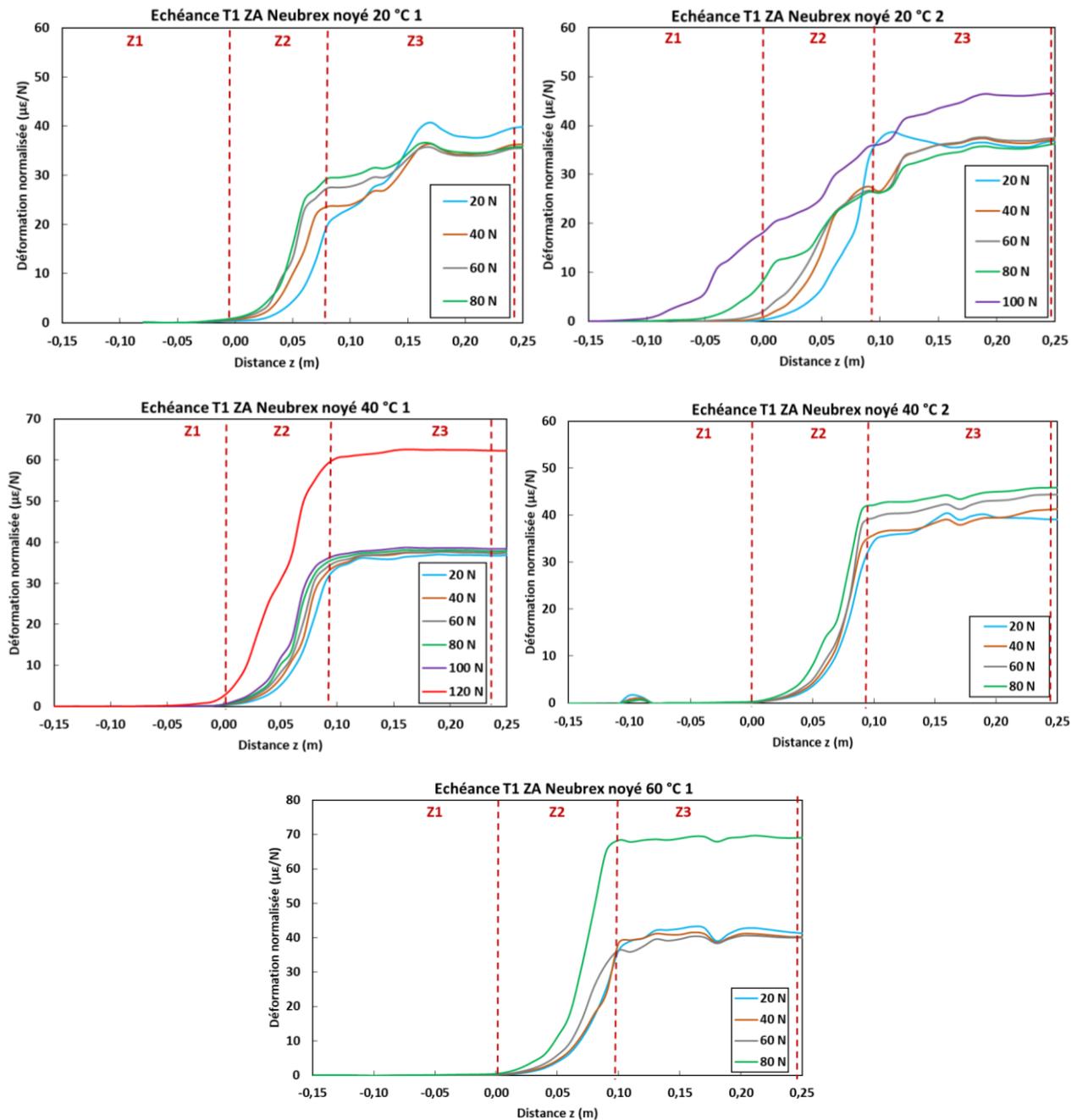


Figure VI-12 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans les cylindres ZA après 3 mois de vieillissement (T1). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

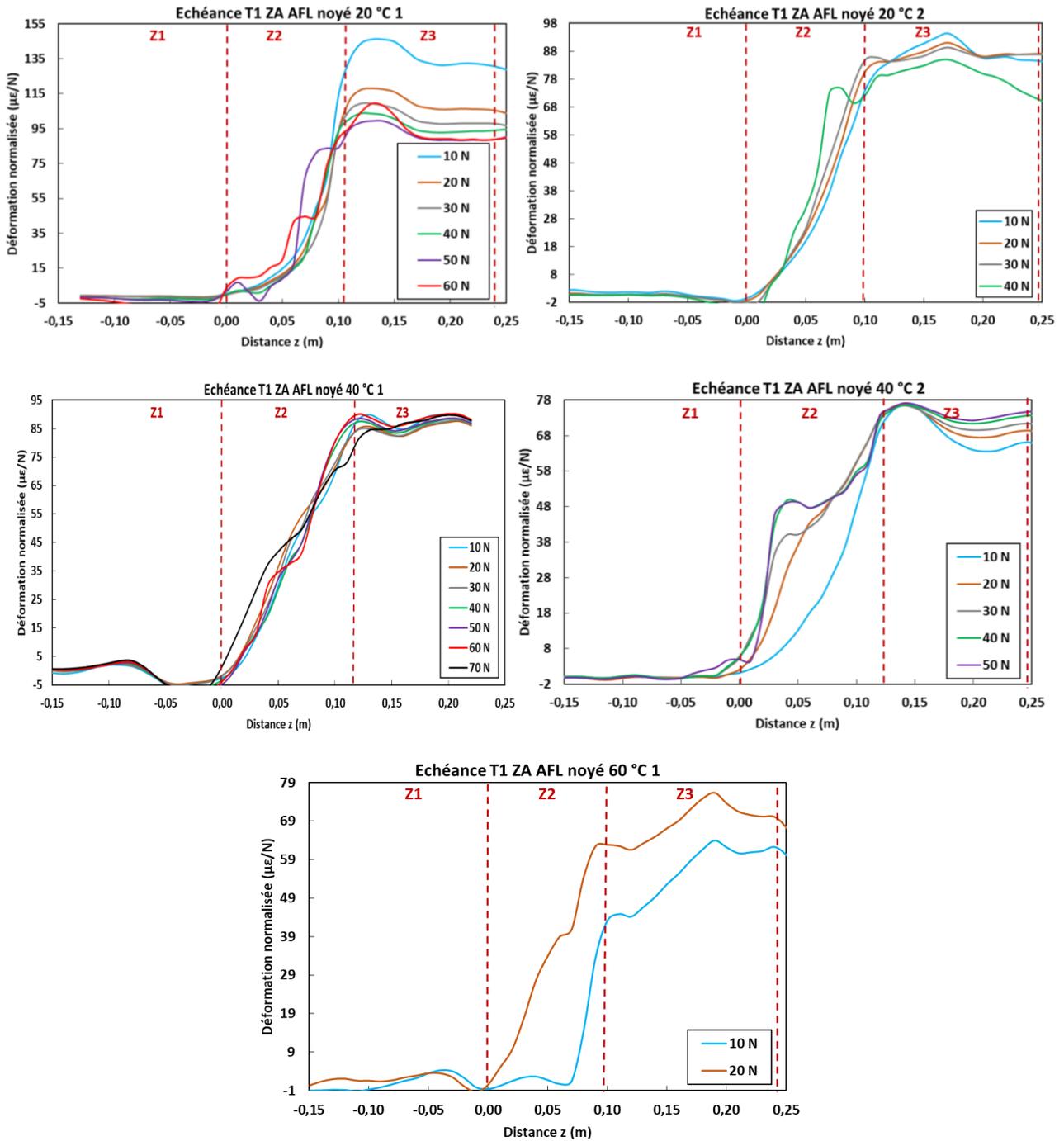


Figure VI-13: Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL noyé dans les cylindres ZA après 3 mois de vieillissement (T1). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

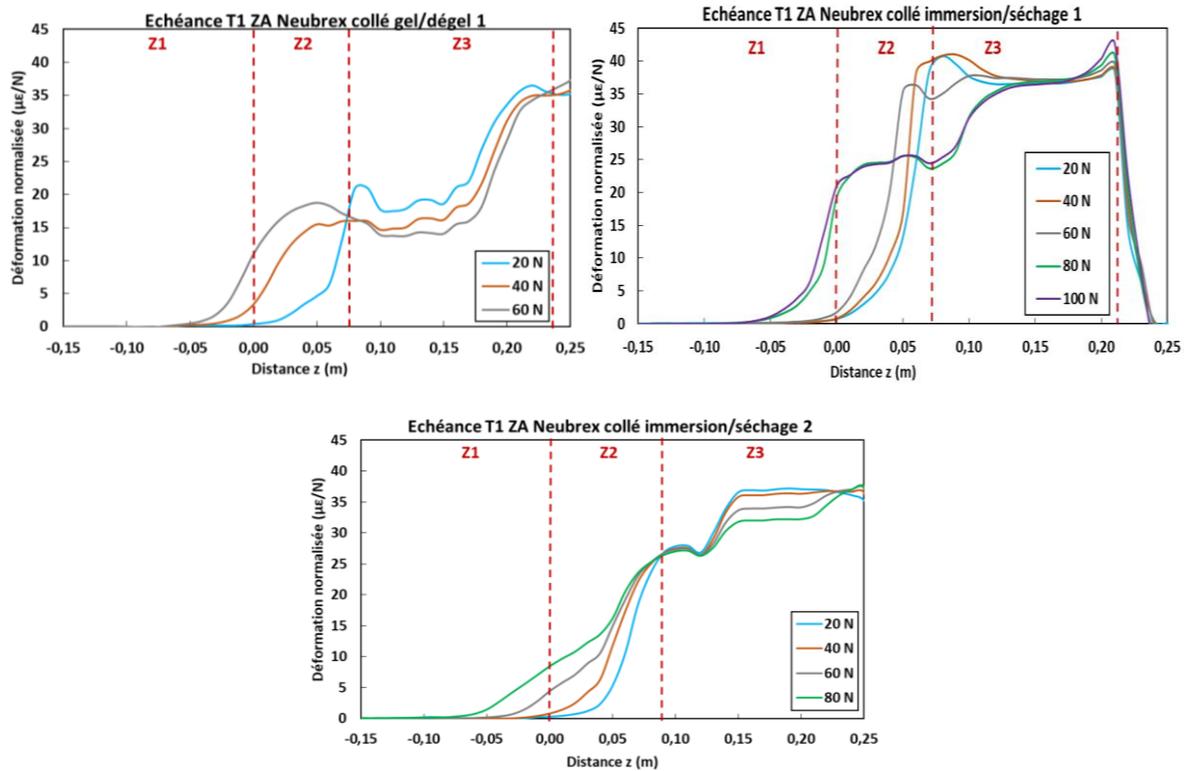


Figure VI-14 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement des prismes ZA, après 3 mois de vieillissement (T1). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

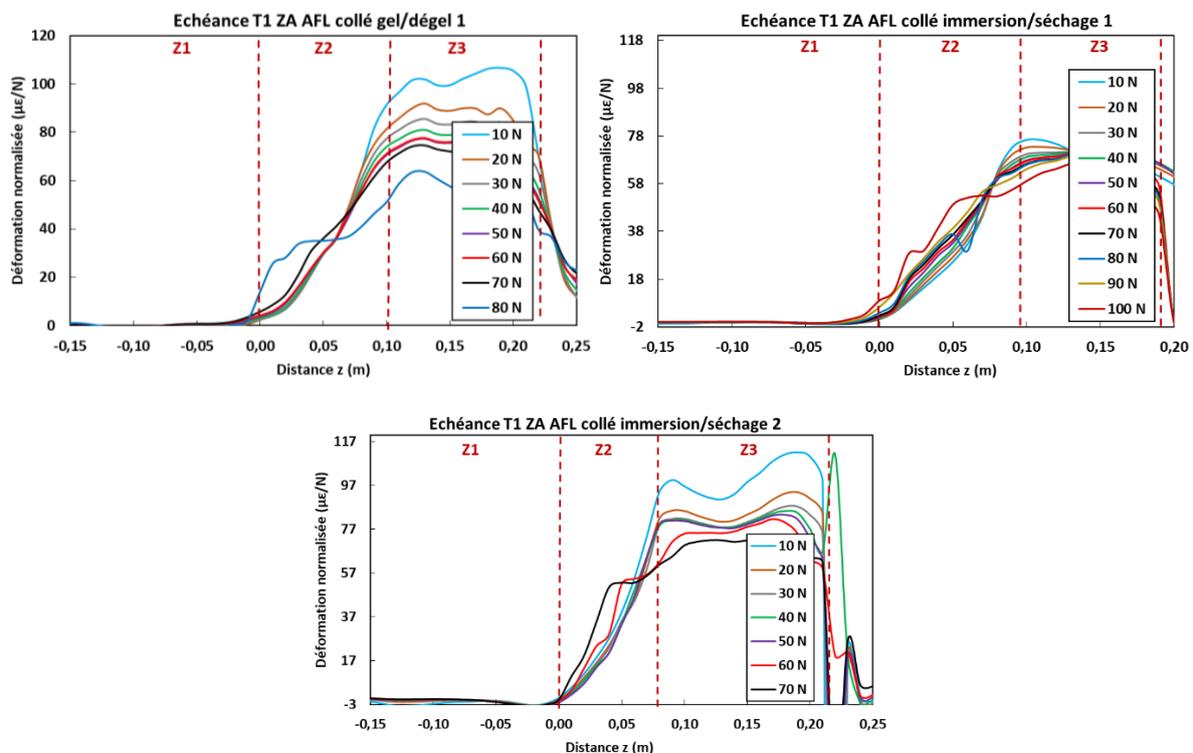


Figure VI-15 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement des prismes ZA, après 3 mois de vieillissement (T1). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

VI.4.3. Caractérisation après 6 mois de vieillissement accéléré

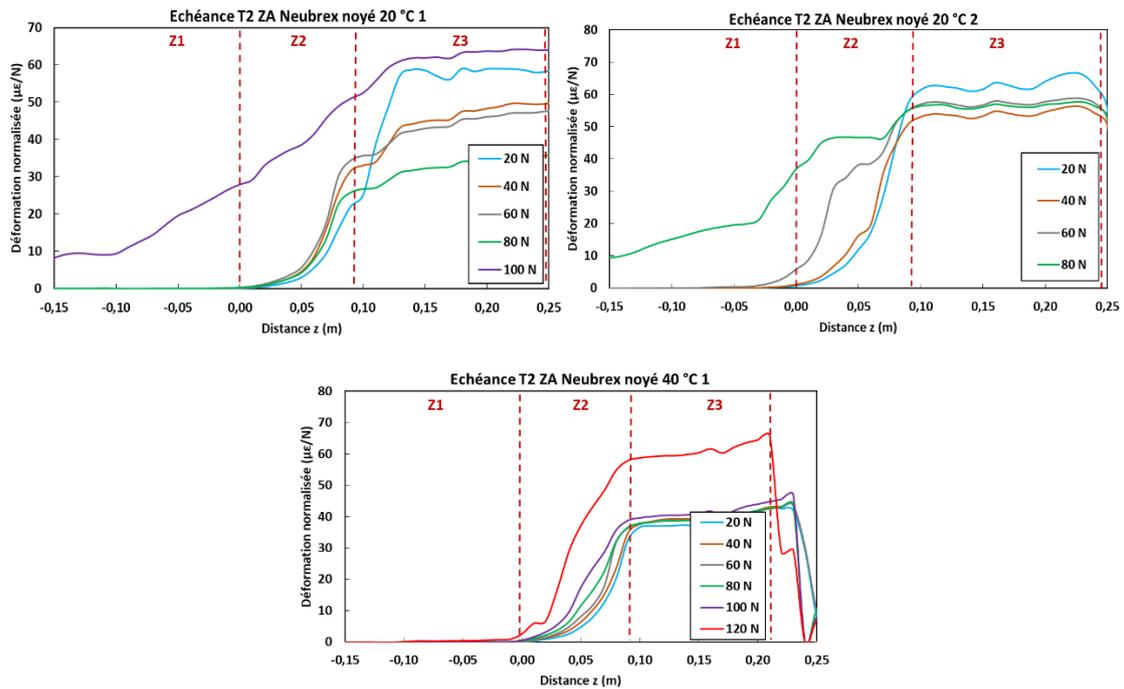


Figure VI-16 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans les cylindres ZA après 6 mois de vieillissement (T2). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

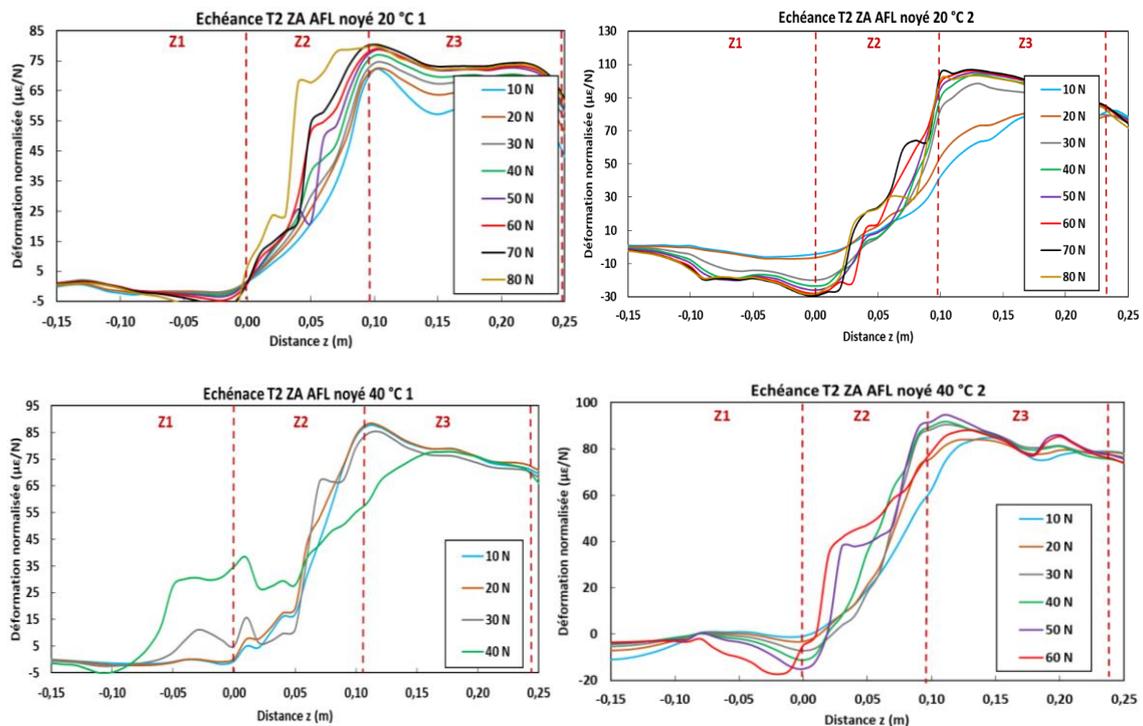


Figure VI-17 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL noyé dans les cylindres ZA après 6 mois de vieillissement (T2). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

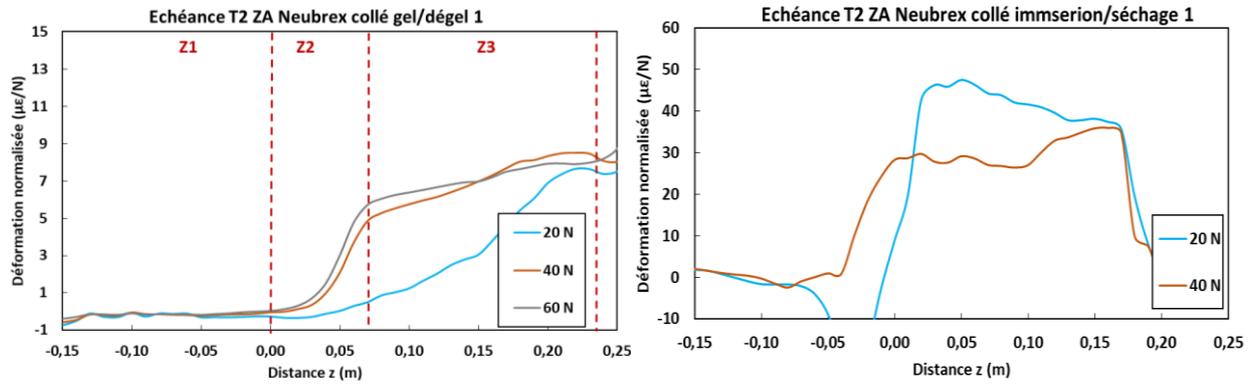


Figure VI-18 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement des prismes ZA, après 6 mois de vieillissement (T2). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

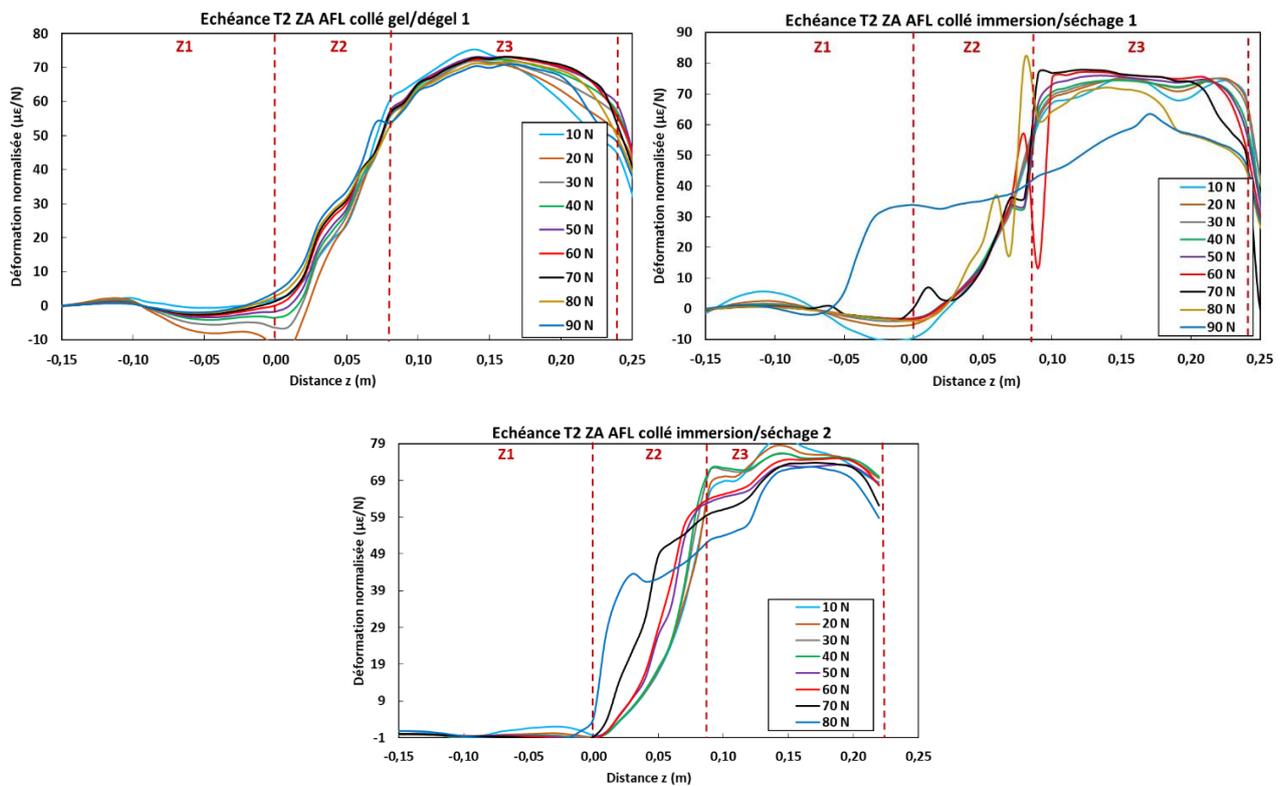


Figure VI-19: Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement des prismes ZA, après 6 mois de vieillissement (T2). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

VI.4.4. Caractérisation après 9 mois de vieillissement accéléré

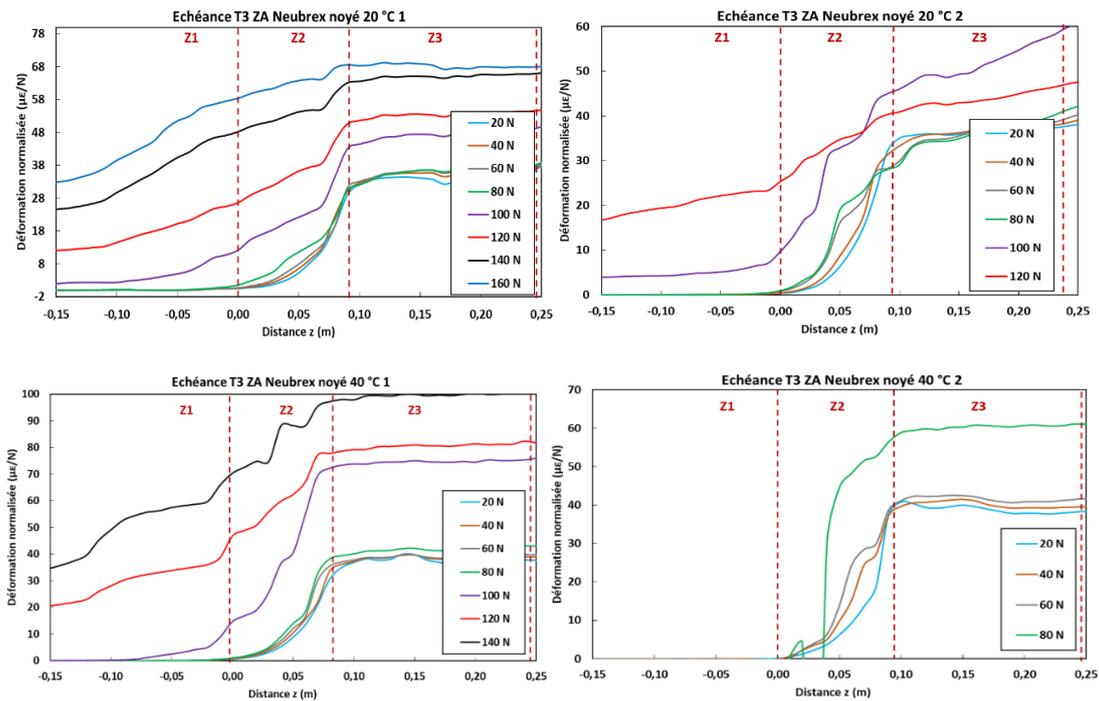


Figure VI-20 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans les cylindres ZA après 9 mois de vieillissement (T3). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

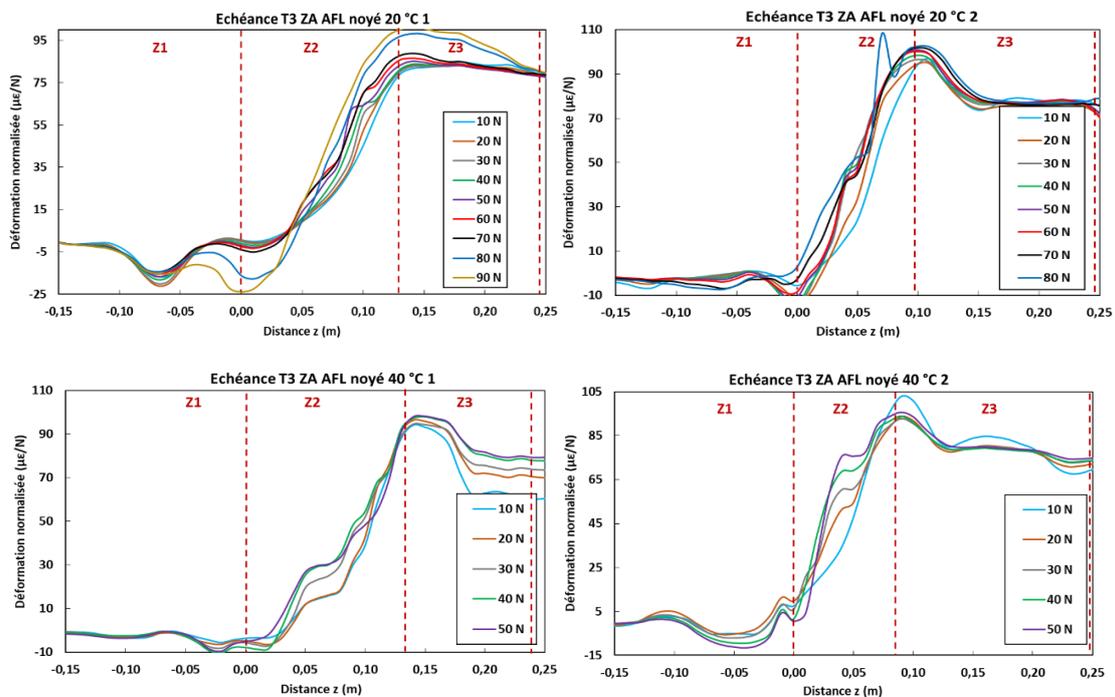


Figure VI-21 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL noyé dans les cylindres ZA après 9 mois de vieillissement (T3). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

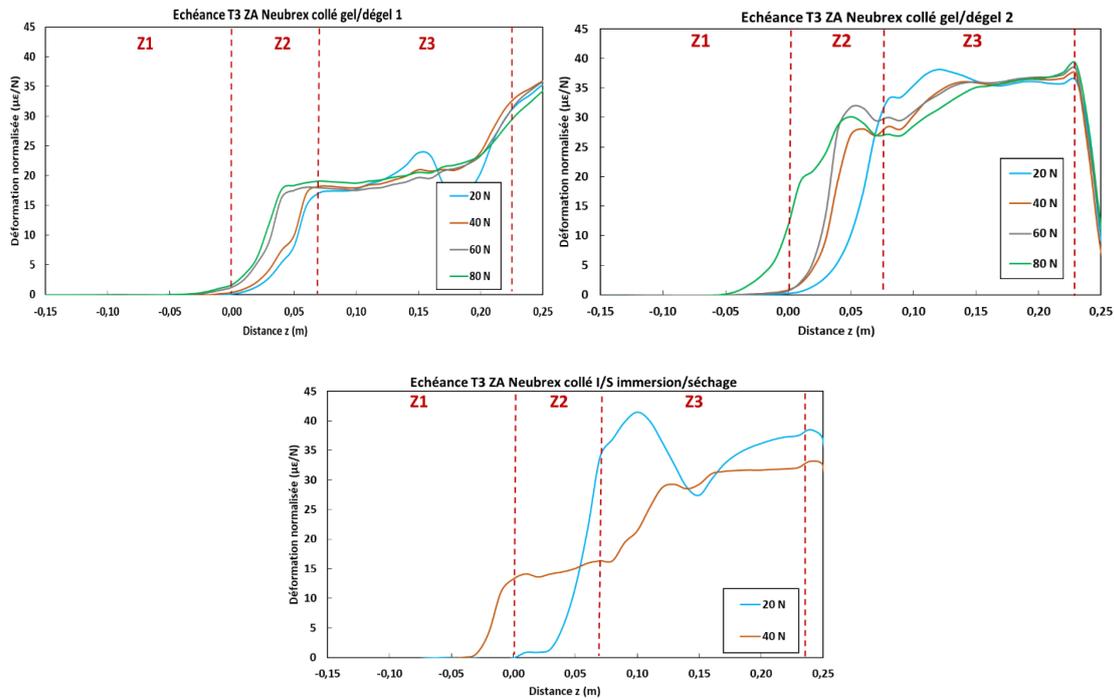


Figure VI-22: Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement des prismes ZA, après 9 mois de vieillissement (T3). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

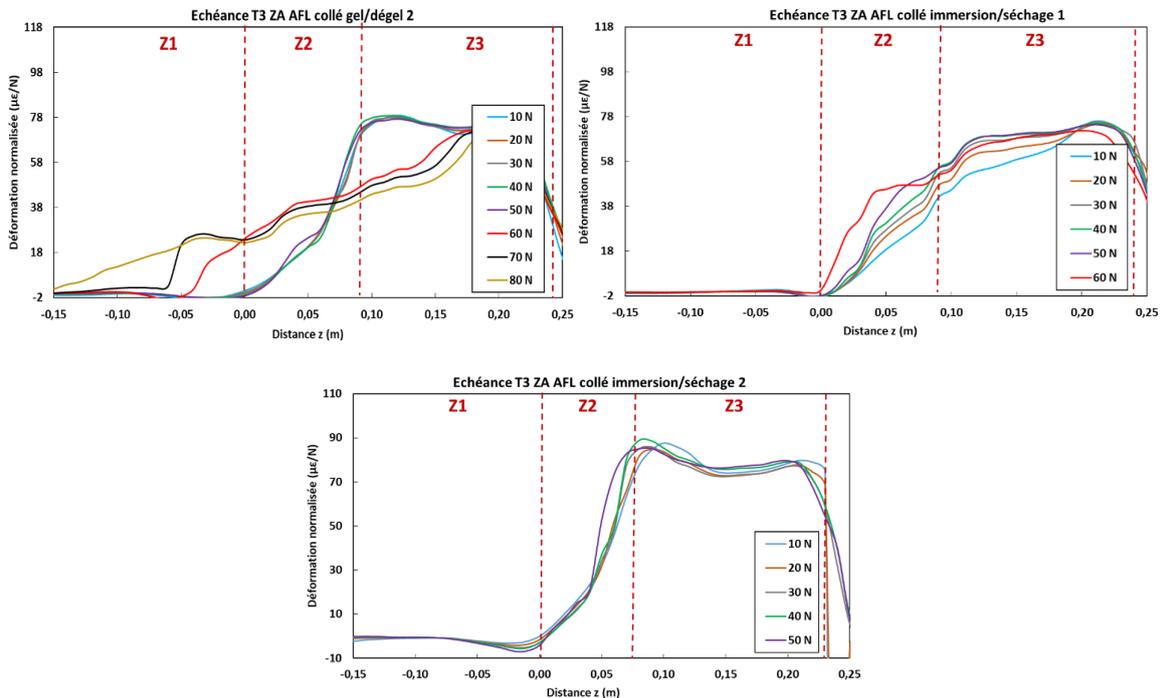


Figure VI-23 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement des prismes ZA, après 9 mois de vieillissement (T3). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

VI.4.5. Caractérisation après 12 mois de vieillissement accéléré

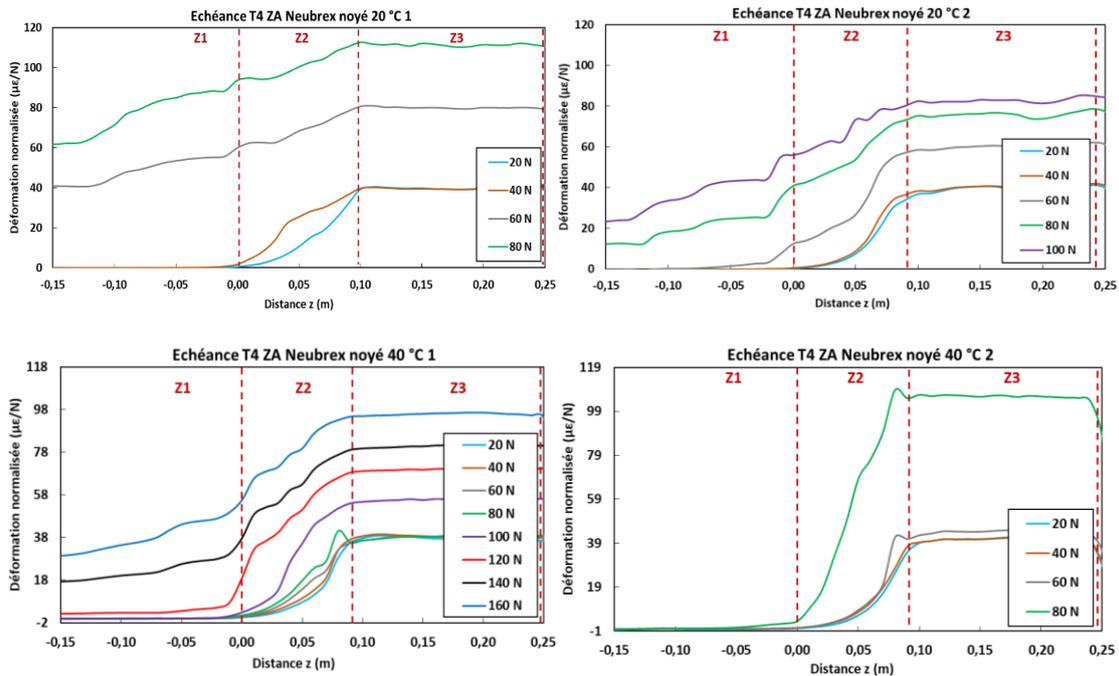


Figure VI-24 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans les cylindres ZA après 12 mois de vieillissement (T4). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

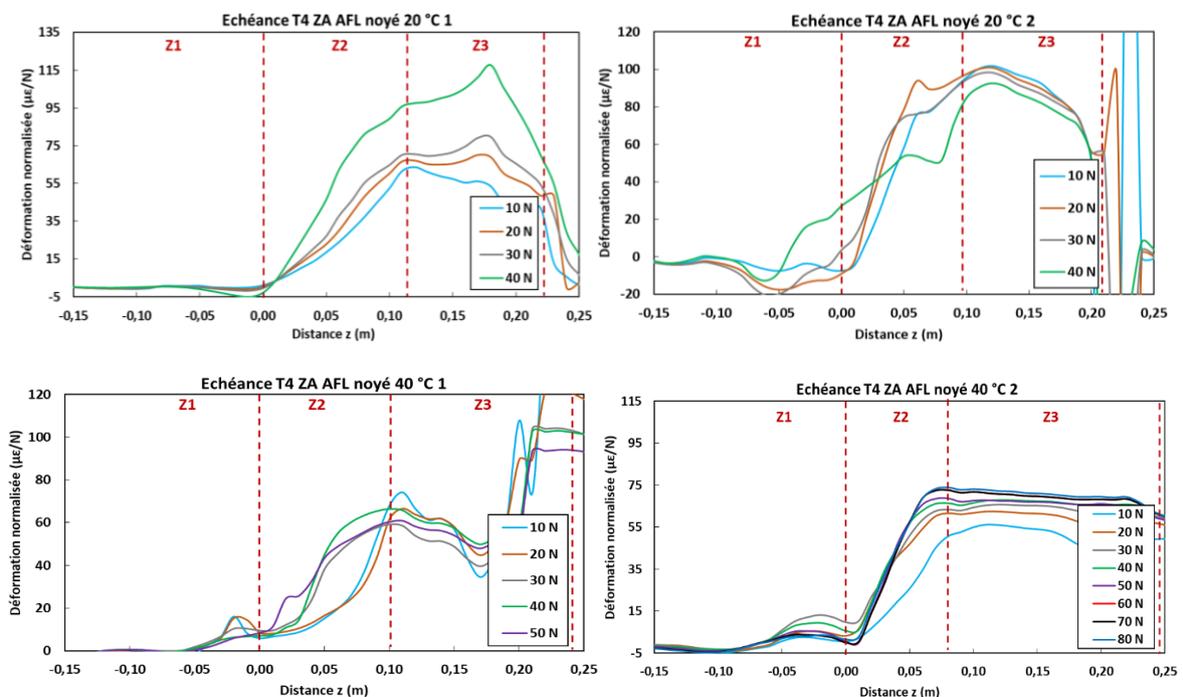


Figure VI-25 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL noyé dans les cylindres ZA après 12 mois de vieillissement (T4). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

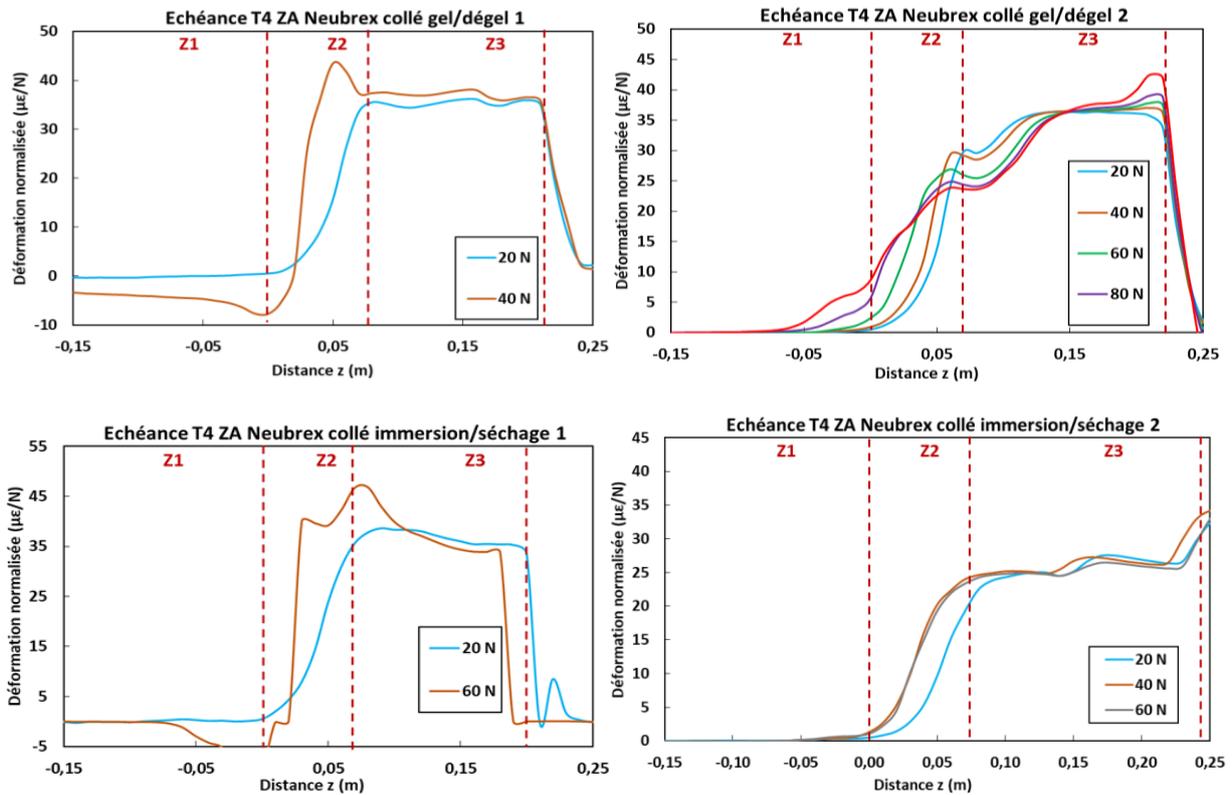


Figure VI-26: Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement des prismes ZA, après 12 mois de vieillissement (T4). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

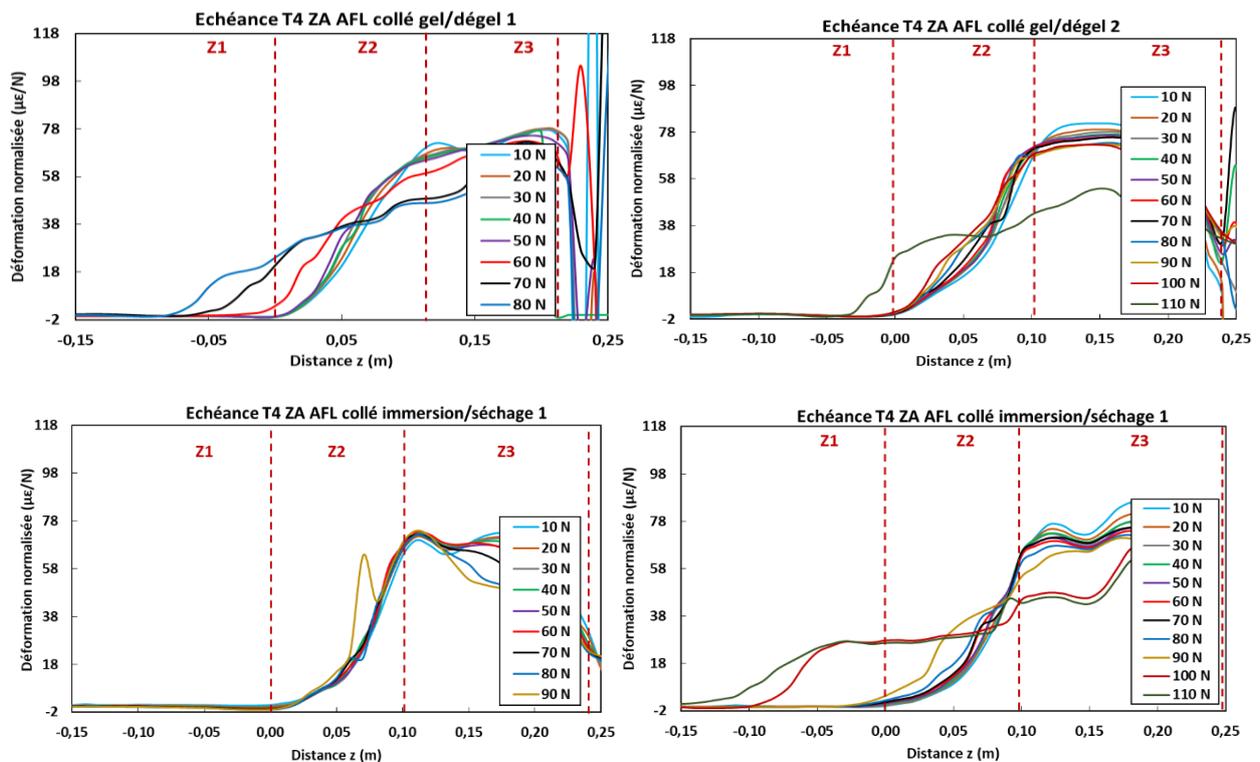


Figure VI-27 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement des prismes ZA, après 12 mois de vieillissement (T4). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

VI.4.6. Caractérisation après 15 mois de vieillissement accéléré

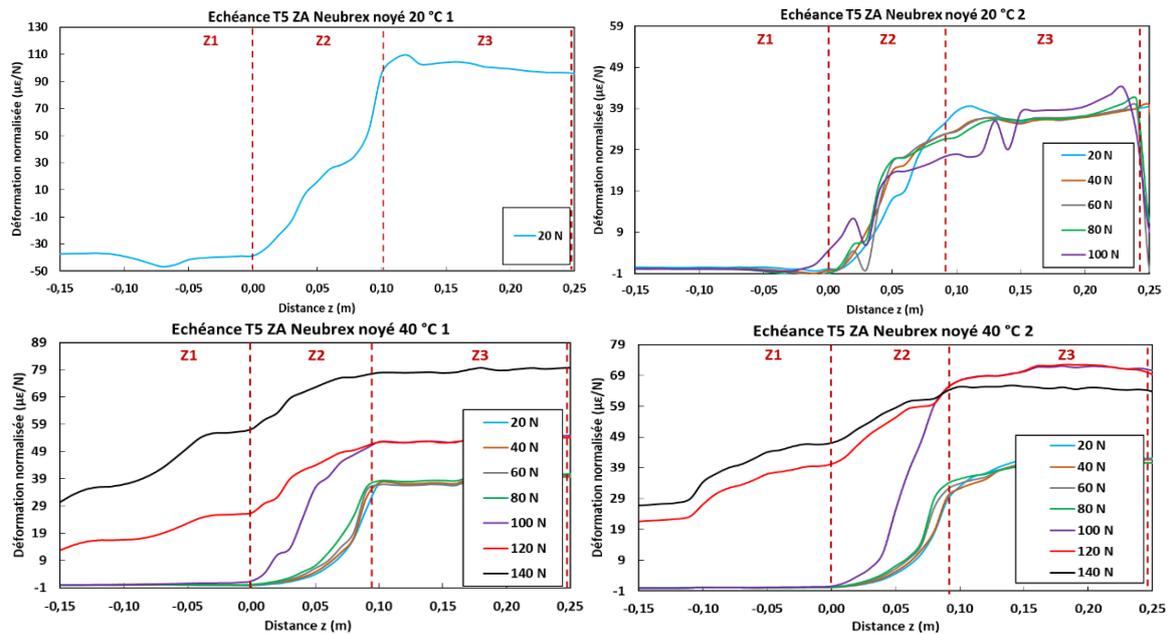


Figure VI-28: Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans les cylindres ZA après 15 mois de vieillissement (T5). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

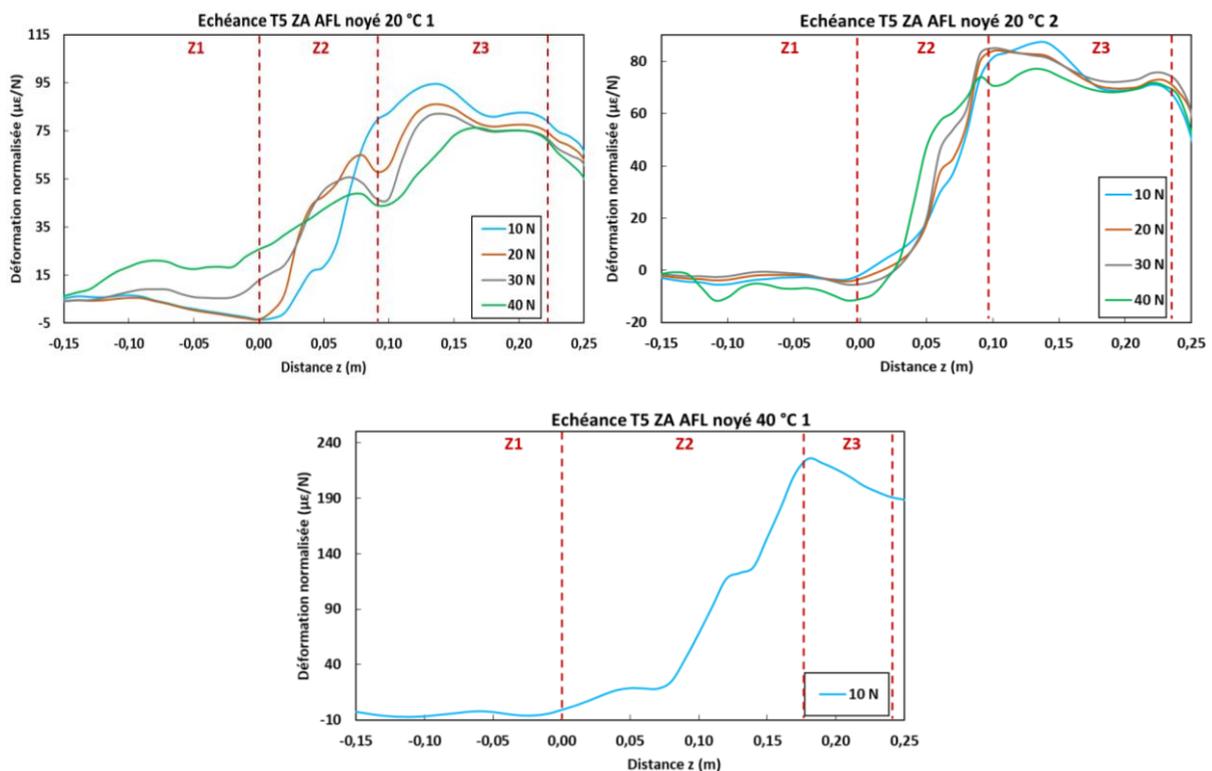


Figure VI-29 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL noyé dans les cylindres ZA après 15 mois de vieillissement (T5). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

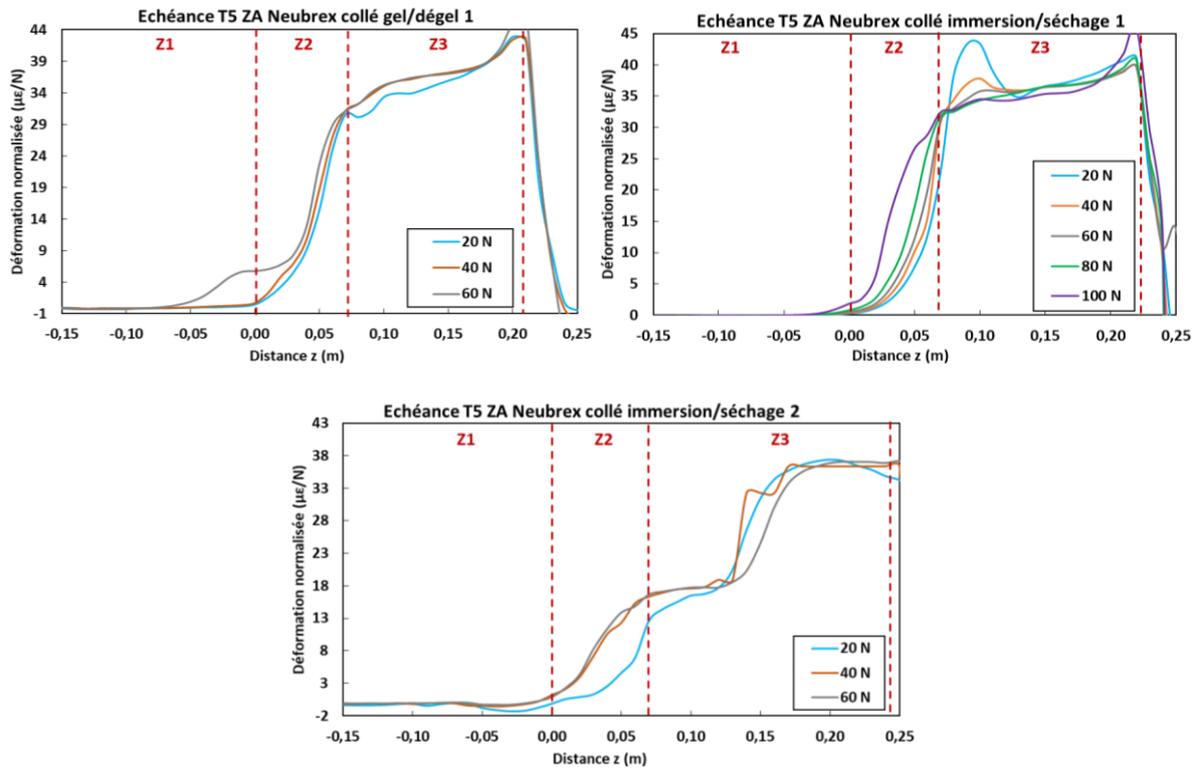


Figure VI-30 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement des prismes ZA, après 15 mois de vieillissement (T5). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

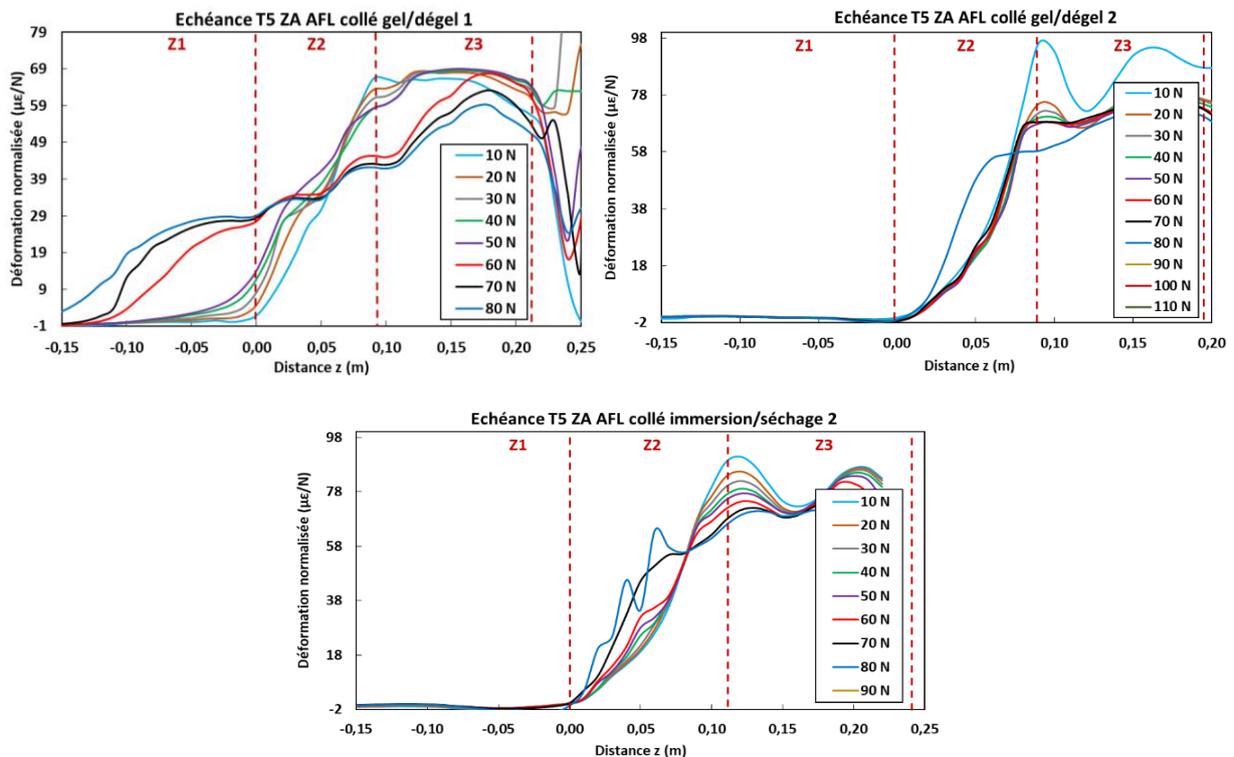


Figure VI-31 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement des prismes ZA, après 15 mois de vieillissement (T5). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

VI.4.7. Caractérisation après 18 mois de vieillissement accéléré

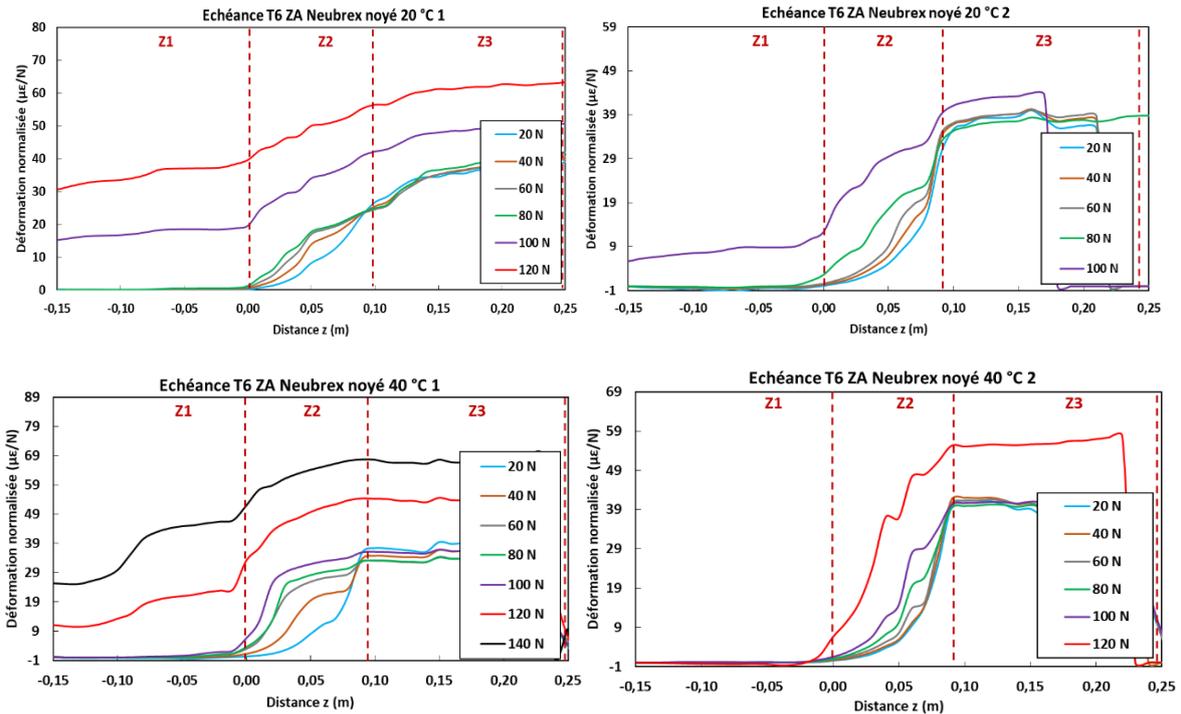


Figure VI-32 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans les cylindres ZA après 18 mois de vieillissement (T6). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

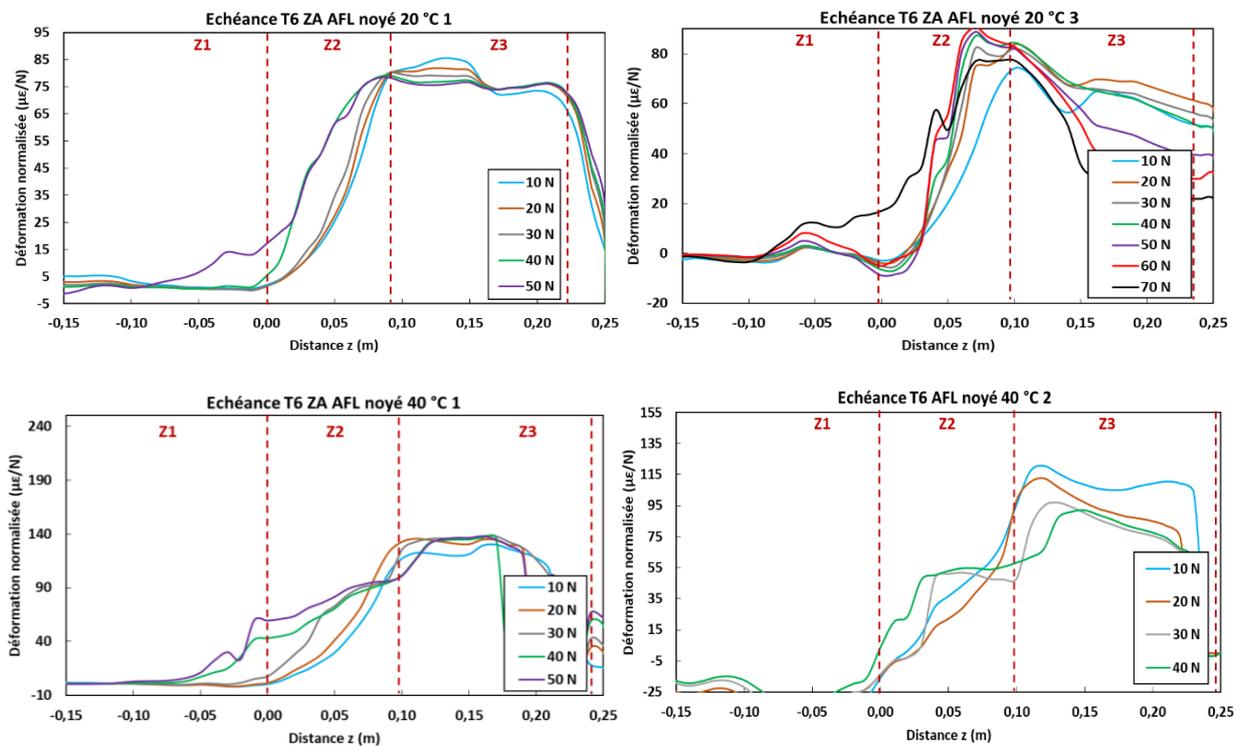


Figure VI-33 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL noyé dans les cylindres ZA après 18 mois de vieillissement (T6). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

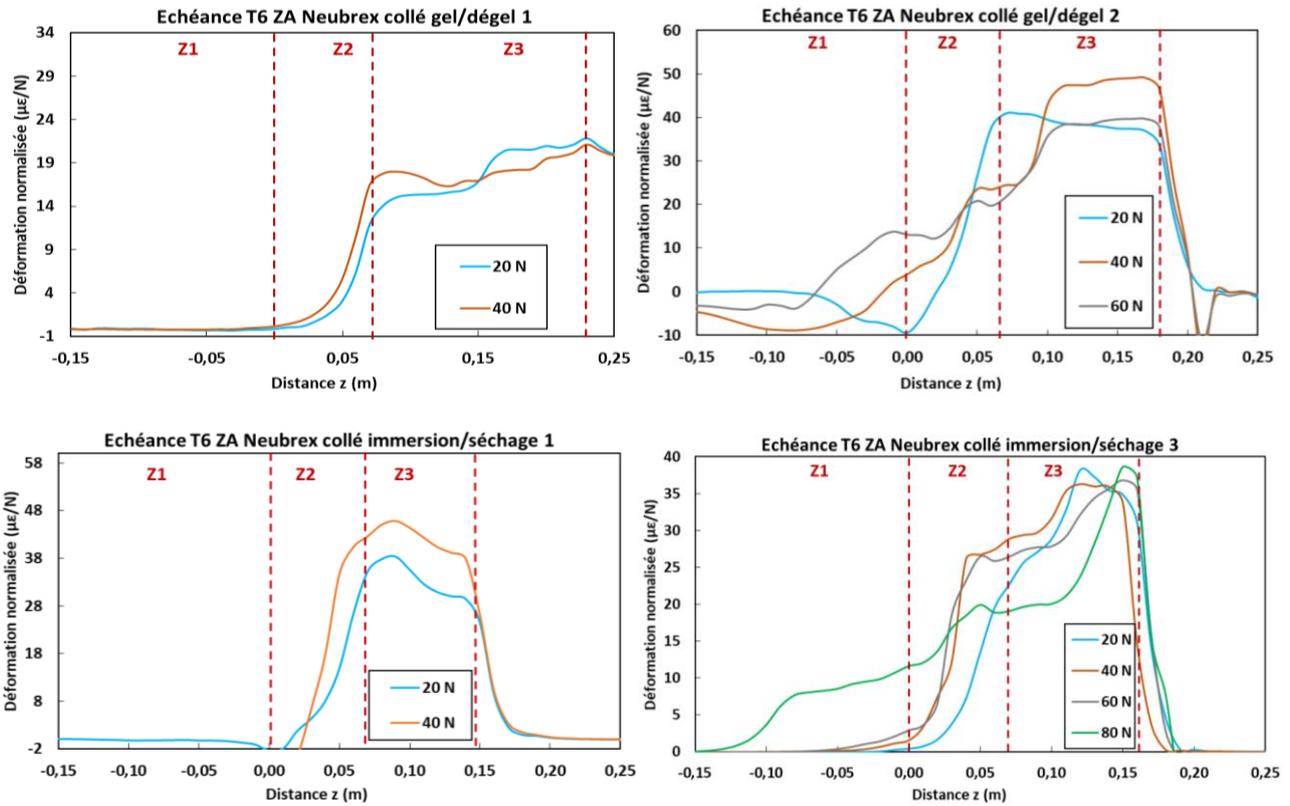


Figure VI-34 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement des prismes ZA, après 18 mois de vieillissement (T6). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

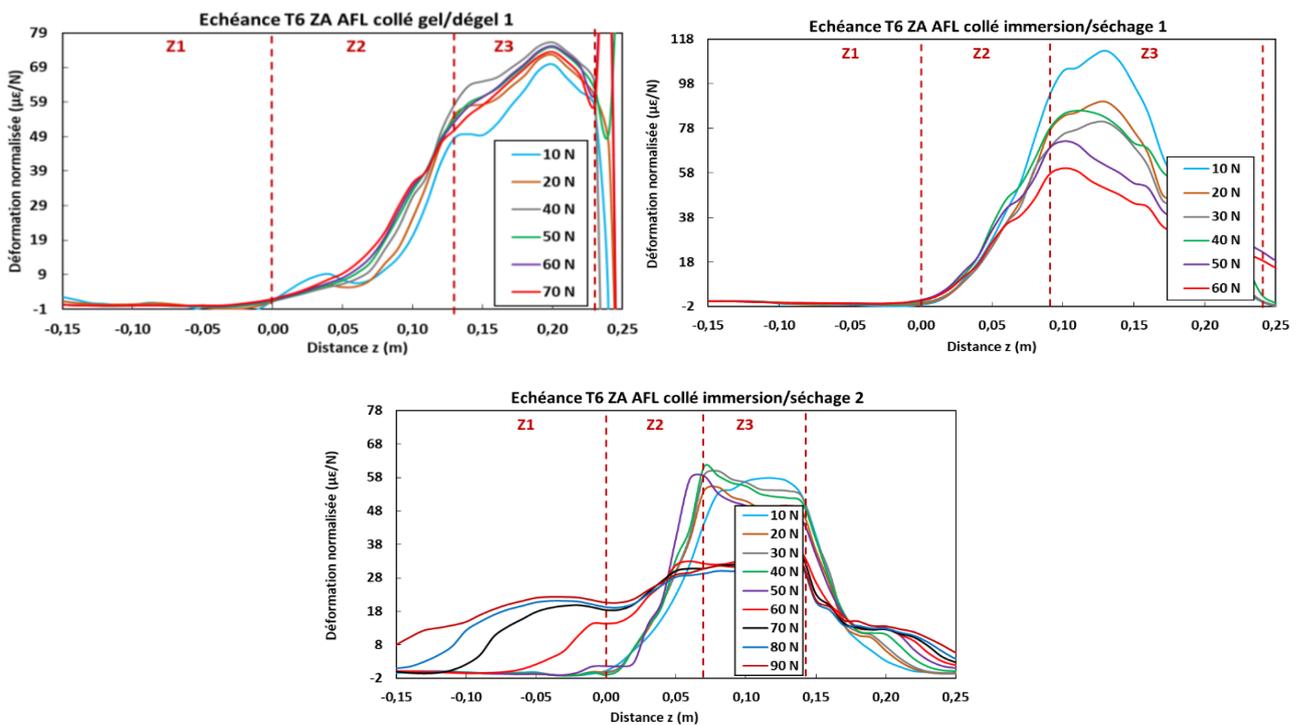


Figure VI-35 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement des prismes ZA, après 18 mois de vieillissement (T6). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

VI.4.8. Caractérisation après 16 mois de vieillissement naturel (VN)

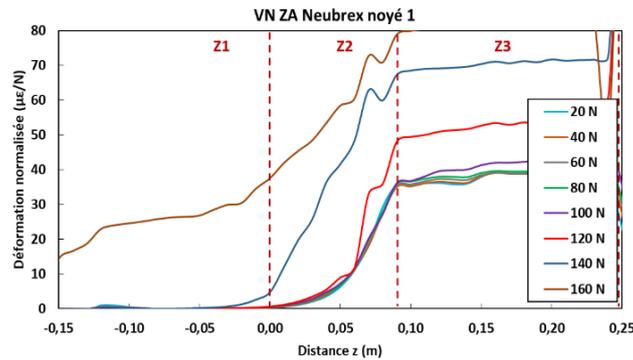


Figure VI-36 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex noyé dans un cylindre ZA, après 16 mois en vieillissement naturel (VN). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

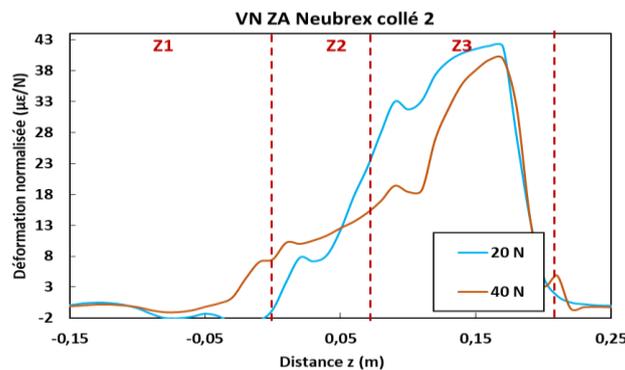


Figure VI-37 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO Neubrex collé en parement d'un prisme ZA, après 16 mois en vieillissement naturel (VN). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

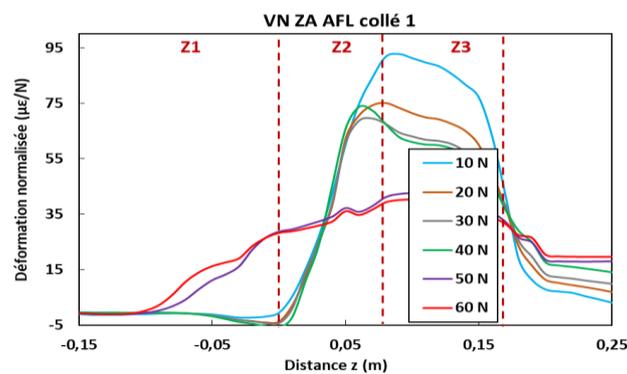


Figure VI-38 : Profils de la déformation normalisée le long du câble à FO AFL collé en parement d'un prisme ZA, après 16 mois en vieillissement naturel (VN). Ces profils sont enregistrés à différents paliers de charge pendant les essais d'arrachement câble/béton.

VI.5. Annexe E : Premier essai de flexion 3-points sur un prisme en béton fibré

VI.5.1. Protocole d'essai

A partir des résultats de l'essai de compression présenté dans le chapitre V et afin d'évaluer plus précisément l'effet de la rigidité de l'adhésif sur la réponse mécanique du capteur lorsqu'une fissure unique se développe dans le béton, l'adhésif A, l'adhésif B et l'adhésif C sont utilisés pour le collage de la même FO monomode dans trois rainures réalisées sur la face inférieure d'une éprouvette prismatique entaillée (de dimension $7 \times 7 \times 28 \text{ cm}^3$) en béton fibré. Un essai de flexion 3-points est réalisé durant lequel l'ouverture de l'entaille est mesurée par trois capteurs de déplacement (LVDT) avec une résolution spatiale micrométrique du système d'acquisition de données, fixés aux deux faces latérales de l'échantillon à l'aide de supports métalliques, comme le montre la Figure VI-39. Les FOs sont interrogées au moyen du même interrogateur OBR avec une résolution spatiale de 3 mm.

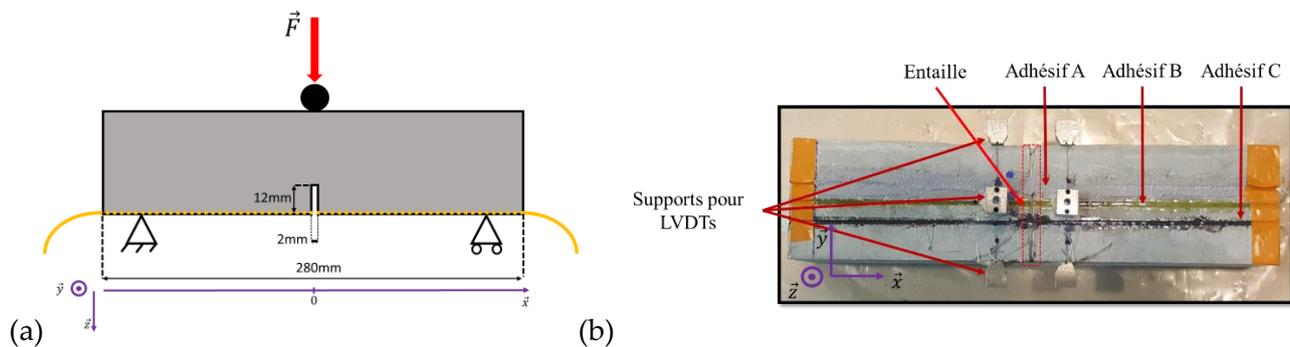


Figure VI-39 : (a) Schéma de la configuration de l'essai de flexion ; (b) Vu de dessous de l'éprouvette prismatique montrant les supports des capteurs LVDT et les FOs collées avec les différents adhésifs.

L'essai de flexion a été réalisé à l'aide d'une machine d'essai universelle de capacité 100 kN sous contrôle de déplacement de l'actionneur (voir la Figure VI-40-a) et le déplacement a été arrêté à différents paliers de déplacement de l'actionneur afin de garantir que le profil de déformation reste constant le long des FOs durant chaque palier (Figure VI-40-b).

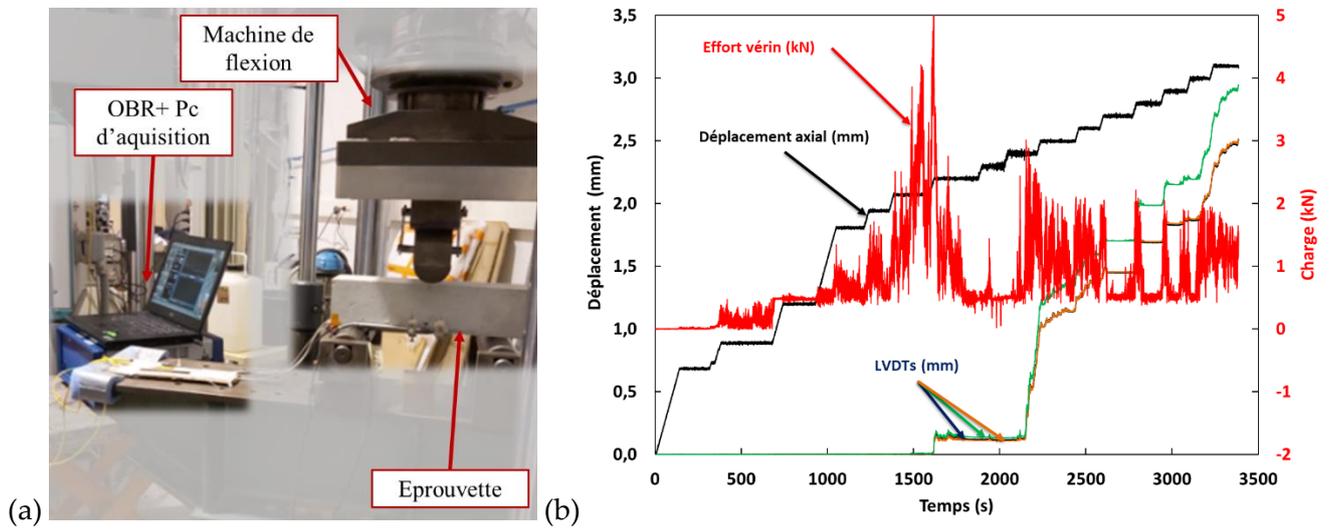


Figure VI-40 : (a) Dispositif expérimental de l'essai de flexion, (b) graphe illustrant les déplacements de la traverse de la presse et des capteurs LVDTs et la charge appliquée sur l'éprouvette durant l'essai de flexion.

VI.5.2. Analyse des profils de déformation des FOs

A partir des résultats de la Figure VI-40, on remarque que les capteurs LVDTs ne détectent clairement une ouverture au niveau de l'entaille qu'à partir du 7^{ème} palier correspondant à plus de 2 mm de déplacement de l'actionneur.

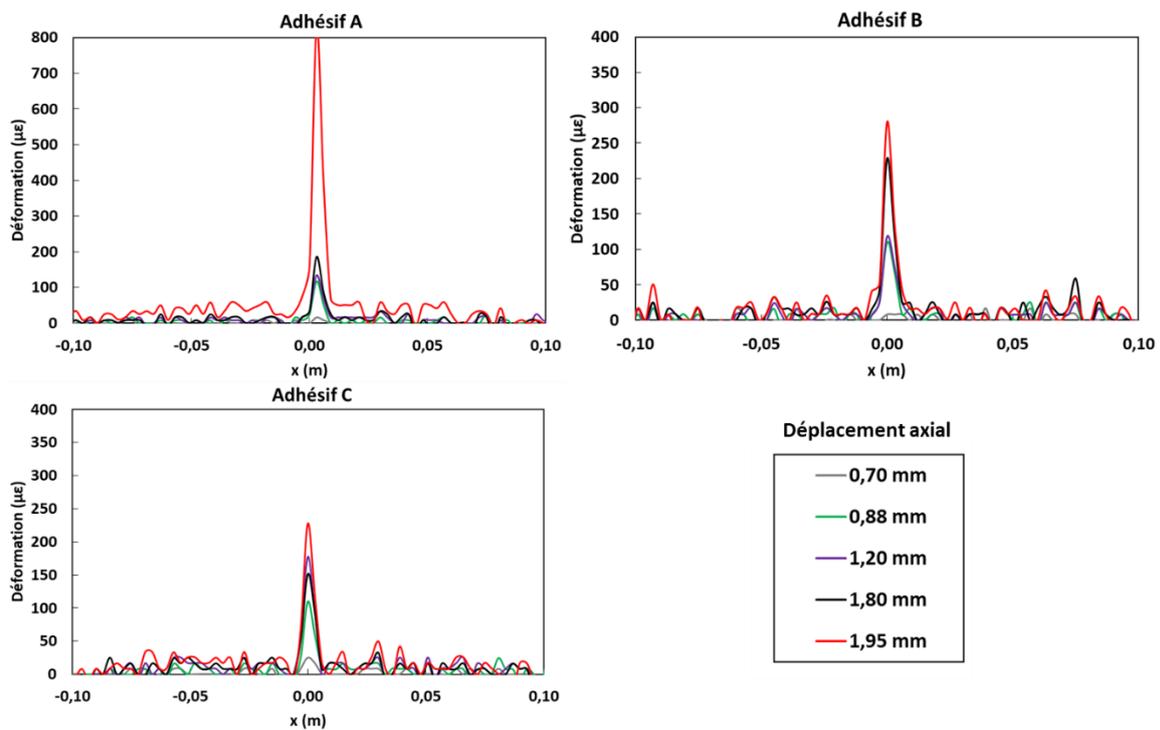


Figure VI-41 : Profils de déformation enregistrés par les 3 FOs gravées à la surface du prisme en béton à l'aide des 3 différents adhésifs, sur les 5 premiers paliers de déplacement de la traverse (longueur de jauge = 3 mm).

Les résultats des FOs obtenues jusqu'au 5^{ème} palier pour les trois adhésifs utilisés sont illustrés dans les graphes de la Figure VI-41. Contrairement aux capteurs de déplacement, les trois FOs,

collées avec les trois adhésifs, ont détecté l'ouverture de l'entaille bien avant le 7^{ème} palier. Des pics de déformation apparaissent dans les profils enregistrés par les FOs à partir du 2^{ème} palier de déplacement. Toutefois, en raison des rigidités élevées des trois adhésifs (particulièrement pour les adhésifs A et B, voir le Tableau V-2), la largeur des pics est de 1 cm environ pour les trois adhésifs et n'est que 3 fois supérieure à la résolution spatiale de l'interrogation (3 mm). Par conséquent, les propriétés intrinsèques de l'interrogateur sont susceptibles d'affecter les résultats des mesures (comme détaillé dans le chapitre I – paragraphe I.5.5) et il n'est pas possible d'établir une comparaison fiable de l'effet des trois adhésifs à partir des profils des déformations présentés dans la Figure VI-41.

VI.5.3. Amélioration du protocole de l'essai de flexion

Ce premier essai de flexion 3-point n'a pas permis d'évaluer l'effet de la rigidité de l'adhésif sur la réponse d'une FO engravée en surface de béton au droit d'une fissure. En revanche, il est possible de tirer des premières conclusions et proposer des améliorations du protocole d'essai :

-Les capteurs à FO permettent une localisation et une détection précoce de l'ouverture d'une fissure dans le béton bien avant les capteurs de déplacement traditionnels ;

-Afin d'évaluer l'effet de l'adhésif sur la diffusion des contraintes lors de l'ouverture des fissures, il est nécessaire d'utiliser des adhésifs beaucoup plus souples afin d'obtenir des pics de déformation au niveau de l'entaille étalés sur une longueur plus importante de la FO collée en surface. Un deuxième essai est alors réalisé avec des adhésifs souples et les résultats sont présentés dans la partie V.3.3.

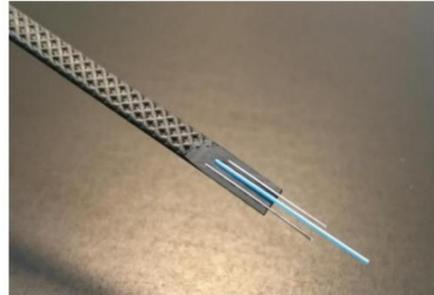
VI.6. Annexe F : Fiches techniques

VI.6.1. Fiche technique du câble Neubrex

FutureNeuro™ FN-SILL-3 Embossed Sensing Cable

FEATURES

- Two sensing optical fibers
- Non-slippery embossed sheath
- No elastic hysteresis effects
- Long-term heat resistance up to 80 °C
- Tensile strength up to 25 kg-f

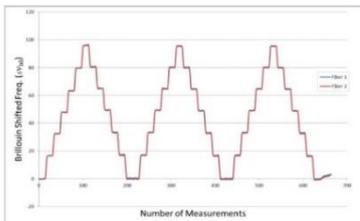


The FN-SILL-3 is designed for strain and temperature measurements. It consists of 2 optical fibers (in the cable center) and 2 reinforcing bars, which allow the cable to sustain up to 25 kg force.

The embossed grid makes it easy to embed the cable or attach it to the measured object/structure.

The outer sheath is made from olefin elastomers, which exhibits superior characteristics regarding long-term heat- and UV-resistance. It also ensures there is no elastic hysteresis effect. Thus, FN-SILL-3 offers linear responses to the mechanical or thermal loads, providing accurate strain or temperature measurement.

Validated no-hysteresis performance



The figure above presents measurements results in both fibers of FN-SILL-3 cable subject to 40 hours of

thermal load test (20-80-20 °C, with 10 °C step). In total, 640,000+ data points were available for hysteresis effects analysis.

The results clearly demonstrate that the cable maintained its structure and cable reinforcing members keep the low elongation and deformation characters during temperature increase and decrease.

Applications

FN-SILL-3 cable is ideal for civil engineering applications where it can be embedded in Reinforced Concrete structure. As shown in the picture, the sensing fiber is attached to rebar for strain measurement.

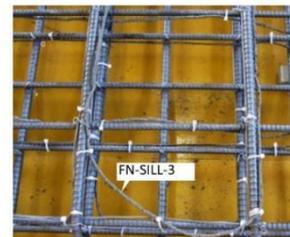
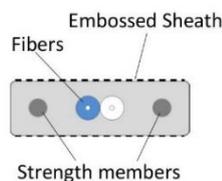
In this particular installation as below the FN-SILL-3 was *pre-soaked* in mortar to enhance its bonding with premixed concrete. Usually FN-SILL-3 does not need to be pre-treated due to its embossed sheath.

Specifications FN-SILL-3

Fiber Type	10 / 125 μm Single-Mode Fiber
Fiber count	2
Attenuation	< 0.5 dB/km
Strain Sensing Range*(Δε)	5000 με
Temperature Sensing Range	-20 to +80 C
Bending Radius	> 15 mm
Outer Sheath	Olefinic elastomers
Strength Member	φ0.3mm, SUS304 x2
Tensile Strength	25 kg-f
Dimension (W x H)	4.3 x 1.7 mm
Weight	12 g / m
Operation Temperature	-20 to +80 C
Storage Temperature	-40 to +85 C

* Depends on cable installation. Please contact us for more information.
** All specifications are subject to change without notice.

Configurations



Application example:
Embedded in reinforced
concrete structure



Neubrex Co., Ltd.

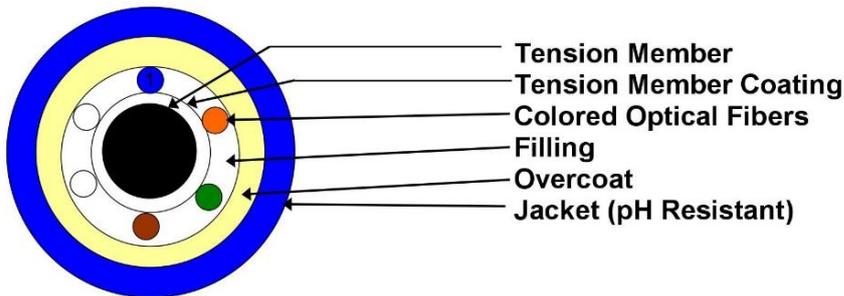
Sakaemachi-dori 1-1-24, Chuo-ku, Kobe
Hyogo 650-0023, Japan
Tel: +81-78-335-3510
www.neubrex.com

VI.6.2. Fiche technique du câble AFL



DNS-5553

2.1mm FS Unit with high pH resistant jacket, Blue , 2 G.657.A1 SM fibers, 2-50um MM fibers



Dimensions and Tolerances

Component	Diameter(mm)	Maximum Eccentricity	Minimum Wall (mm)	Wt (kg/km) 6 Fiber
Tension Member	0.40 ± .05			0.260
TM Coating	0.50 ± .02			0.072
Silicone Filling	1.20 ± .04			1.317
Epoxy Overcoat	1.70 ± .05	*67%	0.15	1.161
Special Jacket	2.10 ± .05	*67%	0.10	1.140
			Total	3.950

NOTES: Jacket is suitable for wet concrete environments where the pH can reach 13.

Optical Characteristics

Fiber Type:

Optical Attenuation at 1310nm:

Optical Attenuation at 1550nm:

Fiber Type:

Optical Attenuation at 850nm:

Optical Attenuation at 1300nm:

Operation Temperature (Max/Min)

Single Mode per ITU-T G.652.D & G.657.A1

0.36dB/km maximum

0.22dB/km maximum

Multi Mode per ITU-T G.651.1

3.20dB/km maximum

1.20dB/km maximum

(85C/-25C)

VI.6.3. Fiches techniques des produits utilisés pour la fabrication du béton AA



Gagneraud
Projet ODOBA

4. Fiches Techniques Produits

CIMENTS
FICHE TECHNIQUE PRODUIT

Construire des villes meilleures™

USINE DU TEIL

CEM I 52,5 N - SR 5 CE PM-CP2 NF

SERVICES EXCLUSIFS

Centre de Relation Clientèle
0825 888 425*
Numéro indigo : 0 156 TTT/mn

Déclaration de Performance n°
0333-CPR-1203

NF EN 197-1 NF P 15-317 NF P 15-318

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MECANIQUES

	DP (min)	Stabilité (mm)	Résistances mécaniques (MPa)				MV (g/cm3)	SSB (cm²/g)	Demande en eau (%)	Q41 (J/g)	L'
			1 jour	2 jours	7 jours	28 jours					
Val. moyenne	174	1	20,8	32,9	50,5	66,7	3,17	3650	27,2	303	63,4
Val. garantie	> 60	< 5		> 18		> 50					

CARACTERISTIQUES CHIMIQUES

	Valeur moyenne	Valeur garantie		Valeur moyenne
SO3 (%)	2,1	< 2,5	Alcalins équivalents [Na2O + 0,658 K2O] (%)	0,2
Chlorures Cl- (%)	0,03	< 0,1	Alcalins actifs [suivant la norme NF P 18-454] (%)	0,2
Perte au feu 950°C (%)	1,3	< 3	Vc coefficient de variation des alcalins actifs	0,15
Insolubles (%)	0,3	< 0,75		
S- (%)	0,00	< 0,2		

CONSTITUANTS PRINCIPAUX ET SECONDAIRES :

Clinker Portland LE TEIL		Constituant secondaire	
	97,0%		3,0%
C3S + C2S (%)	84	Calcaire	
CaO/SiO2	2,8		
MgO (%)	0,9		
C3S (%)	66		
C2S (%)	18		
C3A (%)	4		
C4AF (%)	7		
		Total des constituants	100%

AUTRES CONSTITUANTS

Gypse (%)	2,5
Agent de mouture AMA 14E - Teneur sous forme d'extrait sec (%)	0,04
Agent de mouture AMA 32E - Teneur sous forme d'extrait sec (%)	0,04

LIVRAISON EN VRAC

Date de révision : 01/04/2015

Les données figurant sur la présente fiche technique sont la propriété de Lafarge Ciments et ne peuvent être reproduites partiellement ou totalement sans notre autorisation préalable. Les résultats indiqués ne sont mentionnés qu'à titre purement indicatif, ils sont susceptibles de variation dans les limites des normes applicables et ne sauraient en conséquence engager la responsabilité de Lafarge Ciments. Les résultats de nos autocontrôles périodiques sont disponibles sur demande auprès de votre interlocuteur commercial habituel ou sur notre site internet www.lafarge-france.fr



Lafarge France - Estaque

Chemin de la Nerthe
13016 MARSEILLE

Fiche Technique de Produit

Engagement du 01/07/2016 au 31/12/2016

Granulats : ABA421 : 6/16 Cal C EST
Péetrographie : Calcaire
Elaboration : Concassé
Système EVCP : CE niveau 2+

Partie contractuelle

Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

Classe granulaire

6.3	16
-----	----

Norme

Norme NF P 18-545 Article 10

Catégorie

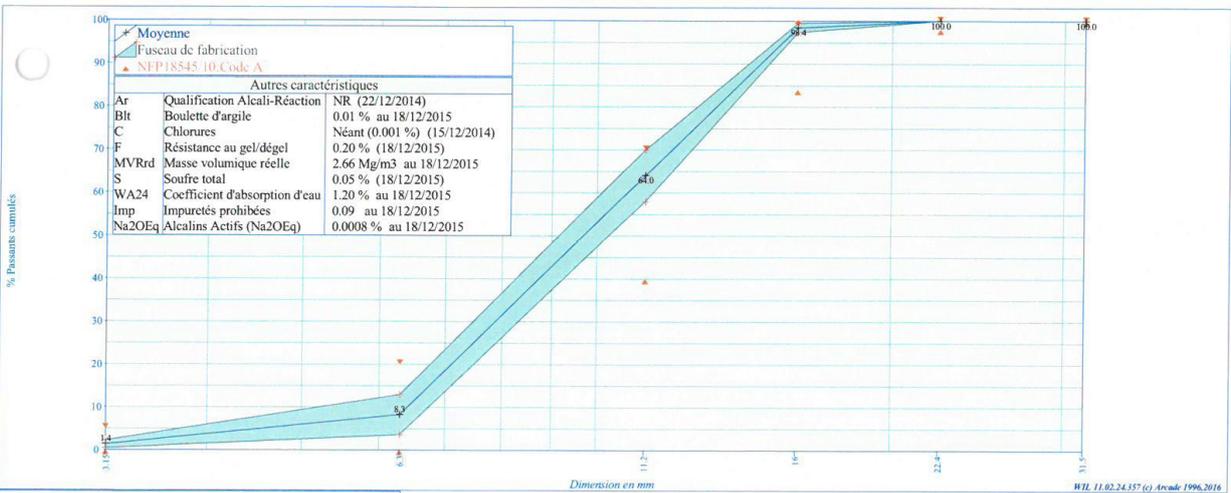
Code A

	d/2	d	D/1.4	D	1.4D	2D	f	FI	MBF	W	LA 6.3/10
	3.15	6.3	11.2	16	22.4	31.5					
Etendue e		15	30	15							
Incertitude U	1	5	6	5	1		0.6	4	2		
V.S.S.+U	6	25	76	100			4.6	24	12.00		
V.S.	5	20	70	99			4.0	20	10.00		
V.S.i.		0	40	84	98	100					
V.S.i.-U		0	34	79	97						

Partie informative

Résultats de production

	du 18/01/16 au 27/06/16						du 18/12/15 au 18/12/15				
	3.15	6.3	11.2	16	22.4	31.5	f	FI	MBF	W	LA 6.3/10
Maximum	3	17	72	99	100	100	1.5	15	3.00	0.8	
Xf+1.25xEcart-types	2	13	70	99	100	100	1.4			0.6	
Moyenne Xf	1	8	64	98	100	100	0.8	11	2.58	0.5	23
Xf-1.25xEcart-types	0	4	58	97	100	100	0.2			0.3	
Minimum	0	1	47	97	100	100	0.1	9	2.17	0.2	
Ecart-type	0.7	3.8	4.8	0.9	0.0	0.0	0.50	3.0	0.420	0.10	
Nombre de résultats	25	25	25	25	25	25	25	3	2	24	1



Marcel Garcia

CHRYSO®Tard CHR

Retardateur de prise



CHRYSO®Tard CHR ralentit les réactions d'hydratation en colmatant momentanément la surface des grains de ciment.

Dès la fin de la prise, le durcissement se fait rapidement et l'on obtient des résistances mécaniques élevées à 28 jours.

CHRYSO®Tard CHR n'a pas d'effet tensio-actif. Son incorporation dans les bétons ne modifie pas leur consistance.

CHRYSO®Tard CHR peut avantageusement s'employer en synergie avec des superplastifiants - hauts réducteurs d'eau.

Informations indicatives

- Nature : liquide
- Couleur : Brun
- Densité (20°C) : 1,060 ± 0,010
- pH : 10,50 ± 1,00
- Extrait sec (EN 480-8) : 15,00 % ± 1,00 %
- Extrait sec (24h-105°C) : 14,70 % ± 1,00 %
- Teneur en Na₂O équivalent : ≤ 0,50 %
- Teneur en ions Cl⁻ : ≤ 0,10 %
- Point de congélation : -1 °C
- Durée de vie : 18 mois

Informations normatives et réglementaires

- Ce produit satisfait aux exigences réglementaires du marquage CE. La déclaration correspondante est disponible sur notre site Internet.
- Ce produit est conforme au référentiel de certification NF 085 dont les spécifications techniques sont celles de la partie non harmonisée de la norme NF EN 934-2.
- Ce produit est conforme à la norme ASTM C 494 - Type B.

Domaines d'application

- Tous types de ciments
- Bétonnage par temps chaud
- Long maintien d'ouvrabilité
- Reprises de bétonnage
- Bétons de masse, mortiers de carrelage
- Parois moulées
- Pieux

Précautions

En cas de gel, ce produit conserve ses propriétés. Après dégel, une agitation efficace est nécessaire jusqu'à l'obtention d'un produit totalement homogène.

Mode d'emploi

Plage de dosage : 0,2 à 1,0 kg pour 100 kg de ciment.

Pour des dosages différents, nous consulter.

Ce produit est totalement miscible à l'eau.

Ce produit doit être incorporé préalablement à l'eau de gâchage.

L'efficacité maximale de ce produit doit être déterminée après des essais de convenance prenant en compte les caractéristiques rhéologiques et les performances mécaniques souhaitées pour le béton.

Le retard provoqué par le **CHRYSO®Tard CHR** est proportionnel au dosage utilisé.

Références chantiers

Métro du Caire, Egypte.

Tunnel sous la Manche, France-Royaume-Uni.

Station d'épuration (STEP) du Havre, France : bétons vibrés ou auto-plaçants pour les parois moulées, dalles de compression, voiles, ...



CHRYSO®Omega 152

Plastifiant Réducteur d'eau



CHRYSO®Omega 152 est un plastifiant – réducteur d'eau de dernière génération. Cet adjuvant multi-dosage fait appel à nos avancées les plus récentes dans la synthèse des molécules afin d'apporter :

- une large plage de dosage,
- un fort potentiel de réduction d'eau,
- du maintien d'ouvrabilité,
- une cohésion du béton.

CHRYSO®Omega 152 est particulièrement recommandé pour le béton prêt à l'emploi. Cet adjuvant peut également être utilisé en combinaison avec d'autres produits de la gamme CHRYSO®.

Informations indicatives

- Nature : liquide
- Couleur : Brun
- Durée de vie : 9 mois

Spécifications

- Densité : $1,081 \pm 0,020$
- pH : $4,90 \pm 1,00$
- Extrait sec (SYNAD-IFSTTAR) : $27,70 \% \pm 1,30 \%$
- Teneur en Na_2O équivalent : $\leq 2,00 \%$
- Teneur en ions Cl^- : $\leq 0,10 \%$

Informations normatives et réglementaires

- Ce produit satisfait aux exigences réglementaires du marquage CE. La déclaration correspondante est disponible sur notre site Internet.

- Ce produit est conforme au référentiel de certification NF 085 dont les spécifications techniques sont celles de la partie non harmonisée de la norme NF EN 934-2.
- Adresse AFNOR - 11, Avenue de Pressensé - 93571 Saint Denis La Plaine Cedex

Domaines d'application

- Tous types de ciments, sauf ciments blancs
- Bétons avec maintien d'ouvrabilité
- Bétons de consistance 100 à 210 mm au cône
- BPE

Précautions

Stocker à l'abri du gel.
Eviter l'exposition prolongée à de fortes chaleurs. En cas de gel, ce produit conserve ses propriétés. Après dégel, une agitation efficace est nécessaire jusqu'à l'obtention d'un produit totalement homogène.

Mode d'emploi

Plage de dosage : 0,3 à 1,5 kg pour 100 kg de ciment

Ce produit doit être incorporé de préférence dans l'eau de gâchage ou en fin de malaxage.

Dans le cas d'un ajout différé sur béton frais, dans un camion toupie, il est nécessaire de malaxer à grande vitesse puis à vitesse lente (avec un minimum de 3 minutes, pour chaque régime).

L'efficacité maximale de ce produit doit être déterminée après des essais de convenance prenant en compte les caractéristiques rhéologiques et les performances mécaniques souhaitées pour le béton.





Gagneraud Projet ODOBA



Jean Lefebvre Méditerranée - Carrière de la Nerthe
Carrière de Châteauneuf-Les-Martigues Vallon de Valtrède
13220 Châteauneuf-Les-Martigues
Tel:04.42.10.91.40 Fax:04.42.76.10.66

Fiche Technique de Produit

Engagement du 01/03/2016 au 31/08/2016
Référence : NF001F-431611
Page 1/1

Granulats : Filler silo 4
Pétrographie : Calcaire
Elaboration : Concassé Tertiaire

F.D.T. : Suivi E.JL

Partie normative

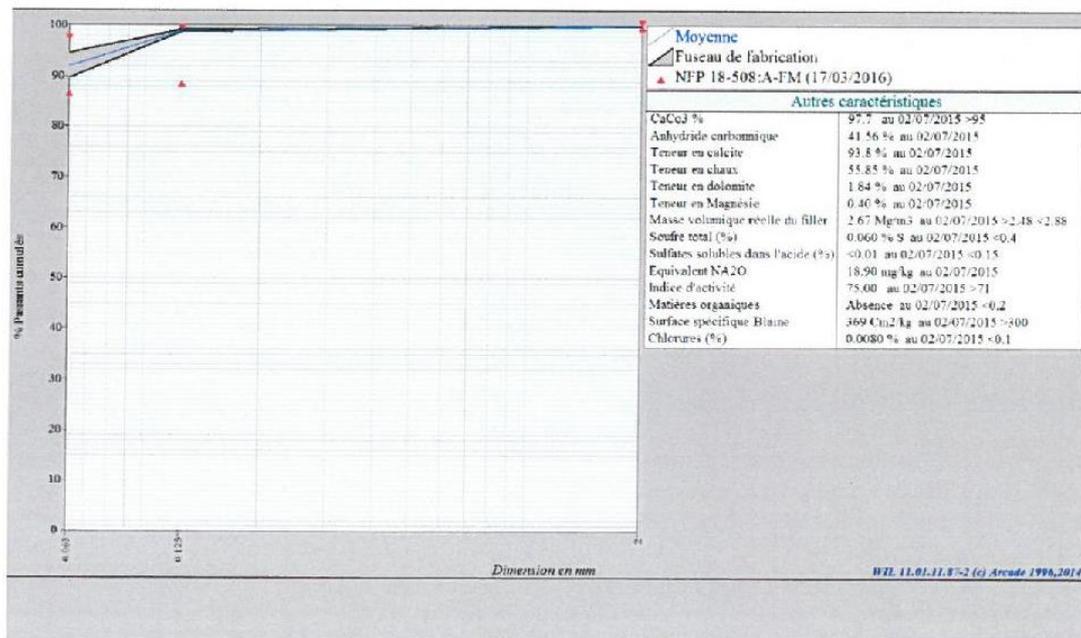
Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

Classe granulaire	Norme				Catégorie	
	0	0.125	NF P 18-508 Additions calcaires			A-FM (17/03/2016)
		0.063	0.125	2	MBF	W
V.S.S+U		100.0	100		5.0	
V.S.S		97.0	99		3.0	1.0
V.S.I		87.0	89	100		
V.S.I-U		84.0	87	97		

Partie informative

Résultats de production

	du 03/09/15 au 25/02/16				
	0.063	0.125	2	MBF	W
Maximum	95.0	99	100	2.0	0.4
Xf+1.25xEcart-types	94.5	99	100	1.9	0.3
Moyenne Xf	92.0	99	100	1.5	0.2
Xf-1.25xEcart-types	89.5	99	100	1.1	0.1
Minimum	88.0	98	100	1.3	0.1
Ecart-type	2.01	0.2	0.0	0.30	0.10
Nombre de résultats	17	17	17	17	17
Unité	%	%	%	g/kg	%
Dernier	25/02/2016	25/02/2016	25/02/2016	25/02/2016	25/02/2016



VI.6.4. Fiches techniques des produits utilisés pour la fabrication du béton ZA

Direction Commerciale
Assistance
et Prescription Clients
Tél. : 01 34 77 78 81
Fax : 01 30 98 73 50



Version du : 06/02/2017
N° DoP : 0333-CPR-5003

Fiche produit

AIRVAULT
CEM II/A-LL 42.5 R CE PM-CP2 NF

Caractéristiques physiques et mécaniques											
Compression en MPa				Eau pâte pure en %	Début de prise en mn	Stabilité en mm	Masse volumique en g/cm ³	Surface Blaine en cm ² /g	Chaleurs en J/g		L*
1j	2j	7j	28j						41h	120h	
-	33	47	56	29.1	3H10	1	3.12	3906	325	-	58

Composition élémentaire (%)		Constituants (%)		Caractéristiques des constituants			
				Nature	Caractéristiques		
Perte au feu	3.6	Principaux		Clinker (K) d'Airvault	CaO/SiO ₂	-	3.1
SiO ₂	19.7	Clinker (K) d'Airvault	92.0		C ₃ S+C ₂ S (%)	-	78
Al ₂ O ₃	4.6	Calcaire (LL) (%)	6.0		MgO (%)	-	1.2
Fe ₂ O ₃	3.2				Al ₂ O ₃ (%)	-	5.0
TiO ₂	0.3	Secondaires	2.0		C ₃ S (%)	-	66
MnO	0.1	Laitier (S) (%)			C ₂ S (%)	-	11
CaO	63.5	Cendres (V) (%)			C ₃ A (%)	-	7
MgO	1.2	FDEC (%)			C ₄ AF (%)	-	10
SO ₃	2.7	Sulfate de calcium			Calcaire (L ou LL)	CaCO ₃ (%)	93.3
K ₂ O	1.36	Gypse	2.7			Vb (g/100g)	0.5
Na ₂ O	0.11	Anhydrite	-		TOC (%)	0.1	
P ₂ O ₅	0.5	Additifs		Laitier (S)	Laitier vitreux (%)	97.5	
S-	<0,02	Agent de mouture	0.048		(CaO+MgO)/SiO ₂	1.4	
Cl-	0.05	Agent réducteur de Cr VI	0.18		CaO+MgO+SiO ₂ (%)	83.2	
Insoluble	-			Cendres (V)	PF (%)	4.6	
Na ₂ O eq.	0.70				CaO réactive (%)	< 10	
Na ₂ O eq. Actif	0.93				SiO ₂ réactive (%)	40.2	
C ₃ A	-			Fumées de silice (D)	SiO ₂ amorphe (%)	-	
C ₃ A+0.27xC ₃ S	-				PF (%)	-	
C ₄ AF+2xC ₃ A	-				Aire massique BET (m ² /kg)	-	

Etablissement	Vrac	Big bag	Sac 25 kg	Sac 35 kg
Usine d'Airvault	Oui			

Ces valeurs ne sont données qu'à titre indicatif. Les résultats d'auto-contrôle sont disponibles sur demande à la Direction Commerciale Assistance et Prescription Clients



Siège social :
Rue des Technodes
76930 Guerville
Tél. : 01 34 77 78 00
Fax : 01 34 77 79 06

SAS au capital de 593 836 525 €
Siren 654 800 689 RCS Versailles



Holcim Granulats (Belgique) S.A.

Laboratoire central
B-7530 Gaurain-Ramecroix
Tel:(00) 32 69 25 14 07 Fax: (00) 32 69 25 14 76 email: serge.willoecq@holcim.com

Fiche Technique Produit
du 07/03/2017 au 06/09/2017

Référence : 04a02.SEL
Page 1/1, imprimé le mercredi 6 septembre 2017

Site : Site de Gaurain-Ramecroix **Utilisateur :** Holcim Belgique
Produits : 0/4 CF A f7 a L BENOR de Gaurain **Av Robert Schuman. 71**
Péetrographie : Calcaire **1401 Nivelles**
Elaboration : Lavé
Norme(s) : NF & BENOR & CE2+ (12620-13242)
Certificateur : Be-Cert (0965) & www.marque-nf.com
N° Certificat : CPR-GTO501 & 023-12

Partie normative

Valeurs spécifiées sur lesquelles le producteur s'engage

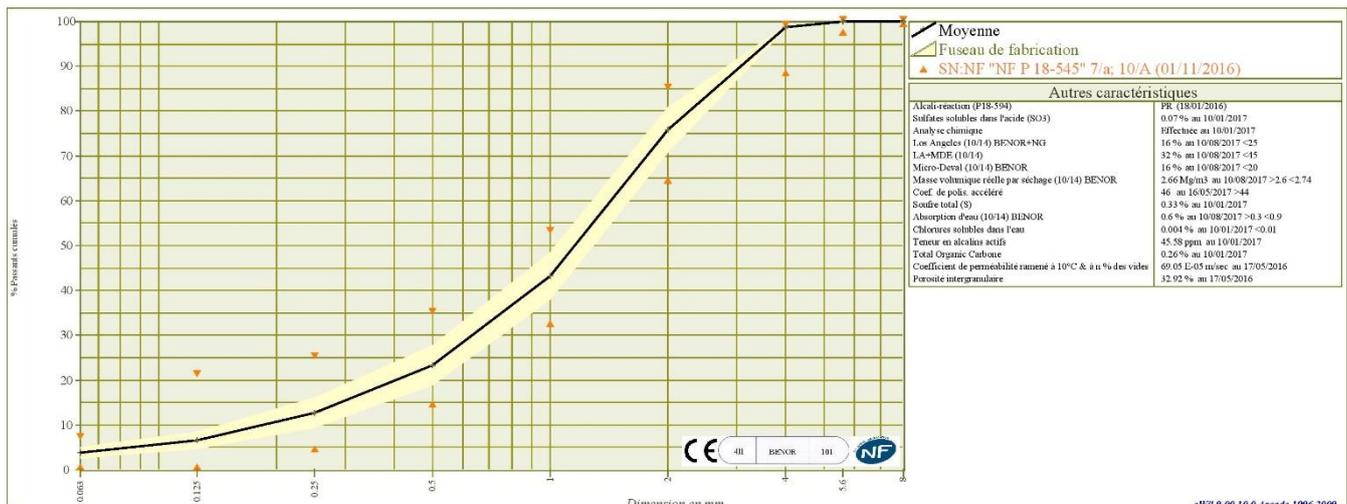
Classe granulaire	Norme	Code
0 4	Interne	NF "NF P 18-545" 7/a; 10/A (01/11/2016)

	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6	8	FM	MB	MVv	GTR<=50	OPM	Wopm
Etendue e	6	20	20	20	20	20	10			0.6					
Incertitude U	1	2	2	4	4	3	2	1		0.15	0.5				
V.S.S.+U	8.0	23	27	39	57	88	100	100		3.8	2.0				
V.S.S.	7.0	21	25	35	53	85	99	100	100	3.7	1.5				
V.S.I.	1.0	1	5	15	33	65	89	98	100	3.1					
V.S.I.-U	0.0	0	3	11	29	62	87	97		3.0					
Ecart-type max	1.82		6.06		6.06	6.06				0.18					

Partie informative

Résultats de production

du 13/03/17 au 29/08/17															
	0.063	0.125	0.25	0.5	1	2	4	5.6	8	FM	MB	MVv	GTR<=50	OPM	Wopm
Maximum	6.7	9	17	30	52	84	99	100	100	3.7	0.9	1.59			
Xf+1.25xEcart-types	5.0	9	16	28	49	81	99	100	100	3.6	0.7	1.53			
Moyenne Xf	3.7	7	13	23	43	76	99	100	100	3.4	0.5	1.45	D11	1.93	9.0
Xf-1.25xEcart-types	2.5	5	9	19	38	71	98	100	100	3.2	0.3	1.36			
Minimum	1.6	4	8	16	35	68	98	100	100	3.1	0.3	1.37			
Ecart-type	1.00	1.5	2.7	3.6	4.3	4.0	0.3	0.0	0.0	0.20	0.10	0.070			
Nombre de résultats	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	41	11	1	1	1



EN 12620 (GF85)
EN 13242 (GF85-GTf10)

Nos produits étant sujets à évolution, merci de nous contacter pour tout engagement ou durée de validité

Producteur : CCB Gaurain **Utilisateur :** CCB France
Granulats : 6/14
Péetrographie : Calcaire
libellé CE-BENOR-NF : Gravillons de concassage
Usage : EN 12620 + EN 13043 - CE 2+
Certificateur : CRIC (0965)
Certificat : 0965-GT-0520

Partie normative

Classe granulaire

6.3 14

Norme

Norme NF P 18-545 Article 10

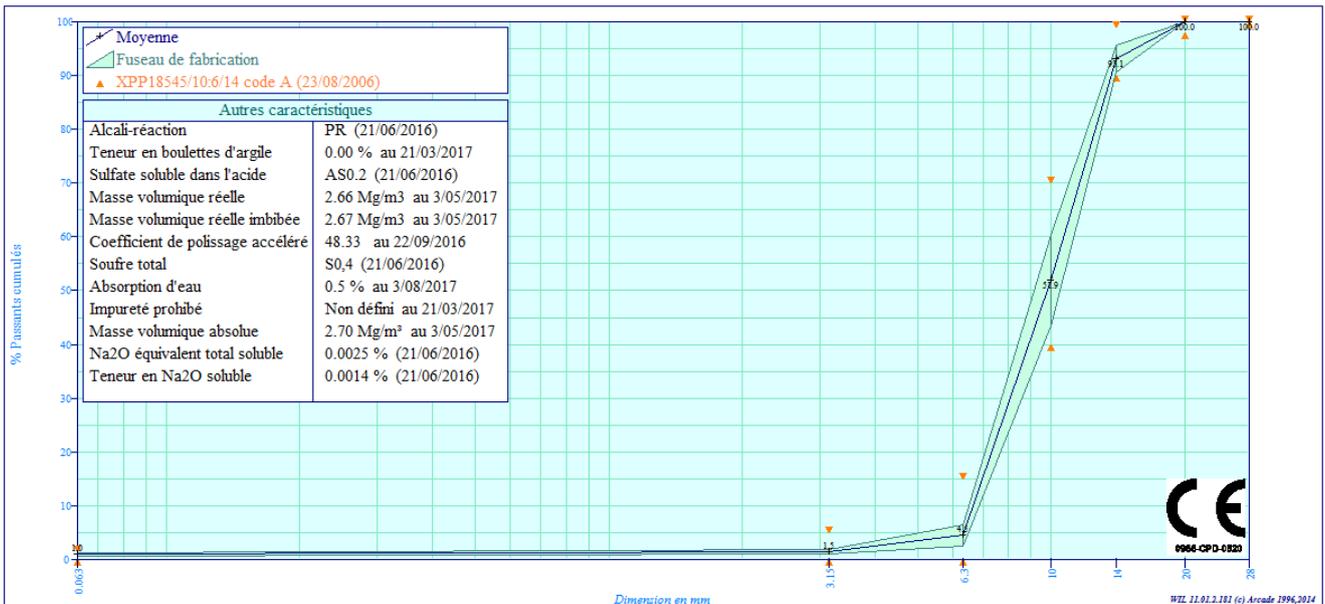
Code

6/14 code A (23/08/2006)

	0.063	3.15	6.3	10	14	20	28	FI	W	LA	LA+MDE	MDE
Etendue e				30								
V.S.S.+U	1.8	6.0	20.0	82.0	100.0			24				
V.S.S.	1.5	5.0	15.0	70.0	99.0			20				
V.S.I.			0.0	40.0	90.0	98.0	100.0					
V.S.I.-U			0.0	28.0	85.0	97.0	100.0					

Partie informative
Résultats de production

	du 10/01/17 au 27/06/17							du 03/09/15 au 08/06/17				
	0.063	3.15	6.3	10	14	20	28	FI	W	LA	LA+MDE	MDE
Maximum	1.4	2.1	9.3	64.6	97.4	100.0	100.0	19	0.9	20	37	17
Xf+1.25xEcart-types	1.3	1.9	6.5	60.3	95.6	100.0	100.0		0.8	19	36	17
Moyenne Xf	1.0	1.5	4.5	51.9	93.1	100.0	100.0	18	0.6	19	35	16
Xf-1.25xEcart-types	0.7	1.1	2.5	43.5	90.6	100.0	100.0		0.4	18	33	15
Minimum	0.5	0.8	2.1	35.5	89.4	100.0	100.0	17	0.3	17	32	15
Ecart-type	0.23	0.31	1.59	6.72	2.03	0.00	0.00	1.0	0.20	1.0	1.0	1.0
Norme								EN 933-3	EN 1097-5	EN 1097-2		EN 1097-1



CHRYSO® Fluid Optima 206

Superplastifiant Haut réducteur d'eau



CHRYSO® Fluid Optima 206 est un superplastifiant de nouvelle génération, à base de polycarboxylate modifié particulièrement recommandé pour le béton prêt à l'emploi et les chantiers de génie civil.

CHRYSO® Fluid Optima 206 est destiné à créer une forte réduction d'eau et/ou une augmentation de l'ouvrabilité du béton. Il permet de réaliser des bétons avec un long maintien d'ouvrabilité sans retard de prise préjudiciable. Ainsi **CHRYSO® Fluid Optima 206** peut être utilisé dans une gamme étendue de bétons.

CHRYSO® Fluid Optima 206 est particulièrement adapté à la formulation de bétons autoplaçants homogènes.

CHRYSO® Fluid Optima 206 est compatible avec la majorité des ciments.

Informations indicatives

- Nature : liquide
- Couleur : Brun vert
- Durée de vie : 12 mois

Spécifications

- Densité (20°C) : 1,050 ± 0,020
- pH : 7,00 ± 2,00
- Extrait sec (halogène) : 20,20 % ± 1,00 %
- Extrait sec (EN 480-8) : 20,30 % ± 1,00 %
- Teneur en Na₂O équivalent : ≤ 1,00 %
- Teneur en ions Cl⁻ : ≤ 0,10 %

Informations normatives et réglementaires

- Ce produit satisfait aux exigences réglementaires du marquage CE. La déclaration correspondante est disponible sur notre site Internet.
- Ce produit est conforme au référentiel de certification NF 085 dont les spécifications techniques sont celles de la partie non harmonisée de la norme NF EN 934-2.
- Ce produit ne favorise pas la corrosion de l'acier enrobé dans du béton (test électrochimique selon la norme DIN V 18998 : 2002-11).
- Adresse AFNOR - 11, Avenue de Pressensé - 93571 Saint Denis La Plaine Cedex

Domaines d'application

- Bétons auto-plaçants
- Bétons de consistance 50 à 210 mm au cône
- BPE
- Ouvrages d'art
- BHP - BTHP

Précautions

Stocker à l'abri du gel.
En cas de gel, ce produit conserve ses propriétés. Après dégel, une agitation efficace est nécessaire jusqu'à l'obtention d'un produit totalement homogène.

Mode d'emploi

Plage de dosage : 0,3 à 3,0 kg pour 100 kg de ciment.

Ce produit doit être incorporé de préférence dans l'eau de gâchage ou en fin de malaxage.



VI.6.5. Fiche technique de l'adhésif X120



X120

Colle

Caractéristiques spécifiques

- Pour installer des fibres optiques ou des capteurs à réseaux de Bragg

Caractéristiques techniques

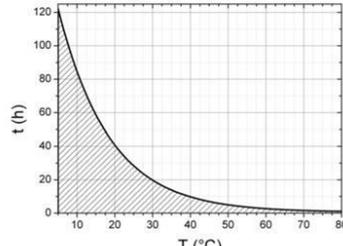
Description

La colle **X120** est une colle **époxy à deux composants durcissant à température ambiante**, spécialement choisie pour l'installation de **fibres optiques**. Elle est compatible avec la plupart des **capteurs à réseaux de Bragg** devant être fixés par collage, y compris les fibres nues. Le mélange peut également servir de **couche protectrice** pour les parcours de câbles et les capteurs.

La X120 est fournie dans une **cartouche de 50 ml**, avec **deux embouts mélangeurs** et nécessite l'emploi d'un **applicateur** pour mélanger les composants et appliquer la colle. Des embouts supplémentaires peuvent également être commandés séparément.

Avantages et applications

- Simple à utiliser
- Excellent transfert des contraintes

X120		Résine	Durcisseur	
	Matériau	s.o.	Résine époxy	
	Couleur	s.o.	Noire	
	Consistance	s.o.	Pâteuse	
	Viscosité ¹⁾	Pa.s	520	100
	Pourcentage solide	%	100	
	Poids spécifique	g/cm ³	1,0	
	Rapport de mélange	s.o.	2	1
	Durée de fluidité ¹⁾	min.	90	
	Température de fonctionnement	°C	-55 ... 120	
	Température de stockage	s.o.	Température ambiante	
	Durée limite de stockage	mois	12	
	Taille de cartouche ²⁾	ml	50	
	Avec embouts mélangeurs	nbre	2	
	Courbe du temps de polymérisation	h/°C		

Référence de commande : 1-X120

B05003_01_F00_00 HBM FiberSensing : public



VI.6.6. Fiche technique de l'adhésif A (2^e page uniquement)

DESCRIPTION DU PRODUIT

Base chimique	Résine époxydique
Conditionnement	Kit prédosé de 6 kg (comp A : 4,5 kg - comp B : 1,5 kg)
Couleur	Composant A: blanc Composant B: noir Mélange A+B: gris clair
Durée de Conservation	24 mois à partir de la date de fabrication. (Voir mention sur étiquette : "best before")
Conditions de Stockage	Stockage dans son emballage d'origine intact, non entamé, à l'abri du gel, de l'humidité et des rayons solaires directs, à une température comprise entre +5°C et +30°C.
Densité	1,65 kg/l + 0,1 kg/l (mélange A+B, à +23°C)

INFORMATIONS TECHNIQUES

Dureté Shore D	≥ 70 (après 48h à +23°C)				
Résistance en Compression	Echéance	Température de durcissement +10°C	Température de durcissement +35°C	(EN 196)	
	12 h	-	~85 MPa		
	1 jour	~55 MPa	~90 MPa		
	3 jours	~70 MPa	~90 MPa		
	7 jours	~75 MPa	~90 MPa		
Module d'Elasticité à la Compression	~9600 MPa (à + 23°C)			(ASTM D695)	
Résistance à la Traction	Echéance	Température de durcissement +15°C	Température de durcissement +35°C	(NF EN ISO 527-3)	
	1 jour	~20 MPa	~26 MPa		
	3 jours	~23 MPa	~27 MPa		
	7 jours	~26 MPa	~29 MPa		
Module d'Elasticité en Traction	~11200 MPa (à + 23°C)			(ISO 527)	
Résistance au Cisaillement	Echéance	Temp. durcissement + 15°C	Temp. durcissement + 23°C	Temp. durcissement + 35°C	(FIP 5.15)
	1 jour	~4 MPa	-	~17 MPa	
	3 jours	~15 MPa	-	~18 MPa	
	7 jours	~16 MPa	~18 MPa ⁽¹⁾	~18 MPa	
	Rupture du béton (~ 15 MPa) ⁽¹⁾ (EN ISO 4624)				
Retrait	0,04%			(FIP : Fédération Internationale de la Précontrainte)	
Tensile Adhesion Strength	Echéance	Support	Temp. durcissement	Adhérence	(EN ISO 4624, EN 1542, EN 12188)
	7 jours	Béton durci	+23°C	> 4 MPa ⁽¹⁾	
	7 jours	Acier	+23°C	> 21 MPa ⁽²⁾	
	⁽¹⁾ 100% rupture dans le support béton ⁽²⁾ sur support décapé par projection d'abrasifs suivant le degré de soin Sa. 2.5				
Coefficient d'Expansion Thermique	2,5.10 ⁻⁵ par °C (température de -20°C à +40°C)			(EN 1770)	

Notice Produit
Sikadur®-30
Décembre 2017, Version 03.01
020206040010000001

VI.7. Première page de l'article publié dans la revue *Sensors*



Article

Experimental and Numerical Investigation on the Strain Response of Distributed Optical Fiber Sensors Bonded to Concrete: Influence of the Adhesive Stiffness on Crack Monitoring Performance

Ismail Alj^{1,*} , Marc Quiertant¹ , Aghiad Khadour², Quentin Grando³, Benjamin Terrade¹, Jean-Claude Renaud¹ and Karim Benzarti⁴ 

¹ MAST, EMGCU, Gustave Eiffel University, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-Vallée, France; marc.quiertant@univ-eiffel.fr (M.Q.); benjamin.terrade@univ-eiffel.fr (B.T.); jean-claude.renaud@univ-eiffel.fr (J.-C.R.)

² COSYS, LISIS, Gustave Eiffel University, IFSTTAR, F-77447 Marne-la-Vallée, France; aghiad.khadour@univ-eiffel.fr

³ PSN-RES, SEREX, Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire (IRSN), CEDEX 13115 Saint-Paul-Lez-Durance, France; quentin.grando@irsn.fr

⁴ Laboratoire Navier, Gustave Eiffel University, F-77447 Marne-la-Vallée, France; karim.benzarti@univ-eiffel.fr

* Correspondence: ismail.alj@univ-eiffel.fr; Tel.: +33-181668165

Received: 11 August 2020; Accepted: 7 September 2020; Published: 9 September 2020



Abstract: The present study investigated the strain response of a distributed optical fiber sensor (DOFS) sealed in a groove at the surface of a concrete structure using a polymer adhesive and aimed to identify optimal conditions for crack monitoring. A finite element model (FEM) was first proposed to describe the strain transfer process between the host structure and the DOFS core, highlighting the influence of the adhesive stiffness. In a second part, mechanical tests were conducted on concrete specimens instrumented with DOFS bonded/sealed using several adhesives exhibiting a broad stiffness range. Distributed strain profiles were then collected with an interrogation unit based on Rayleigh backscattering. These experiments showed that strain measurements provided by DOFS were consistent with those from conventional sensors and confirmed that bonding DOFS to the concrete structure using soft adhesives allowed to mitigate the amplitude of local strain peaks induced by crack openings, which may prevent the sensor from early breakage. Finally, the FEM was generalized to describe the strain response of bonded DOFS in the presence of crack and an analytical expression relating DOFS peak strain to the crack opening was proposed, which is valid in the domain of elastic behavior of materials and interfaces.

Keywords: distributed optical fiber sensor (DOFS); strain measurement; polymer adhesive; Young's modulus; finite element modelling; crack opening

1. Introduction

Structural health monitoring (SHM) is a crucial approach in the framework of maintenance and safety management plans of civil structures and nuclear power plants and still remains an active field of research and development. Optical fiber (OF) sensor systems are now considered as one of the most promising technologies for the monitoring of civil engineering structures as this technology is capable of measuring various types of measurands such as pH, temperature, moisture, corrosion, strain, cracks, and parameters related to the chemical composition of the host medium [1–6]. However, before selecting an instrumentation for SHM, both the performance of the measurement chain (including