



HAL
open science

Capteurs de corrosion à fibre optique pour la surveillance répartie d'ouvrages en béton armé

Shamyr Sadat Ali-Alvarez

► **To cite this version:**

Shamyr Sadat Ali-Alvarez. Capteurs de corrosion à fibre optique pour la surveillance répartie d'ouvrages en béton armé. Matériaux et structures en mécanique [physics.class-ph]. Université Grenoble - Alpes, 2016. Français. NNT : 2016GREAI042 . tel-02274655

HAL Id: tel-02274655

<https://hal.science/tel-02274655v1>

Submitted on 30 Aug 2019

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

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Matériaux, Mécanique, Génie civil, Electrochimie**

Arrêté ministériel : 7 août 2006

Présentée par

Shamyr Sadat ALI ALVAREZ

Thèse dirigée par **Ricardo NOGUEIRA** et
codirigée par **Pierre FERDINAND** et **Sylvain MAGNE**

préparée au sein du *Laboratoire Capteurs et Architectures
Electroniques* (LCAE) du CEA/SACLAY et du *Laboratoire
Electrochimie et de Physicochimie des Matériaux et des Interfaces*
de l'Université de Grenoble, dans l'**École Doctorale I-MEP2**

Capteurs de Corrosion à Fibre Optique pour la surveillance répartie d'ouvrages en béton armé

Thèse soutenue publiquement le 19 septembre 2016 devant le jury composé de :

Pr Frédéric RAGUENEAU

Laboratoire de Mécanique et Technologie (LMT), ENS-Cachan, Président

Pr Francis COLLOMBET

IUT GMP de Toulouse, HDR, Rapporteur

M. Dominique PAGNOUX

XLIM, Université de Limoges, Chargé de Recherches CNRS, HDR,
Rapporteur

Pr Ricardo NOGUEIRA

Professeur au LEPMI, UJF Grenoble, Directeur de thèse

Mme Valérie L'HOSTIS

CEA/SACLAY (DEN/DANS/LECBA), Ingénieur de Recherche, HDR,
Examinatrice

M. Sylvain MAGNE

CEA/SACLAY (DRT/LIST/LCAE), Ingénieur de recherche, HDR, Encadrant

Mme Virginie ROCHE

UJF LEPMI Grenoble, Maitre de Conférences, Invitée



À ma mère et à mon père...

Remerciements

Ce travail a été réalisé au sein du CEA LIST (DM2I/LCAE), basé au CEA Saclay, sous la direction de M. Pierre FERDINAND.

Ce travail de thèse a été mené sous la tutelle scientifique du Pr. Ricardo NOGUEIRA, Directeur du Laboratoire d'Electrochimie et de Physicochimie des Matériaux et des Interfaces (LEPMI). Je remercie M. NOGUEIRA d'avoir accepté d'être examinateur de cette thèse.

Je remercie M. Frédéric RAGUENEAU, Professeur au Laboratoire de Mécanique et Technologie (LMT) de l'ENS-Cachan, de m'avoir fait l'honneur de présider cette thèse.

Je remercie également vivement M. Francis COLOMBET, Professeur à l'IUT de Toulouse (Génie Mécanique et Productique) et M. Dominique PAGNOUX, Chargé de Recherches CNRS à XLIM, Université de Limoges d'avoir accepté d'être rapporteurs de cette thèse.

J'adresse mes plus vifs remerciements à Mme Valérie L'HOSTIS, chercheur au CEA/SACLAY, Chef du Laboratoire d'Etude du Comportement des Bétons et des Argiles (LECBA), pour son support technique dans le domaine du génie civil, et pour sa participation en tant qu'examinatrice de cette thèse.

Un grand merci également à Melle Virginie ROCHE, chercheur au LEPMI, pour son aide précieuse dans la mise en œuvre des expérimentations d'électrochimie. C'est avec plaisir que j'accueille Virginie ROCHE en tant que membre invitée dans le jury de cette thèse.

Je tiens à remercier M. Sylvain MAGNE, ingénieur de recherche au CEA LIST (DM2I-LCAE), pour les conseils scientifiques précieux qu'il m'a apportés durant ce travail ainsi que pour son aide pour la rédaction finale du mémoire de thèse.

Mes sincères remerciements vont également aux équipes du LCAE (Saclay) et du LEPMI (Grenoble) pour leur collaboration durant ce travail.

À ma sœur, qui m'a soutenu pendant cette aventure.

À ma femme, qui a patienté pendant des longues journées de travail.

Et mes remerciements les plus chaleureux à ma mère et à mon père, qui se trouvent à plusieurs milliers de kilomètres, et qui m'ont toujours soutenu.

Capteurs de Corrosion à Fibre Optique pour la surveillance repartie d'ouvrages en béton armé

Résumé

La corrosion des armatures de renforcement des structures en béton représente un enjeu socio-économique majeur. Sa détection et le suivi de son évolution constituent un défi pour la recherche appliquée. Les techniques standards non destructives de détection de corrosion mettent en œuvre des procédés indirects tels la mesure d'impédance, de potentiels, ou par ultrasons. Leurs capacités d'auscultation sont limitées dans l'espace (notamment en profondeur), leur coût reste élevé dans un contexte de maintenance périodique et elles conduisent à des paramètres d'interprétation complexe. Des progrès sont nécessaires dans la détection et l'analyse fiable de la progression des processus de corrosion. Dans ce travail, nous présentons une nouvelle méthode pour détecter la corrosion et le suivi de son évolution, basée sur une observation directe à l'interface fer-béton par Capteur à Fibre Optique (CFO). L'attaque par corrosion de la surface de l'armature dépend de plusieurs paramètres électrochimiques (température, *pH*, carbonatation, présence de chlorures, contamination biologique, etc.). Deux comportements mécaniques à l'interface fer-béton sont distingués. Dans le premier cas (corrosion généralisée par front de carbonatation), le produit d'oxydation du métal reste à l'interface et augmente la pression interne, pouvant conduire à la fissuration de la couche de béton extérieure. Dans le second cas (corrosion localisée par piqures), les ions métalliques sont évacués hors de la structure par les fissures existantes avec comme conséquence une réduction de section des barres d'armature (affaiblissement du renforcement). Un CFO innovant est proposé dans le but de localiser et quantifier les deux types de corrosion précités. Le principe consiste à observer l'impact direct de la corrosion sur l'état de déformation d'une fibre optique préalablement précontrainte par construction. Deux procédés métrologiques sont étudiés : Bragg et réflectométrie fréquentielle (*Optical Frequency-Domain Reflectometry* - OFDR). Des tests de corrosion accélérée montrent la faisabilité du procédé. Une procédure de fabrication simplifiée et à coût optimisé est proposée pour la surveillance *in situ* et repartie des structures de génie civil, dans une perspective future de maintenance conditionnelle.

Mots clés : Corrosion, béton armé, armature, Capteur à Fibre Optique (CFO), Réseau de Bragg, Réflectométrie fréquentielle, Surveillance de structures, Maintenance conditionnelle.

Thèse préparée au sein des laboratoires :

LEPMI

Laboratoire d'Electrochimie et de Physicochimie
des Matériaux et des Interfaces
UMR5279
1130 rue de la piscine
38402 Saint-Martin d'Hères cedex

LCAE

Laboratoire Capteurs Architectures
Electroniques,
CEA LIST (DM2I-LCAE)
CEA/Saclay
Gif-sur-Yvette 91191 cedex

Distributed corrosion sensing in reinforced concrete structures by optical fiber sensing

Abstract

Corrosion of reinforced bars (rebars) in concrete structures remains a major issue in civil engineering works, being its detection and evolution a challenge for the applied research. Usual non-destructive corrosion detection methods involve impedance, potential or ultra-sonic indirect measurements of complex interpretation. Besides, they are restricted to near-surface examinations and the maintenance cost is still high (scheduled maintenance). Many efforts remain to be done to survey the onset and progression of corrosion processes in a reliable way. In this work, we present a new methodology to detect the onset of corrosion and to monitor its evolution, based on the direct observation at rebar–concrete interface by use of an Optical Fiber Sensor (OFS). The corrosion attack over rebar surface depends on several physical, chemical and electrochemical parameters (temperature, pH, presence of chlorides/CO₂, biological contamination, etc.). Two types of mechanical behavior are described. In the first case (carbonation front; generalized corrosion), metal oxidation products stay at the interface and increase internal pressure, potentially leading to a crack of the external concrete layer. In the second case (localized pitting), metal ions are evacuated out of the structure through cracks, leading to a reduction of the rebar section (structural weakness). An innovative sensor design is proposed with the purpose of localizing and quantifying the amount of both corrosion types. The basic principle consists in measuring the impact of corrosion over the state of strain of a prestressed optical fiber. Two metrological techniques are used: Fiber Bragg Grating (FBG) and Optical Frequency-Domain Reflectometry (OFDR). Accelerated corrosion tests were performed in electrolytic solutions for both kinds of corrosion types (pitting and carbonation) and provide a proof-of-concept for the technique. A low-cost, simplified manufacturing procedure is proposed with the aim to provide distributed and *in situ* Structural Health Monitoring (SHM), suitable for future Condition-Based Maintenance (CBM) of civil engineering concrete structures.

Keywords: Corrosion, concrete, Reinforcing-bar (rebar), Optical Fiber Sensor (OFS), Fiber Bragg Grating (FBG), Optical Frequency-Domain Reflectometry (OFDR), Structural Health Monitoring (SHM), Condition-Based Maintenance (CBM).

Thesis developed within the laboratories:

LEPMI

Laboratoire d'Electrochimie et de Physicochimie
des Matériaux et des Interfaces
UMR5279
1130 rue de la piscine
38402 Saint-Martin d'Hères cedex

LCAE

Laboratoire Capteurs Architectures
Electroniques,
CEA LIST (DM2I-LCAE)
Centre CEA de Saclay
Gif-sur-Yvette 91191 cedex

Table des matières

Remerciements	5
Résumé	7
Abstract	9
Introduction	19
Chapitre 1 : Contexte du problème	23
1.1 La Corrosion dans les structures en béton armé	24
1.2 Conséquences économiques	25
1.3 Pourquoi mesurer la corrosion ?	26
1.3.1 La maintenance conditionnelle.....	27
1.4 La fibre optique comme solution	28
1.5 Limites de la recherche	28
Chapitre 2 : La corrosion des structures de béton armé	31
2.1 Le béton armé	32
2.1.2 Le béton.....	32
2.1.2.1 Le ciment	32
2.1.2.2 Les granulats	33
2.1.2.3 Adjuvants	34
2.1.2.4 Eau de gâchage.....	34
2.1.2.5 Formulation.....	34
2.1.3 Les armatures.....	35
2.1.3.1 Corrosion des métaux	36
2.2 Mécaniques de dégradation du béton armé	39
2.3 Indicateurs physico-chimiques d'une situation de corrosion des armatures	42
2.4 Techniques de mesure traditionnelles	43
2.4.1 Analyse non destructive par auscultation de l'ouvrage.....	44
2.4.1.1 Détection par ultrasons	44
2.4.1.2 Détection électrique	45
2.4.2 Analyse destructive par prélèvement	48

2.5 Conclusion	48
Chapitre 3 : Capteurs à Fibre Optique	51
3.1 La fibre optique.....	52
3.1.3 Caractéristiques.....	53
3.1.3.1 Atténuation.....	53
3.1.3.2 Dispersion chromatique	54
3.1.3.3 Non-linéarité	54
3.1.3.4 Dispersion modale de polarisation (<i>Polarization-mode dispersion</i> PMD).....	54
3.1.4 Fibres monomodes et multimodes	55
3.1.4.1 Fibres multimodes.....	55
3.1.4.2 Fibres monomodes	55
3.1.4.3 Longueur d'onde de coupure et fréquence normalisée.....	55
3.2 La fibre comme capteur	56
3.3 Procédés de mesure optique	58
3.3.1 Procédé de réflectométrie OTDR (<i>Optical Time Domain Reflectometry</i>).....	58
3.3.2 Procédé de diffusion Raman.....	59
3.3.3 Procédé de diffusion Brillouin.....	59
3.3.4 Procédé Bragg.....	60
3.3.5 Procédé OFDR (<i>Optical Frequency - Domain Reflectometry</i>)	62
3.4 Conclusions	64
Chapitre 4 : Etat de l'art CFO de Corrosion	67
4.1 Capteur de corrosion colorimétrique	68
4.1.1 Procédé de P. Fuhret <i>al.</i> [48].....	68
4.1.2 Procédé de N. Singh <i>et al.</i> [49]	69
4.2 Capteur de corrosion en intensité lumineuse	69
4.2.1 Procédé de J. Sirkis [50]	69
4.2.2 Procédé de S. Dong <i>et al.</i> [51]	70
4.2.3 Expérience de C.K.Y. Leung [52]	71
4.2.4 Expérience de Y.L. Lo <i>et al</i> [53]	72
4.2.5 Expérience de Martins-Filho <i>et al.</i> [54].....	73
4.3 Capteurs de corrosion reposant sur un effet mécanique	73

4.3.1 Procédé d'E. Uddet <i>et al.</i> [55]	73
4.3.2 Expérience de Zheng <i>et al.</i> [56]	75
4.3.3 Expérience de Gao <i>et al.</i> [57].....	76
4.3.4 Expérience de Grattan <i>et al.</i> [58]	76
4.3.5 Expérience de S.A. Wade <i>et al.</i> [59]	77
4.3.6 Expérience de Lo <i>et al.</i> [60]	77
4.3.7 Expérience de Lee <i>et al.</i> [61]	77
4.3.8 Expérience de Mc Cague <i>et al.</i> [62]	78
4.3.1 Expérience de Zhang <i>et al.</i> [63]	79
4.4 Capteurs de corrosion réflectométriques.....	79
4.4.2 Expérience de Sinchenko <i>et al.</i> [64].....	79
4.4.3 Expérience de Cooper <i>et al.</i> [65].....	79
4.4.4 Expérience de T. Hien Nguyen <i>et al.</i> [66].....	80
4.5 Conclusion	80
Chapitre 5 : Conception du capteur	83
5.1 Considérations de conception.....	84
5.1.1 Corrosion : variables « directes » vs « intermédiaires »	84
5.1.2 capteurs « physiques » vs « chimiques ».....	84
5.1.3 Mesure « continue » vs « discrète ».....	84
5.1.4 Résolutions spatiale et sensibilité : technique d'interrogation optique	85
5.2 Conception du capteur.....	85
5.3 Conclusions	87
Chapitre 6 : Mesure directe par FBG.....	89
6.1 Principe du capteur de corrosion par FBG	90
6.2 Mise en œuvre	91
6.2.5 Corrosion en solution électrolyte : relâchement de la précontrainte	91
6.2.6 Corrosion en espace confiné : superposition des forces compressives.....	96
6.2.7 Corrosion aléatoire : un scénario plus complexe.....	98
6.3 Conclusions	100
Chapitre 7 : Mesure directe par OFDR	101

7.1 Principe du capteur de corrosion par OFDR	102
7.2 Mise en œuvre	102
7.2.8 Corrosion par piqures	104
7.2.9 Corrosion générale	104
7.3 Conclusions	106
Chapitre 8 : Mesure répartie par CFO	107
8.1 Principe du capteur de corrosion par OFDR segmenté	108
8.2 Réalisation du capteur de corrosion segmenté.....	109
8.3 Corrosion accélérée du CFO segmenté en milieu aqueux	110
8.4 Expériences de corrosion aqueuse accélérée sur CFO segmenté	113
8.5 Conclusions	118
Chapitre 9 : Conclusion et perspectives.....	120
Bibliographie	125

Liste des figures

Figure 1	: Le béton dans les constructions modernes.....	24
Figure 2	: Effondrement du pont I-35W sur le fleuve Mississippi.....	25
Figure 3	: Classement de la corrosion et leurs coûts associés aux <i>USA</i>	26
Figure 4	: Produits de corrosion d'un acier dans un béton pollué.....	37
Figure 5	: Diagramme de Pourbaix simplifié du fer	38
Figure 6	: Fissure du béton à cause de la corrosion	39
Figure 7	: Évacuation par les fissures ouvertes des dérivés d'oxyde de fer	40
Figure 8	: Volume relatif des différents sous-produits de la corrosion.....	41
Figure 9	: Exemple d'auscultation par GPR.....	45
Figure 10	: Résistivité du béton	47
Figure 11	: Technique de mesure de potentiel électrochimique.....	48
Figure 12	: Schéma de la fibre optique.....	52
Figure 13	: Phénomènes de diffusion dans la fibre.....	57
Figure 14	: Exemple de signal obtenu par un OTDR	58
Figure 15	: Procédé de P. Fuhr <i>et al.</i> [48].....	68
Figure 16	: Procédé de J. Sirkis [50].....	69
Figure 17	: Procédé de S. Dong <i>et al.</i> [51].....	70
Figure 18	:Expérience de C.K.Y. Leung [52]	71
Figure 19	: Schéma de principe du CFO proposé par E. Udd <i>et al</i> [55]	74
Figure 20	: Schéma de principe du CFO proposé par Z. Zheng <i>et al.</i> [56].....	75
Figure 21	: Schéma de du CFO de corrosion proposé par J-R Lee <i>et al.</i> [61].....	78
Figure 22	: Relation entre corrosion et pression à l'interface - carbonatation.....	86
Figure 23	: Relation entre corrosion et pression a l'interface - piqures	86

Figure 24 : Principe du capteur de corrosion combiné.....	87
Figure 25 : Schéma du capteur à Réseau de Bragg.....	90
Figure 26 : Longueur d'onde centrale (MPW) à différents étapes.....	92
Figure 27 : Évolution de la longueur d'onde centrale - <i>MPW</i>	96
Figure 28 : Fracture de l'échantillon	97
Figure 29 : Evolution du MPW (carrés) et potentiel de corrosion (triangles)	98
Figure 30 : Comportement global du spectre mesuré.....	99
Figure 31 : Principe de fonctionnement du capteur de corrosion OFDR.....	102
Figure 32 : Mise en place de l'expérience CFO OFDR.....	103
Figure 33 : Évolution du décalage de fréquence et potentiel électrochimique.....	104
Figure 34 : Evolution du décalage spectral CFO OFDR	105
Figure 35 : Synthèse du test CFO OFDR	106
Figure 36 : Principe de fonctionnement du capteur de corrosion segmenté	108
Figure 37 : Capteur de corrosion segmenté	109
Figure 38 : Expérience de corrosion accélérée en milieu aqueux du CFO segmenté	112
Figure 39 : Vue de la connectique en cuivre à l'intérieur de l'aquarium	112
Figure 40 : Traces de rétrodiffusion de la ligne optique collée sur le CFO segmenté	113
Figure 41 : Relevés fréquentiels enregistrés sur le capteur segmenté.....	114
Figure 42 : Relevés fréquentiels enregistrés durant le 3ème jour.	115
Figure 43 : Relevés fréquentiels enregistrés sur le CFO segmenté après une polarisation ininterrompue durant 3 jours, puis observation durant le 4 ^{ème} jour.....	116
Figure 44 : Amplitudes de fréquences relevées sur les segments corrodés du CFO segmenté et ajustement par une fonction racine carrée du temps sur les deuxième et troisième segments.....	117
Figure 45 : Vue du CFO à la fin de l'essai de corrosion accélérée (connecteur sur gaine noire, à droite)	117
Figure 46 : Évolution du profil fréquentiel OFDR du CFO segmenté pour différentes températures du bain	118

Liste des tableaux

Tableau 1 : Liste des matières premières.....	25
Tableau 2 : Composition typique des ciments type Portland	33
Tableau 3 : Les granulats les plus utilisés	33
Tableau 4 : Caractéristiques mécaniques de la nuance <i>Fe E-500</i>	35
Tableau 5 : Composition chimique de fers à béton.....	36
Tableau 6 : Valeurs expérimentales du MPW	92

Introduction

L'utilisation de mortiers à base de chaux, d'argile, de sable et d'eau pour la construction est ancienne (les égyptiens utilisaient ce type de mortier vers 2600 av. J.C. et les romains formaient des mélanges de chaux et de pouzzolanes (sable volcanique de Pouzzole (baie de Naples)) dès 100 ap. J.C.) mais son savoir-faire a été perdu au moyen-âge.

Dans la seconde moitié du 18^{ème} siècle, des recherches sur les ciments ont été à nouveau menées en Angleterre (Smeaton, Higgins) et en France (Chaptal, Vicat).

La découverte du ciment est attribuée à Louis Vicat, qui fut le premier en 1818 à fabriquer de manière artificielle des chaux hydrauliques dont il détermina les composants ainsi que leur proportion. L'industriel anglais Joseph Apsdin déposa le premier brevet en 1824 et créa la marque *Portland*.

Le béton constitué de granulats (graviers, sable), de ciment et d'eau est un matériau évolutif à maturation progressive. Initialement à l'état liquide, il évolue vers un état viscoélastique durant les premières heures puis durcit pour enfin présenter des résistances mécaniques importantes (maturation sur une période de 28 jours).

Il s'agit d'un matériau peu coûteux, aisé à mettre en forme.

Cependant, la réaction de prise du béton (réaction d'hydratation) est exothermique et conduit à un rétreint à l'issue de la prise pouvant faire apparaître des fissurations dans l'ouvrage. La construction de structures en béton est ainsi encadrée par des normes (Eurocodes, e.g. EN 13670).

De plus, la résistance en traction du béton est d'environ 10 % à 15 % de sa résistance en compression. Selon les types de béton, les résistances en compression sont comprises entre 16 et 50 MPa pour des bétons standards et entre 60 MPa à 100 MPa pour des bétons à haute performance (BHP). Les résistances en traction sont donc limitées à quelques MPa, ce qui correspond à des amplitudes de déformation très faibles de l'ordre de 100 μ déformations (en considérant un module d'Young typique de 30 GPa). A titre de comparaison, les aciers tolèrent des

déformations pouvant atteindre quelques milliers de μ déformations (quelques 0,1 %) et les matériaux composites carbone-époxy peuvent supporter des déformations de l'ordre du pourcent.

Des procédés de renforcement ont ainsi été mis au point à l'aide d'armatures passives (« fers à béton »). Parallèlement, la mise en précontrainte du béton à l'aide d'armatures actives (tendons de précontraintes, vérins plats) a aussi permis d'accroître la gamme de déformation d'usage (Eugène Freyssinet, 1935).

Les armatures en acier au carbone présentent un coefficient de dilatation équivalent à celui du béton (typiquement $10^{-5} K^{-1}$) et confèrent une rigidité importante au béton armé compte-tenu de leur module d'Young élevé ($\sim 200 GPa$). Enfin, celles-ci sont protégées naturellement de la corrosion en vertu du pH élevé du béton (~ 13) qui entraîne une passivation de l'interface.

Une diminution du pH (e.g. carbonatation liée à la pollution atmosphérique) peut entraîner une dépassement susceptible de déclencher un processus de corrosion dite généralisée. De même, la présence de chlorures (sels de déverglaçage, bords de mer) peut entraîner une corrosion localisée par piqûres avec pour conséquence une réduction de section des barres d'armature (affaiblissement du renforcement). Les oxydes métalliques produits (Fe_2O_3 , Fe_3O_4) présentent une masse volumique plus réduite que le fer. Ainsi, en l'absence de fissures permettant aux produits d'oxydation de s'écouler, une augmentation de pression peut apparaître à l'interface fer-béton consécutive à leur expansion et entraîner un éclatement de l'enrobage. L'apparition de fissures accélère alors le processus de corrosion en favorisant la migration des espèces corrosives.

La corrosion est identifiée comme une des pathologies affectant les ouvrages de génie civil, avec un impact sur sa fiabilité. On identifie une période d'incubation, période durant laquelle les agents agressifs transitent dans le béton mais où aucune dégradation n'est encore visible à l'échelle macroscopique [1]. Une période de propagation des fissures suit alors cette phase, conduisant à la ruine de l'ouvrage.

La durée de vie d'une structure de génie civil est alors définie comme la durée de service sans précaution particulière (i.e. protection cathodique, réparation de fissures, etc.). La norme *EN-1990* (Eurocode 0) propose au maître d'ouvrage des valeurs de durée de vie minimale des constructions en fonction de leur catégorie.

S'il convient de prévenir la migration des agents corrosifs (e.g. chlorures) afin d'accroître la période d'incubation, il est bien évident que la durée de service d'une structure excède souvent en pratique la durée de vie prescrite par cette définition conservatoire, essentiellement pour des raisons économiques, lorsqu'une réparation s'avère moins coûteuse qu'une reconstruction.

Dans ce contexte, la corrosion des armatures de renforcement des structures en béton représente un enjeu socio-économique majeur.

Selon Rochdi [2], le coût de la surveillance et de l'entretien des ouvrages en France représentait plus de 500 millions d'Euros/an en 1999 (100 fois plus aux USA). A ce coût qui concerne la maintenance et les travaux de réhabilitations, il convient de rajouter le coût indirect lié aux interruptions d'usage.

Toujours selon [2], le coût lié à l'entretien et à la réparation d'une structure serait d'environ 80 % du coût total de la structure sur 50 ans, le coût de sa maîtrise d'œuvre et de sa réalisation n'étant que de 20 %.

Ces chiffres justifient l'intérêt économique de déployer une stratégie de maintenance adaptée aux pathologies rencontrées dans les ouvrages. Celle-ci est pour le moment périodique (programmée) et met en œuvre des procédés indirects tels la mesure d'impédance, de potentiels, ou par ultrasons. Leurs capacités d'auscultation sont limitées dans l'espace (notamment en profondeur), leur coût reste élevé dans un contexte de maintenance périodique et elles conduisent à des paramètres d'interprétation complexe.

Des progrès sont nécessaires dans le procédé de détection et d'analyse de la corrosion afin de le rendre plus fiable et moins probabiliste mais aussi dans la stratégie de maintenance qui doit évoluer vers une maintenance conditionnelle dans le but d'optimiser les coûts, *i.e.* ne déclencher une opération de maintenance qu'en cas de nécessité et là où cela s'avère nécessaire.

Chapitre 1 : Contexte du problème

L'objectif de ce chapitre est de faire un rappel des enjeux technico-économiques liés à la corrosion. Les opérateurs ont besoin de diagnostics améliorés pour pouvoir intervenir de manière plus efficace sur les ouvrages, augmenter leur durée de vie, avec un impact minimal (tant économique que sociétal) sur le service pendant les interventions de réparation.

1.1 La Corrosion dans les structures en béton armé

L'utilisation du béton en combinaison avec l'acier est une technique utilisée pour diminuer les coûts de construction, par rapport à la fabrication d'une structure entièrement en acier. Le béton offre de bonnes caractéristiques physiques en compression, mais son talon d'Achille est sa relative faiblesse en traction. Ceci est la raison pour laquelle l'acier est utilisé comme colonne vertébrale en compensation (« béton armé »). L'acier est aussi parfois utilisé comme structure de précontrainte (« béton précontraint »). Le béton fonctionne alors essentiellement en compression dans un domaine de déformation plus étendu.

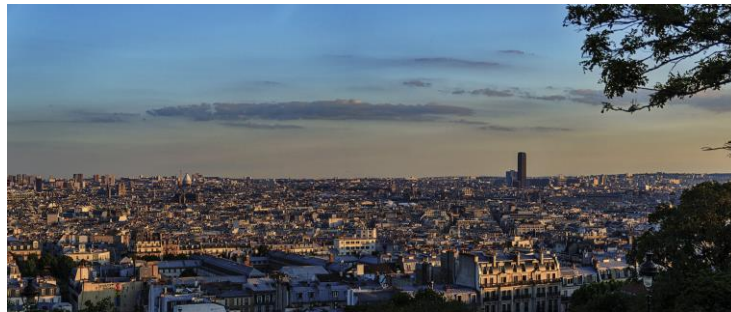


Figure 1: Le béton dans les constructions modernes.
Le béton armé est le matériel artificiel le plus utilisé dans le monde (photo en accès libre)

Le béton est obtenu à partir de granulats agglomérés par un ciment - qui constitue environ 1/6 du volume total - et d'eau. Selon l'*US Geological Survey*, la production mondiale de ciment pour l'année 2013 était de 4 milliards de tonnes [3]. Par conséquent, ce volume de production place le béton comme le matériau artificiel le plus utilisé au monde (Tableau 1) [4]. La figure 1 illustre à titre d'exemple la densité des structures en béton dans la ville de Paris.

La présence d'un métal (essentiellement de l'acier) dans le béton sous forme d'armature introduit cependant un facteur de risque lié à la possible apparition de phénomènes de corrosion pouvant dégrader la résistance mécanique de la structure. L'actualité mentionne fréquemment des exemples d'effondrements de structures de génie civil consécutifs à une dégradation par corrosion, par exemple des ponts : *Silver Bridge* (Ohio, Etats-Unis), *Mianus River Bridge* (Connecticut, Etats-Unis) et *I-35W Mississippi River bridge* (Minneapolis, Etats-Unis), comme illustré dans la figure 2.

Share of global GDP 1997 (percent)	Cumulative share of global GDP 1997 (percent)	Raw material	Total price in billion US\$ 1997	Cumulative price in billion US\$ 1997	Amount produced	Price per kilo	Reserve	Reserve base	Years of consumption at stable 1997 consumption ^{100%}
0.376	1.10	Cement	111.8	327.4	1.5 Gt	€7.45	Sufficient		
0.118	0.73	Aluminium	35.1	215.7	21.2 Mt	\$1.65	23 Gt (Bauxite)		243
0.105	0.61	Iron ore	31.3	180.6	1.03 Gt	€3.04	240 Gt		228
0.089	0.50	Copper	26.4	149.3	11.3 Mt	\$2.34	320 Mt	630 Mt	56
0.089	0.41	Gold	26.4	122.9	2300 t	\$11,464	45,000 t	72,000 t	31
0.062	0.32	Nitrogen	18.4	96.5	96 Mt	€19.20	Sufficient		
0.045	0.26	Zinc	13.4	78.1	7.8 Mt	\$1.72	190 Mt	430 Mt	55
0.030	0.22	Gemstones	9.0	64.7	350,000 t				
0.025	0.19	Nickel	7.5	55.7	1.08 Mt	\$6.93	40 Mt	140 Mt	130
0.024	0.16	Crushed stone	7.2	48.2	1.33 Gt	€0.54	Sufficient		
0.015	0.14	Mica, sheet	4.4	41.0	3.7 Mt	\$1.20	Large		
0.014	0.12	Sand and gravel for	4.3	36.6	961 Mt	€0.45	Large		

Tableau 1: Liste des matières premières
Le ciment, constituant du béton, se place comme la première matière première en termes de production annuelle. Source : Lomborg [4]

1.2 Conséquences économiques

Selon les pays, les coûts de réparation et de restauration des structures corrodées peuvent constituer un poste important des dépenses d'infrastructures. Ainsi, les structures construites dans des zones à climat chaud et humide, en bords de mer ou sous climat froid soumis aux sels de déverglaçage (États-Unis, Canada, nord de l'Europe) sont particulièrement exposées. En contrepartie, les structures construites en pays chauds et secs (Mexique, Nord de l'Afrique, etc.) sont relativement épargnées.



Figure 2 : Effondrement du pont I-35W sur le fleuve Mississippi
Source : ABC News

Aux coûts de réparation s'ajoutent les coûts d'arrêt d'exploitation qui impactent directement l'activité socio-économique. Pour donner un exemple, en 2013 :

4,7 millions de voitures et 338.000 poids lourds ont transité par le viaduc de Millau. Une interruption d'un jour de service est équivalente à 100.000 euros de pertes de rentabilité [5]. Ainsi, les travaux de réparations accusent des retards souvent importants en raison des budgets d'entretien limités dont disposent la plupart des exploitants et des collectivités publiques.

A titre d'exemple, les USA doivent maintenir et surveiller environ 600.000 ponts d'autoroutes, dont 15 % sont considérés comme structurellement déficients, essentiellement en raison de la corrosion. La plupart de ces ponts ont été construits durant les années 1930 et durant les années 1950 - 1970 lors de la réalisation du réseau d'autoroutes. Les premiers ont atteint leur fin de vie et les seconds nécessitent des réparations majeures. De plus, des millions de tonnes de sels ont été déversées sur les routes et les ponts durant les années 1950. Le coût des dommages provoqués est de l'ordre de 8,3 BUSD pour les ponts chaque année (figure 3) [6].

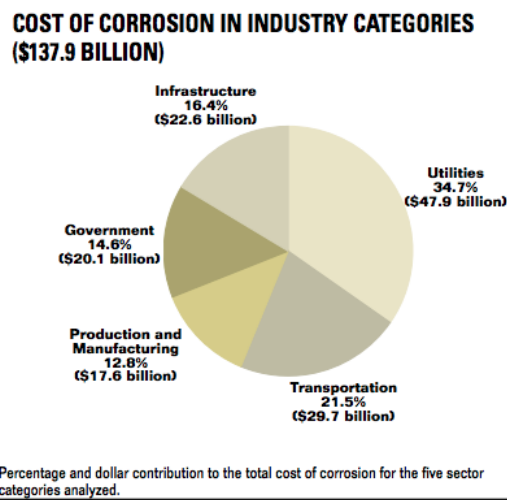


Figure 3 : Classement de la corrosion et leurs coûts associés aux USA
Le coût global de la corrosion est de 137.9 BUSD par an. Source : *US Geological Survey* [6]

1.3 Pourquoi mesurer la corrosion ?

La problématique de corrosion est particulièrement critique pour les structures en béton armé qui, fragilisées, mettent en péril la sécurité des biens et des personnes. Déterminer l'intégrité d'une structure est vital pour éviter les conséquences citées précédemment. Tant qu'il n'existe pas de solutions totalement efficaces (e.g. utilisation d'autres matériaux de construction viables

économiquement), la corrosion demeurera un problème majeur pour les structures. En plus, la majorité des ouvrages déjà existants ont été construits selon la technique acier-béton. Cela constitue un immense ensemble de structures soumises à cette problématique. Une maintenance optimisée est nécessaire étant donné qu'une déconstruction massive suivie d'une reconstruction engendrerait des coûts trop importants.

1.3.1 La maintenance conditionnelle

Actuellement, cette maintenance est programmée (*i.e.* périodique) [7],[8]. En effet, hormis quelques infrastructures manifestement dégradées, il n'est pas possible d'anticiper l'état réel de l'ouvrage uniquement à partir d'une analyse visuelle de l'extérieur. Quel que soit le procédé de réparation ou de protection envisagé, il est nécessaire de connaître à tout moment l'état de corrosion au sein de l'ouvrage affectant sa durabilité afin de définir une stratégie de maintenance de l'infrastructure en question.

Cependant, les gestionnaires d'ouvrages manquent d'outils opérationnels pour étayer leur prise de décision.

Face à cet énorme enjeu technico-économique que constituent l'entretien et la restauration des structures endommagées par la corrosion, la constante augmentation des coûts afférents conduit à privilégier une stratégie de réparation conditionnelle (*Condition-Based Maintenance* - CBM) plutôt que périodique [*Scheduled-Driven Maintenance*].

Le principe d'une maintenance conditionnelle est d'optimiser les interventions là où elles sont réellement nécessaires et ainsi épargner une analyse systématique longue et coûteuse. Ces outils permettront aux autorités compétentes d'évaluer l'état réel de leurs structures, de prédire leurs performances à venir et d'optimiser la répartition des budgets nécessaires à leur entretien afin d'assurer leur fiabilité et de réduire les coûts du cycle de vie.

L'efficacité de cette stratégie de maintenance évoluée est donc absolument tributaire d'une cartographie précise et fiable de l'état de corrosion global de l'ouvrage afin d'intervenir sélectivement sur des zones identifiées comme « à risque », *i.e.* lorsque au moins un témoin d'alerte de corrosion est activé.

1.4 La fibre optique comme solution

Selon P. Ferdinand [9], dès l'apparition des premières fibres optiques au début des années 1970, certains chercheurs envisagèrent leur utilisation comme simples guides de lumière, puis en tant que capteurs. Les fibres optiques ont été développées dans un objectif initial de télécommunications. Plus de 40 ans de développements ont abouti à la conception de divers dispositifs de mesure basés sur différentes propriétés optiques. En passant par le Gyroscope à Effet Sagnac, les ampèremètres à fibre, les mesures réparties de type DTS-Raman et DTSS-Brillouin, les réseaux de Bragg, les fibres à cristal photonique, etc. (la liste n'est pas exhaustive), l'évolution de la technologie dans ce domaine permet de présenter la fibre optique comme une possible solution aux problématiques de détection de corrosion. Des nouveaux développements dans les méthodes d'interrogation permettant d'augmenter simultanément la sensibilité et la résolution spatiale ont ouvert un éventail d'applications.

Parmi les avantages des Capteurs à Fibres Optiques (CFO), nous pouvons citer le déport important (plusieurs dizaines de *km*), la passivité (électrique, chimique), l'immunité électromagnétique et une grande capacité de multiplexage.

Les CFO constituent ainsi une solution intéressante dans l'objectif d'une mesure *in situ* répartie de corrosion de capacité élevée (une pluralité de points de mesure le long d'une seule fibre optique), fiable et à coût optimisé.

1.5 Limites de la recherche

Les disciplines impliquées dans cette thèse sont multiples. Trois domaines de spécialités différentes se présentent dans un même cas d'étude. D'une part nous devons considérer le génie civil, avec tout ce qui est lié au béton armé. Ensuite l'électrochimie permet de comprendre les mécanismes réactionnels à l'origine de la corrosion. Finalement, l'optique et les fibres optiques utilisées en télécommunications sont étudiées comme procédé potentiel de détection de la corrosion.

L'insertion de capteurs de corrosion (*a fortiori* répartis) dans des ouvrages existants est difficile, voire impossible. Dès lors, l'étude vise essentiellement des ouvrages nouveaux pour lesquels l'implémentation de capteurs peut être anticipée dès la conception. Une recherche bibliographique est donc nécessaire pour approfondir chaque thème.

Chapitre 2 : La corrosion des structures de béton armé

Pour mieux comprendre les phénomènes de corrosion, et pour parvenir au développement d'un capteur de corrosion adapté, il faut étudier les matériaux, leur comportement physico-chimique, et la façon dont ils sont déployés sur chantier. Cela permettra d'établir les contraintes à respecter au moment de concevoir un système de détection de corrosion.

2.1 Le béton armé

Le béton armé est un matériau composite constitué de béton et de barres d'acier qui allie la résistance en compression du béton, à la résistance en traction de l'acier.

Le béton est un matériau capable de supporter des efforts de compression importants (*10 à 100 MPa*) [10] alors que sa résistance aux efforts de traction est très faible (de l'ordre du dixième de sa résistance à la compression). C'est donc pour pallier cette insuffisance qu'est née l'idée de placer, dans les zones soumises à des efforts de traction, des barres d'acier (armatures) résistantes aussi bien en compression qu'en traction. Le matériau résultant de l'association du béton et de l'acier est appelé « béton armé ».

Dans une structure en béton armé, les aciers principaux sont positionnés dans les parties tendues du béton pour compenser la faible résistance du béton en traction.

2.1.2 Le béton

Le béton est un mélange de ciment, de granulats, d'eau et d'adjuvants, sous une proportion établie pour donner des caractéristiques différents en termes de résistance mécanique, texture, durée de prise, etc. La plupart des normes, dont *NF EN 206-1* [10], établissent une période de *28 jours*, qui constitue la prise du béton, pour établir les propriétés mécaniques du béton. La classe de résistance à la compression minimale est établie selon la géométrie de l'échantillon, soit cylindrique, soit cubique.

La résistance caractéristique du béton doit se situer au-dessus de *95 %* de la résistance théorique de fabrication. Nous allons citer les caractéristiques des matériaux constituant du béton, pour comprendre leur comportement physico-chimique.

2.1.2.1 Le ciment

Le ciment se compose essentiellement de chaux, de silice, d'alumine et d'oxyde de fer combinés à des silicates et aluminates de calcium. Les

différents ciments résultent du mélange de clinker, de calcaire, de laitier et de cendres volantes. Les normes *NF EN 197-1* [11] et *ASTM C-150* [12] définissent la composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants.

Type de ciment	Composition %						Pertes par calcination %	CaO Libre %
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	MgO	SO ₃		
I	55	19	10	7	2,8	2,9	1	1
II	51	24	6	11	2,9	2,5	0,8	1
III	57	19	10	7	3	3,1	1	1,6
IV	28	49	4	12	1,8	1,9	0,9	0,8
V	38	43	4	9	1,9	1,8	0,9	0,8

Tableau 2 : Composition typique des ciments type Portland
Source : *ASTM C-150* [12]

2.1.2.2 Les granulats

Un granulat est composé d'un ensemble de grains minéraux qui, selon leur dimension, se situent dans une famille particulière. Les granulats sont donc triés selon leur granulométrie. La norme *NF P18-545* [13] définit les règles générales permettant d'effectuer les contrôles des granulats. Elle précise les critères de régularité et de conformité et fournit les Fiches Techniques Produit. La norme *NF EN 12620* définit des catégories de valeurs maximales pour chaque caractéristique physique ou mécanique spécifiant des granulats (Tableau 3) [14].

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

Tableau 3 : Les granulats les plus utilisés
Source : Cimbéton [14]

Les granulats sont les principaux composants du béton (environ 70 % en poids). Les performances mécaniques des granulats vont donc conditionner la résistance mécanique du béton et leurs caractéristiques géométriques et esthétiques, en particulier, l'aspect des parements des ouvrages. Le choix des caractéristiques des granulats (roulés ou concassés, teintes, dimensions) est

déterminé par les contraintes mécaniques, physico-chimiques et esthétiques du projet à réaliser et de mise en œuvre du béton (critère de maniabilité, enrobage).

2.1.2.3 Adjuvants

Les adjuvants pour matériaux de construction sont des produits chimiques ajoutés au béton ou au ciment pour modifier leurs caractéristiques. Ces ajouts, réalisés lors du malaxage, sont le plus souvent inférieurs à 5 % en masse de ciment [15].

La norme *NF EN 934-2* [16] définit les catégories générales propres aux adjuvants. Ces catégories sont au nombre de 3 selon leurs caractéristiques générales :

- La prise et le durcissement (accélérateurs de prise, accélérateurs de durcissement, retardateurs de prise) ;
- L'ouvrabilité (plastifiants, superplastifiants) ;
- Certaines propriétés particulières (entraîneurs d'air, générateurs de gaz, hydrofuges de masse).

L'ajout d'un adjuvant dépend donc des caractéristiques que l'on souhaite obtenir dans le béton utilisé.

2.1.2.4 Eau de gâchage

L'eau de gâchage est nécessaire pour l'hydratation du ciment, et elle facilite aussi la mise en œuvre du béton ou du mortier dans le chantier. Elle doit être propre et ne doit pas contenir d'impuretés qui pourraient nuire à la qualité du béton. Les caractéristiques des eaux requises pour la confection des mortiers et des bétons sont précisées dans la norme *NF EN 1008* [17].

2.1.2.5 Formulation

Le choix des proportions de chacun des constituants d'un béton afin d'obtenir les propriétés mécaniques et de mise en œuvre souhaitées s'appelle la formulation. Plusieurs méthodes de formulations existent, dont notamment :

- la méthode Baron ;
- la méthode Bolomey ;
- la méthode de Féret ;
- la méthode de Faury ;
- la méthode Dreux-Gorisse.

La formulation d'un béton doit intégrer avant tout les exigences de la norme *NF EN 206-1*, laquelle, en fonction de l'environnement dans lequel sera mis en place le béton, sera plus ou moins contraignante vis-à-vis de la quantité minimale de ciment à insérer ainsi que la quantité d'eau maximale tolérée dans la formule. De même, à chaque environnement donné, une résistance garantie à *28 jours* sur éprouvettes est exigée aux producteurs, pouvant justifier des dosages de ciments plus ou moins supérieurs à la recommandation de la norme, et basée sur l'expérience propre à chaque entreprise, laquelle étant dépendante de ses matières premières dont la masse volumique peut varier, notamment celle des granulats. D'autres exigences de la norme *NF EN 206-1* imposent l'emploi de ciments particuliers en raison de milieux plus ou moins agressifs, ainsi que l'addition d'adjuvants conférant des propriétés différentes à la pâte de ciment que ce soit le délai de mise en œuvre, la plasticité, la quantité d'air occlus, etc.

2.1.3 Les armatures

Parmi les différentes nuances d'acier utilisées en béton armé, on peut citer : Barres lisses (*NF A 35-015*), Barres à haute adhérence (*NF A 35-016* et *NF A 35-019*) et Treillis soudés (*NF A 35-015*). La nuance utilisée pour cette étude est la nuance habituelle *Fe E-500* (Tableau 4).

Nuance Fe E	500
Limite d'élasticité	500 MPa
Résistance à la traction	550 MPa
Allongement à la rupture	8 %
Coefficient de dilatation thermique linéaire	$12.10^{-6} K^{-1}$

Tableau 4 : Caractéristiques mécaniques de la nuance *Fe E-500*
Source : *NF A 35-015* [18]

Le fer dans son état minéral se trouve sous une forme oxydée, ou en association avec d'autres éléments, en équilibre thermodynamique. Les fonderies d'acier dans l'industrie sidérurgique, en appliquant de l'énergie, transforment ces minerais bruts en différents produits, dont le fer à béton.

Nous pouvons remarquer dans le Tableau 5 qu'environ 90 % de la composition de l'armature est du minéral de fer [Fe]. Étant soumis à un risque de corrosion, cet élément joue un rôle clef dans la durabilité de la structure. En fait, l'état d'équilibre thermodynamique du fer se trouve sous sa forme naturelle oxydée.

Elements	A ₁₂ P	A ₁₀ P	B ₁₀ P	B ₈ P	C ₁₆ P	C ₂₀ P	C ₈ P	D ₈ P	E ₂₅ P	E ₂₀ P	F ₁₂ P
Aluminium (Al)	0	2	3	0	0	0	0	3	1.6	3.1	3
Barium (Ba)	0.14	0	0	0	0	0.13	0	0.24	0	0	0
Bromine (Br)	2.2	2.6	2.4	0	0	0	0	2.3	0	2.2	2.4
Cadmium (Cd)	4	3	4.9	3.9	2	3.1	2.5	5.8	4.3	3	3.5
Calcium (Ca)	0.06	0.02	0.09	0.66	0.28	0	0.01	0.48	0.11	0.13	0.07
Carbon (C)	0.05	0.13	0.04	0.07	0.06	0.07	0.09	0.08	0.07	0.04	0.07
Chlorine (Cl)	0.1	0.07	0.9	0.09	0.07	0.11	0.07	0.13	0.08	0.07	0.08
Chromium (Cr)	0.31	0.24	0.27	0.14	0.11	0.19	0.14	0.24	0.2	0.28	0.22
Copper (Cu)	0.31	0.27	0.33	0.12	0.37	0.1	0.1	0.31	0.33	0.28	0.32
Galium (Ga)	0.18	0	0.06	0.07	0	0.08	0.03	0.06	0	0.15	0.09
Iron (Fe)	89.4	89.3	86.8	93.6	94.8	92.8	94.1	84	87.8	88	87.4
Iridium (Ir)	0	0	0	0	0	0.55	0.5	0	0	0	0
Manganese (Mn)	0.75	0.9	0.84	0.71	0.65	0.74	0.83	0.84	1.01	0.91	0.76
Molibdène (Mo)	0	0	0.04	0	0	0	0	0	0	0	0
Nickel (Ni)	0.1	0.05	0.06	0	0.07	0	0	0.07	0.06	0.09	0.06
Nitrogen (N ₂)	0.014	0.007	0.04	0.01	0.28	0.42	0.40	0.31	0.008	0.007	0.08
Osmium (Os)	0.56	0.39	0.28	0.35	0.31	0.42	0.37	0.31	0.35	0.46	0.35
Phosphorus (P)	0	0	0.06	0.09	0.08	0	0.1	0.04	0	0	0
Platinum (Pt)	0.1	0	0	0	0	0	0	0.05	0	0	0
Radium (Ra)	0.2	0.1	0.1	0	0.24	0.24	0.2	0.07	0.2	0.1	0.1
Rhodium (Rh)	0.68	0.42	0.25	0.34	0.28	0.57	0.48	0.24	0.35	0.62	0.42
Silicon (Si)	0.7	0.7	0.9	0.6	0.7	0.59	0.41	1.7	3.53	0.72	1
Sulphur (S)	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0.14	0
Tellurium (Te)	0	0	0	0	0	0.05	0.14	0	0	0	0
Titanium (Ti)	0.16	0	0	0	0	0.15	0	0.13	0	0	0
Vanadium (V)	0	0	0.03	0	0	0	0	0	0	0	0
Zinc (Zn)	0.17	0.04	0.07	0	0.01	0.02	0.02	0.13	0.08	0.15	0.04
Zirconium (Zr)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Total (%)	100	100	99.99	99.99	100	99.98	100	100	100	100	99.98

Tableau 5 : Composition chimique de fers à béton
Source : IJENS [19]

2.1.3.1 Corrosion des métaux

La corrosion des métaux consiste essentiellement en leur oxydation, qui constitue ainsi un « retour à l'état naturel ». Cependant, l'oxydation n'est pas nécessairement la combinaison d'un élément avec de l'oxygène. D'une manière plus générale, il s'agit d'une réaction chimique au cours de laquelle

un composé considéré cède des électrons, avec l'aide des produits intermédiaires (Figure 4).

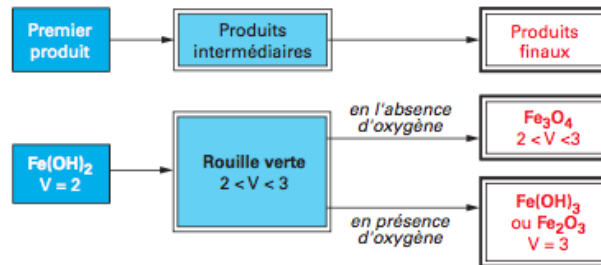
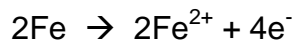
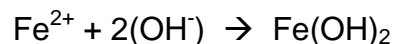
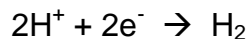
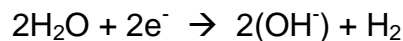


Figure 4 : Produits de corrosion d'un acier dans un béton pollué
Source : L'Hostis et al. [20]

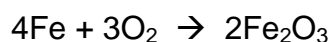
Nous considérons une première réaction appelée « anodique » dans laquelle le métal quitte le réseau cristallin et passe en solution, en laissant une charge électrique dans la phase solide :



Deuxièmement, nous considérons la réaction « cathodique » qui correspond à la réduction d'un oxydant par la capture des électrons. Cette réaction dépend de l'environnement et de la présence (ou non) d'oxygène. Chimiquement ces réactions peuvent se décrire de la façon suivante :



En absence d'oxygène, et :



en présence d'oxygène.

Pour simplifier, nous pouvons dire que, au cours de la réaction, le fer perd des électrons (il est oxydé). L'oxygène gagne de ce fait des électrons (réduction).

La stabilité du fer dans l'eau dépend du pH , qui détermine la concentration d'ions $[\text{H}^{+}]$ dans l'eau, et du potentiel électrique de la pièce en fer par rapport à

la solution, qui détermine la capacité des électrons à quitter le fer. La température joue également un rôle important dans le système, car elle peut modifier la concentration des ions dans la solution.

Nous pouvons ainsi tracer un diagramme potentiel- pH (E, pH), en indiquant les zones de stabilité du fer $[Fe]$, de l'ion $[Fe^{2+}]$ (ou « ion fer II »), de l'ion $[Fe^{3+}]$ (ou « ion fer III ») et les zones de passivation (Figure 5). Il s'agit donc d'une sorte de « carte », les zones délimitées par des frontières indiquant les couples de valeurs (E, pH) pour lesquelles une espèce est stable. Ce diagramme porte le nom de diagramme de Pourbaix [21], et peut être tracé pour tous les métaux.

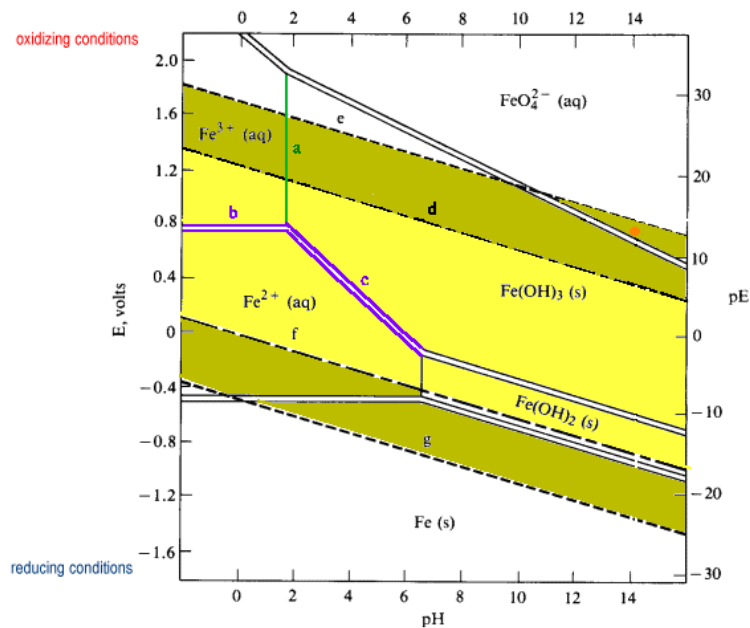


Figure 5 : Diagramme de Pourbaix simplifié du fer
Pour 1 M de solution de fer à 25°C. Source : Western Oregon University [22]

L'examen du diagramme de Pourbaix d'un matériau permet de savoir si celui-ci est adapté à un milieu. Si le couple (E, pH) se situe dans une zone de stabilité, le matériau est protégé contre la corrosion dite généralisée.

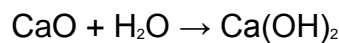
Dans le cas du béton armé, le milieu est fortement basique, avec un pH autour de 12 ~ 13. Dans ces conditions, le $Fe(OH)_3$ (couche de passivation) restera « stable et solide » tant que le potentiel E ne dépassera pas 0,4 V. Il y a lieu de remarquer qu'une augmentation de température entraîne une diminution des valeurs de potentiels seuils dans le diagramme (un acier

passivé à une certaine température peut s'oxyder à une température plus élevée dans les mêmes conditions de pH).

Un autre mécanisme de corrosion peut avoir lieu, avec la présence d'agents externes, comme les chlorures. Ces agents induisent la dépassivation localisée du métal, avec la formation de cavités qui augmentent en profondeur. Ce type de corrosion est appelé corrosion par piqûres.

2.2 Mécaniques de dégradation du béton armé

Nous pouvons distinguer 3 phases principales dans la confection du béton : mélange, prise et service. Au moment de la préparation du béton, le ciment en contact avec l'eau de gâchage se transforme principalement en hydroxyde de calcium :



Cette espèce chimique confère au ciment un pH élevé (entre 12,5 et 13) [23]. La présence d'eau dans le mélange favorise aussi l'apparition d'Hydroxyde de Fer [Fe(OH)_2] en solution interstitielle. Ces deux conditions sont suffisantes pour passiver les armatures métalliques qui y sont incluses. Ce pH sera maintenu dans le béton jusqu'à ce qu'une dégradation ait lieu comme, par exemple, par carbonatation. En conditions idéales, tant que les propriétés physico-chimiques du matériau restent inchangées dans le temps, le système restera en « équilibre », sans dégradation.



Figure 6 : Fissure du béton à cause de la corrosion
La fracture expose l'ensemble des armatures au sein de la structure. Source : Flickr [26]

Pendant le service, la structure est soumise aux phénomènes naturels, contraintes mécaniques, biologiques, chimiques, etc., qui vont rompre les conditions d'équilibre favorables à la couche de passivation. Du point de vue structural, la première couche d'enrobage permet de protéger l'armature la plus extérieure de la structure (Figure 6). Plusieurs schémas de corrosion sont susceptibles d'apparaître selon l'environnement de la structure [20],[24],[25].

En régions côtières ou fréquemment enneigées (nécessitant l'emploi de sels de déverglaçage), les chlorures issus de l'eau salée diffusent au sein du béton, peuvent détruire la couche d'oxyde protectrice et pénétrer dans l'acier. Un processus de corrosion localisée par piqures peut alors démarrer, accéléré par l'accroissement de conductivité de l'électrolyte aqueux. Le fer se dégrade alors en rouille verte qui se dissout et re-précipite sous forme de rouille (oxyde de fer). Les produits de corrosion précurseurs (rouilles vertes) se présentent sous forme de gels, de faible rigidité mécanique. Ils peuvent être évacués par les fissures ouvertes (Figure 7). En bord de mer, la corrosion intervient principalement en zones de marnage, là où l'eau salée et l'oxygène de l'air sont présents simultanément.



Figure 7 : Évacuation par les fissures ouvertes des dérivés d'oxyde de fer
Source : Kennedy Space Center [27]

Un second processus de corrosion est lié à la carbonatation du béton. Au fil des jours, le gaz carbonique [CO_2] présent dans l'air migre dans l'épaisseur du matériau, réagit avec le matériau (la portlandite) pour former du carbonate de calcium [$CaCO_3$] et entraînant la baisse du pH de la solution interstitielle

(jusqu'à environ 8 à 9). Le « front de carbonatation » (*carbonation front*) progresse alors dans l'enrobage du béton sur une profondeur de plusieurs centimètres. Lorsque celui-ci atteint l'armature, une dépassivation en résulte qui entraîne un processus de corrosion généralisée provoquant la formation d'oxy-hydroxydes de fer [$FeO(OH)$] de densité plus faible que le fer initial (entre 3 et 6 fois), cela signifie que le volume occupé est plus important (à masse identique). La carbonatation se produit dans un béton d'humidité intermédiaire (ni sec, ni saturé en eau, optimum $\sim 65\% RH$). Contrairement aux attaques par chlorures, les produits de corrosion présentent un module d'Young proche de celui de l'acier ($\sim 2\text{ GPa}$ [28]) de sorte que la corrosion s'accompagne d'une mise en compression de l'interface fer-béton consécutive à l'accroissement de volume occupé par les résidus oxydés (Figure 8). Il en résulte un éclatement du béton d'enrobage, une diminution de la section des armatures et de l'adhérence acier-béton (épaufrure), réduisant ainsi la durée de vie de la structure.

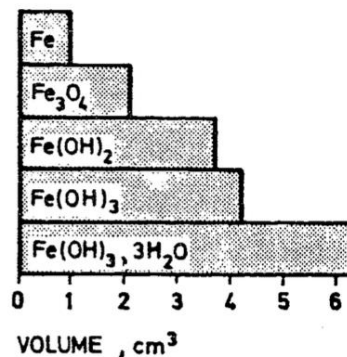


Figure 8 : Volume relatif des différents sous-produits de la corrosion
Source : Tuutti [29]

Enfin, un troisième schéma de corrosion correspond à la sulfatation des aciers liée à une attaque par des acides contenus dans l'eau de mer ou les eaux séléniteuses (riches en sélénite ou sulfate de chaux). Il en résulte également un éclatement du béton d'enrobage.

Pour des raisons d'esthétique et d'optimisation du matériau béton, les concepteurs sont parfois amenés à réduire l'épaisseur de l'enrobage. Ce funeste choix a pour conséquence une moins bonne protection des armatures en acier et une moindre résistance à l'éclatement en cas de corrosion. Le

béton se fissure alors rapidement, accélérant la migration de l'eau et des agents corrosifs favorisant la corrosion d'une manière catastrophique. La configuration la plus défavorable est caractérisée par de longues périodes d'alternances de faible et forte humidité. Les fissures causées par la corrosion apparaissent près des armatures et se propagent le long de celle-ci et perpendiculairement à la surface du béton. La vitesse de corrosion des aciers varie ainsi de quelques $\mu\text{m}/\text{an}$ à quelques mm/an , selon l'environnement.

De la même façon, une infrastructure mal dimensionnée peut présenter des fissures dues à des surcontraintes (e.g. d'origine thermomécanique) dès la première année de mise en service [30]. Cette structure est condamnée à se dégrader à court-terme puisque dans ce cas, l'eau, l'oxygène et les agents de corrosion (sel, gaz carbonique) se propagent beaucoup plus rapidement et profondément à travers les fissures.

Finalement, dans les zones de climat froid, les cycles gel-dégel contribuent aussi à accélérer la ruine de la structure préalablement fissurée.

2.3 Indicateurs physico-chimiques d'une situation de corrosion des armatures

La corrosion dans le béton armé apparaît lors de la dépassivation. Comme il s'agit d'un phénomène électrochimique, celui-ci correspond aux événements suivants [20] :

a) Réactions d'oxydoréduction

b) Apparition de rouille et changement de surface du métal

- a. Rouille « liquide » : celle-ci peut être évacuée vers l'extérieur de l'interface fer-béton via les fissures.
- b. Rouille « solide » : dans le béton armé, l'espace disponible pour le développement de la rouille est limité, ce qui conduit à la rupture du béton à cause de l'augmentation de la pression interne.

- c) **Changement du pH du béton de fortement basique à faiblement basique**
- d) **Changement du potentiel électrochimique**
- e) **Changement de l'impédance électrique de la structure**

2.4 Techniques de mesure traditionnelles

Une des principales difficultés rencontrées dans la détection de corrosion provient du fait qu'elle n'est pas considérée comme une grandeur physique mesurable. La plupart des paramètres physico-chimiques déterminant l'avancée du processus de corrosion (pH , concentrations en chlorures / $[CO_2]$, potentiel électrochimique, etc.) sont quantifiables mais l'amplitude de la corrosion (*i.e.* proportion de fer ayant été oxydé) ne l'est pas directement avec les moyens actuels de détection.

L'autre difficulté repose sur le constat simple que, mises à part certaines structures mal conçues et présentant des défauts manifestes dès leur mise en service, il est difficile de savoir à quel endroit précis démarre un éventuel processus de corrosion sur une infrastructure de grande ampleur (pont, tour, barrages, tunnels etc.). En pratique, la maintenance programmée (systématique) nécessite donc d'inspecter périodiquement des surfaces très importantes pouvant atteindre plusieurs dizaines de milliers de mètres carrés (m^2), ce qui représente bien entendu un travail considérable et génère des coûts importants.

Enfin, l'inspection visuelle permet de détecter les dommages en surface extérieure de l'ouvrage. Pour autant, il s'agit d'une très faible fraction de son volume, l'essentiel restant inaccessible à l'observation directe. Il est donc nécessaire de recourir à des moyens d'inspection en profondeur dans l'ouvrage, ou dans ses fondations enterrées.

En raison de toutes ces difficultés, la localisation de la corrosion et l'estimation de son degré d'évolution sont rendues délicates et présentent souvent une grande incertitude.

Une panoplie de moyens techniques existe cependant pour analyser la fonctionnalité d'un ouvrage [31]. En ce qui concerne la détection de corrosion des armatures passives en acier, nous pouvons distinguer deux analyses distinctes : l'analyse non destructive (*Non-Destructive Evaluation – NDE*) par auscultation et l'analyse destructive (par prélèvement).

2.4.1 Analyse non destructive par auscultation de l'ouvrage

Les analyses non destructives sont réalisées par des mesures électriques (résistivité, courant), électrochimiques (potentiel) ou par ultrasons.

2.4.1.1 Détection par ultrasons

Le principe de cette méthode consiste à utiliser deux transducteurs ultrasonores (un émetteur et un récepteur) et à mesurer le signal transmis ou réfléchi par les différentes interfaces à l'intérieur de la structure auscultée (e.g. *Ultrasonic Pulse Velocity – UPV*) [32]. Le procédé est plutôt conçu pour une observation en transmission au travers d'un pan de mur (dans ce cas, le paramètre recherché est la vitesse du son en fonction de l'état de la structure). En pratique cependant, la plupart des ouvrages ne sont pas accessibles de l'intérieur et donc seul le mode en réflexion est utilisable. Selon ce mode, la présence d'un délaminage (épaisseur d'air) dans une couche de béton induit un écho très important en raison de la très grande différence d'impédance acoustique. De plus, une réflexion assortie d'un changement de phase (180°) intervient aussi entre le béton (matériau diélectrique) et l'armature (matériau métallique).

Ce procédé de radar acoustique (*Ground-Penetrating Radar – GPR*) [33] ne détecte donc pas directement la corrosion mais les défauts qui peuvent en résulter (trous ou grosses fissures). Il prend beaucoup de temps (coûteux en temps d'opérateur qualifié) car le transducteur doit être déplacé en tout point de l'ouvrage (Figure 9). De plus, ce procédé impose un compromis entre la résolution spatiale (qui nécessite des longueurs d'onde acoustiques courtes) et une propagation en profondeur dans le béton (meilleure aux grandes longueurs d'onde). En pratique, on observe plutôt des défauts proches de la surface.



Figure 9 : Exemple d'auscultation par GPR
Source : Csaba 2007 [33]

2.4.1.2 Détection électrique

Un grand nombre de méthodes de détection électriques de la corrosion ont été mises au point [31],[34] parmi lesquelles les mesures de variation de flux ou de résistivité.

f) Mesures d'impédance AC (spectroscopie d'impédance)

Cette méthode met en œuvre trois électrodes, la première en acier inoxydable, une seconde électrode de référence (calomel) et l'armature elle-même (électrode de travail). Le béton est considéré comme l'électrolyte. Le principe consiste à appliquer une tension sinusoïdale d'amplitude constante (e.g. 20 mV) sur une gamme de fréquence étendue (0,01 Hz à 100 kHz) et à mesurer le courant traversant le béton. L'impédance complexe (amplitude et phase) est alors calculée à partir du ratio tension/courant et représentée sur un graphe de Nyquist. Celle-ci se décompose en une première contribution résistive (en phase avec le signal d'entrée) et une seconde, orthogonale, liée au terme capacitif. La vitesse de corrosion se déduit de la résistance de polarisation obtenue à partir du graphe (formule de Stern-Geary).

La technique de mesure de la résistance de polarisation est une variante de la précédente. Elle est basée sur la polarisation de l'armature au moyen d'un faible courant constant imposé qui résulte en un changement anodique du potentiel de l'armature dont on en déduit la vitesse de corrosion.

En pratique, cette méthode d'impédance est peu utilisée sur les ouvrages du fait de sa complexité.

g) Pachomètre

La technique du pachomètre consiste à appliquer un champ électromagnétique à la surface du béton (créé par une bobine) et à observer les perturbations de flux induites par la présence de l'armature située sous le béton d'enrobage. Il s'agit donc d'une mesure sans contact.

Les lignes de champ restent étendues proche de la surface (l'extension du champ en profondeur est proportionnelle au diamètre de la bobine). Il y a donc là aussi un compromis à prendre en compte entre la résolution spatiale et la profondeur d'auscultation. En pratique, cette méthode ne permet donc pas une analyse en profondeur (limitation à environ *10 cm*) et seul le premier réseau d'armature est détecté. De même, si celles-ci sont peu espacées et placées profondément, la mesure devient délicate car plusieurs armatures contribuent au même signal.

En pratique, la méthode est plutôt utilisée pour localiser les armatures et pour apprécier l'épaisseur de l'enrobage en béton. La mesure de la réluctance (fonction du volume de fer) n'est pas utilisée en pratique pour en déduire la progression de la corrosion.

h) Mesure de résistivité électrique du béton

Les zones où le béton présente une faible résistivité électrique sont humides et souvent polluées par des sels, donc potentiellement sujettes à corrosion. Ce procédé met en œuvre une sonde de Wenner à 4 points équidistants (Figure 10). Un courant est appliqué entre les deux points externes tandis que les deux points intérieurs servent à mesurer la différence de potentiel, fonction de la conductivité du béton. Une résistivité supérieure à *20 kΩ.cm* témoigne d'un béton sain.

Cette méthode présente l'avantage d'une exécution rapide et est donc assez répandue. Cependant, elle ne mesure pas directement la corrosion des armatures mais la présence d'humidité ou d'ions (procédé indirect).

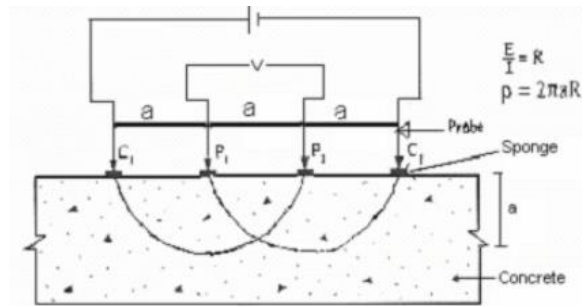


Figure 10 : Résistivité du béton
Source : Song [31]

Enfin, cette méthode n'est applicable que pour des bétons non armés car les armatures métalliques perturbent la mesure de résistivité du béton. Elle ne donne donc pas satisfaction pour estimer la dégradation des armatures d'acier par corrosion.

i) Détection par la méthode du potentiel électrochimique

Le principe consiste à mesurer la différence de potentiel (*d.d.p.*) entre une « demi-pile » portable standard [électrode de référence impolarisable ($[Cu/CuSO_4]$, calomel saturé ou $[Ag/AgCl]$) placée en surface du béton et l'acier d'armature à l'aide d'un millivoltmètre. La mesure est réalisée point par point ou en continu (roue-électrode) selon un maillage régulier (Figure 11). Les valeurs de potentiel sont alors rassemblées pour élaborer des cartes d'anomalies (isopotential). La probabilité de corrosion est considérée comme élevée pour une *d.d.p.* comprise entre -350 mV et -600 mV et faible si inférieure à -250 mV .

Une autre méthode similaire consiste à insérer une barre en d'acier inoxydable ou titane $[Ti]$ « activé » (électrode revêtue d'un oxyde de métal noble ($[TiO_2]$, $[RuO_2]$, $[IrO_2]$) au sein de la structure formant ainsi une pile avec le réseau d'armatures en acier. La mesure du courant généré entre les armatures et cet élément (jouant le rôle de cathode) permet d'en déduire l'intensité de la corrosion (pas ou peu de courant lorsque le réseau d'armatures est sain). De ce principe de pile a été mis au point un ensemble d'armatures témoins placées en échelle (*anode-ladder system*) permettant d'analyser la progression des agents de corrosion (chlorures ou $[CO_2]$) au sein de l'ouvrage.

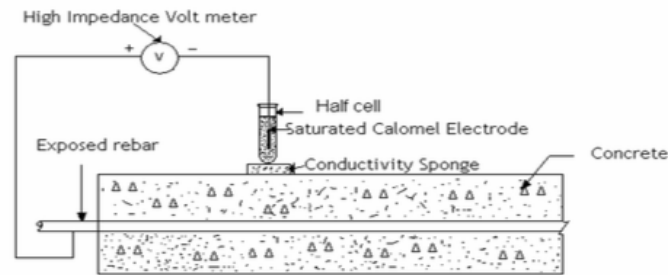


Figure 11 : Technique de mesure de potentiel électrochimique
Source : Song [31]

2.4.2 Analyse destructive par prélèvement

Cette méthode d'analyse consiste à prélever un échantillon de la structure en y forant un trou (carottage). La composition du béton prélevé est ensuite analysée en laboratoire pour en déduire les traces d'éléments chlorure ou carbone. Le front de carbonatation est analysé par l'indicateur coloré phénolphthaléine tandis que les chlorures sont analysés en chromatographie en phase liquide.

Le principe même d'une analyse destructive va à l'encontre du but recherché qui est de préserver la structure. De surcroît, une telle analyse est coûteuse, limitée en termes de résolution chimique, et peu représentative de l'état de la structure en général (prélèvement ponctuel). Enfin, ce procédé ne permet pas de reconstituer une cinétique d'évolution de la corrosion au cours du temps mais donne seulement un aperçu à un instant donné de l'état de la structure.

2.5 Conclusion

L'évolution de la corrosion au sein d'un ouvrage en béton armé dépend d'un grand nombre de facteurs physico-chimiques tels le pH , les concentrations en chlorures (ou en $[CO_2]$) et en oxygène, la température et la teneur en humidité du béton. A cet égard, une mesure unique de type résistive ou électrochimique ne permet pas de conclure sur l'état réel de corrosion des armatures d'un ouvrage.

La méthode de résistivité n'est pas applicable au béton armé et la spectroscopie d'impédance est peu utilisée en raison de sa complexité de

mise en œuvre. Les mesures par ultrasons ne permettent de détecter que les défauts, conséquences tardives de la corrosion (e.g. lorsque le béton d'enrobage a déjà été fissuré).

A l'heure actuelle, seule la technique du relevé de potentiel à la demi-pile est largement utilisée pour évaluer la corrosion sur le terrain, en raison de sa simplicité. Il s'agit d'une mesure directe permettant d'estimer une « probabilité de corrosion ».

Les solutions techniques existantes sont donc assez insatisfaisantes et limitées par différents paramètres.

La première limitation de ces procédés est d'ordre métrologique. En effet, ces méthodes d'auscultation ne délivrent pas une information métrologique de la présence et de l'importance de la corrosion mais plutôt une indication probabiliste (potentiel) ou indirecte et tardive (ultrasons).

La seconde limitation de ces procédés est d'ordre socio-économique. En effet, ces méthodes d'auscultation sont ponctuelles et doivent être déplacées en tout point de la surface extérieure de l'ouvrage afin de l'analyser dans son intégralité, opération longue et coûteuse en temps d'opérateur qualifié.

De surcroît, il est nécessaire de mettre périodiquement en œuvre des mesures de sauvegarde (filet de protection etc.) et d'interdire l'accès de l'ouvrage aux usagers, occasionnant des désagréments et un surcoût socio-économique.

La troisième limitation est liée à la résolution spatiale (latérale et en profondeur). Ces méthodes procèdent à partir de la surface externe de l'ouvrage. Dès lors, elles ne permettent pas d'ausculter la structure en profondeur (*i.e.* au-delà de *10 cm* à *20 cm*) et seul le premier réseau d'armatures est observé. Dans la majorité des cas (e.g. front de carbonatation), cela ne constitue pas un problème car seules les armatures proches de la surface sont susceptibles de se corroder. Cependant, si l'ouvrage est fissuré, une corrosion due à une infiltration d'eau peut intervenir à des profondeurs importantes et ne pas être décelée alors qu'elle impacte l'essentiel du volume de l'ouvrage avec des conséquences importantes en termes de fiabilité mécanique.

La résolution spatiale latérale est, elle aussi, limitée et parfois fonction de la profondeur analysée (ultrason).

Enfin, la dernière limitation est liée à l'accessibilité de la surface de l'ouvrage. Toutes les méthodes décrites nécessitent un accès proche des armatures noyées dans l'ouvrage. Or, dans certains cas, cet accès est restreint, voire coûteux (travaux d'excavation) en particulier pour toutes les structures enterrées (fondations, tunnels etc.). Une instrumentation *in-situ* est donc souhaitable.

En conclusion, les méthodes décrites sont essentiellement d'ordre probabiliste et utilisées sur le terrain dans un cadre de maintenance programmée (systématique). Ces méthodes paraissent difficiles à mettre en œuvre dans le cadre évolutif d'une maintenance conditionnelle (*CBM*) puisque les dispositifs décrits ne peuvent être intégrés à la structure. La mise en place d'une maintenance conditionnelle nécessite d'implanter un réseau de capteurs *in situ* dans la structure dès sa conception afin de fournir une information à la demande durant son cycle de vie, sans nécessiter une interruption d'usage de la structure.

Enfin, celles-ci sont longues et coûteuses en raison de leur caractère ponctuel qui oblige l'opérateur à déplacer une sonde sur une surface considérablement plus étendue que sa zone d'auscultation.

Pour toutes ces raisons, il y a lieu de proposer un procédé de mesure innovant de la corrosion des armatures permettant d'envisager sérieusement la mise en place future d'une maintenance conditionnelle sur les infrastructures en béton armé.

Chapitre 3 : Capteurs à Fibre Optique

Les fibres optiques ont été développées initialement il y a 40 ans pour les besoins des télécommunications optiques. Parallèlement, les fibres optiques ont également été étudiées pour la métrologie optique. Si l'essentiel du marché concerne les télécommunications (les produits ont été standardisés dans cet objectif), une large gamme de produits a été développée dans un objectif de métrologie ponctuelle (réseaux de Bragg (*Fiber Bragg Grating* – *FBG*), interféromètres) ou répartie (DTS-Raman, DTSS Brillouin, OFDR-Rayleigh). Dans ce chapitre, nous allons décrire comment nous pouvons utiliser la fibre optique pour obtenir des informations sur différentes variables physiques, comme la température ou la déformation.

3.1 La fibre optique

La fibre optique est un guide d'onde lumineuse habituellement constitué d'un cœur entouré d'une gaine. Le cœur de la fibre a un indice de réfraction légèrement plus élevé (différence de quelques millièmes) que la gaine et peut donc confiner la lumière qui se trouve guidée dans le cœur en raison du phénomène de réflexion totale. L'ensemble est généralement recouvert d'une gaine polymère de protection.

L'approche géométrique de propagation des faisceaux est satisfaisante pour décrire le comportement des fibres multimodes de diamètres importants (diamètre très supérieur à la longueur d'onde de la lumière). Lorsqu'un rayon lumineux entre dans une fibre optique à saut d'indice à l'une de ses extrémités avec un angle adéquat, il subit de multiples réflexions totales internes. Ce rayon se propage alors jusqu'à l'autre extrémité de la fibre optique, en empruntant un parcours en zigzag. La propagation de la lumière dans la fibre peut se faire avec très peu de pertes ($\sim 0,2 \text{ dB/km @ } 1550 \text{ nm}$) même lorsque la fibre est courbée (Figure 12).

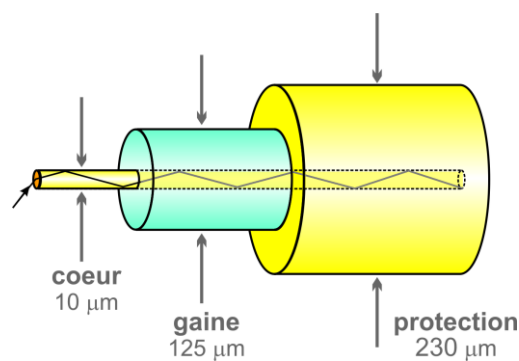


Figure 12 : Schéma de la fibre optique

Nous pouvons distinguer les trois éléments de base qui constituent la fibre : le cœur, la gaine et la protection. Source : Finot [35]

Il existe aussi des fibres à gradient d'indice (parabolique) pour lesquelles le faisceau lumineux décrit un parcours sinusoïdal.

Les fibres optiques les plus utilisées pour la métrologie sont les fibres monomodes pour lesquelles un seul mode de propagation est possible (un seul indice effectif). Compte-tenu du petit diamètre de cœur (9 µm), l'approche

géométrique n'est plus valable et le comportement de propagation est alors expliqué par la théorie des champs (diffraction).

Une fibre optique est souvent décrite selon trois paramètres :

- la différence d'indice normalisé, qui donne une mesure du saut d'indice entre le cœur et la gaine :

$$\Delta n = \frac{n_c - n_g}{n_c} \quad (1)$$

où n_c est l'indice de réfraction du cœur, et n_g celui de la gaine.

- l'ouverture numérique de la fibre, qui est concrètement le sinus de l'angle d'entrée maximal (θ_{max}) de la lumière dans la fibre pour que la lumière soit guidée, mesuré par rapport à l'axe de la fibre. L'ouverture numérique est reliée au saut d'indice et égale à :

$$\sin \theta_{max} = \sqrt{\{n_c^2 - n_g^2\}} \quad (2)$$

- et le diamètre de cœur, généralement $\sim 9 \mu m$ pour une fibre monomode standard (type *SMF28*).

3.1.3 Caractéristiques

Les principaux paramètres qui caractérisent les fibres optiques utilisées pour les transmissions sont les suivants.

3.1.3.1 Atténuation

L'atténuation caractérise l'affaiblissement du signal au cours de la propagation, elle est exprimée en *dB/km*. Le principal atout des fibres optiques en silice est une atténuation extrêmement faible qui autorise un déport important (plusieurs dizaines de kilomètres). L'atténuation dépend de la longueur d'onde et atteint un minimum vers *1550 nm* pour les fibres en silice. Cette longueur d'onde du proche infrarouge est donc privilégiée pour les communications optiques. De nos jours, la maîtrise des procédés de fabrication permet d'atteindre couramment une atténuation aussi faible que

0,2 dB/km à 1550 nm : après 100 km de propagation, il restera donc encore 1 % de la puissance initialement injectée dans la fibre, ce qui peut être suffisant pour une détection. En pratique, la portée entre répéteurs télécom est d'environ 40 à 50 km. Si l'on désire transmettre l'information sur des milliers de kilomètres, il faudra avoir recours à une ré-amplification périodique du signal, le plus généralement par l'intermédiaire d'amplificateurs optiques qui allient simplicité et fiabilité.

3.1.3.2 Dispersion chromatique

La dispersion chromatique est exprimée en $ps.(nm \cdot km)^{-1}$ et caractérise l'étalement temporel du signal lié à sa largeur spectrale (deux longueurs d'ondes différentes ne se propagent pas exactement à la même vitesse). Cette dispersion dépend de la longueur d'onde considérée et résulte de la somme de deux effets : la dispersion propre au matériau, et celle du guide, liée à la forme du profil d'indice. Il est possible de la minimiser en adaptant le profil. Certaines fibres présentent ainsi un minimum de dispersion décalée vers 1550 nm (*Dispersion-Shifted Fiber - DSF*). Pour une fibre en silice, une dispersion nulle est obtenue vers 1300-1310 nm.

3.1.3.3 Non-linéarité

Un canal de transmission est dit non linéaire lorsque sa fonction de transfert dépend du signal d'entrée. L'effet Kerr, les diffusions Raman et Brillouin sont les principales sources de non linéarité dans les fibres optiques. Parmi les conséquences de ces effets non-linéaires, on peut citer l'auto-modulation de phase, des mélanges à quatre ondes intra- et inter-canaux. Ces effets non linéaires ont été abondamment étudiés pour les télécommunication optiques (pour s'en prémunir) et ont été l'objet d'étude pour la conception des capteurs à fibre optique [36].

3.1.3.4 Dispersion modale de polarisation (*Polarization-mode dispersion PMD*)

La dispersion modale de polarisation (PMD) est exprimée en $ps/km^{1/2}$ et caractérise l'étalement du signal. Ce phénomène est dû à des défauts dans la géométrie des fibres optiques qui entraînent l'apparition d'une biréfringence,

i.e. une différence de vitesse de groupe entre les modes se propageant sur les deux axes neutres de la fibre.

3.1.4 Fibres monomodes et multimodes

Les fibres optiques peuvent être classées en deux catégories selon le diamètre de leur cœur et la longueur d'onde utilisée : les fibres monomodes et multimodes.

3.1.4.1 Fibres multimodes

Les fibres multimodes (dites MMF, pour *Multi Mode Fiber*), ont été les premières disponibles sur le marché. Elles ont pour caractéristique de transporter plusieurs modes. Du fait de la dispersion modale, on constate un étalement temporel du signal proportionnel à la longueur de la fibre. En conséquence, elles sont utilisées uniquement pour des bas débits ou de courtes distances. La dispersion modale peut cependant être minimisée (à une longueur d'onde donnée) en réalisant un gradient d'indice dans le cœur de la fibre. Elles sont caractérisées par un diamètre de cœur de plusieurs dizaines à plusieurs centaines de micromètres (les cœurs des fibres à gradient d'indice - *GI* - sont de 50 ou 62,5 μm pour le bas débit). Les transmission haut débit sur longues distances ne peuvent être couvertes que par des fibres optiques monomodes (SMF, pour *Single Mode Fiber*).

3.1.4.2 Fibres monomodes

Une fibre monomode ne présente pas de dispersion intermodale mais présente une dispersion chromatique et de polarisation. Ces fibres monomodes sont caractérisées par un diamètre de cœur de seulement quelques micromètres (le diamètre d'une fibre type *SMF28* est de 9 μm).

3.1.4.3 Longueur d'onde de coupure et fréquence normalisée

La longueur d'onde de coupure est la longueur d'onde λ_c en dessous de laquelle la fibre n'est plus monomode. Ce paramètre est relié à la fréquence normalisée, notée V , qui dépend de la longueur d'onde dans le vide λ_0 , du

rayon de cœur a de la fibre et des indices du cœur n_c et de la gaine n_g . La fréquence normalisée est exprimée par :

$$V = \frac{\left(2 \pi a \sqrt{\{n_c^2 - n_g^2\}} \right)}{\lambda_0} \quad (3)$$

Une fibre est monomode pour une fréquence normalisée V inférieure à 2,405. Des abaques fournissent la constante de propagation normalisée, notée B , en fonction de la fréquence normalisée pour les premiers modes.

La fréquence normalisée donne une indication directe sur le nombre de modes qu'une fibre peut contenir. À mesure que V augmente, le nombre de modes supportés par la fibre va augmenter.

3.2 La fibre comme capteur

Un capteur à fibre optique (ou à fibres optiques) est un dispositif dans lequel certaines caractéristiques de la lumière sont modifiées par interaction avec le mesurande, avant d'être acheminée vers le récepteur optique par l'intermédiaire d'une ou de plusieurs fibres optiques [37].

Selon la norme *NF EN 61757-1* [38] :

« Le capteur à fibres optiques est dit intrinsèque lorsque l'élément sensible est constitué par une ou plusieurs fibre(s) optique(s) dont une ou plusieurs caractéristiques de transmission, de réflexion ou d'émission de la lumière sont fonction de la ou des fibre(s) optique(s). Le capteur à fibres optiques est dit extrinsèque lorsque les caractéristiques de la lumière sont modifiées par la grandeur à mesurer à l'extérieur de la ou des fibre(s) optique(s). Le transducteur optique est un dispositif qui reçoit de l'information sous forme d'une grandeur physique et la transforme en information sous forme d'une grandeur optique, selon une loi définie. »

Dans le cas d'un capteur intrinsèque, c'est la fibre elle-même qui est le transducteur. Nous allons limiter la recherche aux capteurs intrinsèques.

Lors de la propagation de la lumière dans la fibre optique, des interactions par diffusion se produisent entre la matière de la fibre et les photons, qui peuvent

changer les paramètres du signal, tels que l'intensité, la longueur d'onde, la phase, l'état de polarisation ou le mode de propagation. L'étude des paramètres de rétrodiffusion est définie comme la réflectométrie.

La Figure 13 montre les différents phénomènes de diffusion dans la fibre. La diffusion Rayleigh est dite "élastique", les photons sont diffusés à la même longueur d'onde que celle du laser source. Les diffusions Raman et Brillouin correspondent respectivement à l'interaction des photons laser sur les phonons optiques et acoustiques. Dans la silice, le décalage Brillouin est de l'ordre de 15 GHz tandis que le décalage Raman est d'environ 12 THz (12.000 GHz ou 400 cm^{-1}). Pour chaque mode de diffusion, il existe une contribution Stokes et une seconde contribution dite Anti-Stokes, dépendante de la température (facteur de Boltzmann).

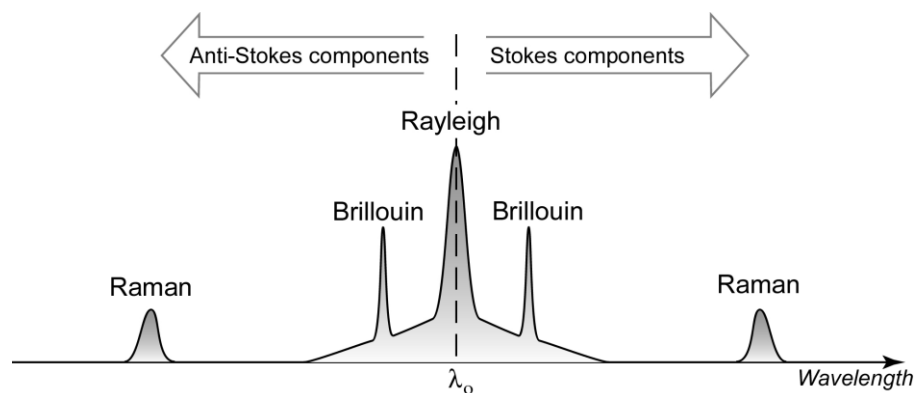


Figure 13 : Phénomènes de diffusion dans la fibre
Source : Ferdinand [39]

La plupart des dispositifs de mesure répartie (DTS-Raman ou DTSS-Brillouin) sont des réflectomètres qui localisent les événements par conversion temps-distance (vitesse $\sim 10\text{ ns/m}$ dans la silice). Compte-tenu de la largeur temporelle de l'impulsion laser ($\sim 10\text{ ns}$), la résolution spatiale de ces appareils est métrique. Une autre classe d'appareil fonctionne sur le principe de la conversion fréquence-distance (OFDR-Rayleigh). Contrairement aux réflectomètres conventionnels, ces dispositifs fonctionnent en émission de lumière continue et le laser est modulé en fréquence. Le dispositif DTS-Raman est uniquement sensible à la température tandis que les dispositifs DTSS-Brillouin et OFDR-Rayleigh détectent des variations de température et de déformations.

3.3 Procédés de mesure optique

3.3.1 Procédé de réflectométrie OTDR (*Optical Time Domain Reflectometry*)

La réflectométrie temporelle OTDR (*Optical Time Domain Reflectometry*) est une technique de localisation « radar ». Elle consiste à générer des impulsions optiques et à mesurer l'intensité réfléchi et rétrodiffusée. Au cours du temps la localisation d'un évènement est alors réalisée pour une correspondance temps – distance ($\sim 10 \text{ ns/m}$). Cette technique est utilisée en télécommunications pour détecter un couplage déficient, voire une coupure (Figure 14).

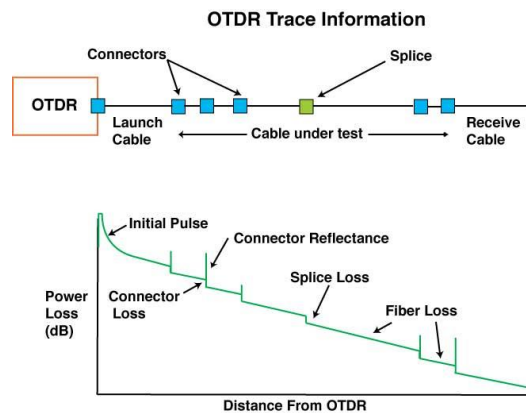


Figure 14 : Exemple de signal obtenu par un OTDR
 Nous pouvons voir la signature de chaque composant optique sur la trace du signal rétrodiffusé. Source : The Fiber Optic Association [40]

La technique OTDR permet d'obtenir une information en termes de puissance optique du signal. Il est possible d'adapter des systèmes de transduction mécanique vers la fibre (torsion ou micro-courbure), qui peuvent donner différentes valeurs d'atténuation en fonction d'une grandeur physique, comme la déformation ou la température. Cependant, la fabrication du capteur est complexe, ainsi que le système de référencement de la mesure, de sorte qu'il n'est pas utilisé en pratique.

3.3.2 Procédé de diffusion Raman

La diffusion Raman, ou effet Raman, est un phénomène optique qui consiste en la diffusion inélastique d'un photon, après interaction sur les phonons optiques. Ce décalage en fréquence correspond à un échange d'énergie entre la lumière et le milieu.

La mesure de ce décalage permet de remonter à la température du milieu. Le rapport R des intensités émises aux longueurs d'onde anti-Stokes λ_a et Stokes λ_s est donné par l'expression :

$$R(T) = \left(\frac{\lambda_s}{\lambda_a}\right)^4 e^{-\left(\frac{h\nu}{kT}\right)} \quad (4)$$

avec k et h les constantes de Boltzmann et Planck, ν la différence des fréquences optiques entre les raies Stokes et anti-Stokes et T la température absolue au cœur de la fibre où la lumière est diffusée [39].

En pratique, pour effectuer une mesure, il faut étalonner le système (référence). C'est pour cela que la détection reste une mesure relative.

La mesure de température par diffusion Raman DTS (*Distributed Temperature Sensing*) peut être effectuée sur fibres multimode ou monomode, avec une portée pouvant atteindre 30 km , mais en pratique, plutôt 5 à 10 km . Elle offre une résolution spatiale d'environ 1 m , avec une résolution en température d'environ $1 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.3.3 Procédé de diffusion Brillouin

La diffusion Brillouin est la diffusion inélastique de la lumière par les ondes acoustiques d'un milieu. Dans une expérience de diffusion Brillouin, on illumine un milieu à l'aide d'un faisceau laser et on détecte la lumière diffusée à une fréquence légèrement différente. Les décalages en fréquence observés sont de l'ordre de $\sim 15 \text{ GHz}$ dans la silice. La mesure de ce décalage permet de remonter à certaines propriétés du milieu, comme la température [41] et contraintes mécaniques (pression, déformation) [42].

En combinaison avec la technique de réflectométrie temporelle, deux familles de produits ont ainsi été développés :

1/ Les réflectomètres BOTDR (*Brillouin Optical Time Domain Reflectometry*):

Ils exploitent le phénomène de diffusion Brillouin spontanée et ne disposent qu'une source laser impulsionnelle et peuvent interroger une fibre optique par une seule extrémité.

2/ Les réflectomètres BOTDA (*Brillouin Optical Time Domain Analysis*) :

Ils exploitent le phénomène de diffusion Brillouin stimulée. Ils disposent donc de deux sources laser, une source impulsionnelle et une source CW servant de pompe, dont les faisceaux respectifs sont injectés dans la fibre de façon contrapropagatives. Il est nécessaire d'avoir accès aux deux extrémités.

Ces deux appareils fonctionnent selon un mode réflectométrique temporel et la résolution spatiale (métrique) est fonction de la largeur temporelle de l'impulsion laser (~ 10 à 15 ns) mais aussi de la durée de vie du phonon acoustique. Les appareils les plus utilisés sont les BOTDA également appelés DTSS (*Distributed Temperature & Strain System*) en raison de leur rapport signal-sur-bruit amélioré en comparaison des appareils BOTDR.

La portée atteint 30 km, avec une résolution spatiale de ~ 1 m. Les mesures ont une résolution en température de ~ 1 °C et en déformation de ~ 20 μ m/m.

3.3.4 Procédé Bragg

Le principe de fonctionnement des CFO à réseaux de Bragg (*Fiber Bragg Gratings -FBG*) est décrit dans de nombreuses publications [43].

Les Réseaux de Bragg sont des réseaux de diffraction obtenus par photo-inscription au sein du cœur de fibres optiques avantageusement monomodes. Ceux-ci se présentent sous la forme d'un motif périodique d'indice effectif de propagation n_{eff} , de pas submicronique Λ et de quelques millimètres de longueur, qui réfléchit la lumière à une longueur d'onde particulière (dite longueur d'onde de Bragg λ_b).

$$\lambda_b = 2 \cdot n_{eff} \cdot \Lambda \quad (5)$$

Le principe consiste à mesurer le décalage de cette longueur d'onde de Bragg, par rapport à un état de référence, en fonction de la température ou de l'état de déformation local à l'endroit du réseau. Pour cela, on forme la soustraction entre la longueur d'onde de Bragg mesurée et la longueur d'onde de référence mesurée lors de la phase de calibrage. Il s'agit fondamentalement d'une mesure spectrométrique, insensible aux perturbations de couplage (connexion, transmission optique par la fibre optique de déport, etc.), ce qui rend ce procédé de mesure particulièrement robuste sur le terrain, en conditions industrielles. Le modèle mathématique de réponse du réseau de Bragg est établi dans l'équation :

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = \left(\frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dT} + \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \right) \Delta T + (1 - p_e) \varepsilon_z - (1 - 2\nu) \cdot (1 - p_e') \cdot \Delta P/E \quad (6)$$

$$\alpha_o = \frac{1}{\lambda} \frac{d\lambda}{dT} \quad (7)$$

$$\xi = \frac{1}{n_{eff}} \frac{dn_{eff}}{dT} \quad (8)$$

avec $\Delta\lambda_b$ la variation de longueur d'onde de Bragg, ΔT la variation de température, $p_e = \frac{n^2}{2}(p_{12}(1-\nu) - p_{11}\nu)$, $p_e' = \frac{n^2}{2}(p_{11} + 2p_{12})$ et ν sont respectivement les constantes photo-élastiques et le coefficient de Poisson de la silice, ε_z est la déformation longitudinale, ΔP est la pression différentielle, α_o ($\sim 0,5 \cdot 10^{-6} K^{-1}$) est le coefficient de dilatation, ξ ($\sim 8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$) est le coefficient thermo-optique et E est le module d'Young. Les constantes p_{11} et p_{12} sont les coefficients de Pockels ($p_{11} \sim 0,14$ et $p_{12} \sim 0,28$ dans le proche IR).

Les réseaux de Bragg peuvent aussi être photo-inscrits sur une fibre biréfringente. Il apparaît alors deux pics dans le domaine spectral correspondant aux deux indices effectifs. Les longueurs d'onde de Bragg dépendent différemment de la température et de la déformation axiale appliquée localement à la fibre. La mesure de ces deux paramètres permet ainsi de remonter à l'évolution de ces deux paramètres *via* une relation

matricielle. La précision de mesure dépend alors du conditionnement de ce système matriciel, variable selon le type de fibre utilisée.

Plusieurs réseaux de Bragg de longueurs d'onde différentes peuvent être placés en série sur la même fibre optique (multiplexage spectral). A titre d'exemple, considérons le cas où les réseaux sont soumis à la même température (insertion dans un ouvrage de génie civil de large dimension) et soumis à une gamme de déformations de $1.000 \mu\text{déformations}$ ($0,001 \%$), typique des CFO de corrosion testés en laboratoire. La gamme de longueur d'onde correspondante est $1,2 \text{ nm}$ par capteur (le coefficient de conversion vaut $1,2 \text{ pm}/\mu\text{déformation}$ à $1,55 \mu\text{m}$). L'étendue spectrale de la source pouvant atteindre 80 nm (bande « télécom » étendue dite « C + L »), le nombre de réseaux multiplexables sur une seule ligne de mesure peut donc atteindre 60 à 70 par armature.

Plusieurs procédés de lecture de longueur d'onde de Bragg ont été mis au point depuis une vingtaine d'années [43], la plus connue et la plus répandue étant la mesure spectrale.

Ce procédé d'interrogation met en œuvre une source large émettant aux alentours de $1,55 \mu\text{m}$. Il peut s'agir d'une diode électroluminescente ou superluminescente ou bien d'une fibre dopée erbium émettant en régime de superfluorescence (fibre dopée excitée par une diode laser ($0,98 \mu\text{m}$ ou $1,48 \mu\text{m}$) et dont le rayonnement est transmis au travers d'un isolateur optique). Un spectromètre conventionnel basé sur un réseau de diffraction ou sur un procédé de transformation de Fourier enregistre les spectres des réseaux de Bragg présents sur la ligne.

La détermination précise des longueurs d'onde s'effectue le plus souvent par une méthode de traitement du signal du type calcul de mi-hauteur ou bien par un ajustement mathématique de la réponse du réseau (e.g. méthode de moindres carrés (maximum de vraisemblance)).

3.3.5 Procédé OFDR (*Optical Frequency - Domain Reflectometry*)

Le principe du procédé OFDR est décrit dans plusieurs publications [44], [45]. La technique consiste à injecter la lumière d'un laser monomode, émettant en

régime continu (*CW*) et accordé en fréquence, dans le cœur d'une fibre optique monomode et à enregistrer les signaux d'interférence entre le signal Rayleigh rétrodiffusé par la fibre et un signal de référence interne à l'appareil. Le dispositif Luna OBR4600 fournit ainsi deux signaux correspondant aux deux polarisations de la lumière dans la fibre. L'appareil détermine ensuite le module carré de la somme des deux signaux pour obtenir un signal indépendant de la polarisation. Ce signal résultant (exprimé en fonction de la fréquence) est ensuite converti dans le domaine spatial par transformée de Fourier. Le signal obtenu correspond au coefficient de réflexion/diffusion le long de la fibre. Une résolution spatiale de l'ordre de quelques dizaines de micromètres est obtenue pour une accordabilité de plusieurs dizaines de nm (la résolution spatiale est inversement proportionnelle à la gamme d'accordabilité). L'étendue de mesure de l'OBR4600 est de 80 mètres en version standard et jusqu'à 2 km en version étendue.

Ce mode permet de mener des investigations très précises de circuits optiques dans le domaine spatial (au même titre qu'un OTDR, mais beaucoup plus précis).

Le profil de diffusion Rayleigh est fonction des imperfections aléatoires (bulles d'air, fluctuations d'indice) de la fibre à l'échelle sub-micrométrique. Il en constitue ainsi une signature figée dans le matériau lui-même. Au plan métrologique, lorsque la fibre est soumise à une élévation locale de température, son indice de réfraction local est modifié par effet thermo-optique et la silice subit une dilatation thermique. De même, lorsque la fibre est soumise à un effort axial, l'indice de réfraction est modifié par effet élasto-optique et le profil de rétrodiffusion est déplacé par élasticité. Dans les deux cas, il en résulte un décalage de chemin optique (indice de réfraction et distance) qui a pour effet de décaler spatialement le profil de diffusion par rapport à une situation de référence.

Une intercorrélacion entre un profil de rétrodiffusion de référence et un profil après interaction d'un mesurande (température, déformation) permet de déduire l'écart fréquentiel (ou distance) entre les deux profils. Cette procédure d'intercorrélacion s'effectue sur des segments de fibres (*gauge*) de longueur

typiquement centimétrique et donne accès à des profils de température ou de déformation le long de la fibre optique.

Une cellule à gaz permet de mesurer la longueur d'onde du laser de manière absolue et garantir les données métrologiques.

Le décalage de la fréquence OFDR, similaire à celui d'un Réseau de Bragg, est établi par l'équation suivante :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = -\frac{\Delta\nu}{\nu} = K_T\Delta T + K_\varepsilon\varepsilon \quad (9)$$

où λ et ν sont respectivement la longueur d'onde et la fréquence de l'onde,

K_T ($\sim 6,45 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$) et K_ε ($\sim 0,780$) sont respectivement les sensibilités en température et en déformation, ΔT la variation de température et ε la déformation appliquée à la fibre [46].

Pour une fibre de type *Bow-Tie* par exemple, le décalage obtenu par autocorrélation est essentiellement dépendant de la température tandis que le décalage obtenu par intercorrélations sur une fibre monomode standard dépend de la température et de la déformation axiale. Les deux profils de température et de déformation peuvent alors être discriminés avec des précisions de l'ordre de $3,5 \text{ }^\circ\text{C}$ et $35 \mu\text{déformations}$, compte-tenu du conditionnement matriciel satisfaisant [47].

D'après le fabricant, la technique OFDR offre (en mode standard) une résolution spatiale de 3 mm , avec une résolution thermique de $\sim 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ et en déformations de $\sim 1 \mu\text{m/m}$. En pratique, ces résolutions métrologiques sont obtenues sur des résolutions spatiales plus importantes (plusieurs cm).

3.4 Conclusions

La fibre comme capteur est un domaine très vaste, avec des applications dans quasiment tous les domaines physiques. Elle offre des avantages très importants en termes de sensibilité, résolution et dimension de surface d'auscultation. Par contre, chaque technique d'interrogation a ses avantages et inconvénients. Le procédé ponctuel Bragg et les procédés repartis basés sur les diffusions Raman, Brillouin, Rayleigh (OFDR) offrent des

caractéristiques différentes, ce qui fait que chaque méthode correspond à une application en particulier. Dans le cas de la corrosion, nos objectifs sont d'avoir la plus grande surface d'auscultation avec la résolution minimale. C'est pour cela qu'*a priori*, les métrologies les plus adaptées pour suivre un phénomène de corrosion sont les techniques Bragg et OFDR-Rayleigh.

Chapitre 4 : Etat de l'art CFO de Corrosion

Une étude de l'art antérieur est nécessaire pour analyser les approches déjà établies par la communauté scientifique. Cette recherche permettra de faire un bilan sur les techniques déjà employées, et fournir des pistes pour un développement et/ou une amélioration des systèmes déjà existants.

4.1 Capteur de corrosion colorimétrique

4.1.1 Procédé de P. Fuhr *et al.*[48]

P. Fuhr et D.R. Huston (Université du Vermont, USA) décrivent un CFO de corrosion applicable à des ouvrages de Génie Civil (GC) en béton armé qui repose sur une mesure spectrale déportée par fibre optique. L'instrumentation de lecture met en œuvre une source large (émettant dans le visible) et un spectromètre adapté. Chaque point de mesure est éclairé par une fibre d'émission et la lumière diffusée par la surface de l'armature est acheminée vers l'extérieur de l'ouvrage par une seconde fibre (de collection) pour y être analysée dans le domaine spectral (Figure 15). La comparaison entre les spectres types (obtenus en présence ou non de corrosion) permet de détecter la corrosion au point observé. La mesure est auto-référencée (puisque basée sur une mesure spectrale).

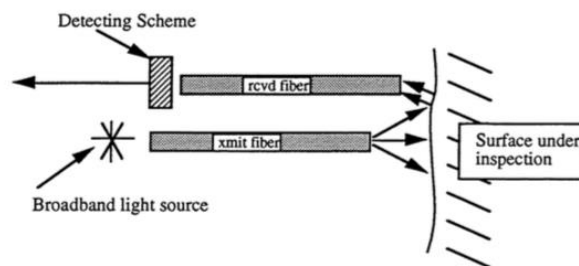


Figure 5. Twin-fiber spectroscopic sensing.

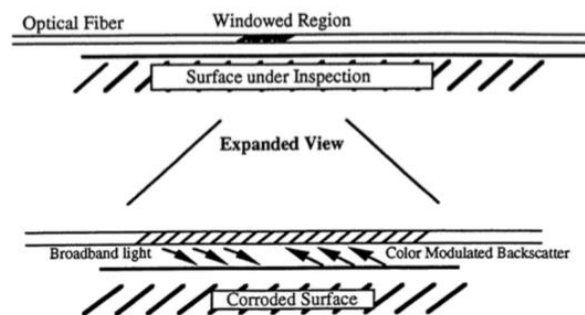


Figure 15 : Procédé de P. Fuhr *et al.* [48]

Cependant, il s'agit d'une mesure ponctuelle qui met en jeu un très grand nombre de fibres (deux fois le nombre de capteurs) ce qui est délicat à mettre en place sur le terrain. Enfin, le CFO réalise une mesure en surface et donc

l'évolution de la corrosion en profondeur dans l'armature semble difficile à évaluer. En pratique, les auteurs mettent ainsi en évidence un effet de seuil dans le comportement de leur capteur.

4.1.2 Procédé de N. Singh *et al.* [49]

Une variante du procédé précédent, employant des coupleurs Y, a été démontrée par N. Singh *et al.*

4.2 Capteur de corrosion en intensité lumineuse

4.2.1 Procédé de J. Sirkis [50]

J. Sirkis de l'Université du Maryland (USA) a décrit un CFO de corrosion basé sur un interféromètre de Fabry-Pérot connecté en extrémité de fibre optique. Ce type de CFO interférométrique est déjà utilisé dans l'industrie pour réaliser des mesures de température ou de déformation. L'originalité du dispositif de Sirkis réside dans son utilisation conjointe comme capteur de corrosion.

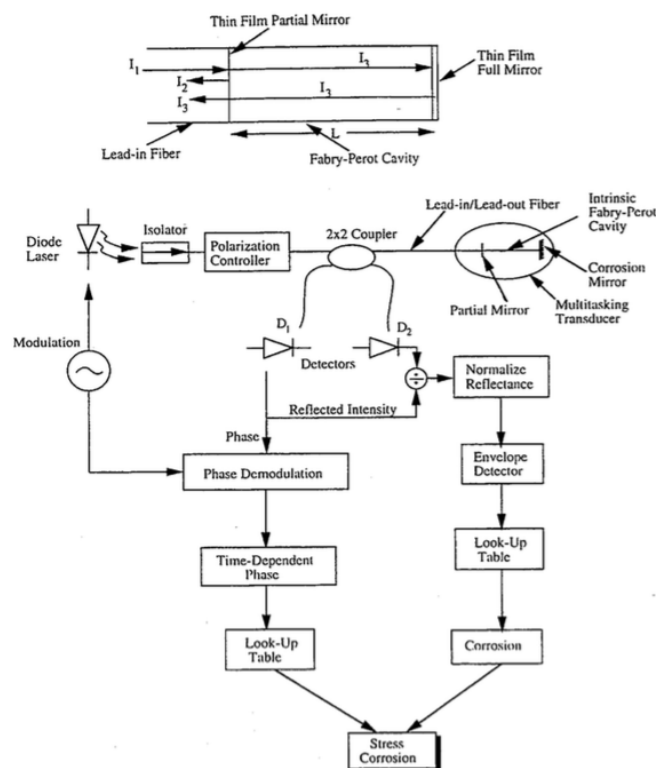


Figure 16 : Procédé de J. Sirkis [50]

Cet interféromètre (Figure 16) est constitué d'un premier miroir déposé en bout de fibre qui ne réfléchit que partiellement la lumière. Une seconde fibre de courte longueur est connectée en extrémité de cette première fibre et une seconde couche de métal (similaire à celui utilisé dans la structure à surveiller) est déposée en extrémité, formant ainsi une cavité. La lumière transmise dans la cavité est alors filtrée en réflexion par la fonction de transfert de l'interféromètre (faisant intervenir la phase et l'amplitude du signal). La phase est fonction du parcours optique de la cavité (qui dépend de la température et de son état de déformation) tandis que l'amplitude est fonction du coefficient de réflexion du second miroir exposé à l'environnement et de son degré de corrosion.

L'utilisation d'un coupleur 2x2 permet de mesurer le signal d'entrée et le signal réfléchi. La réflectivité est alors calculée à partir du quotient de ces deux signaux, auto-référencé en intensité.

4.2.2 Procédé de S. Dong *et al.* [51]

S. Dong *et al.* décrivent un capteur de corrosion à fibre optique basé sur l'évolution de la transmission par une fibre gainée aluminium (adaptée à la surveillance de structures en aluminium). La propagation lumineuse dans un guide optique est obtenue par réflexion totale.

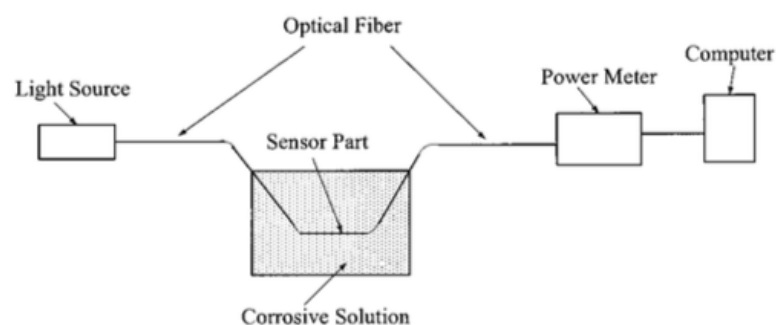


Figure 17 : Procédé de S. Dong *et al.* [51]

La présence d'un film d'aluminium transforme cette réflexion totale en une réflexion métallique moins performante. Le principe du capteur repose donc sur le changement de réflexion consécutif au décollement du film d'aluminium

corrodé, libérant ainsi l'interface air-verre et permettant à la lumière d'être à nouveau guidée par réflexion totale (Figure 17). Il y a donc augmentation de lumière transmise par le CFO à mesure que la corrosion progresse.

4.2.3 Expérience de C.K.Y. Leung [52]

C.K.Y. Leung *et al.* de l'Université de Hong Kong (Chine) décrivent un procédé de détection de la corrosion basé sur la variation de réflectivité d'un film de fer déposé (par pulvérisation ionique (*sputtering*)) en extrémité de fibre optique. La réflectivité du film de fer diminue graduellement au fur et à mesure que celui-ci s'oxyde jusqu'à atteindre la valeur limite de Fresnel typique de l'interface air-silice (environ 4 %). Les auteurs mesurent la quantité de lumière renvoyée par le capteur (Figure 18).

Les CFO proposés par S. Dong et C.K.Y. Leung sont peu coûteux, de constitution simple et permettent de réaliser une mesure directe de la corrosion.

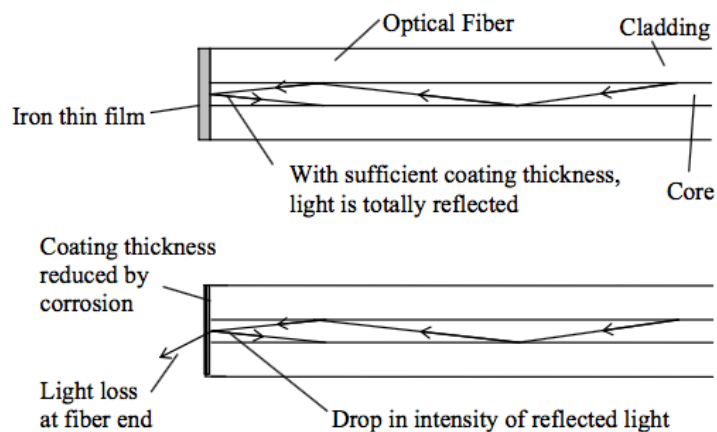


Figure 18 :Expérience de C.K.Y. Leung [52]

En revanche, la mesure d'une quantité de lumière ne renseigne pas directement sur la transmission de la fibre ou la réflectivité du film puisqu'il faut faire l'hypothèse que la transmission des fibres reste constante. Cette hypothèse est irréaliste en conditions réelles de GC sur des durées multi-décennales. En effet, la transmission optique se dégradera probablement au cours du temps pour de multiples raisons bien identifiées par l'homme de l'art

(connecteurs vieillissants, pertes par courbures, hydrogénation de la silice, etc.) de sorte que la quantité de lumière peut diminuer notablement sans que le capteur ne soit corrodé pour autant. Il en résulte un risque de fausse alarme inacceptable pour l'exploitant. Les auteurs ne mentionnent aucune solution permettant de s'affranchir des fluctuations de transmission optique.

De plus, aucun multiplexage n'est possible et il faut donc autant de fibres que de points de mesure. Cela complexifie la connectique et le câblage et *in fine* augmente les coûts d'installation, plus élevés que les coûts des capteurs eux-mêmes, ce qui compromet le bien-fondé de cette démarche technico-économique.

Pour finir, le métal utilisé pour former le film réflecteur ou le revêtement de fibre n'est pas rigoureusement équivalent aux matériaux utilisés pour les armatures de renforcement puisque déposé par pulvérisation. Le potentiel d'oxydo-réduction n'étant pas rigoureusement le même, un effet de pile peut en résulter entraînant une consommation préférentielle du capteur au détriment de l'armature (ou l'inverse) et en faussant l'interprétation.

4.2.4 Expérience de Y.L. Lo *et al* [53]

Y.L. Lo *et al.* décrivent un capteur de corrosion basé sur la mesure d'atténuation dans un segment de fibre recouverte de cuivre et délimitée par deux réseaux de Bragg. Compte-tenu de la possibilité de multiplexage spectral, une pluralité de capteurs opérant en réflexion peuvent être adressés en série sur une seule fibre. Pour chaque point de mesure, le premier réseau est placé en amont (proche de l'instrumentation de lecture) et réfléchit un signal de référence en intensité. Le second réseau (à une longueur d'onde différente) réfléchit un second signal correspondant à l'amplitude du premier signal, atténué par la transmission (en aller-et-retour) au sein de la portion de fibre sujette à la corrosion. Le ratio de ces deux amplitudes permet donc de remonter à l'atténuation induite par la portion de fibre, de façon autoréférencée (*i.e.* indépendamment du signal d'entrée). De plus, ce procédé permet également de réaliser une mesure d'intensité indépendamment du décalage spectral généré par les fluctuations de température et/ou de chargement axial.

La portion de fibre entourée par les deux réseaux est rendue sensible à la corrosion en amincissant la gaine par gravure chimique (*etched taper*) puis en déposant du cuivre par dépôt chimique (*electroless plating*). Ce procédé semble applicable à d'autres matériaux.

Par rapport aux deux capteurs précédents, la mesure est auto-référencée et paraît donc plus fiable. Cependant, au même titre que dans l'expérience de S. Dong [51], le film métallique présente une transmission moins élevée que la réflexion totale à l'interface air-silice et le ratio (*i.e.* la transmission du capteur) augmente à mesure que la corrosion progresse et libère le film métallique.

4.2.5 Expérience de Martins-Filho *et al.* [54]

J. Martins-Filho *et al.* décrivent un CFO de corrosion reposant sur l'usage d'une simple fibre optique à l'extrémité clivée et revêtue d'un film d'aluminium. Chacun de ces CFO est connecté à une fibre de déport par un coupleur Y (à faible taux de couplage ~ 3 % et 9 %, progressif en fonction de la distance) et interrogé par un réflectomètre OTDR. Le principe de mesure de la corrosion est donc similaire à celui de S. Dong et C.K.Y. Leung mais avec l'avantage d'être auto-référencée par rapport à la ligne de base de l'OTDR (*i.e.* diffusion Rayleigh de la fibre de déport).

Il s'agit donc d'une version multipoints des capteurs précédents, présentant donc les mêmes limitations.

4.3 Capteurs de corrosion reposant sur un effet mécanique

4.3.1 Procédé d'E. Uddet *et al.* [55]

E. Udd *et al.* décrivent un capteur de corrosion constitué d'une fibre optique biréfringente (*Side hole, Panda* ou *Bow-Tie* par exemple) avec un réseau de Bragg (*Fiber Bragg Grating*) photo-inscrit dans le cœur, prise en étau entre deux demi-cylindres guidés par un cylindre porteur (Figure 19). Il est nécessaire d'orienter les axes neutres de la fibre pour les faire coïncider avec l'orientation des efforts transverses. Les réseaux de Bragg étant des transducteurs multiplexables dans le domaine spectral, une pluralité de

capteurs identifiés en longueur d'onde peuvent être placés en série sur la même fibre optique.

Les fibres sont précontraintes au montage par écrasement, ou par refroidissement après les avoir assemblées à haute température et en tirant profit de leur différence de coefficient de dilatation.

Cette contrainte transverse accroît la biréfringence existante (de par son orientation préférentielle). Celle-ci se manifeste dans le domaine optique par un dédoublement des deux pics de Bragg étant donné qu'il apparait alors deux indices (*i.e.* un mode de propagation pour chacun des deux états de polarisation principaux de la lumière sur les axes neutres) et donc deux longueurs d'onde de Bragg. L'ampleur de la biréfringence est suffisante pour séparer les deux pics dans le domaine spectral (critère de séparation de Rayleigh) et réaliser une mesure de corrosion ultérieure.

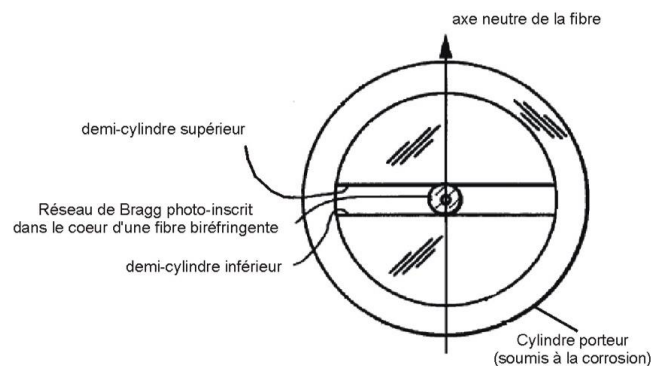


Figure 19 : Schéma de principe du CFO proposé par E. Udd *et al* [55]

Lorsque le cylindre support se trouve en phase de corrosion, sa rigidité évolue (changement de module d'Young et d'épaisseur de paroi) ce qui a pour effet de relâcher la contrainte de compression transverse. L'ampleur du décalage en longueur d'onde est proportionnel à la variation d'amplitude de la contrainte appliquée (et donc fonction de l'ampleur de la corrosion).

Le montage proposé présente l'avantage de permettre une séparation des contributions en température et en corrosion. Les deux longueurs d'onde des deux pics de Bragg sont alors corrélées à l'augmentation de température et de

corrosion (contrainte transverse) et ces deux paramètres métrologiques sont déterminés sélectivement par l'inversion d'un système matriciel.

De la même façon, une déformation axiale appliquée au cylindre support est transmise à la fibre. Les deux modes en polarisation du réseau sont également décalés de la même valeur (mode commun de déformation) et ce montage permet donc aussi de séparer l'effet de la corrosion de celui d'un chargement axial du capteur lié par exemple aux contraintes thermomécaniques de l'ouvrage.

Une variante de ce procédé consiste à photo-inscrire deux réseaux à deux longueurs d'onde différentes au même endroit dans une fibre biréfringente dans le but de mesurer également la composante axiale de la déformation.

4.3.2 Expérience de Zheng *et al.* [56]

Z. Zheng *et al.* (Université Xiamen, Chine) décrivent un procédé de détection très proche de celui décrit par Grattan *et al.* Celui-ci consiste à polir la surface d'une armature de renforcement sur une longueur de 20 mm environ, à y enrouler une fibre avec un réseau de Bragg photo-inscrit successivement recouverte d'une protection époxy (*i.e.* le réseau est placé perpendiculairement à l'axe, contenu dans la section de l'armature). Lors de la corrosion de l'acier, le volume des résidus corrodés augmente conduisant à une augmentation de la déformation du réseau (augmentation de longueur d'onde de Bragg), proportionnelle à l'avancée de la corrosion (Figure 20).

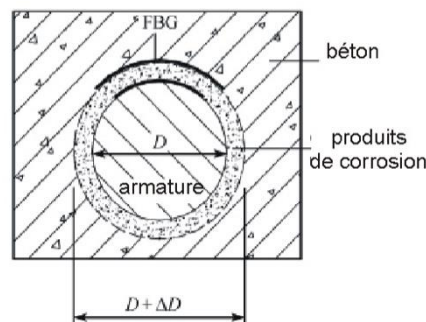


Figure 20 : Schéma de principe du CFO proposé par Z. Zheng *et al.* [56]

4.3.3 Expérience de Gao *et al.* [57]

J. Gao *et al.* de l'Université de Nanjing (chine) décrivent un procédé de détection de corrosion par réseau de Bragg. Les auteurs utilisent deux armatures de même dimension placées en contact mais de compositions légèrement différentes. La première est réalisée avec le même acier que les autres armatures de l'ouvrage tandis que la seconde est en acier inoxydable. Deux réseaux sont collés, un sur chaque section d'armature (en extrémité).

Le réseau collé sur l'armature en acier inoxydable sert à mesurer la température.

Le second réseau, collé sur l'armature en acier standard, est sensible à la température et à la contrainte de traction due à l'expansion des produits de corrosion.

La différence de longueur d'onde entre les deux réseaux (par rapport à la situation de référence sans corrosion) permet de détecter sélectivement la déformation induite par la corrosion (les deux coefficients de dilatation des deux aciers étant considérés comme équivalents).

Ce procédé permet de mesurer l'avancée de la corrosion en un point précis de l'ouvrage, indépendamment de la transmission optique et de la température. L'usage de réseaux de Bragg comme transducteurs permet aussi d'envisager un multiplexage (en longueur d'onde) comme décrit par E. Udd *et al.* Cependant, la mesure est réalisée en extrémité d'armature (sur sa section) et non le long de sa génératrice, ce qui réduit en pratique le nombre de points de mesure au sein de l'ouvrage (deux points par armature, un à chaque extrémité).

4.3.4 Expérience de Grattan *et al.* [58]

S.K.T. Grattan *et al.* décrivent un procédé de détection des effets mécaniques de la corrosion par un capteur à réseau de Bragg sensible aux contraintes induites par l'expansion des produits de corrosion (oxydes de fer). Les auteurs prétendent par ce procédé détecter l'apparition de la corrosion bien plus tôt qu'avec les techniques traditionnelles.

Les réseaux de Bragg sont collés à l'époxy le long de l'armature de fer sous test (diamètre 12 mm), elle-même insérée au sein d'une éprouvette en béton chloré ($25 \times 25 \times 11\text{ cm}^3$) soumise à une corrosion accélérée par courant imposé. Les auteurs ont expérimenté deux procédés de collage (recouvrement total ou partiel du réseau de Bragg) et mettent en évidence un décalage de longueur d'onde de Bragg induit par l'expansion des produits de corrosion (compression ou traction).

4.3.5 Expérience de S.A. Wade *et al.* [59]

S.A. Wade *et al.* (Université Monash, Australie) décrivent un CFO de corrosion de type témoin de corrosion basé sur un procédé mécanique. Ils utilisent pour cela des fibres gainées aluminium précontraintes pour surveiller la dégradation de structures en aluminium.

4.3.6 Expérience de Lo *et al.* [60]

Y.L. Lo *et al.* décrivent un capteur de corrosion à fibre optique utilisant un seul réseau de Bragg suffisamment étendu de sorte qu'une portion est recouverte par un métal (similaire à celui utilisé pour la structure à surveiller) tandis que la portion restante est laissée libre. L'insertion au sein du bloc métallique s'accompagne d'une mise en traction (précontrainte) de sorte que les deux portions de réseaux présentent des raies spectrales bien séparées (discernables). La portion libre est sensible à la température tandis que la portion recouverte de métal est sensible à la température et à la déformation imposée par le métal. A mesure que la corrosion progresse, la section du bloc de métal diminue, de même que sa rigidité, de sorte que la mesure du décalage de longueur d'onde fournit une indication sur la progression de la corrosion, indépendamment de la température.

4.3.7 Expérience de Lee *et al.* [61]

J-R Lee *et al.* décrivent un CFO de corrosion basé sur l'usage d'un réseau de Bragg prétendu (*prestrained*) avant collage par époxy sur une plaque de métal sacrificielle (*i.e.* destinée à être corrodée). Après polymérisation, les éléments

mécaniques de prétension sont retirés (platine de déplacement). Il apparaît alors un état d'équilibre entre la force exercée par la fibre (prétendue) et celle exercée en réaction par la plaque (mise en compression), fonction de leurs rigidités respectives (Figure 21). Un décalage permanent en longueur d'onde de 2 nm est observé dans la réponse spectrale du réseau (déformation équivalente d'environ $1670\text{ microdéformations}$). Chaque zone de colle s'étend sur 10 mm et le CFO fait 34 mm de long. Seule la partie centrale du CFO (14 mm) est exposée à l'environnement (les zones collées sont protégées par un revêtement acrylique).

Sous l'action de la corrosion, la masse et la section de la plaque support se réduisent. La réduction de rigidité consécutive à la corrosion entraîne une modification de la valeur du décalage spectral.

Les auteurs décrivent un procédé de compensation thermomécanique basé sur l'usage de deux capteurs de Bragg de longueurs d'onde différentes placés parallèlement et proches l'un de l'autre (moins d'un centimètre). Un capteur est intégralement protégé de la corrosion par l'application d'un revêtement acrylique sur toute sa surface tandis que l'autre est exposé au milieu extérieur.

Ce CFO ne détecte qu'un relâchement de contrainte liée à une corrosion par piqures et paraît fragile pour une insertion en béton.



Figure 21 : Schéma de du CFO de corrosion proposé par J-R Lee *et al.* [61]

4.3.8 Expérience de Mc Cague *et al.* [62]

Mc Cague *et al.* décrivent un CFO de corrosion basée sur un effet de biréfringence accrue obtenu dans un fibre à cristal photonique (FCP). Une charge appliquée sur la fibre modifie l'indice de réfraction et génère une biréfringence. Une corrélation par interférométrie est effectuée pour déterminer le décalage spectral. Mc Cague *et al.* utilisent ce principe pour mesurer directement la corrosion à l'interface fer-béton, ce qui permet de

mesurer l'état de corrosion *in situ*. Ce dispositif présente cependant beaucoup d'inconvénients : multiplexage réduit, détection ponctuelle, nécessite un accès aux deux extrémités de la fibre, complexité du dispositif optique (polariseur, coupleur etc.).

4.3.1 Expérience de Zhang *et al.* [63]

Zhang *et al.* proposent un capteur de corrosion, basé sur la mesure du décalage de longueur d'onde de Bragg. L'assemblage consiste à décaper la zone de la fibre où est photo-inscrit le réseau de Bragg, jusqu'à $15\ \mu\text{m}$ de diamètre. Ensuite, une couche de fer (pureté 99 %) est déposée par pulvérisation. Le système offre une mesure directe de la corrosion du fer (Fe), mais sur un matériau différent de celui constituant la barre de renforcement, puisqu'il s'agit d'un alliage. Le capteur est très fragile (quelques dizaines de μm), ce qui pose un problème de fiabilité en conditions réelles.

4.4 Capteurs de corrosion réfractométriques

4.4.2 Expérience de Sinchenko *et al.* [64]

Sinchenko *et al.* décrivent un système de détection de corrosion en mesurant les cations dégagés par la réaction cathodique *via* une fibre optique revêtue d'une gaine réactive. La gaine présente une fluorescence dépendante de la concentration des cations. Il s'agit d'une mesure indirecte de la corrosion. Ce système est très complexe à mettre en place (gainage de la fibre), la sensibilité et réactivité du capteur n'est pas stable dans le temps, et se dégrade en présence d'eau.

4.4.3 Expérience de Cooper *et al.* [65]

Cooper *et al.* proposent un système constitué d'une fibre optique à réseau à longue période (LPG) gainée d'hydrogel conçu pour réagir aux indicateurs de la corrosion : pH , humidité et ions métalliques. La réaction provoque un changement d'indice de réfraction qui induit une évolution de la longueur

d'onde du LPG. La réponse du capteur est proportionnelle à la concentration de l'élément témoin. Il ne s'agit donc pas d'une mesure directe de la corrosion.

4.4.4 Expérience de T. Hien Nguyen *et al.* [66]

T. Hien Nguyen *et al.* proposent un méthode de mesure du pH , dans la gamme du pH 10 ~ 13. Une sonde chimique à base de fluorescéine réagit aux changements du pH . Similaires aux autres techniques chimiques, il s'agit d'un mesure indirecte de la corrosion, présentant une stabilité limitée dans le temps (~ 50 min), ainsi que la durée de la mesure. D'autre part, la sonde délivre une mesure ponctuelle.

4.5 Conclusion

Les premiers CFO proposés pour la détection de corrosion reposent sur une analyse chimique (e.g. mesure du pH , concentration en chlorure, etc.). Cependant, le pH ne constitue pas un indicateur déterminant de la corrosion, bien qu'un niveau faible de pH (révélateur d'acidité) favorise les mécanismes d'oxydoréduction. Il en est de même pour la concentration en agents corrosifs (e.g. chlorures). Ces CFO délivrent une mesure indirecte de la corrosion.

Notre objectif est de mesurer directement la corrosion des armatures (ratio fer/oxyde de fer).

Trois procédés de détection directe de la corrosion par CFO sont décrits dans l'art antérieur. Il s'agit de CFO colorimétriques, mécaniques ou bien basés sur une variation d'intensité lumineuse. Ils délivrent un signal fonction de la quantité d'oxyde. Par définition, il s'agit donc bien d'une mesure directe de la corrosion.

Tous les CFO décrits permettent d'effectuer une mesure directe de la corrosion. Les plus aboutis fournissent une mesure auto-référencée, indépendante des fluctuations de température. Ils peuvent être enfouis dans l'ouvrage à surveiller.

Parmi les CFO reposant sur un effet mécanique, certains sont des témoins de corrosion (comportement « tout-ou-rien ») et d'autres fournissent une mesure

graduée (progressive). Tous exploitent des réseaux de Bragg comme éléments de conversion corrosion-déformation.

Cependant, leur principale limitation réside dans le caractère ponctuel de la mesure et dans la compensation thermomécanique mise en œuvre. Étant donné que le nombre de points de mesure est limité pour des raisons technico-économiques (coût du capteur mais surtout du déploiement et de la connectique), aucun des CFO décrits ne permet de garantir une surveillance optimale de la progression de corrosion au sein de l'ouvrage. En effet, les agents de corrosion peuvent progresser au sein de l'ouvrage entre deux capteurs successifs de sorte que les armatures passives peuvent être corrodées bien avant les capteurs. Cette configuration ne permet donc pas de garantir une détection précoce à un coût optimisé.

De plus, les CFO de corrosion reposant sur un mécanisme de conversion corrosion-déformation doivent obligatoirement discriminer les effets thermomécaniques globaux appliqués à l'armature de renforcement des effets mécaniques locaux propres à la corrosion.

Seuls les procédés d'E. Udd [55] et de Lee [61] décrivent une solution permettant de réaliser une telle discrimination.

Chapitre 5 : Conception du capteur

Les dispositifs décrits dans le Chapitre 4 mettent en évidence la faisabilité d'une mesure fiable de la corrosion basée sur les effets mécaniques induits par l'apparition des produits de corrosion (oxydes de fer pour les armatures du béton). Nous avons établi précédemment que la corrosion des armatures dans le béton armé se manifeste physiquement de deux façons : piqures et carbonatation. De même, deux comportements opposés peuvent apparaître. Dans un premier cas (carbonatation), il y a augmentation de pression à l'interface fer-béton consécutive à l'augmentation de volume des produits oxydés, jusqu'à l'éclatement de la couche de béton superficielle. Dans un second cas, en présence de fissures, il peut y avoir évacuation des produits oxydés générés par une corrosion par piqures entraînant un affaiblissement du renforcement sans apparition de surpression interne. De surcroît, la corrosion par piqures apparaît de façon localisée, *a contrario* d'une corrosion par carbonatation, plus étendue (front de carbonatation). Dans ce chapitre, nous proposons une approche de la mesure simultanée de ces deux comportements par un Capteur à Fibre Optique précontrainte.

5.1 Considérations de conception

Pour déterminer la solution optimale de mesure de la corrosion, nous allons lister les différents éléments qui font objet de la recherche, et établir leur rôle dans la conception du capteur.

5.1.1 Corrosion : variables « directes » vs « intermédiaires »

Nous avons cité dans le Chapitre 2 que la principale conséquence de la corrosion est la détérioration mécanique de la structure. Nous allons établir comme objet de mesure les changements physiques induits, soit dans le fer à béton, à l'interface fer/béton ou dans la couche de béton. Les variables de potentiel électrochimique, pH , concentration de chlorures, etc., ne donnent qu'une estimation indirecte de l'état d'avancement de la corrosion.

Option retenue : variable directe.

5.1.2 capteurs « physiques » vs « chimiques »

Les CFO physiques (température, déformation, etc.) décrits dans le paragraphe 3.3 sont intrinsèques (la fibre est le capteur). En contrepartie, les capteurs chimiques nécessitent un conditionnement particulier pour traduire la variable en un phénomène optique mesurable (capteurs extrinsèques). Nous pouvons citer ici les capteurs de pH , où une gaine spéciale est appliquée à la fibre. Le changement de pH modifie l'indice de gaine et la propagation de la lumière dans la fibre. Il est important de mentionner que les gaines réactives des capteurs chimiques vieillissent mal (problème de réversibilité et de perte de performance au cours du temps).

Option retenue : variable physique.

5.1.3 Mesure « continue » vs « discrète »

Nous distinguons également une mesure continue avec différents niveaux intermédiaires d'une mesure binaire (« tout ou rien »). Une mesure continue donne une information de l'évolution du phénomène dans le temps.

Option retenue : mesure continue.

5.1.4 Résolutions spatiale et sensibilité : technique d'interrogation optique

Étant donné que la grandeur à mesurer est une déformation induite par une contrainte mécanique, nous avons privilégié les techniques d'interrogation optiques OFDR et Bragg qui présentent simultanément une excellente résolution spatiale (*cm*) et une grande sensibilité.

Options retenues : techniques d'interrogation OFDR et Bragg.

5.2 Conception du capteur

Considérons une armature passive noyée dans le béton (armatures de renforcement), soumise à l'un des deux agents corrosifs types (chlorures ou CO_2). Le signe et l'étendue de l'évolution de la contrainte appliquée permet de déduire de quel comportement de corrosion il s'agit et *in fine* distinguer une attaque par chlorure d'une attaque par carbonatation.

Prenons de façon arbitraire un comportement linéaire de la corrosion au sein de l'interface fer-béton. La corrosion par carbonatation a pour conséquence l'augmentation des contraintes à l'interface armature-béton. Cette affirmation s'appuie sur les calculs d'expansion de volume effectués dans le chapitre 2, et par l'évidence visuelle lors d'un processus de corrosion (Figure 6). De façon intuitive, la contrainte démarre depuis un état de « repos » jusqu'à un état de détection maximale de corrosion, où intervient l'éclatement de la couche de béton superficielle (Figure 22).

D'autre part, une corrosion par piqures a pour conséquence la perte de masse ferrique, sans augmentation de la contrainte (Figure 23). Une façon de détecter ce phénomène est par le relâchement d'un précontrainte, que nous pouvons obtenir par collage époxy à chaud, technique employée dans le capteur de J-R Lee *et al.* [61].

Si nous combinons ces deux principes, avec la mise en place d'un capteur à fibre optique précontrainte par polymérisation époxy à haute température, nous pouvons estimer que la contrainte augmentera avec une corrosion par carbonatation, comme détaillé dans la Figure 24.

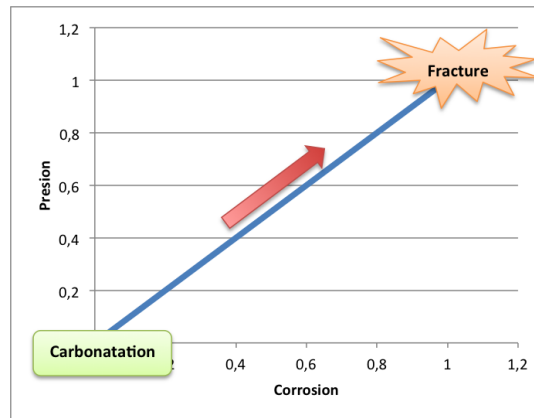


Figure 22 : Relation entre corrosion et pression à l'interface - carbonatation
Exemple de corrosion par carbonatation, où la contrainte augmente jusqu'à la fracture du béton.

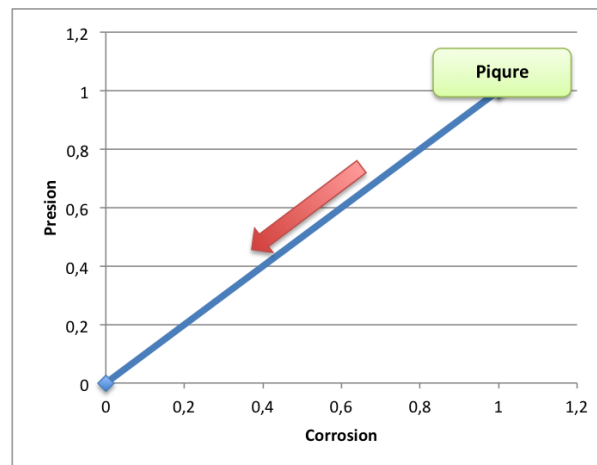


Figure 23 : Relation entre corrosion et pression à l'interface - piqures
Exemple de corrosion par piqures, où la contrainte de précontrainte est relâchée

De cette manière, le même capteur permet donc de distinguer les deux types de corrosion:

En cas de corrosion par chlorures, les résidus de corrosion présentent une cohésion et une rigidité plus faibles (piques). Le film de métal se détache alors du reste de l'armature contribuant à relâcher la précontrainte de compression appliquée par fabrication (*i.e.* le réseau revient à son état initial, avant application de la précontrainte).

En cas de corrosion par carbonatation (pH faible, proche de 8 à 8,5), les résidus de corrosion du fer présentent un volume important et une rigidité équivalente à celle de l'acier initial (200 GPa).

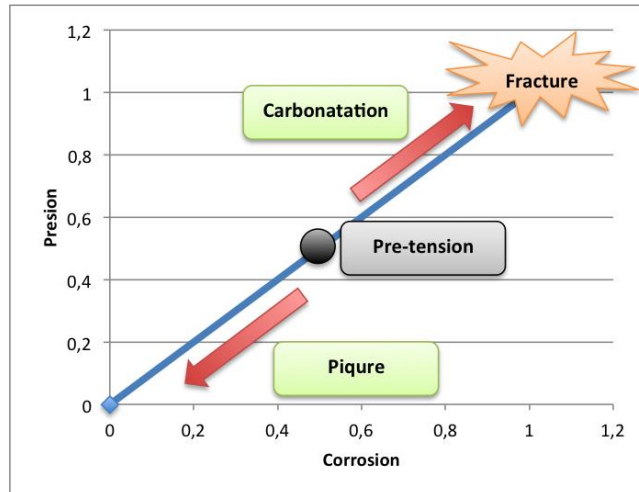


Figure 24 : Principe du capteur de corrosion combiné
Comportement théorique du capteur pour une corrosion par carbonatation et par piqures

Le film d'oxyde de fer conservant sa cohésion, il s'ensuit une mise en compression de l'ensemble fer-fibre-époxy-béton avec équilibre des contraintes. Cette compression de type hydrostatique se cumule à la précontrainte de fabrication. Le béton étant un matériau moins rigide que le fer ($E_{\text{béton}} \sim 30 \text{ GPa}$), celui-ci se déforme environ 7 fois plus. A la rupture en traction du béton d'enrobage ($\sim 200 \mu\text{déformations}$), la pression atteinte est de l'ordre de 6 à 10 MPa (soit entre 60 et 100 bar).

L'amplitude de la déformation équivalente est de l'ordre de quelques dizaines de microdéformations (entre -30 et -50 $\mu\text{déformations}$). Celle-ci est donc beaucoup plus faible qu'en cas de corrosion par chlorures mais reste cependant observable avec les instrumentations optiques OFDR ou Bragg qui présentent une résolution de quelques microdéformations.

5.3 Conclusions

De façon théorique, la mesure de corrosion par transduction des changements à l'interface fer-béton est possible. Contrairement aux CFO décrits dans l'art antérieur, le CFO proposé fournit une mesure répartie (ou distribuée - multipoints -) le long de la structure par une fibre optique. L'apparition de corrosion se manifeste par une modification de l'état de contrainte appliquée à la fibre.

Chapitre 6 : Mesure directe par FBG

La technique de précontrainte permettra d'établir le point de référence du système. Nous allons tester le principe de fonctionnement de notre capteur avec la technique de réseau de Bragg : la mise en place de l'expérience est moins complexe et plus rapide que la technique OFDR. Une fois la technique validée par l'usage de réseaux de Bragg, elle sera étudiée dans un second temps par OFDR.

6.1 Principe du capteur de corrosion par FBG

La longueur d'onde caractéristique (λ_b) d'un réseau de Bragg est définie par l'équation (5), comme établie dans le Chapitre 3.

Sous l'effet d'un changement de température ou l'application d'une contrainte, le pas (Λ) du réseau évolue de même que l'indice de réfraction du cœur de la fibre. Ces deux paramètres ont pour effet de faire évoluer la longueur d'onde de Bragg.

Du point de vue du modèle mathématique, 3 facteurs indépendants interviennent dans l'équation de longueur d'onde (équation (6)) la température (T), déformation axiale (ϵ) et la pression (P).

Lors de la fabrication du capteur, on observe 3 états : repos, chauffage, précontrainte. Le capteur de Bragg est initialement placé sur le métal d'essai. Ensuite, nous chauffons l'ensemble jusqu'à atteindre la température optimale pour la polymérisation de la colle époxy. Seulement le premier terme (ΔT) de l'équation (6) intervient dans le décalage spectral. Une fois l'époxy appliqué et la polymérisation atteinte, le capteur est refroidi jusqu'à température ambiante (Figure 25). Le rétreint du métal étant plus important que celui du verre de silice, la fibre est placée sous précontrainte, via le premier terme de l'équation (6). Ce capteur correspond au schéma proposé dans le Chapitre 5, avec la réponse théorique de relâchement de la contrainte en présence d'une corrosion par piqures (deuxième terme de l'équation (6)), et une augmentation de la contrainte en présence d'une corrosion par carbonatation (troisième terme de l'équation (6)).

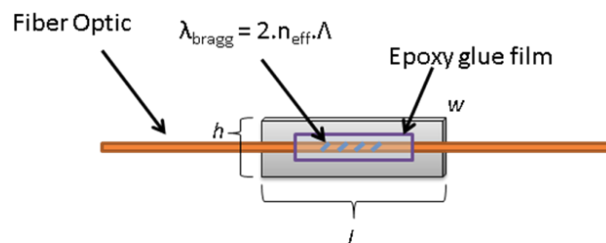


Figure 25 : Schéma du capteur à Réseau de Bragg

6.2 Mise en œuvre

Un capteur prototype a été fabriqué à partir d'une plaque de métal *Fe E-500* de taille $2 \times 1 \times 0,6 \text{ cm}^3$. Le réseau de Bragg a été placé sur une surface découverte de $2 \times 0,4 \text{ cm}^2$. La surface restante a été protégée de la corrosion par une couche isolante, pour favoriser la corrosion sur la surface d'intérêt pour la détection. L'ensemble a été chauffé jusqu'au 95 °C puis la colle époxy est appliquée. Une fois la colle polymérisée, le capteur a été laissé à refroidir pour atteindre la température ambiante, avec l'apparition de la précontrainte. Le réseau de Bragg a été photo-inscrit dans une fibre standard télécom, gainée polyimide. Les mesures optiques ont été effectuées à l'aide d'un analyseur de spectre type « Burleigh WA-7600 WaveMeter ». Les mesures électrochimiques ont été menées à l'aide d'un potentiomètre type « VoltaLabPGZ-100 ».

6.2.5 Corrosion en solution électrolyte : relâchement de la précontrainte

Nous avons effectué une première expérience de corrosion, pour évaluer le comportement en conditions de piqûres. Nous avons submergé la plaque de métal dans une solution électrolyte *Eau / NaCl* (35 g.L^{-1}) pour éviter le confinement des sous-produits de la corrosion. L'accélération du processus de corrosion a été obtenue par l'application d'un flux de courant constant à 70 mA.cm^{-2} .

Selon ces conditions, les produits de corrosion générés à l'interface ont pu diffuser dans l'électrolyte, sans l'apparition des contraintes externes au sein du capteur à Réseau de Bragg. Cependant, la corrosion accélérée a prélevé le métal exposé du capteur, avec comme conséquence la séparation de la fibre de la plaque métallique, et le relâchement de la précontrainte induit lors de la fabrication du capteur.

Comme nous avons établi dans l'équation 6, la longueur d'onde du réseau de Bragg était censée augmenter. La Figure 26 illustre le comportement du réseau de Bragg depuis l'état de repos avant la fabrication du capteur jusqu'à la fin du test de corrosion électrolyte.

A partir de l'état de repos (étape 1), l'ensemble fibre-métal est chauffée jusqu'à la température de polymérisation de la colle époxy. Cette augmentation de température dilate l'ensemble, et crée une augmentation de la longueur d'onde de Bragg (étape 2). On observe ainsi une augmentation de 873 pm pour un décalage de température de 70 K , soit un coefficient de $12,47 \text{ pm.K}^{-1}$.

Nous en déduisons que le coefficient K_{fibre} vaut donc $8,5 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ pour cette fibre.

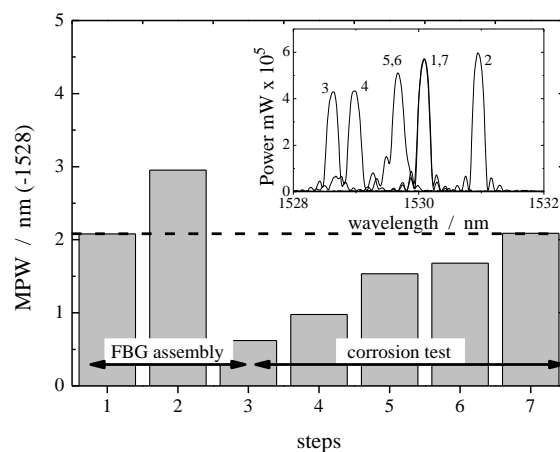


Figure 26 : Longueur d'onde centrale (MPW) à différents étapes

La longueur d'onde a été décalée à 1.528 nm pour un meilleur affichage : condition de repos avant l'assemblage du capteur (étape 1); après chauffage à 95 °C (étape 2); température ambiante, après contraction et début de polarisation (étape 3), mesures successives pendant l'évolution de la corrosion (étape 4 à 6), fin de l'expérience (étape 7). La ligne pointillée horizontale montre que le capteur est revenu après le test à son état initial. Les barres correspondent aux valeurs théoriques obtenues de l'équation (7).

Une fois l'ensemble polymérisé, et de retour à la température d'ambiante, la longueur d'onde est plus faible que la valeur nominale en raison de l'effort de compression appliqué par le métal, supérieur à l'effort de rappel de la silice (étape 3).

	FBG MPW
Etat du capteur	mesure (nm)
T0=25 °C (étape 1)	1.530,086
TP=95 °C (étape 2)	1.530,959
TF=25 °C (étape 3)	1.528,650
TC=25 °C (étape 7)	1.530,093

Tableau 6 : Valeurs expérimentales du MPW
Longueur d'onde centrale du réseau de Bragg aux étapes 1, 2, 3 et 7

Le capteur est soumis à un champ électrique pour accélérer la corrosion. Cette corrosion induit une perte de matière ferrique, qui a pour conséquence un relâchement de la précontrainte appliquée à la fibre. L'ampleur de ce relâchement est apprécié dans l'évolution de la longueur d'onde centrale vers des valeurs plus élevées (étapes 4 à 6), jusqu'à aboutir à la valeur nominale de la longueur d'onde de Bragg (étape 7).

Les résultats expérimentaux sont indiqués dans le Tableau 6.

La corrosion n'est pas un phénomène uniforme dans la surface du métal, et cela nous pouvons le voir par l'apparition des lobes secondaires dans le spectre qui correspondent à un élargissement spectral (*chirp*) consécutif à une distribution de contraintes inhomogène (Figure 26).

La sensibilité d'un réseau de Bragg dépend de sa période (déformation mécanique) mais aussi de son indice de réfraction (effet élasto-optique).

Celle-ci s'exprime en fonction des déformations radiale ε_r et axiale ε_z selon *Ferdinand*[43] :

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = \varepsilon_z - \frac{n^2}{2} [\varepsilon_r (p_{11} + p_{12}) + p_{12} \cdot \varepsilon_z] \quad (10)$$

où $\Delta\lambda_b$ est la longueur d'onde de Bragg, p_{11} et p_{12} sont les paramètres photo-élastiques de la silice, n est l'indice de réfraction du cœur (proche de 1,45 dans le proche infrarouge en l'absence de contraintes).

Les constantes photo-élastiques de la silice sont aussi appelées coefficients de Pockels. Pour la silice, ils ont été déterminés durant les années 1960 et 1970 dans le domaine visible (lampe sodium ou laser hélium-néon).

A la longueur d'onde de 632,8 nm, *Bertholds et Dandliker* [68] obtiennent les valeurs suivantes :

$$p_{11} \sim 0,113 \quad \text{et} \quad p_{12} \sim 0,252 \quad (@ 632,8 \text{ nm})$$

Les coefficients de Pockels augmentent légèrement avec la longueur d'onde. Dans la bande C, on peut prendre comme valeurs de référence :

$$p_{11} \sim 0,14 \quad \text{et} \quad p_{12} \sim 0,28 \quad (@ 1550 \text{ nm})$$

La déformation selon z se déduit des contraintes appliquées selon Timoshenko [67] :

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} = \frac{\sigma_z}{E} - 2\nu \frac{\sigma_r}{E} \quad (11)$$

$$\varepsilon_r = \frac{\sigma_r}{E} (1 - \nu) - \nu \frac{\sigma_r}{E} \quad (12)$$

où ν est le coefficient de Poisson du matériau soumis à cet état de contrainte et E est son module d'Young. Le coefficient de Poisson de la silice vaut environ 0,17 tandis que son module d'Young vaut environ 72 GPa.

En configuration de traction uniaxiale (effort appliqué selon l'axe de la fibre), la contrainte radiale est nulle.

Le système (11)(12) se simplifie et devient :

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} = \frac{\sigma_z}{E} \quad (13)$$

$$\varepsilon_r = -\nu \frac{\sigma_z}{E} = -\nu \cdot \varepsilon_z \quad (14)$$

L'équation de Bragg selon le mode uniaxial devient alors :

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = \varepsilon_z \left(1 - \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + P_{12})] \right) \quad (15)$$

La sensibilité d'un réseau de Bragg se décompose en une partie mécanique et une partie élasto-optique, déterminée par le coefficient p_e qui s'écrit :

$$p_e = \frac{n^2}{2} [p_{12} - \nu(p_{11} + P_{12})] \quad (16)$$

qui vaut environ 0,22 à 1550 nm.

Étant donné que le coefficient de dilatation thermique linéaire de l'acier est proche de $12 \cdot 10^{-6} \cdot K^{-1}$, le décalage spectral attendu vaut :

$$\Delta\lambda = \left(\xi_{\text{fibre}} + 0,78 \times \alpha_{\text{acier}} \right) \times 10^{-6} \Delta T \quad (17)$$

$$\Delta\lambda = (8,5 + 0,78 \times 12) \cdot 10^{-6} \times 1530 \text{ nm} \times (95 - 25) \approx 1,91 \text{ nm}$$

Or le décalage spectral observé expérimentalement a été de $2,31 \text{ nm}$.

Si on prend en compte la contrainte latérale exercée par la colle lors du rétreint (résultant de la différence de coefficients de dilatation thermique entre colle et acier), on constate que le retour à l'ambiante s'accompagne d'une compression légère par la colle de l'ordre de :

$$\sigma_r = E_e \cdot (K_e - K_{\text{acier}}) \cdot \Delta T \approx 3 \cdot 10^9 \times 48 \cdot 10^{-6} \cdot 70 \approx 10 \text{ MPa}$$

Cette compression contribue à une déformation latérale

$$\varepsilon_r = -\frac{10 \text{ MPa}}{72 \text{ GPa}} \cdot (1 - 0,17) - 0,17 \cdot 70 \cdot 12 \cdot 10^{-6} \approx -115 - 142,8 \approx -258 \mu\text{m} \cdot \text{m}^{-1}$$

pour une déformation longitudinale $\square_z = 840 \mu\text{m}$ déformations.

où E_e ($\sim 3 \text{ GPa}$) et K_e ($60 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) sont respectivement le module d'Young et le coefficient de dilatation linéaire de l'époxy.

Le décalage spectral relatif est alors recalculé à partir de la relation (10), pour obtenir :

$$\frac{\Delta\lambda_b}{\lambda_b} = 840 \cdot 10^{-6} - \frac{1,44^2}{2} [258 \cdot (0,14 + 0,28) + 0,28 \cdot 840] \cdot 10^{-6} \approx 708 \cdot 10^{-6} \quad (18)$$

Le décalage spectral d'origine mécanique d'un réseau à 1530 nm est alors 1084 pm . A cela il faut rajouter le décalage d'origine thermique (ξ) qui vaut $12,47 \times 70 \approx 873 \text{ pm}$.

Le décalage spectral total imposé par le rétreint de la colle devient alors : $1,96 \text{ nm}$ (au lieu de $1,91 \text{ nm}$ obtenu précédemment sans prendre en compte l'effet radial).

Il subsiste donc un écart avec la mesure qui peut provenir d'une sous-estimation du décalage thermique liée à des problèmes de convection.

6.2.6 Corrosion en espace confiné : superposition des forces compressives

D'autre part, nous avons effectué un test de corrosion en conditions de confinement. Un bloc de ciment de $6 \times 6 \times 7 \text{ cm}^3$ a été utilisé pour reproduire les conditions de travail auxquelles le capteur sera soumis. Celui-ci a été placé au milieu du bloc, préparé avec du ciment Portland (rapport ciment /eau = 0,6, présence de sel (NaCl) en concentration 35 g.L^{-1} pour favoriser l'initiation de la corrosion). Après 24 heures de séchage dans le moule, l'échantillon est immergé dans une solution $\text{NaOH } 0,1 \text{ M} + \text{NaCl } 35 \text{ g.L}^{-1}$ pendant 6 jours pour la prise du ciment, sans polarisation appliquée. Enfin, nous avons imposé une densité de courant de 100 uA.cm^{-2} jusqu'à la fracture de l'échantillon, qui a eu lieu au 14^{ème} jour.

En forçant les processus de corrosion à l'interface au sein d'un mortier solide limitant la diffusion des produits de corrosion, une nouvelle contrainte de compression s'additionne à la précontrainte existante qui induit une diminution de la longueur d'onde centrale.

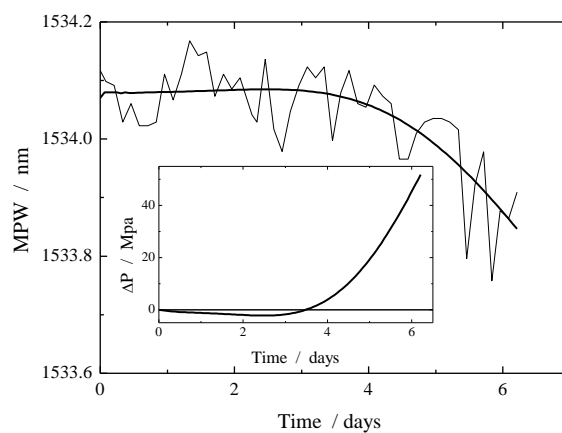


Figure 27 : Évolution de la longueur d'onde centrale - MPW

Test de corrosion accélérée avec une densité de courant imposée de 100 uA.cm^{-2} . Le réseau de Bragg s'est dégradé au 7^{ème} jour de début de la polarisation. La ligne solide correspond à la régression polynomiale. Dans le cadre, la variation de la pression interne estimée à partir de la régression polynomiale $\Delta\lambda_b/\lambda_b = -c\Delta P$; $C = 2,87 \cdot 10^{-6} \text{ MP}\alpha^{-1}$

La Figure 27 montre que, à la différence de l'expérience en électrolyte libre, nous n'observons pas une évolution régulière (étapes 4 à 7), mais plutôt un comportement très perturbé. Cette tendance fluctuante est certainement due à

la formation et la distribution aléatoire de la rouille à l'interface métal – ciment, qui exerce de façon inégale des contraintes de compression sur le réseau dans les premiers jours de polarisation. Au cours du temps, la corrosion généralisée devient de plus en plus importante, avec accumulation massive de rouille à l'interface. Le réseau de Bragg est finalement détruit une semaine après le début de la polarisation. L'expérience a été maintenue jusqu'à fracture de l'échantillon (Figure 28), résultat de l'expansion des forces créées par la transformation des produits de corrosion à l'intérieur du béton. Comme ce matériau possède une faible résistance mécanique à la traction, il n'a pas résisté aux contraintes internes d'expansion de la rouille.



Figure 28 : Fracture de l'échantillon
L'éclatement est dû aux contraintes internes par l'accumulation des produits de la corrosion (rouille) qui ne peuvent être évacuées à la surface

L'évolution de la MPW (*Main Peak Wavelength*) permet d'estimer la pression interne exercée sur le réseau de Bragg. La Figure 27 montre la régression polynomiale de la mesure de longueur d'onde de Bragg. Grâce à la relation entre la longueur d'onde de Bragg et la différence de pression ΔP , $\Delta\lambda_b / \lambda_b = -c\Delta P$, avec $C = 2,87 \cdot 10^{-6} MPa^{-1}$ [69], [70] nous pouvons estimer les contraintes de pression internes. Nous pouvons remarquer que des pressions de dilatation d'environ $40 MPa$ ont été appliquées à l'interface fer-ciment. Cette valeur est élevée en comparaison avec la résistance à la traction du béton ($\sim 3 - 5 MPa$), et pour cela, l'échantillon finit par se fracturer (Figure 28). Il est également intéressant de noter que pendant les premiers jours la pression a diminué, probablement liée à la perte de métal au moment de l'initiation de la corrosion, jusqu'à ce que l'accumulation de la rouille devienne prédominante, ce qu'il advint à partir du 4^{ème} jour.

6.2.7 Corrosion aléatoire : un scénario plus complexe

Au cours des deux expériences précédentes, nous avons imposé une corrosion contrôlée, cependant, en situation réelle, la corrosion apparaît de façon aléatoire (temps et espace), selon différentes vitesses d'évolution.

Ainsi, les noyaux de corrosion formés peuvent augmenter ou s'effondrer avec l'induction des variations de charge de compression ou de traction. Par conséquent, le comportement à long terme de la longueur d'onde centrale ne peut pas être prévu comme dans les expériences décrites ci-dessus.

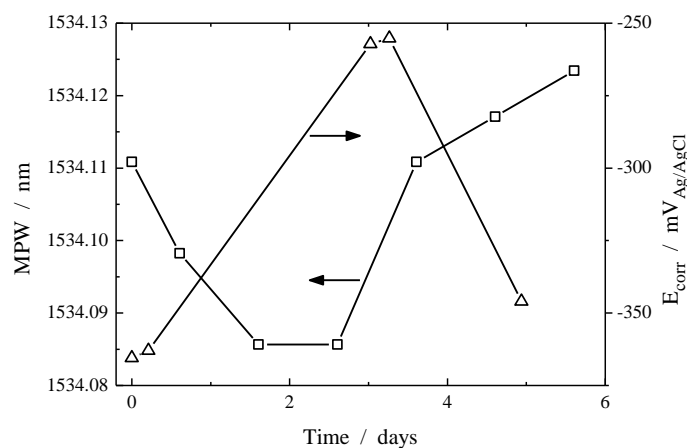


Figure 29 : Evolution du MPW (carrés) et potentiel de corrosion (triangles) Mesures pendant la période de prise de l'échantillon de 6 jours, préparé avec ciment en proportion 0.6 en eau riche en chlorures (35 g.L^{-1})

Pour étudier ce scénario, nous avons effectué le suivi du comportement du spectre pendant la prise de l'échantillon. La Figure 29 montre l'évolution de la longueur d'onde centrale du réseau de Bragg et le potentiel électrochimique, E_{corr} . L'augmentation du potentiel pendant le premier jour est due à la formation de la couche de passivation. Au contraire, la décroissance abrupte après le 4^{ème} jour est probablement liée à l'apparition de phénomènes de corrosion, qui ont été déclenchés par la présence d'ions de chlorure ajoutés à l'eau. En effet, selon des données établies dans le standard *ASTM 876* [7] une diminution du potentiel électrochimique en-dessous de $-250 \text{ mV}_{Ag/AgCl}$ indique une probabilité de plus de 90 % d'un processus de corrosion. Ce scénario de corrosion n'est cependant pas détecté de manière exhaustive par

la longueur d'onde centrale, qui montre une évolution non monotone pendant le durcissement de la pâte de ciment comme nous le voyons sur la Figure 29.

Comme signalé précédemment, ceci est attribué à une distribution complexe des contraintes de solidification et durcissement du mortier, faisant apparaître des processus avec blocage de pores et apparition de fortes contraintes. La longueur d'onde principale devrait ainsi correspondre par alternance à des efforts de traction et / ou de compression des charges locales liées à l'évolution des noyaux de rouille, qui empêchent le réseau de Bragg de suivre l'évolution de la corrosion comme dans les cas précédents.

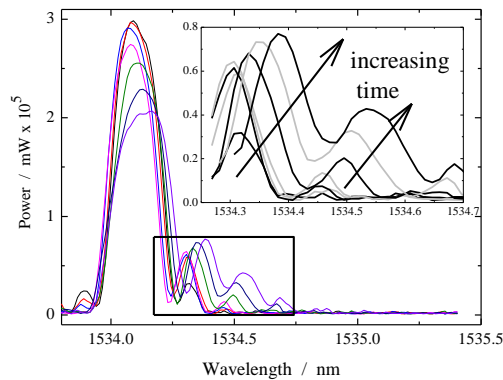


Figure 30 : Comportement global du spectre mesuré au cours du temps
Données obtenues pendant la période de prise (6 jours), échantillon préparé avec ciment en proportion 0.6 d'eau chlorée (35 g.L^{-1}). Cadre : zoom de la zone à lobes secondaires.

Cependant, une analyse plus complète du spectre donne plus d'informations sur l'évolution de la corrosion. La Figure 30 montre les lobes secondaires, avec une distribution asymétrique pour les longueurs d'onde plus élevées. Ce comportement spectral constitue une signature d'une distribution de contraintes réparties de façon non uniforme sur la longueur du réseau de Bragg, produisant un « *chirp* » dans le spectre [71]. Ces lobes secondaires évoluent de façon monotone avec le temps et en fonction de l'avancement de la corrosion, comme nous pouvons le voir dans la Figure 30.

Le suivi de ces lobes secondaires est certainement difficile à exploiter dans des conditions de service réelles. Il faut cependant considérer que cette première série de résultats semble ouvrir la voie au développement d'un nouveau type de capteur en temps réel des armatures du béton.

6.3 Conclusions

Dans cette expérience, nous avons exploré la possibilité d'utiliser un réseau de Bragg photo-inscrit dans une fibre optique comme indicateur de l'état de corrosion. Nous avons obtenu la réponse souhaitée pour les deux comportements de corrosion, ce qui montre que le capteur à fibre optique par transduction directe est faisable. Cependant, un inconvénient du Réseau de Bragg est sa limitation spatiale, restreinte à une zone d'environ 5 mm. Dans le Chapitre 7, nous allons développer une technique répartie pour faire face à cette problématique.

Les résultats de cette expérience ont été publiés avec présentation de poster lors de la conférence « SPIE Smart Structures/NDE 2013 » à San Diego, CA, USA, sous le titre : « *Corrosion detection and evolution monitoring in Reinforced Concrete Structures by the use of Fiber Bragg Grating sensor* ».

Chapitre 7 : Mesure directe par OFDR

La mesure directe par réseau de Bragg démontre la faisabilité de la technique proposée, mais il reste à résoudre le problème de l'étendue de mesure. En effet, un réseau de Bragg présente une longueur typique de 5 mm et le nombre de réseaux pouvant être placés sur une même ligne est actuellement limité par le multiplexage spectral (typiquement quelques dizaines à quelques centaines selon la largeur spectrale de la source). Enfin, le coût d'un réseau de Bragg demeure assez élevé (entre 50 € et 200 € selon les spécifications) ce qui constitue aussi un frein à son déploiement, particulièrement en génie civil où les coûts sont très contraints. Le procédé OFDR permet actuellement d'atteindre simultanément une résolution spatiale élevée (centimétrique) et une grande étendue de mesure (80 m en mode standard, 2 km en mode étendu), tout en simplifiant le câblage et l'analyse des données et réduire le coût du capteur. Dans ce chapitre, nous allons utiliser cette technique pour mesurer la corrosion.

7.1 Principe du capteur de corrosion par OFDR

Le capteur est basé sur les possibilités de la technique OFDR [69]–[71] pour considérer la fibre optique comme un FBG réparti, comme représenté sur la Figure 31. La fenêtre d'échantillonnage (dx) est réglable en position et taille, ce qui permet d'augmenter la plage de mesure et la sensibilité. Comme la technique OFDR présente un comportement métrologique similaire au réseau de Bragg, nous allons utiliser le même principe de fabrication pour profiter des avantages de la technique OFDR. Tandis qu'un réseau de Bragg n'est sensible que sur une longueur de quelques millimètres ($5 \sim 10 \text{ mm}$), la technique OFDR offre une étendue de détection jusqu'à 80 m en mode standard et jusqu'à 2 km en version étendue [72].

Nous allons construire un profil de pré-déformation à l'aide d'époxy polymérisé à haute température selon le même procédé que celui mis en œuvre pour le capteur Bragg (6.2). Le décalage de la fréquence OFDR est établi par l'équation 9.

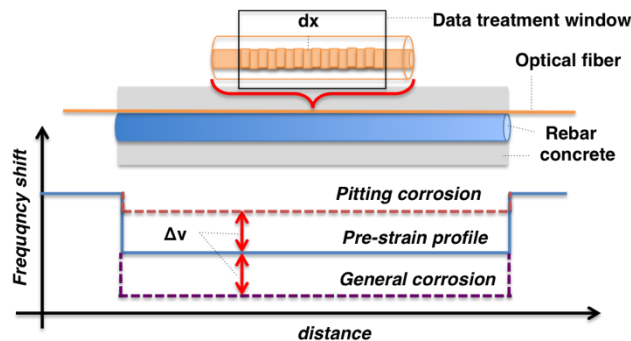


Figure 31 : Principe de fonctionnement du capteur de corrosion OFDR

La fibre optique mesure les changements à la surface de l'interface armature - béton. La ligne bleue représente le profil précontraint de décalage spectral établi par la procédure de fabrication. Les lignes magenta et rouge représentent l'évolution du profil de contrainte consécutive à une corrosion généralisée et par piqûres, respectivement. Le schéma de la fibre optique montre la construction virtuelle de réseau FBG pour le traitement de données.

7.2 Mise en œuvre

Une barre de fer d'armature standard ($Fe \text{ E-500}$, $\varnothing = 12 \text{ mm}$, $L = 6 \text{ cm}$) a été utilisée comme corps d'épreuve de la fibre optique (ITU-G.652). Nous avons appliqué une couche mince d'époxy, et l'ensemble a été chauffé pour la polymérisation de la colle, comme le montre la Figure 32 - gauche.

Le capteur a été assemblé dans une salle climatisée à 22 °C. Une trace OFDR a alors été enregistrée pour une température de polymérisation époxy de 84 °C. Après refroidissement à température ambiante, une nouvelle trace OFDR est enregistrée et leur intercorrélacion montre un décalage de fréquence OFDR permanent de 95 GHz pour un décalage thermique de 62 °C. En utilisant la relation (9), on obtient un décalage spectral d'environ 759 pm et une déformation induite par le rétreint thermique de l'ordre de $630 \mu\text{m.m}^{-1}$. Le dernier point de mesure (à l'ambiante) est ensuite considéré comme la référence pour les mesures. Les variations de la température ambiante (2,5 °C) correspondent à des variations de fréquence de $\pm 3 \text{ GHz}$.

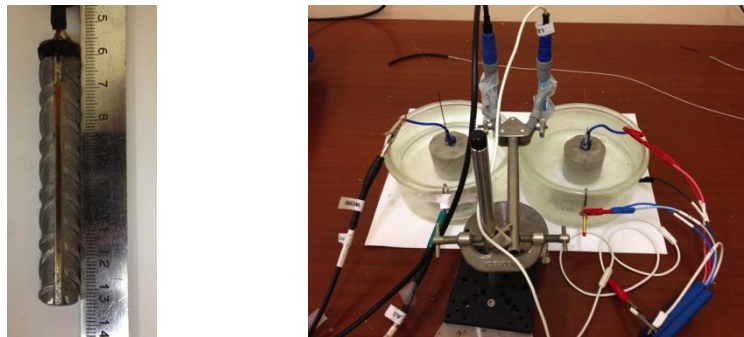


Figure 32 : Mise en place de l'expérience CFO OFDR
À gauche : image du capteur précontraint. À droite : mise en œuvre du test

Quand le capteur revient à température ambiante, une compression apparait comme conséquence de la différence des coefficients de dilatation thermique de l'acier et de la silice. Le profil précontraint s'étend sur 40 mm de longueur, selon la Figure 32 - gauche. La surface exposée à la corrosion correspond à un arc de 90° par l'application d'un revêtement anti-corrosion, sur une hauteur de 4 cm ($3,7 \text{ cm}^2$).

Dans le but de recréer les conditions réelles dans lesquelles les produits de corrosion s'accumulent à l'interface ciment-métal, le capteur est placé au milieu d'un cylindre de béton, qui a été préparé avec des granulats (80 %), du ciment Portland type 1 (20 %) et de l'eau riche en chlorure (35 g.L^{-1}), pour favoriser l'apparition de la corrosion. Le rapport ciment/eau est de 0,6. Après 24 heures de séchage dans la capsule, le cylindre résultant a été plongé dans une solution $\text{NaOH } 0,1 \text{ M} + \text{NaCl } 35 \text{ g.L}^{-1}$, pour étudier la corrosion par

piqûres (Figure 32 - droite). La prochaine étape était de forcer la corrosion par l'imposition d'une densité de courant de 100 mA.cm^{-2} jusqu'à ce que la fissure (corrosion générale) se produise. Les mesures électrochimiques ont été réalisées avec un potentiomètre PGZ-100 avec électrode de référence [Ag / AgCl] et le décalage de fréquence a été enregistré avec réflectomètre en fréquence (OFDR) de type LUNA OBR4600 (Cf. § 3.3.5) [72].

7.2.8 Corrosion par piqûres

Une corrosion par piqûres s'est déclenchée lors de la prise de l'échantillon qui a duré 22 jours (Figure 32 - droite). Cette corrosion a conduit à un changement de fréquence très important de -550 GHz , ce qui équivaut à un relâchement de précontrainte de $5350 \mu\text{m.m}^{-1}$. Le potentiel électrochimique (E) de corrosion enregistré est en-dessous de -500 mV , ce qui équivaut à un état de grave corrosion selon la norme ASTM 876 [7]. Le relâchement de précontrainte est principalement dû à la perte de support mécanique par l'oxydation du métal à la surface de l'armature, avec des produits d'oxydation de faible densité.

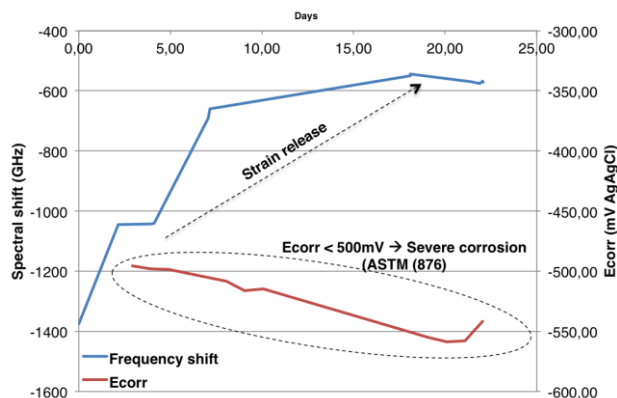


Figure 33 : Évolution du décalage de fréquence et potentiel électrochimique Mesures obtenus pendant le processus de corrosion par piqûres, montrant une claire corrélation entre les deux variables

7.2.9 Corrosion générale

Le capteur qui a subi une corrosion par piqûres a ensuite été soumis à une corrosion généralisée en imposant un courant de 100 mA.cm^{-2} pendant 17 heures. Le décalage de fréquence était -1795 GHz au moment de la fracture

de l'échantillon, soit une augmentation considérable de $17500 \mu\text{m}\cdot\text{m}^{-1}$ (1,75 %) en comparaison avec le point le plus bas au cours du processus de durcissement. La Figure 33 illustre l'évolution des variables optiques et électrochimiques. La charge totale appliquée à l'échantillon (mesure Voltalab), en supposant aucune perte dans le parcours, est $Q = 22640 \text{ C}$ ($Q = I \cdot t$, I : intensité de courant, t : temps). En appliquant la loi de Faraday de l'électrolyse, la masse de métal transformé en rouille est alors :

$$m = \frac{Q}{q \cdot n} \cdot \frac{M}{N_A} = \frac{22640}{1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 6,022 \cdot 10^{23}} \cdot \frac{55,845}{2} = 6,48 \quad (19)$$

avec Q comme la charge totale, q la charge de l'électron, n la valence du métal, M la masse molaire et N_A la constant d'Avogadro.

Le volume et la masse initiale de l'échantillon étaient de $6,8 \text{ cm}^3$ et $53,43 \text{ g}$ respectivement (la masse volumique de fer $\sim 7,874 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$).

Une perte de masse de $6,48 \text{ g}$ ($\sim 13 \%$) est équivalente à $0,56 \text{ mm}$ d'épaisseur en acier corrodé. À partir de cette valeur, on peut estimer un débit de corrosion de $0,033 \text{ mm}\cdot\text{H}^{-1}$. Dans le domaine optique, la pente obtenue par approximations linéaires est $-375 \text{ GHz}\cdot\text{H}^{-1}$, ce qui permet de faire une corrélation de valeurs entre les deux domaines physiques.

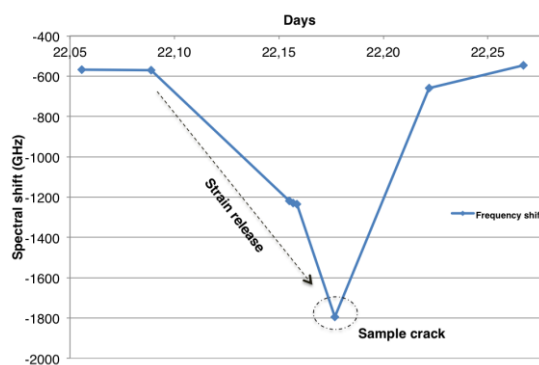


Figure 34 : Evolution du décalage spectral CFO OFDR
Mesures obtenues pendant le test de corrosion accélérée

En superposant toutes les distributions de contraintes optiques pour corrosion par piqûres et corrosion générale, nous pouvons observer le comportement prédit lors de la conception du capteur pour les deux types de corrosion, comme cela est représenté dans la Figure 35.

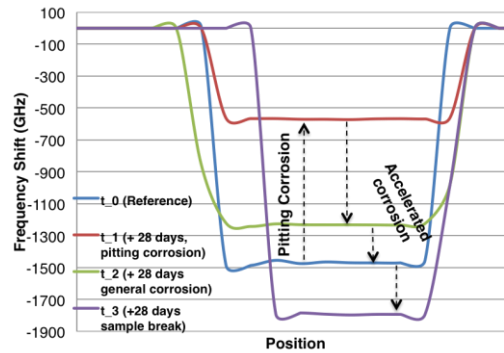


Figure 35 : Synthèse du test CFO OFDR
L'échantillon présente une réponse en concordance avec les prédictions

7.3 Conclusions

Avec cette expérience, nous avons démontré la faisabilité de la technique OFDR pour la mise en œuvre d'un système de surveillance de la corrosion consacré aux structures en béton. La précontrainte obtenue par polymérisation époxy à haute température crée un point de référence en milieu de gamme, ce qui permet de mesurer les deux types principaux de corrosion.

La localisation des évènements sur l'armature s'effectue grâce au profil de déformations de précontrainte déterminé à partir du calcul d'inter-corrélation entre le profil natif de rétrodiffusion de la fibre et celui du CFO. Le profil de déformation fait alors apparaître la zone précontrainte correspondant à la totalité de la portion de fibre noyée dans la colle.

La position dans l'espace du front de ce profil peut alors servir de repère local afin de localiser les points de mesure le long de l'armature de façon relative, indépendamment de la longueur du déport entre le capteur et l'instrumentation de lecture qui peut évoluer au cours du suivi de l'ouvrage.

Les résultats de cette expérience ont été publiés avec présentation orale au « International Workshop on Structural Health Monitoring (IWSHM) 2013 » à l'Université de Stanford, CA, USA, sous le titre : « *Optical fiber sensor for corrosion detection and evolution monitoring in reinforced concrete structures* ».

Chapitre 8 : Mesure répartie par CFO

En ayant validé dans les chapitres précédents le principe du capteur de corrosion par fibre optique par mesure directe à l'interface, un nouvel défi se présente : comment adapter ce capteur soumis aux cycles circadiens, saisonniers, etc. aux conditions réelles de service ? En pratique, le CFO doit aussi servir comme armature de renforcement, soumise aux contraintes thermomécaniques de l'ouvrage qui vont donc perturber la mesure des déformations induites par la corrosion. Un concept innovant est proposé pour faire face à cette problématique.

8.1 Principe du capteur de corrosion par OFDR segmenté

Pour pouvoir distinguer un état de corrosion de, par exemple, un changement de température ou une brusque variation de déformation (e.g. fissure avec relâchement de contraintes), il faut un complément d'informations permettant de séparer les deux effets. Dans cet objectif, nous proposons de segmenter notre capteur OFDR par des zones couvertes (protégées des agents corrosifs) et des zones découvertes (soumises directement à la corrosion).

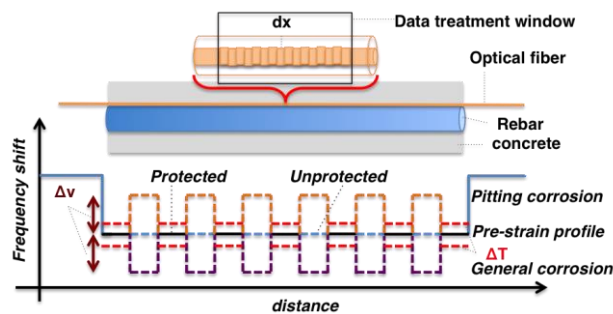


Figure 36 : Principe de fonctionnement du capteur de corrosion segmenté

Ce capteur segmenté a comme particularité que les zones couvertes sont immunes à la corrosion (au moins dans les premiers temps d'exploitation de l'armature). Par conséquent, ces zones sont prises comme référence de l'état de contraintes thermomécaniques de l'armature. Les perturbations induites par la corrosion sont alors déduites par soustraction entre le profil exposé et le profil protégé, comme on montre dans la Figure 36.

Selon ce principe, la fibre optique mesure les changements à la surface de l'interface armature - béton. La ligne bleue représente le profil précontraint de décalage spectral établi par la procédure de fabrication. Les lignes magenta et orange représentent l'évolution du profil de contrainte consécutive à une corrosion généralisée et par piqûres, respectivement. Enfin, la ligne rouge correspond au profil protégé permettant d'effectuer la compensation thermomécanique.

8.2 Réalisation du capteur de corrosion segmenté

Un prototype de CFO segmenté a été réalisé au laboratoire (Figure 37).

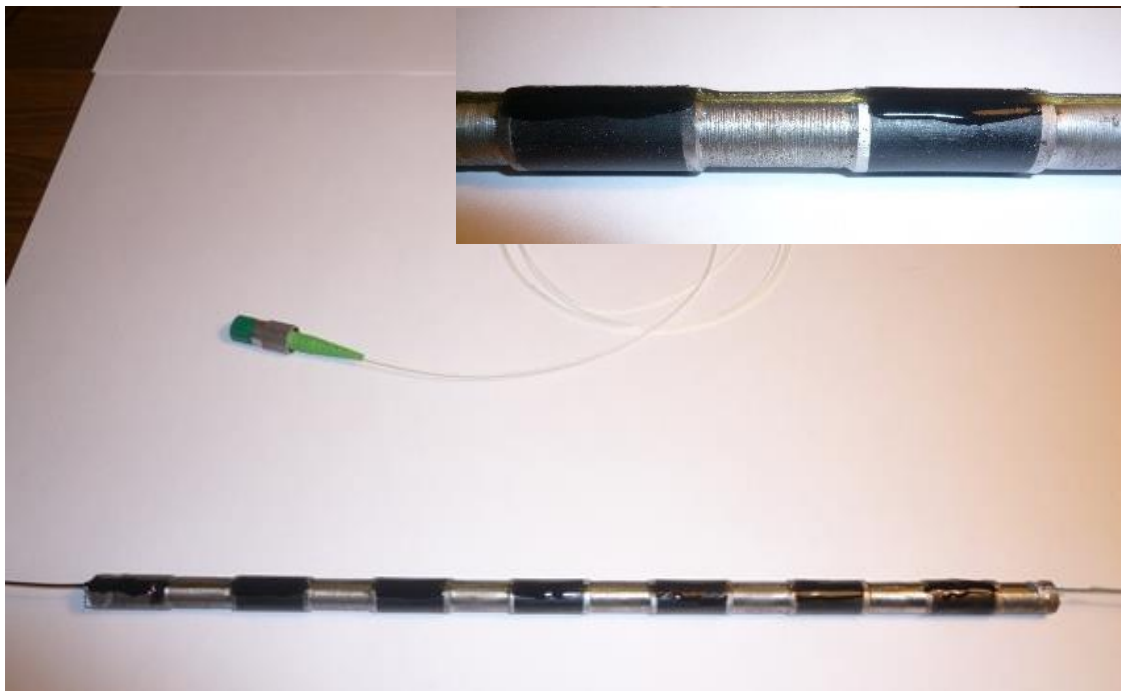


Figure 37: Capteur de corrosion segmenté
Échantillon réalisé au laboratoire (connecteur sur gaine noire, à gauche)

Une armature en acier *Fe E-500* utilisée pour le renforcement du béton (diamètre externe = 13 mm) est prise comme matériau de base. Un chariotage a tout d'abord été réalisé afin d'éliminer le motif externe pour le remplacer par des épaulements.

Chaque série d'épaulements délimite un segment, alternativement couvert et découvert. Les segments couverts présentent un diamètre d'acier un peu plus faible que les segments découverts afin de pouvoir déposer un revêtement protecteur. Le revêtement choisi est une résine époxyde d'enrobage qui est enduite sur le pourtour de l'armature puis celle-ci est insérée dans un moule cylindrique en téflon.

Après polymérisation, le moule est ouvert au cutter puis retiré. L'armature est alors chariotée sur seconde fois afin de retirer la colle en excès sur les parties destinées à être découvertes.

Une rainure est alors réalisée (fraise inclinée à 45°) sur une génératrice de cette armature sur une profondeur d'environ 1 mm . Une fibre optique est alors placée dans cette rainure (maintenue par un adhésif à ses extrémités) et de la pâte à modeler est fixée en extrémité afin de contenir la colle. L'ensemble est placé dans une enceinte thermique réglée à $70\text{ }^\circ\text{C}$. Une fois l'ensemble thermalisé, une colle époxyde est alors appliquée dans le sillon. Celle-ci se répartit sur toutes les surfaces accessibles car sa viscosité est faible à cette température et englobe la fibre optique en formant un enrobage lisse.

Le choix de la profondeur de la rainure résulte d'un compromis entre d'une part, la protection de la fibre aux chocs extérieurs (qui implique une rainure profonde) et d'autre part, le souhait de minimiser le délai de détection de corrosion (qui implique un collage proche de la surface).

La température du four est alors montée à environ $90\text{ }^\circ\text{C}$ afin de polymériser la colle sur une durée de l'ordre de 15 minutes et la durcir. Une augmentation de température a pour conséquence d'accroître la cinétique de polymérisation or celle-ci doit aussi durcir de façon homogène. La température de 90°C constitue donc un bon compromis.

Après polymérisation, l'ensemble est refroidi à température ambiante et la fibre subit une précontrainte de compression, comme décrit au chapitre 7 (décalage de fréquence OFDR typique $\sim 95\text{ GHz}$).

La pâte à modeler est retirée et de la colle époxyde d'enrobage est à nouveau appliquée sur les parties couvertes pour combler la rainure.

8.3 Corrosion accélérée du CFO segmenté en milieu aqueux

La Figure 38 montre l'expérience de corrosion accélérée en milieu aqueux (corrosion par piqûres). Cette expérience met en œuvre un bac transparent (aquarium) au sein duquel a été plongé un dispositif support portant une électrode en cuivre et le CFO segmenté, objet de l'étude.

L'électrode en cuivre (cathode) est reliée au pôle négatif tandis que l'échantillon sous test est reliée à l'anode d'un générateur de courant réglé sur

180 mA (tension maximale 120 V), voir la Figure 39. La surface extérieure du capteur étant 70 cm^2 , la densité de courant appliquée est $2,57 \text{ mA.cm}^{-2}$.

L'aquarium est rempli d'eau salée à raison de 10 g de sel pour 7 litres d'eau (hauteur d'eau = 8 cm). Un thermocouple (TC) est inséré dans l'eau, protégé par une gaine thermorétractable. Pour finir, un second fer à béton (identique à celui utilisé pour réaliser le CFO et sur lequel une fibre factice a aussi été collée) est également plongé verticalement dans l'eau mais non-polarisé. L'objectif de ce fer témoin est d'observer la corrosion naturelle et de vérifier qu'aucun décollement n'est imputable à l'action de l'eau.

Un calibrage préalable de la vitesse de corrosion a été réalisé au laboratoire par le procédé de pesée. Le principe consiste à effectuer une corrosion par piqures sous champ et à retirer périodiquement l'échantillon, éliminer la rouille pulvérulente et peser la masse de fer restante. Le différentiel de masse correspondant à la masse de fer consommée par corrosion permet d'estimer la vitesse de corrosion accélérée.

Selon ces conditions de polarisation, on trouve expérimentalement une vitesse relative de perte de masse d'environ $0,17 \%.h^{-1}$. Le calcul théorique mené à l'aide de la relation de Faraday (19) donne une vitesse d'environ $0,15 \%.h^{-1}$, assez proche de l'observation expérimentale.

En supposant une corrosion homogène, on écrit la correspondance entre la perte de masse et la perte d'épaisseur Δr (rapportée au rayon r) selon :

$$\frac{\Delta m}{m} = \frac{2 \cdot \Delta r}{r} \quad (20)$$

La vitesse relative de perte d'épaisseur est estimée à environ $8,5 \cdot 10^{-4} h^{-1}$.

Etant donné que l'échantillon présente un rayon de 4 mm sur ses zones découvertes, la vitesse de corrosion accélérée est alors de $3,4 \mu\text{m} h^{-1}$.

A titre de comparaison, la vitesse de corrosion naturelle d'un acier conventionnel en environnement salin est de l'ordre de $0,1 \text{ mm.an}^{-1}$ ($\sim 10 \text{ g.dm}^{-2}.\text{an}$), soit $\sim 0,011 \mu\text{m} h^{-1}$ ($11 \cdot 10^{-6} \text{ mm.h}^{-1}$, 1 an = 8.760 heures). Le coefficient d'accélération en corrosion obtenu par ce procédé est ainsi de

l'ordre de 300. Un essai de corrosion accéléré sur *10 jours* correspond à une durée réelle de corrosion naturelle de l'ordre de *3000 jours (i.e. 8 ans)*.

En pratique cependant, la vitesse de corrosion n'est pas constante au cours du temps puisque les produits oxydés s'accumulent à l'interface et perturbent la diffusion des espèces. La vitesse calculée correspond à la vitesse maximale, en début de corrosion.

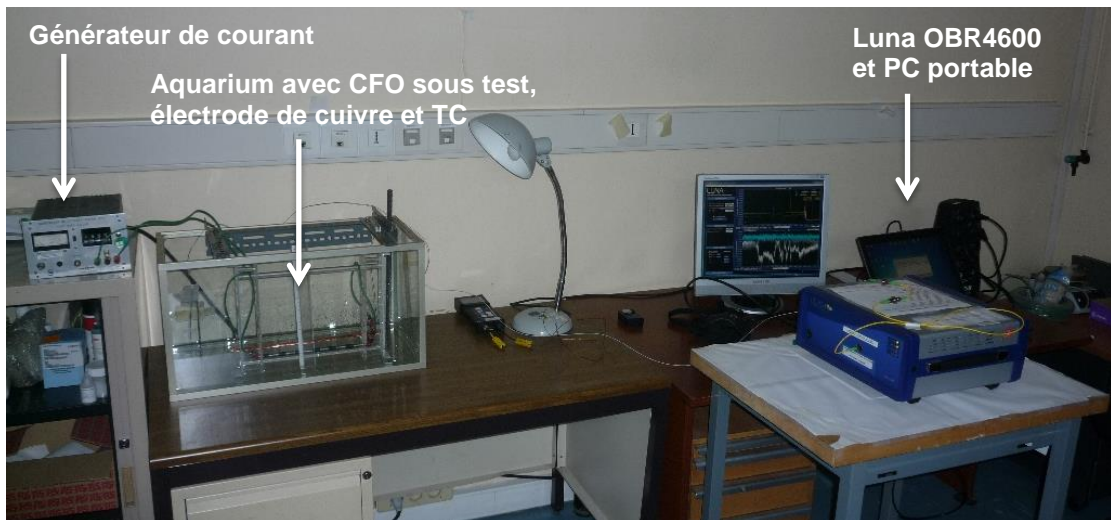


Figure 38 : Expérience de corrosion accélérée en milieu aqueux du CFO segmenté
La fibre optique solidaire du CFO segmenté est reliée au réflectomètre OFDR (Luna OBR4600), contrôlé par un PC portable.

Le réflectomètre est réglé sur l'accordabilité la plus importante, à savoir $85,42 \text{ nm}$ (entre 1525 nm et $1610,42 \text{ nm}$). Cette accordabilité permet d'atteindre une résolution spatiale de l'ordre de $10 \mu\text{m}$ sur la trace de rétrodiffusion Rayleigh. Les données OFDR sont stockées au fur et à mesure du déroulement de l'expérience. Chaque fichier peut servir de fichier de référence à partir duquel un profil de déformation peut être calculé par intercorrélation (mode « *sensing* »). L'indice de réfraction a été choisi à $1,46$.



Figure 39 : Vue de la connectique en cuivre à l'intérieur de l'aquarium

Les profils de fréquences déduits par intercorrélation ont été obtenus avec les paramètres suivants : « *sensing range* » = 0,8 cm, « *gage length* » = 0,5 cm et « *sensor spacing* » = 0,1 cm.

8.4 Expériences de corrosion aqueuse accélérée sur CFO segmenté

La Figure 40 montre l'évolution des traces de rétrodiffusion Rayleigh sur la ligne optique collée sur le capteur, dans les premiers temps de l'expérience.

La zone collée se traduit par l'apparition d'une biréfringence qui modifie l'état de polarisation de l'onde incidente et qui se manifeste par une rotation du vecteur polarisation (oscillations des composantes S et P).

Le capteur est réparti entre les abscisses 4,04 m et 3,76 m.

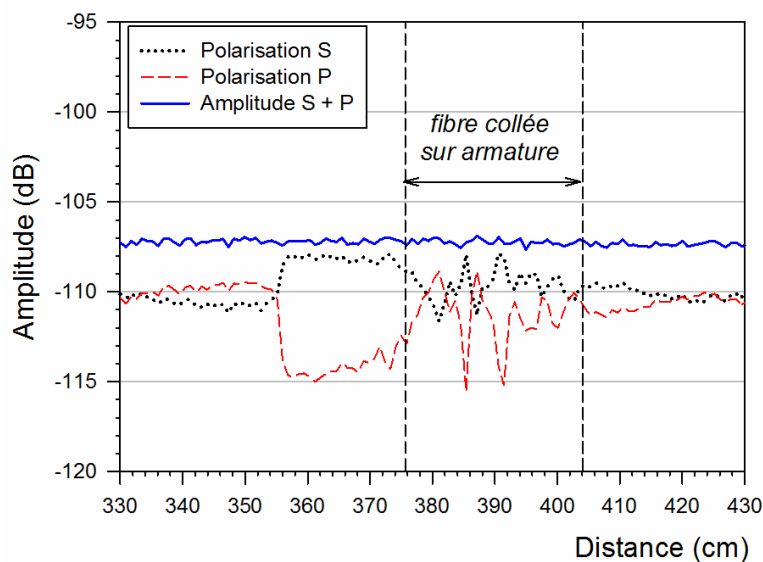


Figure 40 : Traces de rétrodiffusion de la ligne optique collée sur le CFO segmenté
L'appareil OBR4600 enregistre les deux traces de rétrodiffusion Rayleigh en polarisation S et P et fournit le signal d'amplitude correspondant à la somme (amplitude S + P).

La première trace enregistrée est prise comme référence. La Figure 41 montre l'évolution des relevés fréquentiels au cours du temps au fur et à mesure de la progression de la corrosion.

On observe un début de corrosion sur l'extrémité du capteur sur une partie semi-couverte (protection supérieure de rainure seulement) qui inclut le

premier segment semi-couvert [4,02 - 4,04 m], le second segment découvert [4 - 4,02 m] et le troisième segment couvert [3,98 - 4 m].

Une corrosion aussi rapide sur le 3^{ème} segment couvert n'était pas prévue. Une observation du fond de l'aquarium fournit l'explication à ce problème. On remarque que l'époxy se détache du capteur par l'action du champ électrique et se dépose au fond. La quantité d'époxy qui se dépose est plus importante proche de l'extrémité corrodée. La raison tient au fait que l'électrode de cuivre n'a pas été positionnée de façon parallèle mais en biseau. Le champ électrique n'est donc pas homogène le long du capteur et est plus intense à une extrémité (là où la corrosion a démarré).

On décide d'interrompre l'expérience pour rajouter une seconde protection par gaine thermorétractable polyoléfine afin de protéger l'époxy. De plus, l'électrode de cuivre est remplacée parallèlement au capteur afin d'homogénéiser la corrosion.

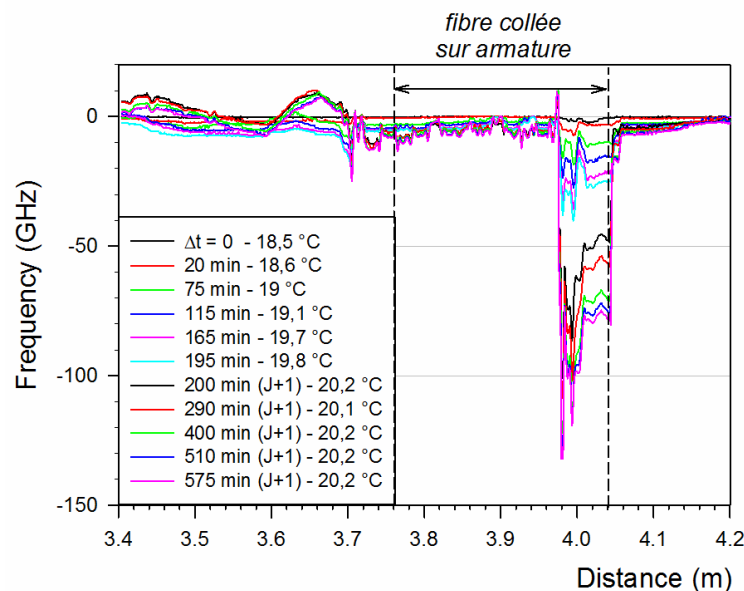


Figure 41 : Relevés fréquentiels enregistrés sur le capteur segmenté
Relevés obtenu durant les deux premiers jours de l'expérience.

La première trace de rétrodiffusion est alors prise comme nouvelle référence.

La poursuite de l'expérience de corrosion fait apparaître la suite des effets de relâchement de la contrainte sur le segment précédent [3,98 - 4 m],

préalablement corrodée (Figure 42). On note une bonne stabilité des autres segments non encore atteints.

Après 3 jours de corrosion interrompue, on constate que les deux segments découverts suivants ($[3,96 - 3,98 m]$ et $[3,92 - 3,94 m]$) sont corrodés, comme en témoigne le relâchement de contraintes (Figure 43). Le segment couvert intermédiaire $[3,94 - 3,96 m]$ assume bien son rôle protecteur de la corrosion (démonstrant le bien-fondé *a posteriori* du rajout d'une seconde protection thermorétractable).

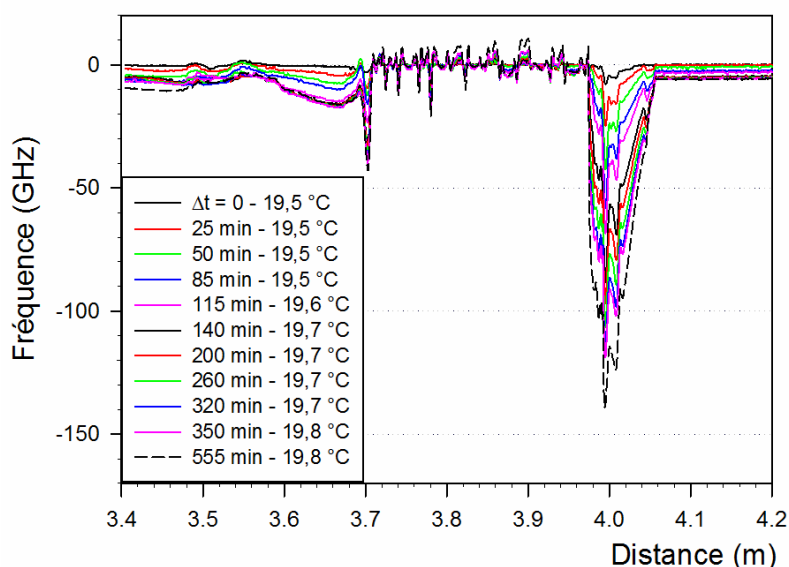


Figure 42 : Relevés fréquentiels enregistrés durant le 3ème jour.

Cependant, on note également un accroissement de contraintes sur les parties découvertes, non encore corrodées (voir en particulier les segments $[3,88 - 3,9 m]$ et $[3,8 - 3,82 m]$) tandis que les segments couverts restent stables. La raison de cet accroissement de contraintes provient probablement du gonflement de l'époxy suite à une prise d'eau. Il s'agit là d'un effet indésirable qui remet en question le choix de cet adhésif.

Comme décrit dans le chapitre 5, le CFO reposant sur une mesure OFDR délivre plus d'informations qu'un capteur « tout-ou-rien » et permet notamment de déduire la cinétique de la corrosion par une analyse de l'amplitude du profil spatial en fréquences. En Figure 44 sont ainsi représentées les évolutions des amplitudes des fréquences sur les segments corrodés de façon successive : à

savoir les segments $[4,02 - 4,04 \text{ m}]$ (en noir), $[4 - 4,02 \text{ m}]$ (en rouge) et le dernier $[3,92 - 3,94 \text{ m}]$ (en bleu).

Le suivi de corrosion sur le premier segment n'est pas exploitable en raison de la discontinuité consécutive à un arrêt de la polarisation.

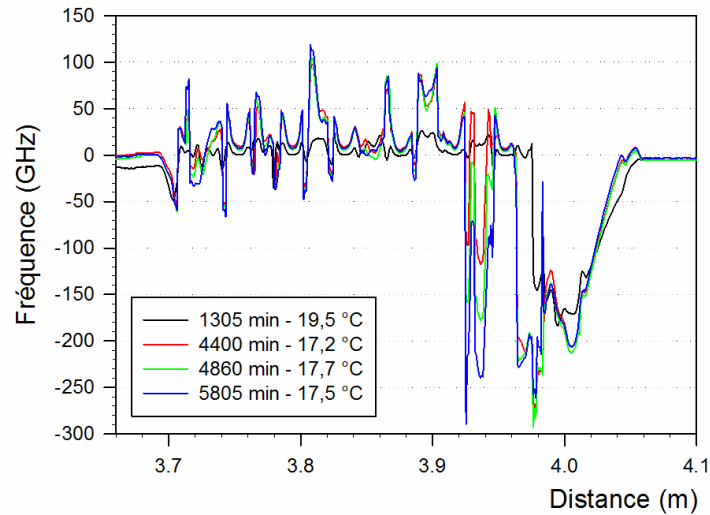


Figure 43 : Relevés fréquentiels enregistrés sur le CFO segmenté après une polarisation ininterrompue durant 3 jours, puis observation durant le 4^{ème} jour.

Les amplitudes enregistrées sur les second et troisième segments ont été ajustées par les relations suivantes :

$$F_2(\text{GHz}) = -4,9 \cdot \sqrt{t(\text{min}) - 590 \text{ min}} \quad (21)$$

$$F_3(\text{GHz}) = -5,6 \cdot \sqrt{t(\text{min}) - 4500 \text{ min}} \quad (22)$$

Un ajustement par une fonction racine carrée du temps témoigne du contrôle de la cinétique de corrosion par les processus de diffusion interne à la couche de produits oxydés.

Le temps initial de démarrage du processus de relâchement est déduit *a posteriori* à partir de l'intersection entre la courbe ajustée et la ligne de référence à 0 GHz.

La Figure 45 montre le CFO OFDR à l'issue de l'essai en corrosion aqueuse accélérée (au bout de 10 jours d'essai).

Le fer à béton témoin présente une légère corrosion en surface et la colle époxy n'a pas été altérée (pas de décollement).

Enfin, nous avons cherché à montrer la pertinence d'une segmentation en réalisant plusieurs enregistrements OFDR pour différentes températures du bain, modifiées par l'immersion de pains de glace. La Figure 46 montre l'évolution des profils de fréquences pour les différentes températures données par le TC. On observe une augmentation de fréquences de l'ensemble du profil (translation de l'ensemble) mais le différentiel local de fréquences induit par la corrosion reste le même. L'effet est faible car les variations de températures sont limitées mais le graphe montre bien l'insensibilité de la détection de corrosion aux perturbations thermomécaniques extérieures (variations de température ou de chargement d'origine mécanique ou thermomécanique, voire évolution de chargement suite à des fissures dans l'ouvrage).

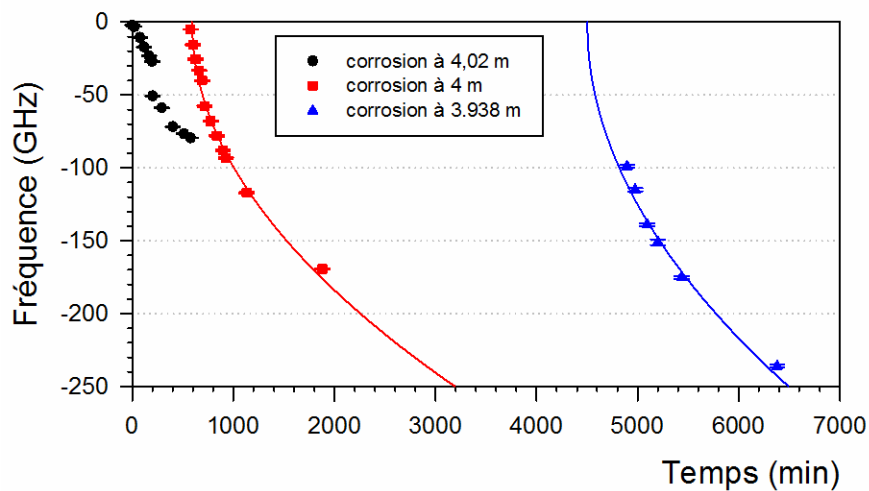


Figure 44 : Amplitudes de fréquences relevées sur les segments corrodés du CFO segmenté et ajustement par une fonction racine carrée du temps sur les deuxième et troisième segments



Figure 45 : Vue du CFO à la fin de l'essai de corrosion accélérée (connecteur sur gaine noire, à droite)

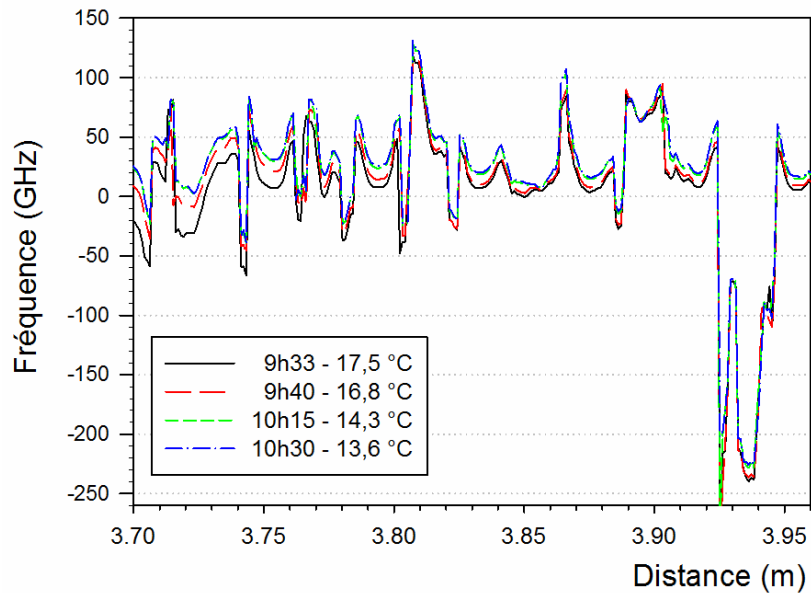


Figure 46 : Évolution du profil fréquentiel OFDR du CFO segmenté pour différentes températures du bain

8.5 Conclusions

L'idée de précontraindre une fibre optique par polymérisation à chaud a été étendue dans ce chapitre à une mesure OFDR sub-centimétrique du profil de déformation. Nous démontrons la faisabilité d'une détection de corrosion par procédé OFDR dans le cas particulier d'une corrosion aqueuse accélérée par champ électrique. La corrosion se manifeste par un relâchement de la précontrainte suite à la destruction du matériau support (fer \rightarrow oxyde de fer pulvérulent). Le procédé OFDR permet de localiser le phénomène dans le domaine spatial mais aussi d'estimer l'ampleur de la dégradation qui présente une cinétique en racine carré du temps typique d'un processus de diffusion des espèces au travers de la couche de produits oxydés.

Le bien-fondé d'une segmentation est démontré en appliquant une variation de température. L'ensemble du profil de fréquences OFDR subit une translation mais le différentiel entre zone couverte et zone découverte (soumise à corrosion) reste indépendant de la perturbation extérieure et uniquement fonction de la dégradation par corrosion.

Etant donné que le CFO de corrosion est destiné à être noyé dans le béton au même titre que n'importe quel autre armature de renforcement (le capteur ne

doit pas se substituer à une armature et fragiliser la structure ; le CFO contribue donc au renforcement), celui-ci est donc également soumis aux contraintes thermomécaniques imposées par l'ouvrage. Il se comporte donc simultanément comme un capteur de corrosion et un extensomètre. Les signaux OFDR enregistrés permettent ainsi d'obtenir simultanément le profil de corrosion et le profil thermomécanique.

Cependant, cette expérience montre que l'adhésif époxy utilisé pour coller la fibre sur le fer et pour assurer la couverture de protection ne constitue pas le matériau idéal en raison d'une forte prise d'eau (sur-pression de gonflement). Par ailleurs, l'époxy s'est décomposé sous l'action du champ électrique ce qui a nécessité d'interrompre l'expérience pour rajouter une protection supplémentaire à base de polymère thermorétractable. En situation réelle (sans champ électrique), le revêtement époxy assure une étanchéité satisfaisante mais sa prise d'eau dans le temps reste un paramètre limitatif à estimer.

La conception et la mise en œuvre de ce CFO de détection répartie de corrosion a été breveté sous le document *FR 2 992 063* intitulé « Dispositif de mesure de la corrosion dans une structure métallique ou comprenant au moins une armature métallique, utilisations et procédé associés », le 18-06-2012.

Chapitre 9 : Conclusion et perspectives

La corrosion des armatures de renforcement des structures en béton représente un enjeu socio-économique majeur. Sa détection et le suivi de son évolution constituent un défi pour la recherche appliquée.

Après avoir rappelé le comportement en corrosion des armatures en béton utilisés comme renforcement, j'ai réalisé une synthèse bibliographique des procédés de détection de corrosion habituellement utilisés sur le terrain et également des procédés de détection par capteur à fibre optique (CFO, essentiellement à partir de réseaux de Bragg ou d'interféromètres).

Les techniques standards non destructives de détection de corrosion mettent en œuvre des procédés indirects tels la mesure d'impédance, de potentiels, ou par ultrasons. Leurs capacités d'auscultation sont limitées dans l'espace (notamment en profondeur), leur coût reste élevé dans un contexte de maintenance périodique et elles conduisent à des paramètres d'interprétation complexe. Des progrès sont nécessaires dans la détection et l'analyse fiable de la progression des processus de corrosion.

D'autres procédés de mesures de paramètres électrochimiques (pH, concentration d'eau, de chlorures, etc.) ne permettent d'obtenir qu'une estimation probabiliste et non un diagnostic fiable. De plus, la plupart des capteurs proposés sont ponctuels, or nul ne peut prévoir à l'avance où va démarrer un processus de corrosion dans une structure nouvelle. Il paraît donc important de mettre en œuvre un procédé de mesure répartie afin de couvrir l'étendue la plus vaste possible tout en minimisant les coûts de déploiement et de maintenance. L'autre avantage d'un tel procédé tient à la possibilité de discriminer un processus de corrosion localisée (piques) d'un processus de corrosion généralisée (carbonatation).

L'objectif de cette étude est de proposer une solution alternative innovante à la problématique de détection de corrosion des armatures de renforcement du béton des ouvrages de génie civil. Deux principaux processus de corrosion sont répertoriés, à savoir la corrosion par piqûres (chlorures) et généralisée (front de carbonatation, sulfatation). Dans le premier cas, les produits de

corrosion apparaissent sous forme pulvérulente, sans cohésion mécanique. Dans le second cas, les produits de corrosion conservent une cohésion mécanique élevée et, de densité plus réduite que le fer initial, contribuent à accroître la pression à l'interface fer-béton avec pour conséquence un éclatement du béton.

La métrologie optique, particulièrement Bragg et OFDR, constitue une alternative intéressante dans le but d'améliorer le diagnostic d'état de corrosion d'un ouvrage de génie civil. La mesure optique apporte un grand nombre d'avantages : déport important (kilométrique), insensibilité aux perturbations électromagnétique et à la foudre, faible intrusivité, faible coût de la fibre, capacité de mesure étendue (*Wavelength-Division Multiplexing – WDM*) et résolution dans le temps (*Optical Time-Domain Reflectometry - OTDR*) ou en fréquence (*Optical Frequency-Domain Reflectometry - OFDR*). Les fibres optiques ainsi que les outils et dispositifs sont standardisés pour leur usage en télécommunications optiques.

Le concept de détection, breveté au cours de cette thèse, repose sur l'usage d'une fibre optique précontrainte par polymérisation à chaud d'un adhésif sur l'armature à surveiller. Ce concept permet de détecter les deux comportements de corrosion possibles (piques, carbonatation). L'apparition d'une corrosion généralisée par carbonatation ou sulfatation se traduit par un accroissement de pression à l'interface qui va se superposer à la précontrainte existante par construction. *A contrario*, l'apparition d'une corrosion localisée par piques conduit à un relâchement localisé lorsque les produits oxydés sont évacués par les fissures.

L'identification du processus de corrosion est donc déduit du signe d'évolution de la contrainte et de son étendue spatiale. L'amplitude de déformation observée expérimentalement correspond à environ 600 μ déformations pour une corrosion par piques et l'amplitude de pression observée lors d'une corrosion généralisée est de l'ordre de 40 MPa.

Plusieurs expérimentations en corrosion accélérée ont été menées sur des CFO de détection prototypes mettant en œuvre des réseaux de Bragg et une simple fibre optique interrogée par le procédé OFDR. La technique Bragg est

sensible et permet d'observer les effets mécaniques induits par la corrosion à l'interface du fer. Cependant, son coût devient prohibitif dans la perspective de l'instrumentation d'une structure de génie civil de grande ampleur. En conséquence, la technique est restreinte à un usage de laboratoire.

La métrologie OFDR en revanche met en œuvre une simple fibre optique et la capacité de mesure est importante (portée jusqu'à 2 km en mode étendue pour une résolution spatiale de quelques centimètres, soit un équivalent d'une centaine de milliers de points de mesure, sans équivalent en technologie électrique). Cette technique a potentiellement un avenir industriel puisque l'instrumentation de lecture (la partie la plus coûteuse) n'est pas immobilisée mais nomade (déplaçable sur de multiples structures d'intérêt).

La loi de comportement en métrologie OFDR est la même qu'en métrologie Bragg. La donnée de sortie s'exprime en fréquence, contrepoint du décalage en longueur d'onde d'un réseau de Bragg, correspondant au décalage du motif de rétrodiffusion Rayleigh par comparaison avec un état de référence.

Le CFO de corrosion proposé consiste en une armature similaire à celle utilisée pour le renforcement des structures en béton et assure la même fonction de renforcement. Ce faisant, le capteur ne modifie donc pas l'équilibre électrochimique (effet de pile) et ne fragilise pas la structure. En utilisant l'armature comme transducteur, le CFO de corrosion agit aussi comme élément structural de l'ouvrage et est *de facto* également soumis à ses contraintes thermomécaniques. Il se comporte donc simultanément comme un capteur de corrosion et un extensomètre. Les signaux OFDR enregistrés permettent ainsi d'obtenir simultanément le profil de corrosion et le profil thermomécanique.

Le bien-fondé d'une segmentation est démontré en appliquant une variation de température. L'ensemble du profil de fréquences OFDR subit une translation mais le différentiel entre zone couverte et zone découverte (soumise à corrosion) reste indépendant de la perturbation extérieure, uniquement fonction de la dégradation par corrosion.

Les essais menés en laboratoire en corrosions généralisée et aqueuse sur un CFO segmenté et non segmenté ont permis d'apporter la preuve de concept

de ce nouveau procédé de détection répartie de corrosion. Le signal OFDR fournit ainsi plusieurs informations déterminantes aux questions suivantes : « où a lieu le processus de corrosion au sein de la structure », « de quel type de corrosion s'agit-il ? », « quelle est l'ampleur de cette corrosion ? », « depuis combien de temps ce processus de corrosion a-t-il démarré ? ».

La fiabilité et capacité étendue de la détection associées à un coût optimisé du capteur permet d'envisager une instrumentation de nouvelles structures de génie civil dans la perspective d'une maintenance conditionnelle (intervenir là où, et si cela est véritablement nécessaire), par opposition à une maintenance périodique conventionnelle.

Les progrès réalisés à l'issue de ce travail de thèse ont permis de passer d'un niveau de TRL ~ 2 (formulation du concept) à TRL ~ 4 (validation en laboratoire ; *TRL = Technological Readiness Level* [niveau de maturité technologique]). L'aboutissement de cette recherche a donné lieu à deux communications dans des conférences internationales et au dépôt d'une demande de brevet.

Ce travail de thèse a aussi permis de mettre en évidence certaines difficultés qu'il faudra résoudre dans la perspective d'une validation en conditions de chantier (conditions différentes d'un essai en laboratoire). Parmi les difficultés identifiées, le procédé de fabrication du CFO prototype est encore insatisfaisant. Sa mise en œuvre doit être optimisée en termes de coût et en termes de fiabilité mécanique (résistance aux chocs, en particulier les granulats). L'usage de matériaux époxy pose des problèmes de prise d'eau et de destruction sous champ électrique (lors de tests en corrosion accéléré). La connectique doit aussi être étudiée pour la rendre compatible avec une utilisation de chantier et pouvoir connecter de façon étanche une structure de génie civil sans générer de chemin privilégié pour la diffusion de l'eau.

Bibliographie

- [1] V. Baroghel-Bouny, Nouvelle approche de la durabilité du béton – indicateurs et méthodes, Tech. Ing., C2245, 10 mai 2005
- [2] El H. Rochdi, Contribution à l'étude du comportement mécanique de dalles en béton armé renforcées par matériaux composites, Thèse de l'Université Claude Bernard (Lyon 1), soutenue le 16 décembre 2004.
- [3] U.S. Department of the Interior, « Mineral Commodity Summaries », U.S. Geological Survey, févr. 2014.
- [4] B. Lomborg, *The Skeptical Environmentalist: Measuring the Real State of the World*. Cambridge University Press, 2001.
- [5] Compagnie Eiffage Viaduc Millau, « Bilan 2013 ». 16-mai-2014.
- [6] Gerhardus H. Koch Michiel P. H. Brongers et N. G. Thompson, « Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States », U.S. Federal Highway Administration, 2002.
- [7] ASTM International, *ASTM C876-09, Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete*. West Conshohocken, PA, 2009.
- [8] Comité Européen de Normalisation, *NF EN 13306, Maintenance - Terminologie de la maintenance*. 2001.
- [9] P. FERDINAND, « Réseaux de capteurs à fibres optiques Mesures et multiplexage », *Tech. Ing. CND Méthodes Surfaiques*, r460, 2008.
- [10] Comité Européen de Normalisation, *NF EN 206-1: Béton - Spécification, performance, production et conformité*. 2004.

- [11]Comité Européen de Normalisation, *NF EN 197-1, Ciment - Partie 1 : composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants*. 2002.
- [12]ASTM International. et ASTM International Committee C01 on Cement., *Standard specification for Portland cement*. West Conshohocken, PA: ASTM Int'l, 2012.
- [13]Comité Européen de Normalisation, *NF P18-545: Granulats - Éléments de définition, conformité et codification*. 2011.
- [14]Cimbéton, « B51. Ciments et bétons : L'essentiel ». 2002.
- [15]US Federal Highway Administration, « Admixtures », 24-févr-2015. <http://www.fhwa.dot.gov/infrastructure/materialsgrp/admixture.html>. [Consulté le: 24-juin-2015].
- [16]Comité Européen de Normalisation, *NF EN 934-2+A1 : Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2: adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage*. 2012.
- [17]Comité Européen de Normalisation, *NF EN 1008 : Eau de gâchage pour bétons - Spécifications d'échantillonnage, d'essais et d'évaluation de l'aptitude à l'emploi, y compris les eaux des processus de l'industrie du béton, telle que l'eau de gâchage pour béton*. 2003.
- [18]Association française de normalisation, *NF A35-015, Aciers pour béton armé - Aciers soudables lisses - Barres et couronnes*. 2009.
- [19]M. U. Jibrin et S. P. Ejeh, « Chemical Composition of Reinforcing Steel Bars in the Nigerian Construction Industry », *IJENS*, vol. 13, n° 1, p. 1-7, févr. 2013.
- [20]V. L'Hostis, A. Raharinaivo, et G. Taché, « Corrosion des armatures dans les bétons - Mécanisme », *Tech. Ing.* , cor407, 2009.
- [21]M. Pourbaix, *Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions*. Oxford; New York: Pergamon Press, 1966.
- [22]Western Oregon University, *Simplified Pourbaix diagram for 1 M iron solutions*. .

- [23] Q. T. Nguyen, *Etudes expérimentale et théorique de l'effet de la corrosion sur la fissuration du béton et le comportement global des structures en béton armé*. LMT-Cachan, 2006.
- [24] V. L'Hostis, D. Neff, L. Bellot-Gurlet, et P. Dillmann, « Characterization of long-term corrosion of rebars embedded in concretes sampled on French historical buildings aged from 50 to 80 years », *Mater. Corros.*, vol. 60, n° 2, p. 93–98, 2009.
- [25] E. Sutter, « Corrosion atmosphérique », *Tech. Ing.*, cor50, 2015.
- [26] M. Gallasch, *PHOTO 4 - Another Brick in the Wall*. 2011.
- [27] Corrosion Technology Laboratory, *Cracking and staining of a seawall near the Kennedy Space Center*. 2008.
- [28] F. J. Molina, C. Alonso, et C. Andrade, « Cover cracking as a function of rebar corrosion: Part 2—Numerical model », *Mater. Struct.*, vol. 26, n° 9, p. 532-548, nov. 1993.
- [29] K. Tuutti, « Corrosion of steel in concrete », Swedish Cement and Concrete Research Institute / CBI, Cement och betonginstitutet, 1982.
- [30] S. Magne, J. Boussoir, S. Rougeault, V. Marty-Dewynter, P. Ferdinand, et L. Bureau, « Health monitoring of the Saint-Jean bridge of Bordeaux, France using fiber Bragg grating extensometers », 2003, vol. 5050, p. 305-316.
- [31] H.-W. Song et V. Saraswathy, « Corrosion Monitoring of Reinforced Concrete Structures - A review », *Int J Electrochem Sci*, vol. 2, p. 1–28, 2007.
- [32] A. Shah et Y. Ribakov, « Non-linear ultrasonic evaluation of damaged concrete based on higher order harmonic generation », *Mater. Des.*, vol. 30, n° 10, p. 4095–4102, 2009.
- [33] C. Ékes, « GPR: "A New Tool For Structural Health Monitoring of Infrastructure" », *Terraprobe Geosci. Corp Kan.*, 2007.
- [34] *ASM handbook: Corrosion*. ASM International, 1998.
- [35] C. Finot, *Principe fibre optique 2*. .

- [36] L. Thevenaz, *Advanced Fiber Optics*. EFPL Press, 2011.
- [37] J.-C. FESTINGER, « Capteurs à fibres optiques. Présentation », *Tech. Ing.* r412, 2015.
- [38] Comité Européen de Normalisation, *NF EN 61757-1 Capteurs à fibres optiques - Partie 1 : spécification générique*. 2012.
- [39] P. Ferdinand, *Capteurs à fibres optiques et réseaux associés*. Paris: Tec et Doc-Lavoisier, 1992.
- [40] The Fiber Optic Association, Inc., *OTDR trace information*. 2013.
- [41] D. Culverhouse, F. Farahi, C. N. Pannell, et D. A. Jackson, « Potential of stimulated Brillouin scattering as sensing mechanism for distributed temperature sensors », *Electron. Lett.*, vol. 25, n° 14, p. 913-915, juill. 1989.
- [42] R. Bernini, A. Minardo, et L. Zeni, « Dynamic strain measurement in optical fibers by stimulated Brillouin scattering », *Opt Lett*, vol. 34, n° 17, p. 2613–2615, sept. 2009.
- [43] P. FERDINAND, « Capteurs à fibres optiques à réseaux de Bragg », *Tech. Ing.*, r6735, 2015.
- [44] M. Froggatt et J. Moore, « High-spatial-resolution distributed strain measurement in optical fiber with Rayleigh scatter », *Appl Opt*, vol. 37, n° 10, p. 1735–1740, avr. 1998.
- [45] B. Soller, D. Gifford, M. Wolfe, et M. Froggatt, « High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies », *Opt Express*, vol. 13, n° 2, p. 666–674, janv. 2005.
- [46] S. T. Kreger, D. K. Gifford, M. E. Froggatt, B. J. Soller, et M. S. Wolfe, « High Resolution Distributed Strain or Temperature Measurements in Single- and Multi-Mode Fiber Using Swept-Wavelength Interferometry », in *Optical Fiber Sensors*, 2006, p. ThE42.
- [47] M. E. Froggatt, D. K. Gifford, S. T. Kreger, M. S. Wolfe, et B. J. Soller, « Distributed Strain and Temperature Discrimination in Unaltered Polarization Maintaining Fiber », in *Optical Fiber Sensors*, 2006, p. ThC5.

- [48] P. L. Fuhr et D. R. Huston, « Corrosion detection in reinforced concrete roadways and bridges via embedded fiber optic sensors », *Smart Mater. Struct.*, vol. 7, n° 2, p. 217, 1998.
- [49] N. Singh, S. C. Jain, A. K. Aggarwal, M. L. Singla, et M. Singh, « Simple fiber-optic technique for in-situ corrosion sensing in structures », 2000, vol. 3993, p. 201-205.
- [50] J. S. Sirkis, *Fiber optic stress-corrosion sensor and system*. 1994.
- [51] S. Dong, Y. Liao, et Q. Tian, « Intensity-based optical fiber sensor for monitoring corrosion of aluminum alloys », *Appl Opt*, vol. 44, n° 27, p. 5773–5777, sept. 2005.
- [52] C. K. Leung, K. T. Wan, et L. Chen, « A novel optical fiber sensor for steel corrosion in concrete structures », *Sensors*, vol. 8, n° 3, p. 1960–1976, 2008.
- [53] Y.-L. Lo, T.-Y. Yan, et C.-P. Kuo, « Self-referenced intensity-based fiber optic sensor system using fiber Bragg gratings », *Opt. Eng.*, vol. 41, n° 5, p. 1087-1092, 2002.
- [54] J. F. Martins-Filho, E. Fontana, J. Guimarães, et I. J. Souza Coêlho, « Multipoint fiber-optic-based corrosion sensor », 2008, vol. 7004, p. 70043P-70043P-4.
- [55] E. Udd, E. D. Haugse, et A. Trego, *Fiber optic grating corrosion and chemical sensor*. Google Patents, 2000.
- [56] Z. Zheng, X. Sun, et Y. Lei, « Monitoring corrosion of reinforcement in concrete structures via fiber Bragg grating sensors », *Front. Mech. Eng. China*, vol. 4, n° 3, p. 316-319, 2009.
- [57] J. Gao, J. Wu, J. Li, et X. Zhao, « Monitoring of corrosion in reinforced concrete structure using Bragg grating sensing », *NDT E Int.*, vol. 44, n° 2, p. 202 - 205, 2011.
- [58] S. K. T. Grattan, S. E. Taylor, T. Sun, P. A. M. Basheer, et K. T. V. Grattan, « Monitoring of Corrosion in Structural Reinforcing Bars: Performance Comparison Using In Situ Fiber-Optic and Electric Wire Strain Gauge Systems », *Sens. J. IEEE*, vol. 9, n° 11, p. 1494-1502, nov. 2009.

- [59] S. A. Wade, C. D. Wallbrink, G. McAdam, S. Galea, B. R. W. Hinton, et R. Jones, « A fibre optic corrosion fuse sensor using stressed metal-coated optical fibres », *Sens. Actuators B Chem.*, vol. 131, n° 2, p. 602 - 608, 2008.
- [60] Y.-L. Lo et F.-Y. Xiao, « Measurement of Corrosion and Temperature Using a Single-Pitch Bragg Grating Fiber Sensor », *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, vol. 9, n° 10, p. 800-807, oct. 1998.
- [61] J.-R. Lee, C.-Y. Yun, et D.-J. Yoon, « A structural corrosion-monitoring sensor based on a pair of prestrained fiber Bragg gratings », *Meas. Sci. Technol.*, vol. 21, n° 1, p. 017002, 2010.
- [62] C. McCague, M. Fabian, M. Karimi, M. Bravo, L. R. Jaroszewicz, P. Mergo, T. Sun, et K. T. V. Grattan, « Novel Sensor Design Using Photonic Crystal Fibres for Monitoring the Onset of Corrosion in Reinforced Concrete Structures », *J. Lightwave Technol.*, vol. 32, n° 5, p. 891-896, mars 2014.
- [63] N. Zhang, W. Chen, X. Zheng, W. Hu, et M. Gao, « Optical Sensor for Steel Corrosion Monitoring Based on Etched Fiber Bragg Grating Sputtered With Iron Film », *IEEE Sensors*, vol. 15, n° 6, p. 3551-3556, juin 2015.
- [64] E. Sinchenko, G. McAdam, C. Davis, S. McDonald, I. McKenzie, P. J. Newman, et P. R. Stoddart, « Optical fibre techniques for distributed corrosion sensing », in *Optical Fibre Technology/Australian Optical Society, 2006. ACOFT/AOS 2006. Australian Conference on*, 2006, p. 84-86.
- [65] K. R. Cooper, J. Elster, M. Jones, et R. G. Kelly, « Optical fiber-based corrosion sensor systems for health monitoring of aging aircraft », in *AUTOTESTCON Proceedings, 2001. IEEE Systems Readiness Technology Conference, 2001*, p. 847-856.
- [66] T. H. Nguyen, T. Venugopala, S. Chen, T. Sun, K. T. V. Grattan, S. E. Taylor, P. A. M. Basheer, et A. E. Long, « Fluorescence based fibre optic pH sensor for the pH 10–13 range suitable for corrosion monitoring in concrete structures », *Sens. & Actuators B*, vol. 191, p. 498 - 507, 2014.

-
- [67] S. Timoshenko et J. N. Goodier, *Theory of Elasticity, by S. Timoshenko and J. N. Goodier, 2nd Edition*. McGraw-Hill book Company, 1951.
- [68] A. Bertholds et R. Dandliker, « Deformation of single-mode optical fibers under static longitudinal stress », *J. Lightwave Technol.*, vol. 5, n° 7, p. 895-900, juill. 1987.
- [69] K. O. Hill et G. Meltz, « Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview », *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, n° 8, p. 1263-1276, août 1997.
- [70] G. B. Hocker, « Fiber-optic sensing of pressure and temperature », *Appl Opt*, vol. 18, n° 9, p. 1445–1448, mai 1979.
- [71] T. Erdogan, « Fiber grating spectra », *J. Lightwave Technol.*, vol. 15, n° 8, p. 1277-1294, août 1997.
- [72] Luna Inc, « OPTICAL BACKSCATTER REFLECTOMETER (Model OBR 4600) ». 2012.