

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

\*\*\*\*\*

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

\*\*\*\*\*

CENTRE DE RECHERCHE ET  
DE FORMATION DOCTORALE  
EN SCIENCES TECHNOLOGIE  
ET GEOSCIENCES

\*\*\*\*\*

UNITE DE RECHERCHE ET DE  
FORMATION DOCTORALE EN  
PHYSIQUES ET APPLICATIONS

\*\*\*\*\*

FACULTE DES SCIENCES

\*\*\*\*\*



REPUBLIC OF CAMEROON

\*\*\*\*\*

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

\*\*\*\*\*

POST GRADUATE SCHOOL OF  
SCIENCES, TECHNOLOGY  
GEOSCIENCES

\*\*\*\*\*

DOCTORAL RESEARCH UNIT AND  
TRAINING IN PHYSICS AND  
APPLICATIONS

\*\*\*\*

FACULTY OF SCIENCES

\*\*\*\*\*

## DEPARTEMENT DE PHYSIQUE DEPARTMENT OF PHYSICS

LABORATOIRE DE MECANIQUE, MATERIAUX ET STRUCTURES

# Systemes d'auscultation des ouvrages de génie civil avec mesure par fibre optique: Effet du type de matériau sur le transfert des contraintes.

Mémoire rédigé et présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master of Science  
en physique

Par:

**NGANGUEM Joyce Langevins**

Matricule: **1702689**

Licencié en Physique

Sous la direction du:

**DJUIDJE KENMOE Germaine épouse ALOYEM KAZE**

Professeur

Université de Yaoundé I

Soutenu le **19 Juillet 2024**

Rapporteur

**Pr. DJUIDJE Germaine**

Président

**Pr. SAIDOU**

Examineur

**Pr. FEWO Serge**

Année académique: 2024



Laboratoire de Mécanique, Matériaux et Structures

**Systemes d'auscultation des ouvrages de  
génie civil avec mesure par fibre optique :  
Effet du type de matériau sur le transfert  
des contraintes.**

Mémoire rédigé et présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master of Science  
en Physique

par

**NGANGUEM Joyce Langevins**

Matricule : **17O2689**

Licencié en Physique

Sous la Direction de

**DJUIDJE KENMOE Germaine épouse ALOYEM KAZE**

Professeur

Université de Yaoundé I

Année académique :2024



---

---

## Dédicaces

---

Je dédie ce mémoire :

- **Au Dieu Tout Puissant**, qui a été le pourvoyeur de mes parents durant les longues années, pour le souffle de vie et la santé accordée à mes parents ainsi qu'à moi même.
- À mes parents, **M. TCHOMBOU Jules, Mme KENMOE DASSI Ernestine et Mme TCHEUDIBOU valerie** pour l'encadrement, l'éducation et autres sacrifices consentis durant les longues années.
- À ma Grand-mère chérie, **OUEGANG Regine sylvie** pour m'avoir élevé avec tant d'amour depuis mon enfance.

---

---

## Remerciements

---

Ce document étant le tout premier d'une longue liste, je tiens à exprimer ma gratitude à l'endroit de :

- **l'Université de Yaoundé I**, pour avoir accepté mon dossier dès mon inscription et m'a permis de poursuivre mes études supérieures dans son enceinte.

- **Pr DJUIDJE KENMOE Germaine épouse ALOYEM KAZE**, mon directeur de mémoire qui malgré ses multiples occupations a accepté de m'encadrer et a dirigé ce travail de recherche de la meilleure des façons. Je suis très reconnaissant pour l'aide qu'elle m'a apportée, ainsi que sa grande disponibilité à me recevoir dans son bureau chaque fois que je rencontrais un problème majeur. Les différents conseils prodigués au cours de nos séances de travail m'ont permis de progresser à grands pas jusqu'à l'obtention du présent mémoire.

- **Pr NDJAKA Jean Marie**, Chef du Département de Physique de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I pour ses multiples enseignements et son rôle de guide pour nous, jeunes étudiants en Physique.

- **Pr FEWO Serge Ibraïd**, qui m'a permis d'avoir des bases fondamentales sur les principes de propagation des ondes lumineuses à travers des corps d'indices différents.

- Pr **SAÏDOU** qui m'a permis d'avoir des connaissances en mécanique quantique.
- Pr **TCHAWOUA Clément**, par qui j'ai acquis des notions sur la résolution des systèmes dynamiques oscillants, sur le comportement visco-élastique des structures.
- Pr **WOAFO Paul**, qui m'a permis tout d'abord, d'avoir une notion sur la mécanique des solides, sur les méthodes de simulation numérique, et également pour ses multiples conseils qui m'ont été d'une aide inestimable.
- Dr **NDY Paul Von Kluge** qui m'a été d'une aide capitale car celui-ci m'a donné des orientations à travers son expérience dans le domaine.
- Mes aînés académiques du laboratoire et particulièrement à **KEPDJIEP Hermann** pour les aides multiformes.
- Mes camarades de promotion, pour notre entraide et soutien réciproque.
- Toute ma grande famille.
- Toutes les personnes qui de près ou de loin ont contribué à l'élaboration de ce travail.
- Toute personne que j'ai omis de mentionner.

---

---

# Table des matières

---

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	xii
Abstract	xiii
Introduction générale	1
<b>1 GÉNÉRALITÉS SUR LES DIFFÉRENTS TYPES DE CAPTEURS ET ÉTUDE DE LA FIBRE OPTIQUE</b>	<b>4</b>
1.1 Généralités sur les capteurs ponctuels. . . . .	4
1.1.1 Présentation des capteurs ponctuels. . . . .	4
1.1.2 Principaux capteurs traditionnels destinés à la mesure de la température. . . . .	5
1.1.3 Principaux capteurs traditionnels destinés à la mesure des déplacements (déformations). . . . .	7
1.1.4 Quelques résultats graphiques obtenus des capteurs traditionnels sur le terrain. . . . .	10
1.2 Étude de la fibre optique. . . . .	12
1.2.1 Historique de la fibre optique. . . . .	12
1.2.2 Présentation des différentes études réalisées sur la fibre optique en tant que capteur. . . . .	13
1.2.3 Structure d'une fibre optique. . . . .	16

1.2.4	Les différents types de FOs . . . . .	18
1.2.5	Avantages et inconvénients de la fibre optique . . . . .	19
1.2.6	Chaîne de mesure et modes d'interrogation des capteurs à fibre optique .	20
<b>2</b>	<b>MODÉLISATION MATHÉMATIQUE D'UNE FIBRE OPTIQUE</b>	
	<b>SOUMISE À UN CHARGEMENT EXTÉRIEUR</b>	<b>24</b>
2.1	Introduction . . . . .	24
2.2	Présentation des modèles physiques . . . . .	25
2.2.1	Fibre optique colée en surface . . . . .	25
2.2.2	Analyse de déformation de la fibre. . . . .	27
2.2.3	fibre optique noyée dans le béton . . . . .	33
2.2.4	Analyse de déformation de la fibre . . . . .	35
<b>3</b>	<b>RESULTATS ET DISCUSSIONS</b>	<b>42</b>
3.1	Introduction . . . . .	42
3.2	Résultats . . . . .	42
3.2.1	Effet des propriétés du coeur de la fibre sur le paramètre de retard de déformation pour une fibre colée en surface. . . . .	43
3.2.2	Effet des propriétés du coeur de la fibre sur le paramètre de retard de déformation pour une fibre noyée dans le béton. . . . .	45
3.2.3	Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre colée en surface en fonction de la longueur de la fibre. . .	46
3.2.4	Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre noyée en fonction de la longueur de la fibre. . . . .	48
3.2.5	Effet du type de revêtement de la fibre sur le paramètre de retard de déformation pour une fibre en silice colée en surface. . . . .	49
3.2.6	Effet du type de revêtement de la fibre sur le paramètre de retard de déformation pour une fibre en silice noyée dans le béton. . . . .	51

---

3.2.7	Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre en silice colée en surface en fonction de la longueur de la fibre. . . . .	52
3.2.8	Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre en silice noyée en fonction de la longueur de la fibre. . . .	54
3.3	Conclusion . . . . .	55
	<b>Conclusion générale et Perspectives</b>	<b>58</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>61</b>

---

---

# Liste des tableaux

---

1.1	Résumé des caractéristiques des différents types de FOs. . . . .	19
3.1	Parametres physiques (modules de cisaillement) . . . . .	43
3.2	Parametres physiques (modules d'young) . . . . .	43
3.3	Parametres physiques (longueurs) . . . . .	43

---

---

# Table des figures

---

1.1	Sonde à résistance de platine [2]. . . . .	5
1.2	Schéma du principe de mesure d'un thermocouple [4]. . . . .	6
1.3	Jauge de déformation [5]. . . . .	7
1.4	Schéma du principe de mesure d'un thermocouple [4]. . . . .	8
1.5	Schéma de vue en coupe d'un LVDT [9]. . . . .	9
1.6	Capteur pour mesure d'inclinaison [13] . . . . .	10
1.7	Courbes issues des données de mesure d'un inclinometre [Retour d'expérience du barrage hydroélectrique de memve'ele]. . . . .	10
1.8	Courbes issues des données de mesure d'un piezometre [Retour d'expérience du barrage hydroélectrique de memve'ele]. . . . .	11
1.9	Discrétisation de la fibre par la méthode des éléments finis [13] . . . . .	15
1.10	Réprésentation des rapports de déformation obtenus par calcul analytique et par la FEM [13] . . . . .	16
1.11	Structure d'une FO standard [14] . . . . .	17
1.12	Types de fibre optique [14]. . . . .	18
1.13	Chaîne de mesure des capteurs à fibre optique [11]. . . . .	21
1.14	Modes d'interrogation d'un capteur à fibre optique [17] . . . . .	22
2.1	Schéma d'un capteur à fibre optique colée en surface [17] . . . . .	25
2.2	Représentation des contraintes sur une fibre optique en surface [18] . . . . .	27
2.3	Représentation longitudinale de la fibre optique en surface avec contraintes [18] . . . . .	31
2.4	Schéma d'un capteur à fibre optique noyé dans le béton [17]. . . . .	33
2.5	Schéma théorique du transfert d'efforts . . . . .	35

2.6	Représentation longitudinale de la fibre optique noyée avec contraintes . . . . .	39
3.1	variation du paramètre de retard de déformation en fonction du rayon de la fibre colée en surface. Pour le cas(i) ( $E_f=70$ GPa, courbe verte); pour le cas (ii) ( $E_f=55$ GPa, courbe rouge); pour le cas (iii) ( $E_f=45$ GPa, courbe bleue). . . . .	44
3.2	variation du paramètre de retard de déformation en fonction du rayon de la fibre noyée dans le béton. Pour le cas(i) ( $E_f=70$ GPa, courbe verte); pour le cas (ii) ( $E_f=55$ GPa, courbe rouge); pour le cas (iii) ( $E_f=45$ GPa, courbe bleue). . . . .	45
3.3	Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre colée en surface en fonction de la longueur de la fibre. Pour le cas (i) ( $E_f= 70$ GPa, $k = 0.018 \mu m^{-1}$ , courbe verte); pour le cas (ii) ( $E_f= 55$ GPa, $k = 0.025 \mu m^{-1}$ , courbe rouge); pour le cas (iii) ( $E_f= 45$ GPa, $k = 0.035 \mu m^{-1}$ , courbe bleue). . . . .	47
3.4	Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre noyée en fonction de la longueur de la fibre. Pour le cas (i) ( $E_f= 45$ GPa, $k = 0.05 \mu m^{-1}$ , courbe bleue); pour le cas (ii) ( $E_f= 55$ GPa, $k = 0.035 \mu m^{-1}$ , courbe rouge); pour le cas (iii) ( $E_f= 70$ GPa, $k = 0.026 \mu m^{-1}$ , courbe verte). . . . .	48
3.5	variation du paramètre de retard de déformation en fonction du rayon de la fibre colée en surface. Pour le cas(i) ( $G_p=2$ GPa, courbe verte); pour le cas (ii) ( $G_p=0.8$ GPa, courbe rouge); pour le cas (iii) ( $G_p=0.1$ GPa, courbe bleue). . . . .	50
3.6	variation du paramètre de retard de déformation en fonction du rayon de la fibre noyée dans le béton. Pour le cas(i) ( $G_p=2$ GPa, courbe verte); pour le cas (ii) ( $G_p=0.8$ GPa, courbe rouge); pour le cas (iii) ( $G_p=0.1$ GPa, courbe bleue). . . . .	51

- 3.7 Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre en silice colée en surface en fonction de la longueur de la fibre. Pour le *cas* (i) ( $k = 0.0185 \mu m^{-1}$ , courbe verte); pour le *cas* (ii) ( $k = 0.023 \mu m^{-1}$ , courbe rouge); pour le *cas* (iii) ( $k = 0.028 \mu m^{-1}$ , courbe bleue). . . . . 53
- 3.8 Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre en silice noyée en fonction de la longueur de la fibre. Pour le *cas* (i) ( $k = 0.026 \mu m^{-1}$ , courbe verte); pour le *cas* (ii) ( $k = 0.032 \mu m^{-1}$ , courbe rouge); pour le *cas* (iii) ( $k = 0.059 \mu m^{-1}$ , courbe bleue). . . . . 54

---

---

## LISTE DES ABREVIATIONS

---

**FO** : Fibre Optique .

**FEM** : Finite Element Method.

**LVDT** : Linear Variable Differential Transformer.

**PbP** : Phosphate de Plomb.

**InTe** :Tellure d'Indium.

---

## Résumé

---

Dans un monde en constante évolution avec la construction d'ouvrages de plus en plus grands, il devient impératif pour les chercheurs et ingénieurs de développer des systèmes de surveillance qui ont pour but de contrôler ces ouvrages et empêcher tout dysfonctionnement. Cette étude présente ainsi la notion d'auscultation dans un sens général, allant de l'inspection visuelle à la solution novatrice qu'est la fibre optique sans oublier l'utilisation des capteurs traditionnels. Par la suite nous étudierons dans un premier temps l'effet du type de matériau constituant le coeur de fibre optique sur le transfert des contraintes à travers la fibre optique et ensuite l'impact du type de revêtement sur la transmission des contraintes à travers la fibre en silice. Tout ceci analysé à travers l'étude des coefficients de retard de déformation et les rapports de déformation dans le cas où la fibre est collée en surface ou noyée dans le béton. Pour atteindre ces résultats nous avons utilisé des hypothèses sur le comportement isotropique élastique et linéaire de tous les matériaux constituant la fibre et aussi la continuité du déplacement le long des interfaces des couches. À partir du développement analytique dans les deux cas de figure (fibre noyée et fibre collée en surface), nous avons pu obtenir les coefficients de retard de déformation et les rapports de déformation (déformation du coeur de la fibre sur la déformation du matériau hôte) qui nous ont permis par la suite d'avoir des résultats.

---

## Abstract

---

In a constantly evolving world with the construction of larger and larger structures, it is becoming imperative for researchers and engineers to develop monitoring systems which aim to control these structures and preventing any malfunctions. This study thus presents the notion of auscultation in a general sense, ranging from visual inspection to the innovative solution of optical fiber without forgetting the use of traditional sensors. Subsequently, we will first study the effect of the type of material constituting the optical fiber core on the transfer of stresses through the optical fiber and then the impact of the type of coating on the transmission of stresses through the silica fiber. All this analyzed through the study of deformation delay coefficients and deformation ratios in the case where the fiber is stuck on the surface or embedded in concrete. To achieve these results we used assumptions on the elastic and linear isotropic behavior of all the materials constituting the fiber and also the continuity of displacement along the interfaces of the layers. From the analytical development along the interfaces of the layers. From the analytical development in the two cases (embedded fiber and surface bonded fiber), we were able to obtain the deformation delay coefficients and the deformation ratios (deformation of the fiber core on the deformation of the host material) which subsequently allowed us to obtain results.

---

## Introduction Générale

---

Le domaine de la science a subi des grandes avancées au fil des années, avec l'avènement des progrès scientifiques et techniques du 19<sup>ème</sup> siècle. Plusieurs domaines ont donc été fortement impactés ; le domaine du génie civil n'étant pas en reste a subi de multiples mutations, allant de la construction de maisons simples aux gratte-ciels sans oublier les centrales nucléaires, les barrages hydrauliques, les ponts de plus en plus longs pour ne citer que ça ; tout ceci pour répondre aux besoins de l'homme de plus en plus grands.

Le défi de la construction étant réalisé, il fallait par la suite maintenir ces ouvrages en bon état jusqu'au terme de leur durée de vie. Il s'agissait donc pour ces constructeurs d'effectuer un suivi régulier de la structure dans le but de détecter des signes précoces de dysfonctionnement afin d'engager une intervention rapide et éviter les catastrophes [1].

À travers ces méthodes de contrôle, un autre objectif était de pérenniser les ouvrages anciens (construits plusieurs siècles avant) qui subissaient déjà les effets du climat, la fatigue, qui pouvait être accidentelle ou due à une surexploitation non contrôlée. Les gestionnaires d'ouvrages se devaient donc de planifier rigoureusement les opérations de maintenance afin d'en optimiser le coût et d'en garantir l'efficacité. La réalisation d'inspections régulières mais aussi le recours aux tech-

niques de contrôle de santé des structures se révélaient donc indispensables pour assurer le maintien de l'aptitude au service et la sécurité structurale de l'ouvrage sur l'intégralité de sa durée d'exploitation.

La surveillance des grands ouvrages a été donc confrontée à plusieurs difficultés parmi lesquelles la fiabilité des résultats obtenus, la durabilité du matériel, et notamment le coût. Au départ cette surveillance s'effectuait grâce à l'inspection visuelle qui était très limitée due au fait de l'impossibilité pour les yeux de déceler les dysfonctionnements internes à la structure. Ensuite nous avons eu l'arrivée des capteurs ponctuels dits traditionnels ; permettant de comprendre le comportement de la structure à des points précis. Ce caractère ponctuel des capteurs a donc été une véritable faiblesse, car impossible pour ceux-ci de produire des données en temps réel du comportement de la structure. En multipliant le nombre de capteur, le coût devenait important, la fiabilité des résultats de tout le réseau de capteur était mitigée sans oublier la faible résistance de ces capteurs aux intempéries qui posait également un problème supplémentaire [2]. Vis-à-vis de ces difficultés, l'utilisation de la fibre optique (FO) comme capteur a été salutaire due à sa capacité à fournir des données en temps réel du comportement de toute la structure. Cette caractéristique, associée à d'autres avantages tels que l'insensibilité au champ électromagnétique a permis une avancée très rapide de cette nouvelle technologie.

L'auscultation est donc une méthode de surveillance des ouvrages qui donne au maître d'ouvrage les informations lui permettant de planifier rigoureusement les opérations de maintenance afin d'en optimiser le coût et d'en garantir l'efficacité. Cette planification nécessitant des outils d'analyse sophistiqués liés à une

connaissance approfondie de l'évolution des matériaux constitutifs de l'ouvrage et de ses conditions d'exploitation. Il sera donc question dans notre travail de faire une présentation de l'évolution dans le temps des méthodes d'auscultation, présenter les limites de l'auscultation traditionnelle. Par la suite, présenter la solution novatrice qu'est la fibre optique et enfin montrer l'impact du type de matériau constituant le coeur de la fibre dans la transmission de l'information et aussi l'impact du revêtement dans la transmission de l'information par la fibre en silice. Tout ceci en considérant ces fibres collées sur le matériau ou encore noyées dans le béton.

# GÉNÉRALITÉS SUR LES DIFFÉRENTS TYPES DE CAPTEURS ET ÉTUDE DE LA FIBRE OPTIQUE

---

## 1.1 Généralités sur les capteurs ponctuels.

### 1.1.1 Présentation des capteurs ponctuels.

Un capteur est un dispositif délivrant un signal dit « de sortie » (hauteur de mercure, intensité électrique, charge, courant, déviation d'une aiguille, entre autres) qui dépend du mesurande (grandeur physique « d'entrée »). On peut distinguer deux grandes familles de capteurs [1].

- **Les capteurs actifs** qui fonctionnent comme les générateurs et convertissent une grandeur physique en un signal électrique. Le signal de sortie est alors une charge, une tension ou un courant. La particularité de ce type de capteur est qu'il ne requiert point le besoin d'une alimentation pour la conversion de la grandeur physique au signal électrique. ex : L'extensometre à fibre optique

- **Les capteurs passifs** qui sont considérés comme des impédances et dont l'un des paramètres est sensible au mesurande. Un tel capteur a besoin d'être alimenté par un circuit électrique (conditionneur) pour convertir en énergie électrique la grandeur mesurée. ex : Jauges de contrainte métalliques, l'inclinometre à fluide

Ces deux types de capteurs sont généralement utilisés pour le contrôle de santé

des ouvrages du génie civil afin de suivre particulièrement deux paramètres : les températures et les déformations (ou les déplacements). Ces derniers permettent une détection précoce des anomalies pouvant affecter une structure (incendie, fissuration, concentration de contrainte, flèche importante). Nous présentons dans la suite les différents capteurs dits « traditionnels » utilisés pour la surveillance des structures.

### 1.1.2 Principaux capteurs traditionnels destinés à la mesure de la température.

#### a) Sondes à résistance de platine.

Le principe de mesure dans une sonde à résistance de platine se base sur le fait que la résistance électrique du platine varie en fonction de la température (figure 1.1). La plus courante des sondes à résistance de platine est appelée sonde Pt100 du fait de la configuration de ce type de capteur qui possède une résistance en platine de  $100 \Omega$  à  $0^\circ\text{C}$  [2]. La gamme de mesure de ce type de capteur est très large (de  $-200^\circ\text{C}$  à  $650^\circ\text{C}$ ) pour un temps de réponse de quelques secondes [3].



FIGURE 1.1 – Sonde à résistance de platine [2].

**b) Thermocouples .**

La mesure de la température à l'aide d'un thermocouple se base principalement sur l'effet Seebeck (principe thermodynamique important qui permet la conversion directe de la chaleur en électricité et vice versa). Si on réunit à une extrémité deux fils métalliques de natures différentes et qu'on élève la température de cette extrémité, on observe l'apparition d'une tension électrique aux deux extrémités restées libres appelée force électromotrice (voir figure 1.2). La détermination de la température dans la partie chauffée est déduite de la mesure de cette tension. La mesure de la température avec un thermocouple s'effectue de manière ponctuelle. Selon la nature des métaux utilisés, la plage de mesure d'un thermocouple varie. Il est ainsi possible de mesurer des températures basses atteignant  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  mais aussi de très hautes températures avoisinant  $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$  [4]. Le temps de réponse de ce type de capteurs est de quelques secondes [3].

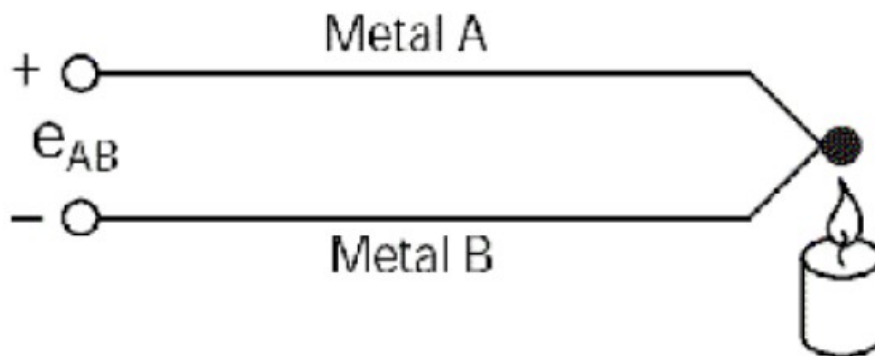


FIGURE 1.2 – Schéma du principe de mesure d'un thermocouple [4].

### 1.1.3 Principaux capteurs traditionnels destinés à la mesure des déplacements (déformations).

#### a) Jauges extensométriques .

Le type de jauge extensométrique le plus utilisé est la jauge résistive. Une jauge est constituée d'une grille formée par un conducteur filiforme, fixée sur un support isolant comme illustré dans la figure 1.3, collée sur la structure, et protégée de l'environnement l'entourant [3]. Le principe de fonctionnement de la jauge repose sur la variation de la résistance électrique du conducteur filiforme en fonction de son allongement (et donc de la déformation du support).

Selon la longueur de la jauge, les mesures se font de manière ponctuelle sur une longueur plus ou moins courte (de quelques millimètres à quelques centimètres) avec une étendue de mesure pouvant atteindre  $\pm 200\ 000\ \mu\varepsilon$  [3].

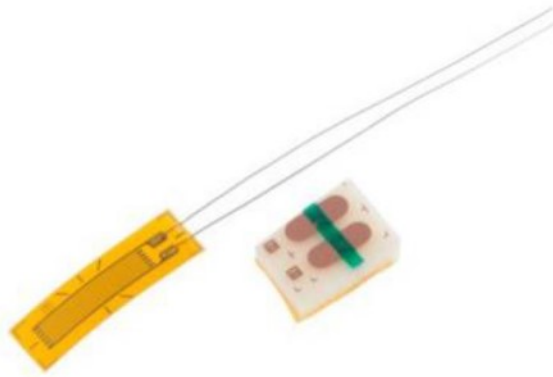


FIGURE 1.3 – Jauge de déformation [5].

**b) Extensomètres à cordes vibrantes.**

Le principe de fonctionnement des capteurs à cordes vibrantes repose sur la mesure de la variation de fréquence de vibration d'une corde tendue à l'intérieur du corps du capteur et fixée ponctuellement à ses deux extrémités au substrat dont on veut mesurer la déformation. Si ce dernier est comprimé, les extrémités se rapprochent et la fréquence propre de vibration mécanique de la corde diminue. De la même manière, lorsque le support est sollicité en traction, les deux extrémités s'éloignent et la fréquence de vibration augmente [6-7]. L'étendue de mesure de ce type de capteurs est de l'ordre de  $4000 \mu\text{m}$  [3].

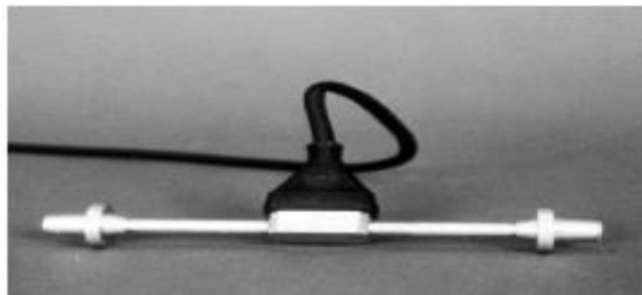


FIGURE 1.4 – Schéma du principe de mesure d'un thermocouple [4].

**c) Les capteurs LVDT (Linear Variable Differential Transformer soit transformateur différentiel linéaire variable).**

Un capteur LVDT est un capteur inductif qui fournit une tension proportionnelle au déplacement d'un noyau ferromagnétique (coeur ferrite), qui coulisse dans l'axe du cylindre (voir figure 1.5). Il est composé d'un bobinage primaire et de 2 bobinages secondaires ; le mouvement du noyau à l'intérieur de ces bobines génère des tensions dans chaque bobinage secondaire (voir la figure 1.5) et c'est en se servant de ces deux tensions qu'on arrive à connaître la position du noyau.

Suivant la taille du capteur, l'étendue de la mesure peut atteindre 400 mm [9].

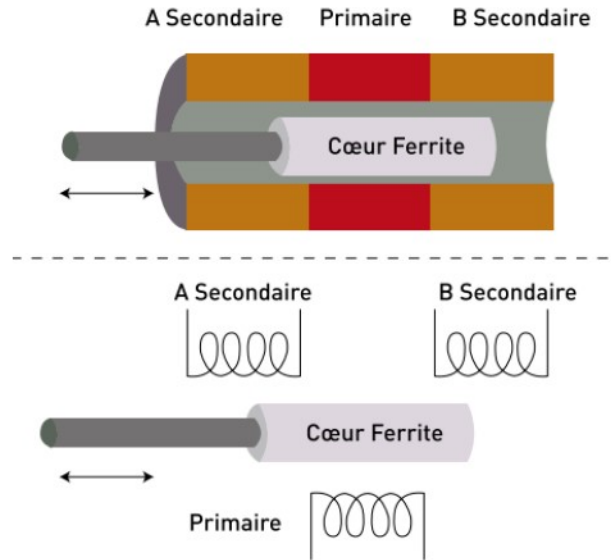


FIGURE 1.5 – Schéma de vue en coupe d'un LVDT [9].

**d) Les capteurs d'inclinaison.**

Les capteurs d'inclinaison, également appelés capteurs d'angle ou capteurs de niveau, sont des dispositifs utilisés pour mesurer l'angle d'inclinaison ou la position angulaire d'un objet par rapport à la gravité ou à une référence spécifique.



FIGURE 1.6 – Capteur pour mesure d’inclinaison [13]

### 1.1.4 Quelques résultats graphiques obtenus des capteurs traditionnels sur le terrain.

Nous vous présentons quelques résultats graphiques obtenus par auscultation traditionnelle à certains points particuliers d’un barrage.

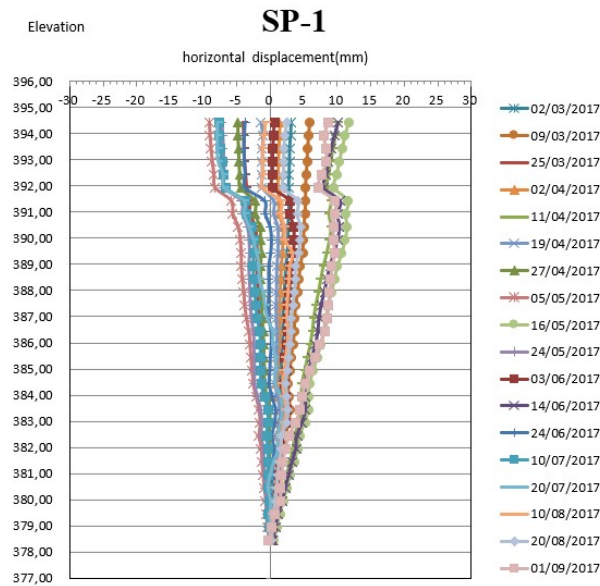


FIGURE 1.7 – Courbes issues des données de mesure d’un inclinometre [Retour d’expérience du barrage hydroélectrique de memve’ele].

Ce que nous observons à la figure 1.7 ce sont les différents déplacements que subissent la partie auscultée de la structure, en fonction de sa hauteur sur une fréquence de prise non constante (6 jours, 8 jours, 9 jours et plus). À travers cette courbe on évalue le comportement de la structure dans le temps, on décèle les anomalies en fonction d'un déplacement maximal acceptable et on fait des interventions pour éviter tout dysfonctionnement en cas de nécessité.

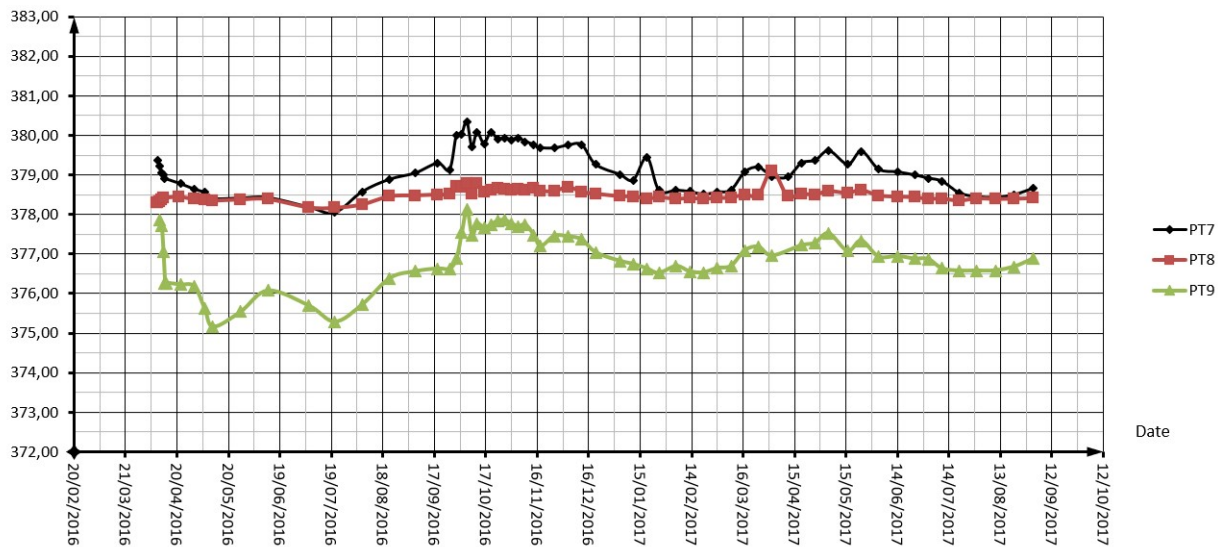


FIGURE 1.8 – Courbes issues des données de mesure d'un piezometre [Retour d'expérience du barrage hydroélectrique de memve'ele].

La figure 1.8 présente quant à elle les différentes hauteurs d'eau à des points précis de la structure auscultée (PT7, PT8, PT9) pour des intervalles de temps d'un mois environ. À travers ces différentes courbes on a la possibilité d'évaluer l'instant où la hauteur d'eau devient un danger pour la structure et préparer en avance des interventions afin d'éviter tout dysfonctionnement.

Malgré leur forte utilisation, les capteurs traditionnels ponctuels ont beaucoup de limites :

- La discontinuité dans l'acquisition des données qui pousse à l'incapacité pour

ces capteurs de faire un suivi en temps réel des structures.

- La sensibilité au champ magnétique intense, qui conduit à des dysfonctionnements internes.

- La sensibilité aux hautes tensions ou à la foudre qui conduit à des dysfonctionnements internes.

- La sensibilité aux environnements hostiles, soumis à de très fortes températures ou des déchets radioactifs dont l'exposition conduit généralement à une défaillance de ceux-ci.

Pour contourner ces nombreux problèmes, les chercheurs ont mis sur pied le système de contrôle par fibre optique qui s'est révélé plus efficace.

## 1.2 Étude de la fibre optique.

### 1.2.1 Historique de la fibre optique.

L'histoire de la fibre optique débute dans la Grèce Antique. À cette époque, les grecs anciens transportaient déjà de la lumière grâce à des tubes en verre ; mais à des fins décoratives. Par la suite, ce sont les artisans vénitiens de la Renaissance qui l'utilisaient pour créer des millefioris grâce au principe de réflexion.

La première utilisation dans les télécoms est attribuée à Alexander Graham Bell ; l'homme qui inventa le téléphone. En 1880, il inventa le photophone, un appareil pouvant transporter la lumière sur 200 mètres.

C'est en 1927 que l'avènement de la fibre optique arrive avec Baird et Hansell. Ils essayèrent d'acheminer des images de télévision via des fibres optiques. L'invention fût brevetée mais n'a jamais été réellement utilisée.

Il faudra attendre les années 50 pour qu'une invention réellement exploitable

voit le jour. Imaginée par Abraham van Heel et Harold Hopkins, le fibroscope permet de transporter des images le long de fibres en verre. Mais cette invention fût également utilisée par le secteur médical pour les endoscopies.

Pour les télécommunications, la pleine exploitation de la fibre fût rendue possible par l'invention du laser. Ce dernier avait l'avantage de transmettre un signal sans pertes sur une grande distance. La première transmission de données via fibre optique est attribuée à Charles Kao et Georges Hockman 1966 .Depuis lors, la fibre optique a subi des grandes avancées et aujourd'hui, celle-ci est utilisée comme capteur.

### 1.2.2 Présentation des différentes études réalisées sur la fibre optique en tant que capteur.

Il faut tout d'abord noter que l'utilisation de la fibre optique dans le domaine de l'auscultation ne date pas de très longtemps.

—→**Yolande SIKALI MAMDEM** [10] a présenté en 2012 à travers une étude détaillée, la mesure de la température et de la déformation d'une poutre en béton. Dans cette étude elle présentait les avantages et les difficultés de l'utilisation des capteurs à fibres optiques répartis pour la surveillance des ouvrages de génie civil dans un premier temps ; et dans un second elle a montré la possibilité de prévoir par calculs la sensibilité à la température et à la déformation de la fréquence de décalage Brillouin d'une fibre optique.

—→**Jian-Neng Wang et Jaw-Luen Tang** [11] ont effectué une étude en 2012 sur l'Interféromètre Mach-Zehnder à fibre de cristal photonique pour la détection de l'indice de réfraction. Où ceux-ci ont démontré avec succès la faisabilité de la

fabrication d'une classe de capteur d'indice de réfraction basé sur l'interféromètre PCF (Photonic Crystal Fiber). Ils ont aussi démontré la résolution du capteur pour différentes longueurs de PCF et les résultats indiquent qu'une résolution faible comme  $1.62 \times 10^{-4}$  à  $8.88 \times 10^{-4}$  RIU (Refractive Index Units) ou  $1.02 \times 10^{-4}$  à  $9.04 \times 10^{-4}$  RIU (pour une longueur de détection = 3.50 cm ou 5.00 cm, respectivement) peuvent être obtenus pour des indices de réfraction compris entre 1.333 et 1.422.

—→ **Antoine Bassil, Xavier Chapeleau, Dominique Leduc et Odile Abraham** [12] ont travaillé sur un modèle de transfert des contraintes par capteurs à fibre optique distribués où ceux-ci ont étudié le mécanisme de transfert de déformation entre un matériau hôte et une fibre optique en étudiant un modèle analytique traitant les liaisons imparfaites entre les couches. Ce modèle de transfert de contrainte est examiné en effectuant des essais de fendage en coin sur des éprouvettes de béton instrumentées avec câbles à fibres optiques intégrés et montés en surface. Les résultats expérimentaux montrent la validité de l'expression de la déformation induite par la fissure ajustée aux déformations distribuées mesurées à l'aide d'un système de réflectométrie à rétrodiffusion (OBR). En conséquence, des estimations précises des ouvertures de fissures à côté de l'emplacement du câble optique ont été réalisés, ainsi que la surveillance de la réponse du câble optique en suivant le paramètre de décalage de déformation.

—→ **Shiuh-Chuan et Chih-Ying Huang** [13] En 2011 ont effectué une étude concernant l'effet du revêtement sur le transfert de déformations des capteurs à fibre optique collés sur une structure en béton. Dans cette étude, un modèle théorique de la déformation transférée du matériau hôte à la fibre optique est

développé pour évaluer l'interaction entre le matériau hôte et le revêtement. Les résultats expérimentaux montrent que la déformation mesurée au niveau de la fibre optique est légèrement différente de la déformation réelle dans l'éprouvette.

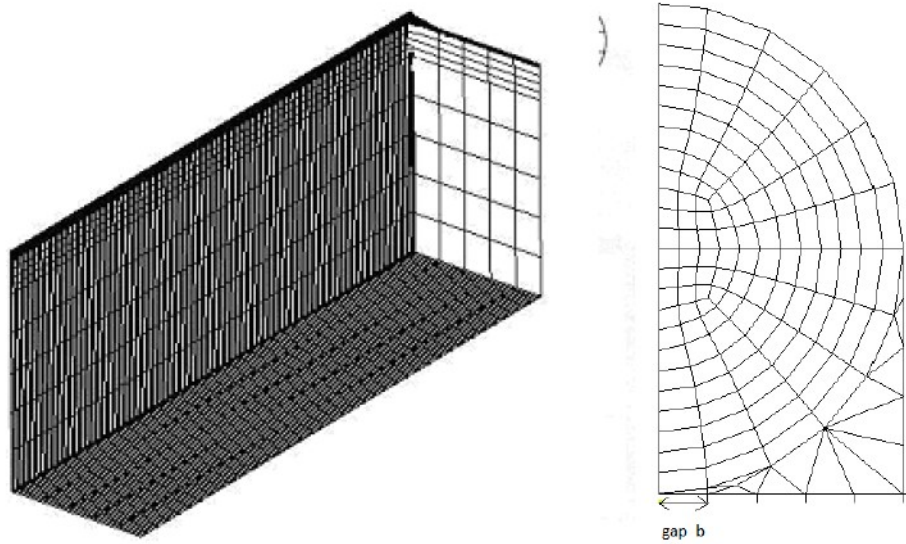


FIGURE 1.9 – Discretisation de la fibre par la méthode des éléments finis [13]

À la figure 1.9 , on observe l'image du matériau discrétisé par la méthode des éléments finis en utilisant un logiciel de simulation approprié. À travers cette étude expérimentale, il obtient le comportement du rapport de déformation en fonction du rapport  $x/L_f$  (où  $L_f$  est la longueur de la fibre).

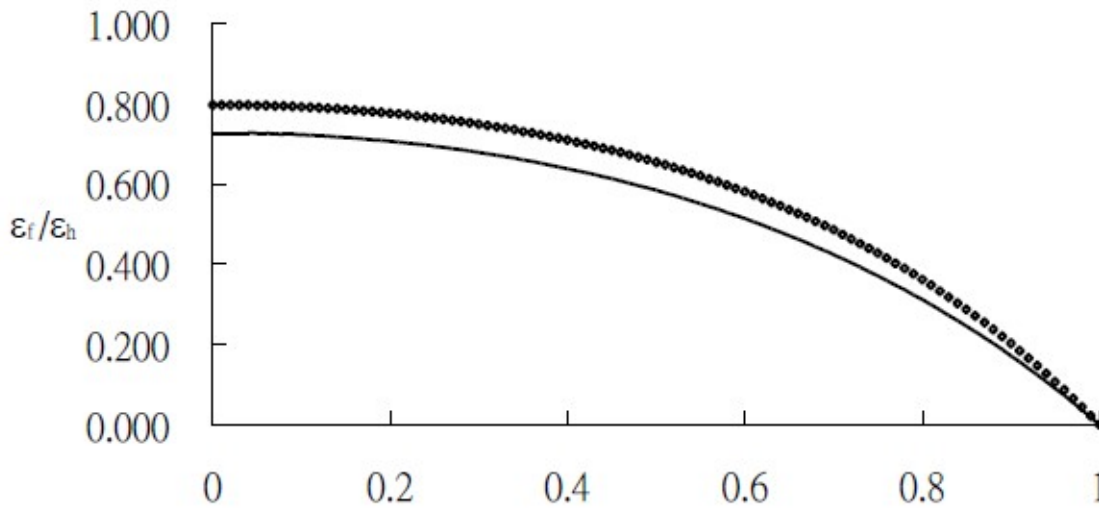


FIGURE 1.10 – Représentation des rapports de déformation obtenus par calcul analytique et par la FEM [13]

La figure 1.10 nous présente les rapports de déformation en fonction du rapport  $x/L_f$  obtenus par **Shiuh-Chuan et Chih-Ying Huang** [13] (où  $L_f$  est la longueur de la fibre). Nous observons deux courbes où la plus foncée représente la courbe obtenue expérimentalement tandis que la courbe fine est celle obtenue analytiquement. On comprend clairement qu’il y’a une différence entre l’information envoyée (contrainte) sur la structure haute et celle (contrainte) reçue par la fibre optique ; d’où l’importance de parler de l’impact du revêtement dans le transfert des contraintes.

### 1.2.3 Structure d’une fibre optique.

Une FO est un guide d’onde diélectrique cylindrique qui permet de guider l’onde lumineuse le long de son axe central. La forme générale d’une FO est celle d’un fil long, de section circulaire et constitué de plusieurs couches, tel qu’illustré dans la figure 1.11.

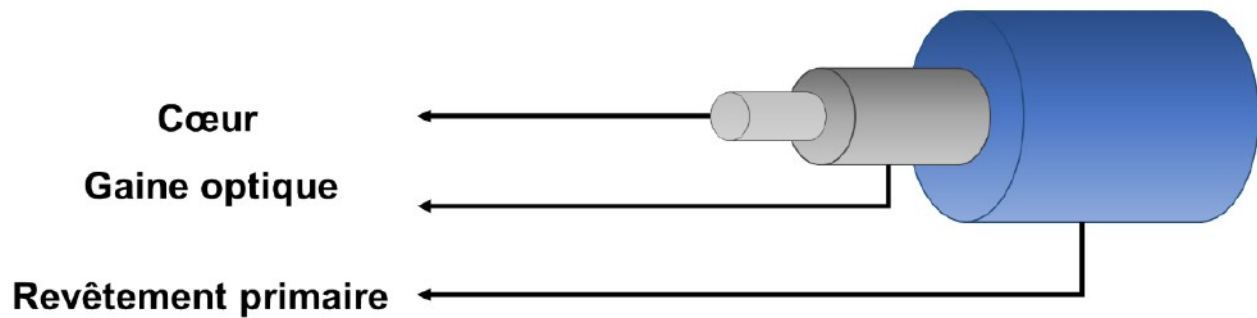


FIGURE 1.11 – Structure d'une FO standard [14]

Une FO est constituée :

**D'un coeur optique** : Le coeur optique possède un indice de réfraction légèrement supérieur à celui de la gaine optique permettant d'assurer le guidage de l'onde électromagnétique (une différence d'indice de réfraction de l'ordre de 1 pourcent). Le coeur le plus souvent en verre est généralement fabriqué en silice ; cependant, nous distinguons les fibres en Tellure d'Indium (InTe) ou encore en Phosphore de Plomb (PbP), qui feront l'objet de notre étude.

**D'une gaine optique** : La gaine optique est fabriquée à partir du même matériau que le coeur mais est dopée différemment. Le dopage se fait généralement par ajout de certains ions modificateurs de réseau ( Aluminium (Al), Titane (Ti), Zirconium (Zr), Germanium (Ge), Fluor (F)). Il est nécessaire que le matériau qui constitue la gaine présente des propriétés optiques comparables à celles du coeur en termes de pureté et de transparence [15].

On peut aussi retrouver dans le commerce des FOs avec un coeur et une gaine en plastique mais leur usage demeure limité : éclairage et liaison de très courte distance [5].

**D'un revêtement primaire** : Le revêtement primaire assure une protection mécanique pour la partie optique très fragile (coeur et gaine) et protège la gaine

optique des différentes agressions de l'environnement extérieur [3].

Le revêtement primaire est habituellement en acrylate pour des utilisations de télécommunication, mais peut être composé de polyimide ou d'autres types de matériaux comme les métaux, le carbone, les polyesters ou le nylon [16].

### 1.2.4 Les différents types de FOs

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

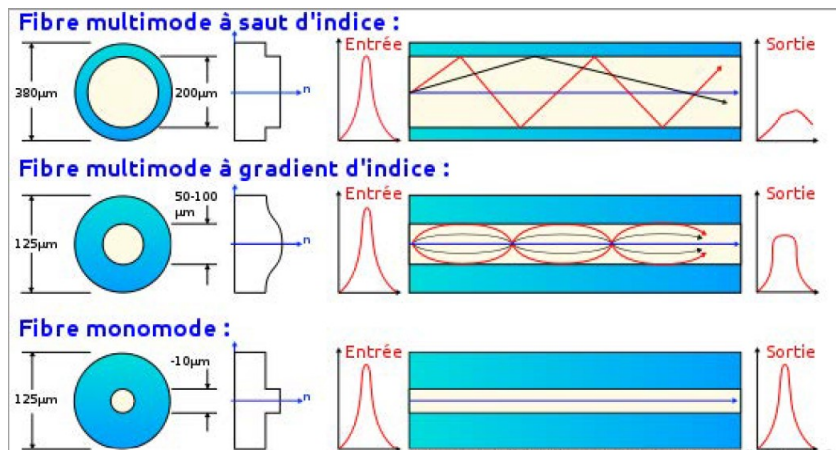


FIGURE 1.12 – Types de fibre optique [14].

**Les fibres monomodes :** Le diamètre du coeur ne mesure que quelques  $\mu m$  (8-10) et l'onde n'a qu'un seul mode de propagation possible qui se trouve dans l'axe de la fibre. Les pertes sont donc minimales et des utilisations à très hauts débits et/ou sur de très longues distances sont alors possibles.

**Les fibres multimodes :** Le diamètre du coeur va de quelques dizaines de micromètre à quelques centaines de micromètre. Par conséquent, l'onde lumineuse présente plusieurs modes de propagation, c'est-à-dire que l'onde lumineuse se propage à des vitesses de phase différentes et suivant des parcours différents.

Elles sont utilisées principalement pour des bas débits ou de courtes distances.

Parmi les fibres multimode, nous distinguons :

—→ Les fibres à saut d'indice : si l'indice de réfraction du coeur est constant en tout point et chute brutalement à une valeur moindre dans la gaine, la propagation de l'onde lumineuse s'effectue alors de manière rectiligne.

—→ Les fibres à gradient d'indice : si l'indice de réfraction du coeur diminue progressivement du centre jusqu'à la périphérie, les parcours caractéristiques des divers modes de propagation de l'onde lumineuse sont alors incurvés.

TABLE 1.1 – Résumé des caractéristiques des différents types de FOs.

Type de fibre	Caractéristiques
Multimode à saut d'indice	Débit pour les télécommunications : environ 100 Mbits/s Coefficient d'atténuation : 10 dB/km ; portée maximale de 2 km
Multimode à gradient d'indice	Débit pour les télécommunications : environ 1Gbit/s Coefficient d'atténuation : 10 dB/km ; portée maximale de 2 km
Monomode	Débit pour les télécommunications : environ 100 Gbit/s Coefficient d'atténuation : 0,5 dB/km ; portée maximale de 100 km

### 1.2.5 Avantages et inconvénients de la fibre optique

#### —→ Avantages

Les avantages liés à l'utilisation des capteurs à fibre optique sont légion ; nous pouvons citer :

- Les dimensions de la fibre optique induisent le faible encombrement (très faible dimension transversale), la légèreté ou la grande souplesse .
- La résistance à la traction d'une fibre optique est en général plus élevée que celle

d'un fil électrique.

- Rapidité dans le transfert de l'information et faible atténuation.
- l'extrême petitesse du champ électromagnétique de l'onde lumineuse les parcourant confèrent aux capteurs un caractère non perturbateur pour le milieu à ausculter.
- Large bande passante.
- L'absence de risques d'étincelles électriques ou de courts-circuits procure une sécurité d'utilisation dans certains lieux particuliers (ex : mines de charbon, industries chimiques etc).
- La nature même de la constitution des fibres leur confère la possibilité d'être utilisée dans des milieux fortement hostiles, où toute autre technologie fonctionne difficilement voire pas du tout (ex : hautes températures, très forte pression, fortes perturbations électromagnétiques le long des lignes à haute tension par exemple).
- Longue durée de vie de ces capteurs est un point tout aussi important.

—→ **Inconvénients**

- La connectique des fibres optiques reste lente et délicate comparée au cas du cuivre qui se connecte et se déconnecte facilement.
- Problème de technicité car cette technologie manque de retour d'expériences et de transfert de compétence.

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

Les capteurs à fibre optique, comme tout capteur sont des éléments d'une chaîne de mesure. Celle-ci a pour rôle de donner accès au mesurande sous une

forme exploitable, alors qu'il ne se prête pas en général à une mesure directe, facilement compréhensible et utilisable. La chaîne de mesure d'un capteur à fibre optique comporte d'une manière générale, en dehors du capteur lui-même, les maillons suivants :

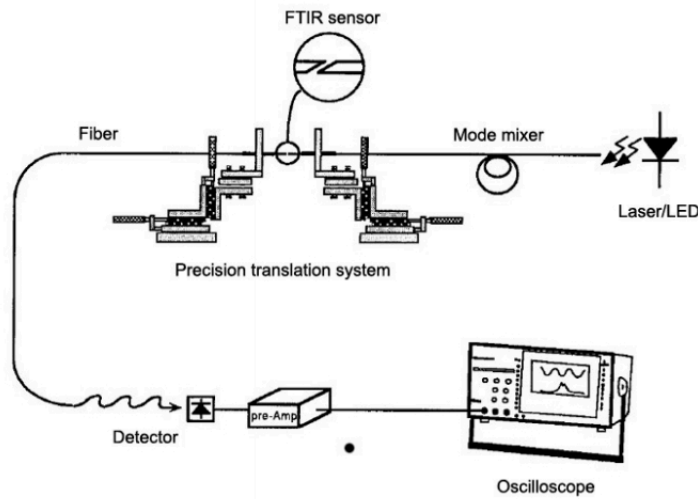


FIGURE 1.13 – Chaîne de mesure des capteurs à fibre optique [11].

- Un émetteur de lumière, qui est un dispositif électronique convertissant un signal électrique en signal optique. Il est constitué d'une ou plusieurs sources monochromatiques, cohérentes ou non, continues ou impulsionnelles (ex : diodes électroluminescentes, diodes lasers, diodes super-luminescentes).
- Un guide d'onde optique, qui est la fibre optique elle-même (monomode ou multimode). Elle peut être soit standard, ou soit spécialement réalisée pour effectuer une mesure dans un contexte particulier.
- Un ou des composants optiques complémentaires, tels que, des coupleurs, des polariseurs, des connecteurs.
- Un multiplexeur, qui assure le multiplexage des signaux pouvant être réalisé suivant différentes procédures.

- Un récepteur de lumière, qui est un dispositif électronique convertissant un signal optique en un signal électrique. Les détecteurs employés sont variables suivant la détection souhaitée (ex : photodiodes simples (PD) ou à avalanche (PDA), barrettes de photodiodes, photomultiplicateurs).
- Une chaîne de traitement du signal, dont la complexité va souvent de pair avec celle du montage optique.
- Un circuit d'alimentation en énergie, qui est le plus souvent classique

Les capteurs à fibre optique au sein d'une chaîne de mesure peuvent être interrogés selon deux principaux modes d'interrogation comme illustrés à la figure 1.14 suivante :

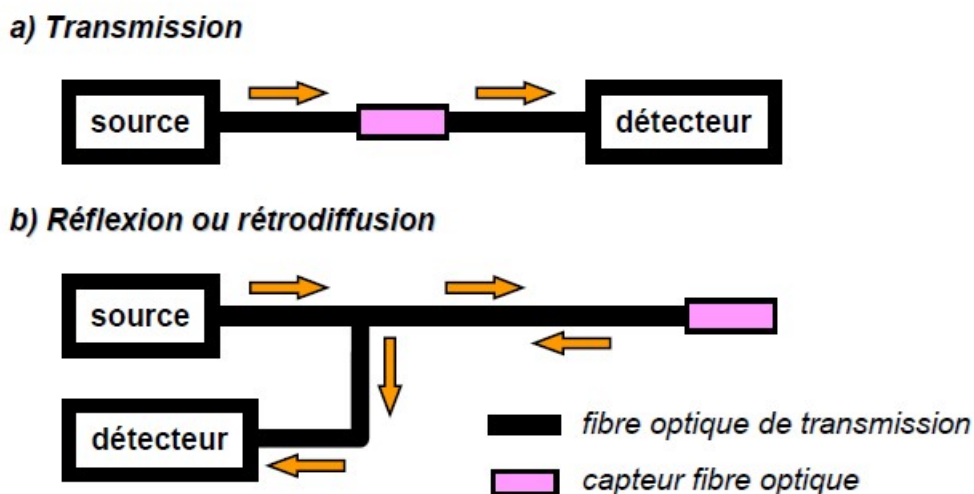


FIGURE 1.14 – Modes d'interrogation d'un capteur à fibre optique [17]

—→**Par transmission**

le signal lumineux injecté à l'entrée de la fibre optique traverse le capteur et est récupéré par un détecteur en sortie de fibre. L'inconvénient de ce type de mode d'interrogation c'est que les deux extrémités de la fibre optique doivent être accessibles [17].

—→**Par réflexion ou rétrodiffusion**

Le signal lumineux injecté à l'entrée de la fibre optique traverse le capteur qui réfléchit ou rétrodiffuse le signal qui est récupéré à la même entrée de la fibre optique [17].

MODÉLISATION MATHÉMATIQUE D'UNE FIBRE  
OPTIQUE SOUMISE À UN CHARGEMENT EXTÉRIEUR

---

## 2.1 Introduction

Deux types d'ouvrages sont considérés dans la présente étude : les ouvrages existants et les ouvrages neufs ou plus précisément, en cours de construction. Il faut noter tout d'abord qu'on positionne le capteur de déformation à l'endroit exact dans le volume de l'ouvrage où l'exploitant désire connaître l'état de déformation. Ceci reste en effet réalisable pour les ouvrages neufs au sein desquels il est possible pendant la construction d'y inclure des capteurs. Cependant, pour la plupart des ouvrages déjà construits, pour lesquels l'installation de capteurs dans le volume n'est plus possible (ex : problèmes de mise en oeuvre,) l'exploitant a recours à des capteurs fixés en paroi externe. Le but final reste néanmoins le même : connaître l'état de la résistance mécanique du matériau, donc les états de déformation et de contrainte, dans le volume de l'ouvrage. C'est pourquoi deux types de capteurs à fibre optique sont considérés ; une fibre colée en surface du matériau et l'autre noyée dans le matériau.

Tout au long de ce chapitre nous étudierons premièrement le paramètre  $k$  appelé « strain-lag parameter » ou encore, paramètre de retard de déformation pour les 2 cas de figure (fibre noyée et fibre colée en surface) et en second, le rapport

de déformation de la fibre optique lorsqu'elle est colée en surface et lorsqu'elle est noyée dans le béton. Pour le faire, nous étudierons l'équilibre entre les interfaces des couches puis après développement on aura le paramètre de retard de déformation et ensuite le rapport de déformation.

## 2.2 Présentation des modèles physiques

### 2.2.1 Fibre optique colée en surface

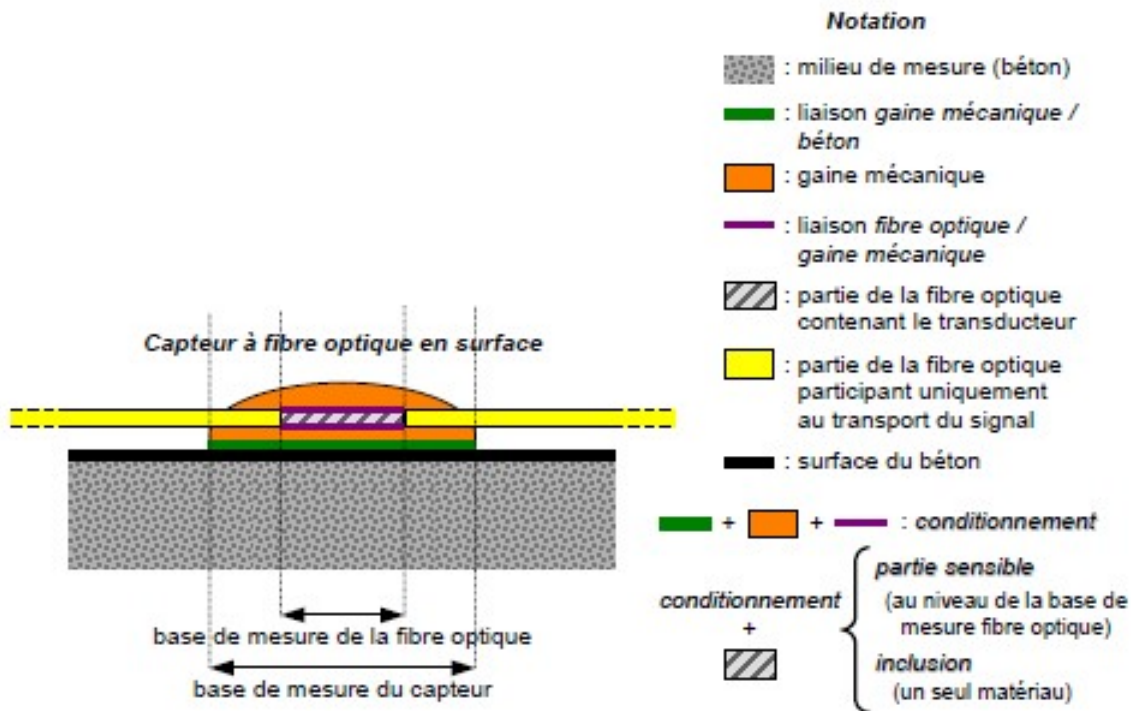


FIGURE 2.1 – Schéma d'un capteur à fibre optique colée en surface [17]

Nous considérons une fibre optique selon le modèle de **Shiuh-Chuan et Chih-Ying Huang** liée en surface sur une structure hôte tandis qu'une charge externe  $\sigma_0$  (contrainte) est appliquée uniquement à la structure hôte. Étant donné que la

contrainte est directement appliquée à la structure hôte et non à la fibre optique, la contrainte dans la fibre optique est soumise à un cisaillement à l'interface entre l'ensemble (coeur + gaine) et le revêtement. Dans le cas présent, la transmission de déformation entre la structure hôte et le capteur à fibre optique lié en surface est dérivée sur la base des hypothèses suivantes :

a) Les propriétés mécaniques du coeur et de la gaine optique sont les mêmes et constituent l'élément sensible de la fibre. Pour simplifier on les appelle collectivement «fibre optique».

b) Tous les matériaux, la fibre optique, le revêtement protecteur, la couche adhésive et le matériau de la structure ont un comportement isotrope élastique linéaire.

c) Toutes les interfaces sont parfaitement collées ; ainsi, la continuité du déplacement le long des interfaces est décrite comme suit :

$$u_1^h = u_1^a \text{ pour } r = r_a$$

$$u_1^a = u_1^p \text{ pour } r = r_p$$

$$u_1^p = u_1^f \text{ pour } r = r_f$$

(2.1)

où  $u_1^h, u_1^a, u_1^p, u_1^f$  sont respectivement les déplacements du matériau hôte, de l'adhésif, du revêtement et de la fibre optique et  $r_a, r_p$  et  $r_f$  sont respectivement les rayons de l'adhésif, du revêtement et la fibre optique.

d) Le revêtement protecteur et l'adhésif sont soumis à une déformation par cisaillement.

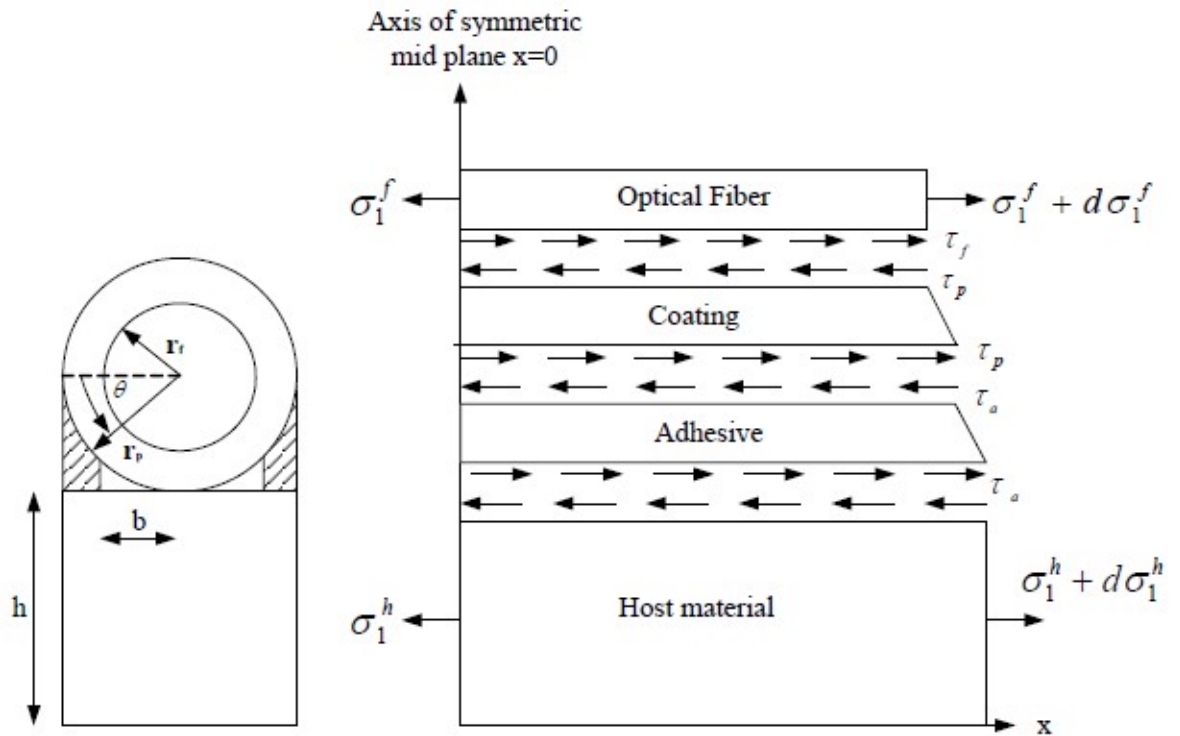


FIGURE 2.2 – Représentation des contraintes sur une fibre optique en surface [18]

### 2.2.2 Analyse de déformation de la fibre.

Le modèle analytique est illustré à la figure 2.2, avec une fibre optique cylindrique, un revêtement, le matériau hôte et l'adhésif. Le matériau hôte subit l'influence d'une contrainte de champ lointain  $\sigma_0$  ; sous l'hypothèse (c), l'équation d'équilibre du revêtement est :

$$r_p \int_0^\pi \tau_p(r_p, \theta, x) d\theta dx - r_f \int_0^{2\pi} \tau_p(r_f, \theta, x) d\theta dx = 0 \quad (2.2)$$

où  $\tau_p$  représente la contrainte de cisaillement dans le revêtement qui est inverse au rayon et exprimé comme suit :

$$\tau_p(r, \theta, x) = \frac{r_p}{r} T(\theta, x) \quad (2.3)$$

où  $T(\theta, x)$  désigne la contrainte de cisaillement à l'interface entre le revêtement et l'adhésif. La déformation de cisaillement dans le revêtement est :

$$\gamma_p = \frac{\partial u_1^P(r, \theta, x)}{\partial r} = \frac{\tau_p(r, \theta, x)}{G_p} \quad (2.4)$$

En remplaçant l'équation (2.3) dans (2.4) nous obtenons :

$$\gamma_p = \frac{\partial u_1^P(r, \theta, x)}{\partial r} = \frac{1}{G_p} \frac{r_p}{r} T(\theta, x) \quad (2.5)$$

où  $G_p$  et  $u_1^p$  représentent respectivement le module de cisaillement et le déplacement axial du revêtement. En intégrant par rapport au rayon, on obtient.

$$u_1^p = \frac{r_p}{G_p} \ln(r) T(\theta, x) + C_1 \quad (2.6)$$

Pour renforcer la continuité du déplacement dans l'interface entre le revêtement et la fibre optique on a :

$$u_1^p(r_f, \theta, x) = u_1^f(r_f, \theta, x) \quad (2.7)$$

Le déplacement dans le revêtement de l'équation (2.6) va donc s'écrire :

$$u_1^p(r, \theta, x) = \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r}{r_f}\right) T(\theta, x) + u_1^f(r_f, \theta, x) \quad (2.8)$$

où  $u_1^f(r_f, \theta, x)$  est le déplacement de la fibre optique dans l'interface fibre optique revêtement.

La continuité du déplacement entre le revêtement et la couche adhésive peut alors s'écrire :

$$u_1^p(r_p, \theta, x) = u_1^a(r_p, \theta, x) = \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) T(\theta, x) + u_1^f(r_f, \theta, x) \quad (2.9)$$

D'après la figure 2.2, l'épaisseur de la couche adhésive est donnée par :

$$t(\theta) = r_p - r_p \cos(\theta) \quad (2.10)$$

Dans le matériau adhésif on aura comme contrainte et déformation :

$$\gamma_a = \frac{u_1^h - u_1^a(r_p, \theta, x)}{r_p - r_p \cos(\theta)}; \tau_a = \frac{u_1^h - u_1^a(r_p, \theta, x)}{r_p - r_p \cos(\theta)} G_a \quad (2.11)$$

en remplaçant (2.8) dans (2.11) on obtient :

$$\tau_a = \frac{G_a}{r_p - r_p \cos(\theta)} \left( u_1^h - \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) T(\theta, x) - u_1^f \right) \quad (2.12)$$

La continuité de l'effort tranchant sur l'interface entre la couche adhésive et le revêtement donne :

$$T(\theta, x) = \tau_a = \frac{G_a}{r_p - r_p \cos(\theta)} \left( u_1^h - \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) T(\theta, x) - u_1^f \right) \quad (2.13)$$

On peut donc l'écrire comme suit :

$$T(\theta, x) = \frac{1}{\left[ \frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) \right]} (u_1^h - u_1^f) \quad (2.14)$$

En remplaçant l'équation (2.13) dans l'équation (2.2) on aura :

$$\int_0^{2\pi} \tau_p(r_f, \theta, x) d\theta = \frac{r_p}{r_f} \int_0^\pi T(\theta, x) d\theta = \frac{r_p}{r_f} \int_0^\pi \frac{1}{\left[ \frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) \right]} (u_1^h - u_1^f) d\theta \quad (2.15)$$

En tenant compte de l'espace  $b$  occupé par le matériau adhésif, l'équation (2.15) devient :

$$\int_0^{2\pi} \tau_p(r_f, \theta, x) d\theta = \frac{2r_p}{r_f} \int_0^{\cos^{-1}(\frac{b}{r_p})} \frac{1}{[\frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln(\frac{r_p}{r_f})]} (u_1^h - u_1^f) d\theta \quad (2.16)$$

L'équation d'équilibre de la fibre optique sur l'axe  $x$ , est :

$$\sigma_1^f \pi r_f^2 = (\sigma_1^f + d\sigma_1^f) \pi r_f^2 + r_f \left[ \int_0^{2\pi} \tau_p(r_f, \theta, x) d\theta \right] dx \quad (2.17)$$

Après différenciation de l'équation (2.17) et remplacement de l'équation (2.16) on obtient :

$$\frac{d^2 \sigma_1^f}{dx^2} + \frac{2r_p}{\pi r_f^2} \left( \frac{\sigma_1^h}{E_h} - \frac{\sigma_1^f}{E_f} \right) \int_0^{\cos^{-1}(\frac{b}{r_p})} \frac{1}{[\frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln(\frac{r_p}{r_f})]} d\theta = 0 \quad (2.18)$$

où  $\sigma_1^f$  et  $\sigma_1^h$  sont respectivement la contrainte normale dans la fibre optique et le matériau hôte.  $E_f$  et  $E_h$  sont les modules d'Young de la fibre optique et le matériau hôte.

Pour retrouver l'expression de la contrainte  $\sigma_1^h$  sur le matériau hôte on utilise la représentation longitudinale suivante.

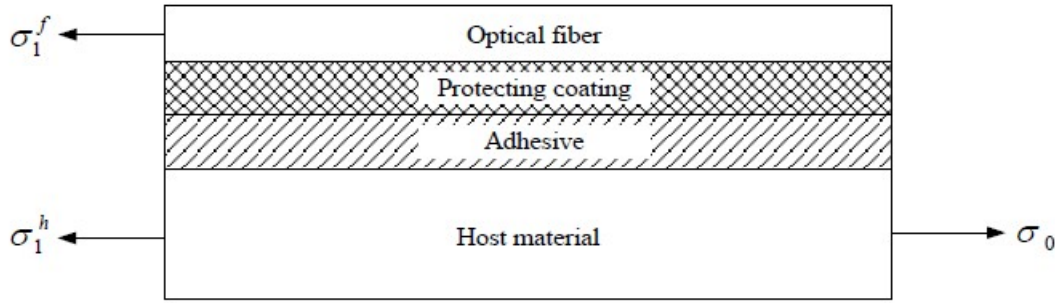


FIGURE 2.3 – Représentation longitudinale de la fibre optique en surface avec contraintes [18]

L'équation d'équilibre pour les quatre matériaux dans la figure 2.3 est :

$$\sigma_1^h = \sigma_0 - \frac{\pi r_f^2}{2hr_p} \sigma_1^f \quad (2.19)$$

En remplaçant l'équation (2.19) dans (2.18) on aura :

$$\frac{d^2 \sigma_1^f}{dx^2} - k^2 \sigma_1^f = -\frac{2r_p \epsilon_0}{\pi r_f^2} \int_0^{\cos^{-1}(\frac{b}{r_p})} \frac{1}{\left[ \frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) \right]} d\theta \quad (2.20)$$

On pose :

$$k_1 = \sqrt{\frac{2r_p}{\pi r_f^2} \left[ \frac{\pi r_f^2}{2hr_p E_h} + \frac{1}{E_f} \right] \int_0^{\cos^{-1}(\frac{b}{r_p})} \frac{1}{\left[ \frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) \right]} d\theta}$$

La solution de l'équation différentielle est donnée par :

$$\sigma_1^f = A \cosh(k_1 x) + B \sinh(k_1 x) + \frac{2r_p \epsilon_0}{k_1^2 \pi r_f^2} \int_0^{\cos^{-1}(\frac{b}{r_p})} \frac{1}{\left[ \frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) \right]} d\theta \quad (2.21)$$

où les constantes A et B sont déterminées par les conditions limites.

$$\sigma_1^f = 0; x = \pm L_f \text{ avec}$$

$L_f$  la moitié de la longueur de la fibre.

En incluant les conditions aux limites dans l'équation (2.21), la contrainte de la fibre optique de l'équation (2.20) devient :

$$\sigma_1^f = \frac{\epsilon_0}{\left[ \frac{\pi r_f^2}{2hr_p E_h} + \frac{1}{E_f} \right]} \left( 1 - \frac{\cosh(k_1 x)}{\cosh(k_1 L_f)} \right) \quad (2.22)$$

La déformation dans la fibre devient

$$\epsilon_1^f = \frac{\epsilon_0}{E_f \left[ \frac{\pi r_f^2}{2hr_p E_h} + \frac{1}{E_f} \right]} \left( 1 - \frac{\cosh(k_1 x)}{\cosh(k_1 L_f)} \right) \quad (2.23)$$

On peut obtenir le rapport suivant :

$$\frac{\epsilon_1^f}{\epsilon_0} = \frac{1}{E_f \left[ \frac{\pi r_f^2}{2hr_p E_h} + \frac{1}{E_f} \right]} \left( 1 - \frac{\cosh(k_1 x)}{\cosh(k_1 L_f)} \right) \quad (2.24)$$

$\frac{\epsilon_1^f}{\epsilon_0}$  est le rapport de déformation pour une fibre colée en surface.

D'après ce qui précède on a :

$$k_1 = \sqrt{\frac{2r_p}{\pi r_f^2} \left[ \frac{\pi r_f^2}{2hr_p E_h} + \frac{1}{E_f} \right] \int_0^{\cos^{-1}\left(\frac{b}{r_p}\right)} \frac{1}{\left[ \frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) \right]} d\theta}$$

$k_1$  est le coefficient de retard de déformation pour la fibre colée en

surface

posons  $k_{01} = \sqrt{\frac{2r_p}{\pi r_f^2} \left[ \frac{\pi r_f^2}{2hr_p E_h} + \frac{1}{E_f} \right]}$

En posant  $a = G_a \cdot G_p$ ;  $c = G_p \cdot r_p + r_p \cdot G_a \cdot \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right)$ ;  $e = G_p \cdot r_p$

$$f = \int_0^{\cos^{-1}\left(\frac{b}{r_p}\right)} \frac{1}{\left[ \frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) \right]} d\theta$$

Après remplacement on obtient:

$$f = \int_0^{\cos^{-1}\left(\frac{b}{r_p}\right)} \frac{a}{[c - e\cos(\theta)]} d\theta$$

Pour la résoudre on pose

$t = \tan \frac{\theta}{2}$  et on obtient :

$$f = \frac{a}{[c\sqrt{1 - (\frac{e}{c})^2}]} \left( \arctan\left[\tan\left(\cos^{-1}\left(\frac{b}{r_p}\right)\right)\sqrt{\frac{c+e}{c-e}}\right] \right) \tag{2.25}$$

D'où on obtient :

$$k_1 = k_{01}\sqrt{f} \tag{2.26}$$

### 2.2.3 fibre optique noyée dans le béton

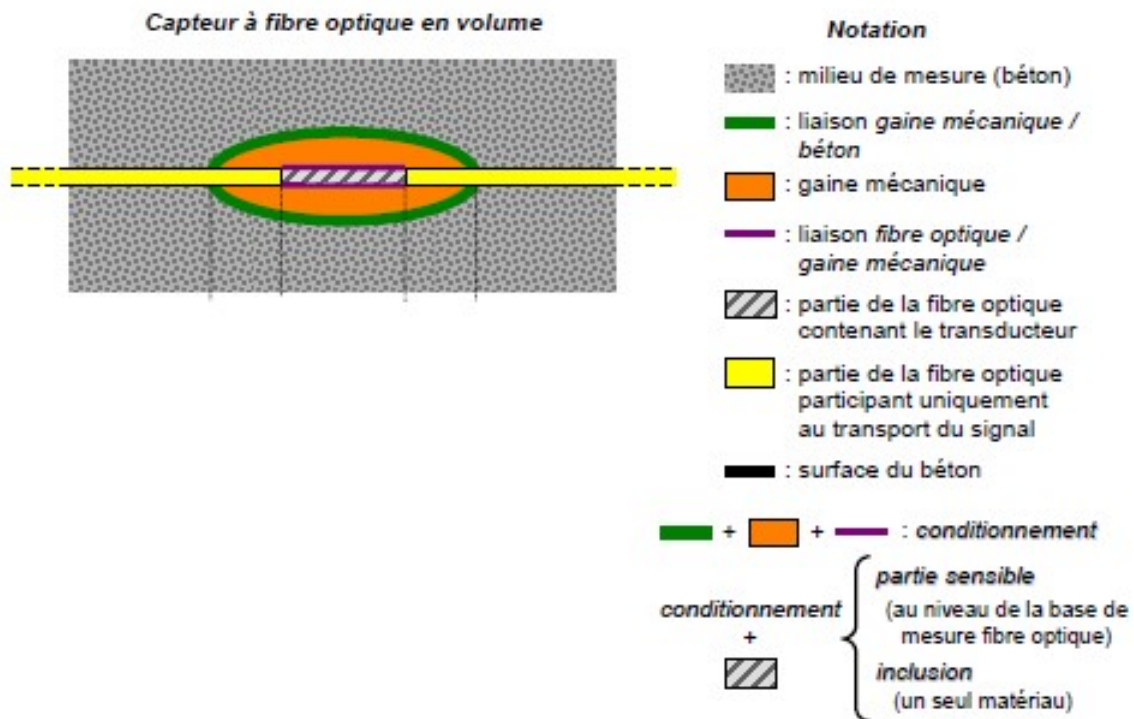


FIGURE 2.4 – Schéma d'un capteur à fibre optique noyée dans le béton [17].

Dans cette partie nous considérons une fibre optique identique à celle utilisée

précédemment, selon le modèle de **Shiuh-Chuan et Chih-Ying Huang** mais à présent, noyée dans une structure hôte. Nous appliquons une charge externe (contrainte)  $\sigma_0$  uniquement à la structure hôte. la fibre optique est donc soumise à un cisaillement à l'interface entre le coeur de la fibre (que nous appellerons par la suite «fibre optique») et le revêtement. la transmission de la déformation entre la structure hôte et le capteur à fibre optique noyée est dérivée sur la base des hypothèses suivantes :

a) Les propriétés mécaniques du coeur et de la gaine optique sont les mêmes et constituent l'élément sensible de la fibre. Pour simplifier on les appelle collectivement «fibre optique».

b) Tous les matériaux, la fibre optique, le revêtement protecteur, la couche adhésive et le matériau de la structure ont un comportement isotrope élastique linéaire.

c) Toutes les interfaces sont parfaitement collées ; ainsi, la continuité du déplacement le long des interfaces est décrite comme suit :

$$\begin{aligned} u_2^h &= u_2^a \text{ pour } r = r_a \\ u_2^a &= u_2^p \text{ pour } r = r_p \\ u_2^p &= u_2^f \text{ pour } r = r_f \end{aligned}$$

(2.27)

où  $u_2^h, u_2^a, u_2^p, u_2^f$  sont respectivement les déplacements du matériau hôte, de l'adhésif, du revêtement et de la fibre optique et  $r_a, r_p$  et  $r_f$  sont respectivement les

rayons de l'adhésif, du revêtement et la fibre optique.

d) Le revêtement protecteur et l'adhésif sont soumis à une déformation par cisaillement.

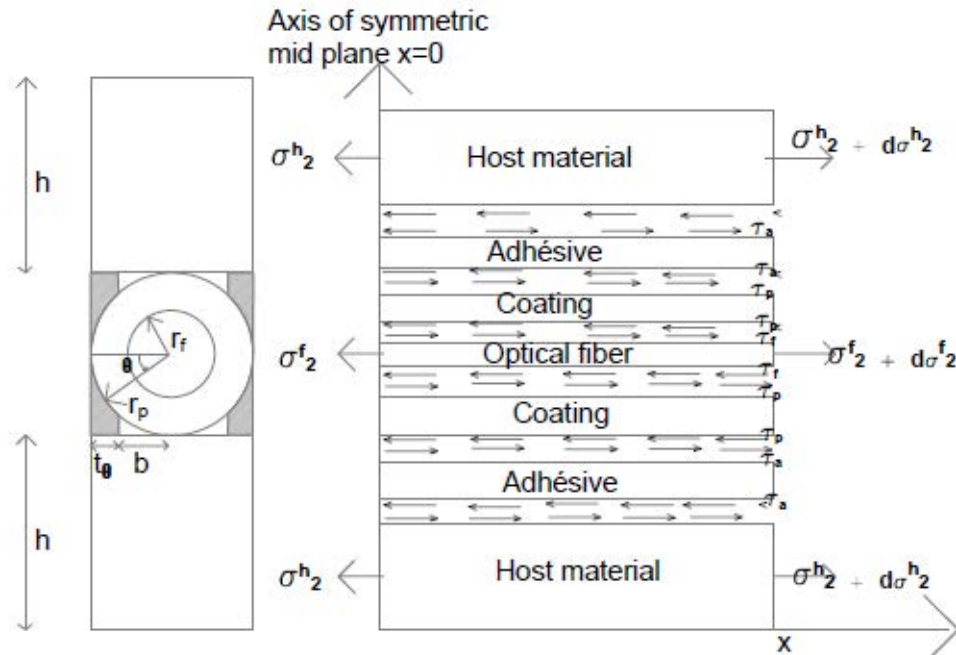


FIGURE 2.5 – Schéma théorique du transfert d'efforts

### 2.2.4 Analyse de déformation de la fibre

Le modèle analytique est illustré à la figure 2.5 avec une fibre optique cylindrique, un revêtement et le matériau hôte. Le matériau hôte subit l'influence d'une contrainte  $\sigma_0$ . Sous l'hypothèse (d), l'équation d'équilibre du revêtement est :

$$r_p \int_0^{2\pi} \tau_p(r_p, \theta, x) d\theta dx - r_f \int_0^{2\pi} \tau_p(r_f, \theta, x) d\theta dx = 0 \quad (2.28)$$

où  $\tau_p$  représente la contrainte de cisaillement dans le revêtement qui est inverse au rayon et exprimé comme suit :

$$\tau_p(r, \theta, x) = \frac{r_p}{r} T(\theta, x) \quad (2.29)$$

où  $T(\theta, x)$  désigne la contrainte de cisaillement à l'interface entre le revêtement et l'adhésif. La déformation de cisaillement dans le revêtement est :

$$\gamma_p = \frac{\partial u_2^P(r, \theta, x)}{\partial r} = \frac{\tau_p(r, \theta, x)}{G_p} \quad (2.30)$$

En remplaçant l'équation (2.29) dans (2.30) nous obtenons :

$$\gamma_p = \frac{\partial u_2^P(r, \theta, x)}{\partial r} = \frac{1}{G_p} \frac{r_p}{r} T(\theta, x) \quad (2.31)$$

où  $G_p$  et  $u_2^p$  représentent respectivement le module de cisaillement et le déplacement axial du revêtement. En intégrant par rapport au rayon, on obtient.

$$u_2^p(r, \theta, x) = \frac{r_p}{G_p} \ln(r) T(\theta, x) + C_1 \quad (2.32)$$

Pour renforcer la continuité du déplacement dans l'interface entre le revêtement et la fibre optique on a :

$$u_2^p(r_f, \theta, x) = u_2^f(r_f, \theta, x) \quad (2.33)$$

Le déplacement dans le revêtement de l'équation (2.32) va donc s'écrire :

$$u_2^p(r, \theta, x) = \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r}{r_f}\right) T(\theta, x) + u_2^f(r_f, \theta, x) \quad (2.34)$$

où  $u_2^f(r_f, \theta, x)$  est le déplacement de la fibre optique dans l'interface fibre optique revêtement.

La continuité du déplacement entre le revêtement et la couche adhésive peut alors s'écrire :

$$u_2^p(r_p, \theta, x) = u_2^a(r_p, \theta, x) = \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) T(\theta, x) + u_2^f(r_f, \theta, x) \quad (2.35)$$

D'après la figure 2.5, l'épaisseur de la couche adhésive est donnée par :

$$t(\theta) = r_p - r_p \cos(\theta) \quad (2.36)$$

Dans le matériau adhésif on aura comme contrainte et déformation :

$$\gamma_a = \frac{u_2^h - u_2^a(r_p, \theta, x)}{r_p - r_p \cos(\theta)}; \tau_a = \frac{u_2^h - u_2^a(r_p, \theta, x)}{r_p - r_p \cos(\theta)} G_a \quad (2.37)$$

en remplaçant (2.35) dans (2.37) on obtient :

$$\tau_a = \frac{G_a}{r_p - r_p \cos(\theta)} \left( u_2^h - \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) T(\theta, x) - u_2^f \right) \quad (2.38)$$

La continuité de l'effort tranchant sur l'interface entre la couche adhésive et le revêtement donne :

$$T(\theta, x) = \tau_a = \frac{G_a}{r_p - r_p \cos(\theta)} \left( u_2^h - \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) T(\theta, x) - u_2^f \right) \quad (2.39)$$

On peut donc l'écrire comme suit :

$$T(\theta, x) = \frac{1}{\left[ \frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) \right]} (u_2^h - u_2^f) \quad (2.40)$$

En remplaçant l'équation (2.40) dans l'équation (2.28) on aura :

$$\int_0^{2\pi} \tau_p(r_f, \theta, x) d\theta = \frac{r_p}{r_f} \int_0^\pi T(\theta, x) d\theta = \frac{r_p}{r_f} \int_0^\pi \frac{1}{\left[ \frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) \right]} (u_2^h - u_2^f) d\theta \quad (2.41)$$

En tenant compte de l'espace  $b$  occupé par le matériau adhésif, l'équation (2.41) devient :

$$\int_0^{2\pi} \tau_p(r_f, \theta, x) d\theta = \frac{4r_p}{r_f} \int_0^{\cos^{-1}\left(\frac{b}{r_p}\right)} \frac{1}{\left[ \frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) \right]} (u_2^h - u_2^f) d\theta \quad (2.42)$$

L'équation d'équilibre de la fibre optique sur l'axe  $x$ , est :

$$\sigma_2^f \pi r_f^2 = (\sigma_2^f + d\sigma_2^f) \pi r_f^2 + r_f \left[ \int_0^{2\pi} \tau_p(r_f, \theta, x) d\theta \right] dx \quad (2.43)$$

Après différenciation de l'équation (2.43) et remplacement de l'équation (2.42)

on obtient :

$$\frac{d^2 \sigma_2^f}{dx^2} + \frac{4r_p}{\pi r_f^2} \left( \frac{\sigma_2^h}{E_h} - \frac{\sigma_2^f}{E_f} \right) \int_0^{\cos^{-1}\left(\frac{b}{r_p}\right)} \frac{1}{\left[ \frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right) \right]} d\theta = 0 \quad (2.44)$$

où  $\sigma_2^f$  et  $\sigma_2^h$  sont respectivement la contrainte normale dans la fibre optique et le matériau hôte.  $E_f$  et  $E_h$  sont les modules d'Young de la fibre optique et le matériau hôte.

Pour retrouver l'expression de la contrainte  $\sigma_2^h$  sur le matériau hôte on utilise la représentation longitudinale suivante.

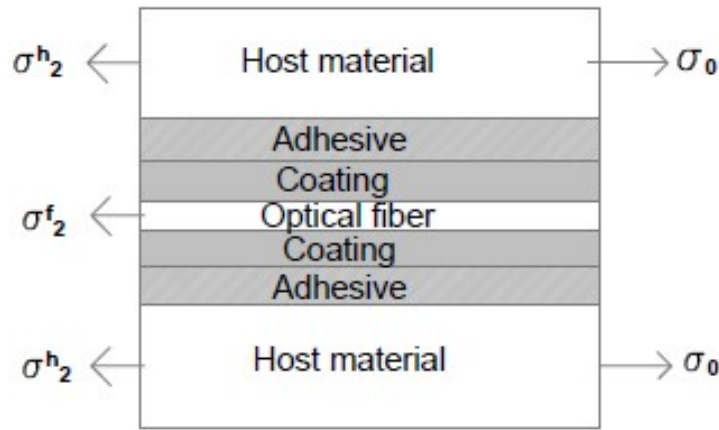


FIGURE 2.6 – Représentation longitudinale de la fibre optique noyée avec contraintes

L'équation d'équilibre pour les quatre matériaux dans la 2.6 est :

$$\sigma_2^h = \sigma_0 - \frac{\pi r_f^2}{4hr_p} \sigma_2^f \tag{2.45}$$

En remplaçant l'équation (2.45) dans (2.44) on aura :

$$\frac{d^2 \sigma_2^f}{dx^2} - k_2^2 \sigma_2^f = -\frac{4r_p \epsilon_0}{\pi r_f^2} \int_0^{\cos^{-1}(\frac{b}{r_p})} \frac{1}{[\frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln(\frac{r_p}{r_f})]} d\theta \tag{2.46}$$

On pose :

$$k_2 = \sqrt{\frac{4r_p^2}{\pi r_f^2} \left[ \frac{\pi r_f^2}{4hr_p E_h} + \frac{1}{E_f} \right] \int_0^{\cos^{-1}(\frac{b}{r_p})} \frac{1}{[\frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln(\frac{r_p}{r_f})]} d\theta}$$

La solution de l'équation différentielle est donnée par :

$$\sigma_2^f = A \cosh(k_2 x) + B \sinh(k_2 x) + \frac{4r_p \epsilon_0}{k_2^2 \pi r_f^2} \int_0^{\cos^{-1}(\frac{b}{r_p})} \frac{1}{[\frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln(\frac{r_p}{r_f})]} d\theta \tag{2.47}$$

où les constantes A et B sont déterminées par les conditions limites.

$$\sigma_2^f = 0; x = \pm L_f \text{ avec}$$

$L_f$  la moitié de la longueur de la fibre.

En incluant les conditions aux limites dans l'équation (2.47), la contrainte de la fibre optique devient :

$$\sigma_2^f = \frac{\epsilon_0}{\left[\frac{\pi r_f^2}{4hr_p E_h} + \frac{1}{E_f}\right]} \left(1 - \frac{\cosh(k_2 x)}{\cosh(k_2 L_f)}\right) \quad (2.48)$$

La déformation dans la fibre devient

$$\epsilon_2^f = \frac{\epsilon_0}{E_f \left[\frac{\pi r_f^2}{4hr_p E_h} + \frac{1}{E_f}\right]} \left(1 - \frac{\cosh(k_2 x)}{\cosh(k_2 L_f)}\right) \quad (2.49)$$

On peut obtenir le rapport suivant :

$$\frac{\epsilon_2^f}{\epsilon_0} = \frac{1}{E_f \left[\frac{\pi r_f^2}{4hr_p E_h} + \frac{1}{E_f}\right]} \left(1 - \frac{\cosh(k_2 x)}{\cosh(k_2 L_f)}\right) \quad (2.50)$$

$\frac{\epsilon_2^f}{\epsilon_0}$  est le rapport de déformation pour une fibre noyée dans le béton.

D'après ce qui précède on a :

$$k_2 = \sqrt{\frac{4r_p}{\pi r_f^2} \left[\frac{\pi r_f^2}{4hr_p E_h} + \frac{1}{E_f}\right] \int_0^{\cos^{-1}\left(\frac{b}{r_p}\right)} \frac{1}{\left[\frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right)\right]} d\theta}$$

$k_2$  est le coefficient de retard de déformation pour la fibre noyée

posons  $k_{02} = \sqrt{\frac{4r_p}{\pi r_f^2} \left[\frac{\pi r_f^2}{4hr_p E_h} + \frac{1}{E_f}\right]}$ .

En posant  $a = G_a \cdot G_p$ ;  $c = G_p \cdot r_p + r_p \cdot G_a \cdot \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right)$ ;  $e = G_p \cdot r_p$

$$f = \int_0^{\cos^{-1}\left(\frac{b}{r_p}\right)} \frac{1}{\left[\frac{r_p(1 - \cos(\theta))}{G_a} + \frac{r_p}{G_p} \ln\left(\frac{r_p}{r_f}\right)\right]} d\theta$$

Après remplacement on obtient:

$$f = \int_0^{\cos^{-1}\left(\frac{b}{r_p}\right)} \frac{a}{[c - e \cos(\theta)]} d\theta$$

Pour la résoudre on pose

$t = \tan \frac{\theta}{2}$  et on obtient :

$$f = \frac{a}{[c\sqrt{1 - (\frac{e}{c})^2}]} (\arctan[\tan(\cos^{-1}(\frac{b}{r_p}))\sqrt{\frac{c+e}{c-e}}]) \quad (2.51)$$

D'où on obtient :

$$k = k_{02}\sqrt{f} \quad (2.52)$$

Dans ce chapitre 2, nous avons présenté les différents modèles soumis à notre étude. Il s'agit d'une fibre optique utilisée de différentes manières pour l'auscultation d'une structure. Premièrement nous la considérons colée extérieurement à la structure et en second noyée à l'intérieur de la structure. Pour la suite, il sera question dans un premier temps d'étudier l'impact du type de coeur de la fibre sur le transfert des contraintes en se servant du paramètre de retard de déformation et du rapport de déformation. Dans un second, il sera question de comprendre l'influence du type de revêtement sur la sensibilité au transfert des contraintes de la fibre en silice en étudiant tour à tour les coefficients de retard de déformation et le rapport de déformation ; Toutes ces analyses faites dans les cas d'une fibre noyée dans le béton ou colée en surface.

## RESULTATS ET DISCUSSIONS

---

### 3.1 Introduction

Nous considérons dans la première partie de ce chapitre trois fibres optiques dont les coeurs seront faits des trois matériaux suivants : silice (Si), phosphate de plomb (PbP), Tellure d'indium (InTe) et d'un revêtement commun fait en polyimide. Dans la seconde partie, nous prenons trois fibres avec un coeur en silice (Si) et des revêtements différents en polyimide, acrylate et polyéthylène. Il s'agira donc dans un premier temps d'étudier l'effet du type de matériau constituant le coeur de la fibre sur le transfert des contraintes par la fibre optique et dans un second d'étudier l'impact du revêtement sur le transfert des contraintes à travers une fibre en silice. Ces analyses se feront tour à tour par l'étude du paramètre de retard de déformation et celui du rapport de déformation en considérant une fibre optique noyée dans le béton, et une autre colée en surface.

### 3.2 Résultats

Les tracés des courbes seront effectués en considérant les paramètres suivants :

TABLE 3.1 – Parametres physiques (modules de cisaillement)

	revêtement polyimide	Acrylate	Polyethylene	Adhésive
Module de cisaillement (GPa)	$G_p = 2$	$G_p = 0.1$	$G_p = 0.8$	$G_a = 0.0067$

TABLE 3.2 – Parametres physiques (modules d'young)

	silice	InTe	PbP
Module d'young (GPa)	$E_f = 70$	$E_f = 45$	$E_f = 55$

TABLE 3.3 – Parametres physiques (longueurs)

	$h(\text{mm})$	$r_p(\mu\text{m})$	$b = 0.2r_p(\mu\text{m})$
longueurs	8	125	25

### 3.2.1 Effet des propriétés du coeur de la fibre sur le paramètre de retard de déformation pour une fibre colée en surface.

Nous considérons trois fibres optiques dont les coeurs sont faits des trois matériaux suivants : silice (Si), phosphate de plomb (PbP), Tellure d'indium (InTe) et d'un revêtement commun fait en polyimide. En étudiant le coefficient de retard de déformation lorsque ces fibres sont colées en surface, en faisant varier le rayon de la fibre nous obtenons les courbes suivantes.

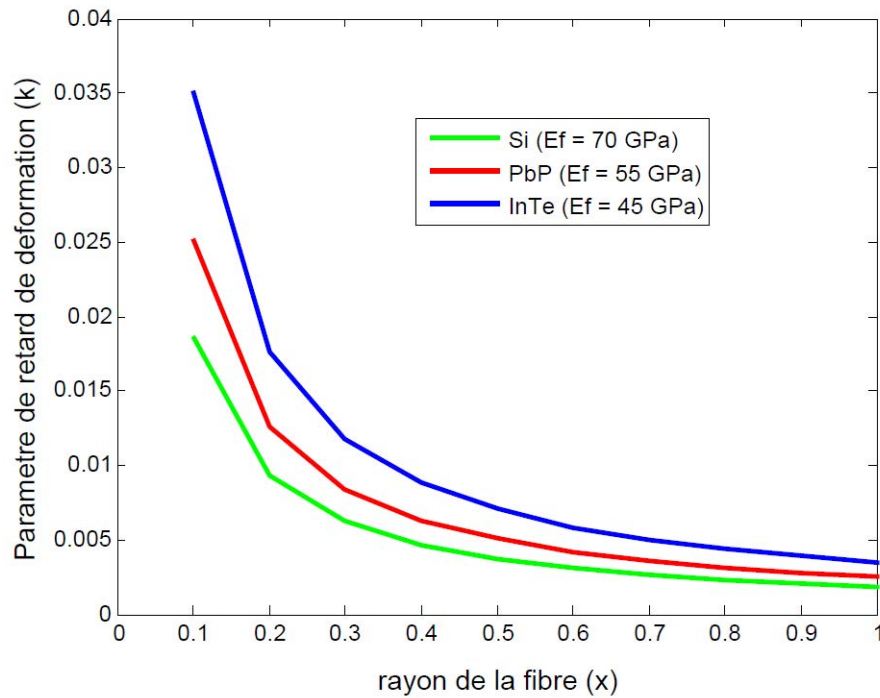


FIGURE 3.1 – variation du paramètre de retard de déformation en fonction du rayon de la fibre colée en surface. Pour le cas(i) ( $E_f=70$  GPa, courbe verte) ; pour le cas (ii) ( $E_f=55$  GPa, courbe rouge) ; pour le cas (iii) ( $E_f=45$  GPa, courbe bleue).

Nous observons que les courbes sont décroissantes en fonction du rayon de la fibre en  $\mu\text{m}$ , ce qui montre que plus le rayon utilisé est grand, on aura un coefficient de retard de déformation décroissant et par ricochet une transmission de moins en moins bonne des contraintes. On note aussi le fait que les valeurs maximales soient de plus en plus petites en considérant les modules d'young de plus en plus élevés bien que gardant les mêmes allures. Ce ci traduit le fait que, plus la fibre est rigide et moins elle transmet bien les contraintes. On se rend donc compte que la fibre en silice sera moins efficace que celle en phosphore de plomb et aussi en tellure d'indium

### 3.2.2 Effet des propriétés du coeur de la fibre sur le paramètre de retard de déformation pour une fibre noyée dans le béton.

De la meme maniere nous considérons les trois fibres précédentes, une dont le coeur est fait en silice, une deuxieme dont le coeur est fait en phosphure de Plomb (PbP) et une derniere Tellure d'Indium. En étudiant le coefficient de retard de déformation lorsque celle çï est noyée dans le béton en fonction du rayon de la fibre nous obtenons les courbes suivantes.

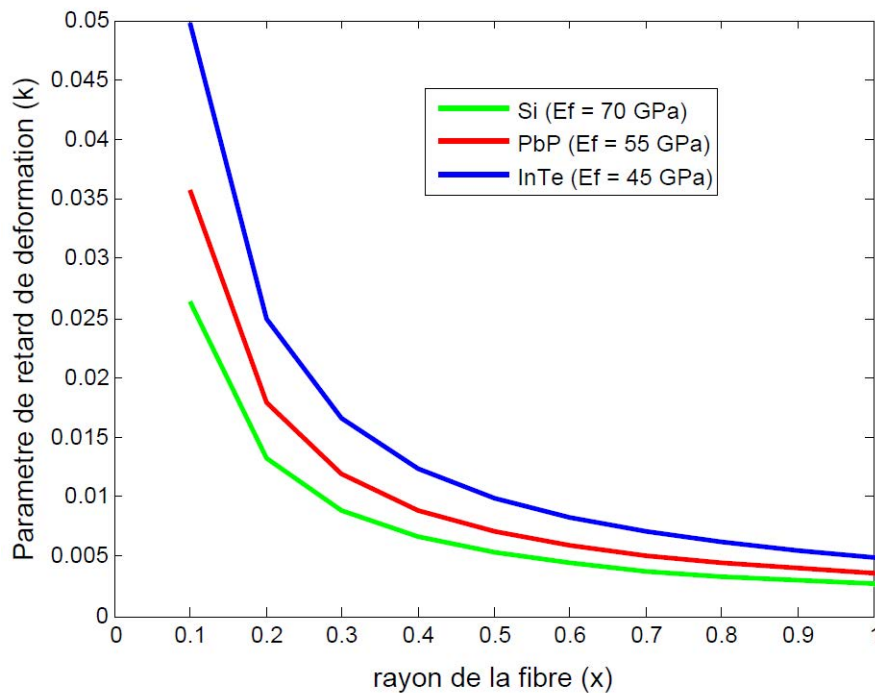


FIGURE 3.2 – variation du paramètre de retard de déformation en fonction du rayon de la fibre noyée dans le béton. Pour le cas(i) ( $E_f=70$  GPa, courbe verte) ; pour le cas (ii) ( $E_f=55$  GPa, courbe rouge) ; pour le cas (iii) ( $E_f=45$  GPa, courbe bleue).

Nous observons aussi que les courbes sont décroissantes en fonction du rayon de la fibre en  $\mu\text{m}$  et du module d'young, ce qui montre que plus le rayon utilisé est grand et la fibre rigide, on aura un coefficient de retard décroissant et par ricochet une transmission de moins en moins bonne des contraintes. On peut conclure comme précédemment qu'une fibre en silice sera moins efficace que celle en phosphore de plomb et aussi en tellure d'indium

En comparant les courbes obtenues aux figures (3.1) et (3.2) nous nous rendons compte que malgré les tracés sensiblement identiques, les valeurs maximales des paramètres de retard de déformations sont différentes et plus élevées lorsque la fibre est noyée; ce qui traduit qu'une fibre optique présenterait de meilleurs résultats lorsque celle-ci est noyée qu'exposée à l'extérieur.

### **3.2.3 Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre collée en surface en fonction de la longueur de la fibre.**

Nous considérons chaque fibre précédente avec les propriétés respectives et les coefficients de retard de déformation maximaux obtenus à partir des courbes précédentes. En faisant varier la longueur de la fibre pour des paramètres de retard de déformation différents nous obtenons les courbes suivantes.

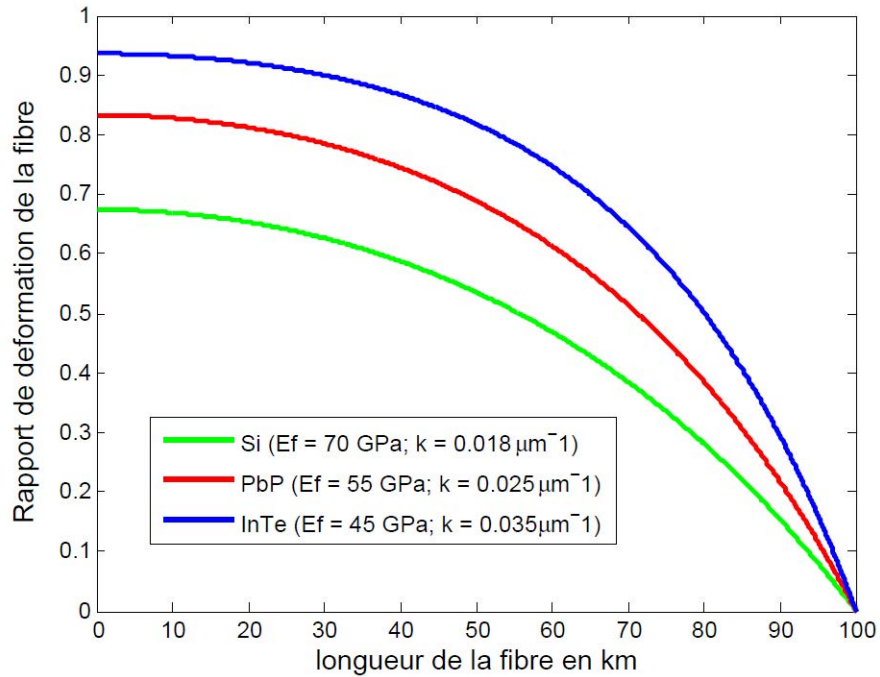


FIGURE 3.3 – Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre colée en surface en fonction de la longueur de la fibre. Pour le cas (i) ( $E_f = 70 \text{ GPa}$ ,  $k = 0.018 \mu\text{m}^{-1}$ , courbe verte); pour le cas (ii) ( $E_f = 55 \text{ GPa}$ ,  $k = 0.025 \mu\text{m}^{-1}$ , courbe rouge); pour le cas (iii) ( $E_f = 45 \text{ GPa}$ ,  $k = 0.035 \mu\text{m}^{-1}$ , courbe bleue).

Nous observons que les courbes sont concaves et décroissantes en fonction de la longueur de la fibre. La décroissance du rapport de déformation en fonction de la longueur de la fibre montre que la sensibilité de la fibre n'est pas la même tout au long de la fibre; on voit donc que la transmission des contraintes est atténuée tout au long de la fibre optique. En considérant chaque courbe de manière particulière, on voit que leurs valeurs maximales sont différentes et de plus en plus grandes en fonction des paramètres de retard de déformation élevés; ce qui nous confirme une fois de plus qu'une fibre en silice est moins efficace que celle en phosphore de plomb et aussi en tellure d'indium.

### 3.2.4 Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre noyée en fonction de la longueur de la fibre.

Nous considérons dans la même logique chaque fibre précédente avec ses propriétés et son coefficient de retard de déformation maximal obtenu à partir des courbes précédentes. En faisant varier la longueur de la fibre pour des paramètres de retard de déformation différents nous obtenons les courbes suivantes.

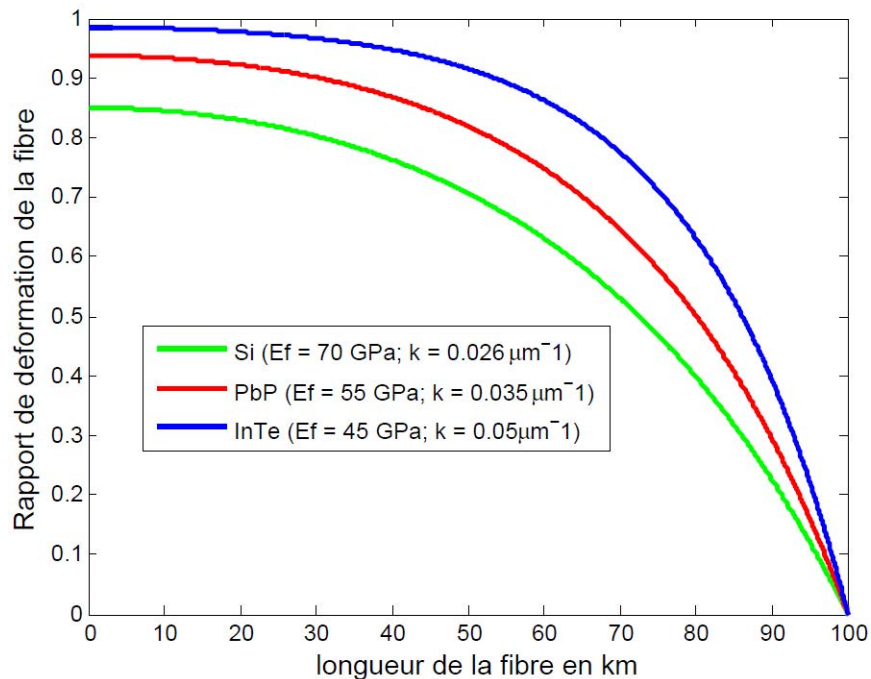


FIGURE 3.4 – Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre noyée en fonction de la longueur de la fibre. Pour le cas (i) ( $E_f = 45$  GPa,  $k = 0.05 \mu m^{-1}$ , courbe bleue) ; pour le cas (ii) ( $E_f = 55$  GPa,  $k = 0.035 \mu m^{-1}$ , courbe rouge) ; pour le cas (iii) ( $E_f = 70$  GPa,  $k = 0.026 \mu m^{-1}$ , courbe verte).

observons que les courbes dans le cas d'une fibre noyée sont aussi décroissantes en fonction de la longueur de la fibre. En considérant chaque courbe de manière particulière, on voit que leurs valeurs maximales sont différentes et de plus en plus grandes en fonction des paramètres de retard de déformation élevés ; ce qui nous confirme une fois de plus qu'une fibre en silice est moins efficace que celle en phosphore de plomb et aussi en tellure d'indium comme précédemment.

En comparant les courbes obtenues aux figures (3.3) et (3.4) bien qu'elles possèdent des mêmes allures, présentent du moins une différence dans les plages de variation. Les variations du rapport de déformation sont plus faibles (en terme de plage de valeur) pour une fibre optique colée en surface que celle d'une fibre optique noyée dans le béton. Les rapports de déformation plus élevés dans le cas d'une fibre noyée nous permettent de dire qu'il y'a une meilleure transmission des contraintes dans celle-ci que lorsqu'elle est colée en surface.

### **3.2.5 Effet du type de revêtement de la fibre sur le paramètre de retard de déformation pour une fibre en silice colée en surface.**

Nous considérons trois fibres optiques en silice dont les revêtements sont faits des trois matériaux suivants : polyimide, acrylate et polyéthylène. En étudiant le coefficient de retard de déformation lorsque ces fibres sont colées en surface, en faisant varier le rayon de la fibre nous obtenons les courbes suivantes.

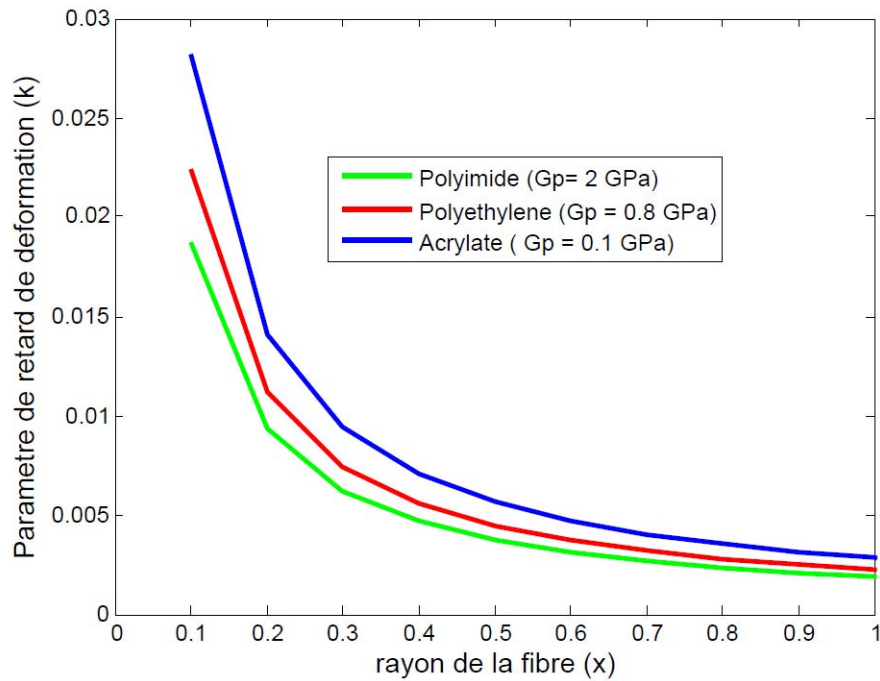


FIGURE 3.5 – variation du paramètre de retard de déformation en fonction du rayon de la fibre colée en surface. Pour le cas(i) ( $G_p=2$  GPa, courbe verte) ; pour le cas (ii) ( $G_p=0.8$  GPa, courbe rouge) ; pour le cas (iii) ( $G_p=0.1$  GPa, courbe bleue).

Nous observons que les courbes sont décroissantes en fonction du rayon de la fibre en  $\mu\text{m}$ , ce qui montre que plus le rayon utilisé est grand, on aura un coefficient de retard de déformation décroissant et par ricochet une transmission de moins en moins bonne des contraintes. On note aussi le fait que les valeurs maximales soient de plus en plus petites en considérant les modules de cisaillement de plus en plus élevés bien que gardant les mêmes allures. Ce ci traduit le fait que, plus la fibre est rigide, capable de résister efficacement aux déformations et moins elle transmet bien les contraintes. On se rend donc compte que la fibre en silice sera plus efficace avec un revêtement en acrylate et moins efficace avec un revêtement en polyimide.

### 3.2.6 Effet du type de revêtement de la fibre sur le paramètre de retard de déformation pour une fibre en silice noyée dans le béton.

De la même manière nous considérons les trois fibres précédentes, une dont le revêtement est fait en polyimide, une deuxième dont le revêtement est fait en acrylate et une dernière en polyéthylène. En étudiant le coefficient de retard de déformation lorsque celle-ci est noyée dans le béton en fonction du rayon de la fibre nous obtenons les courbes suivantes.

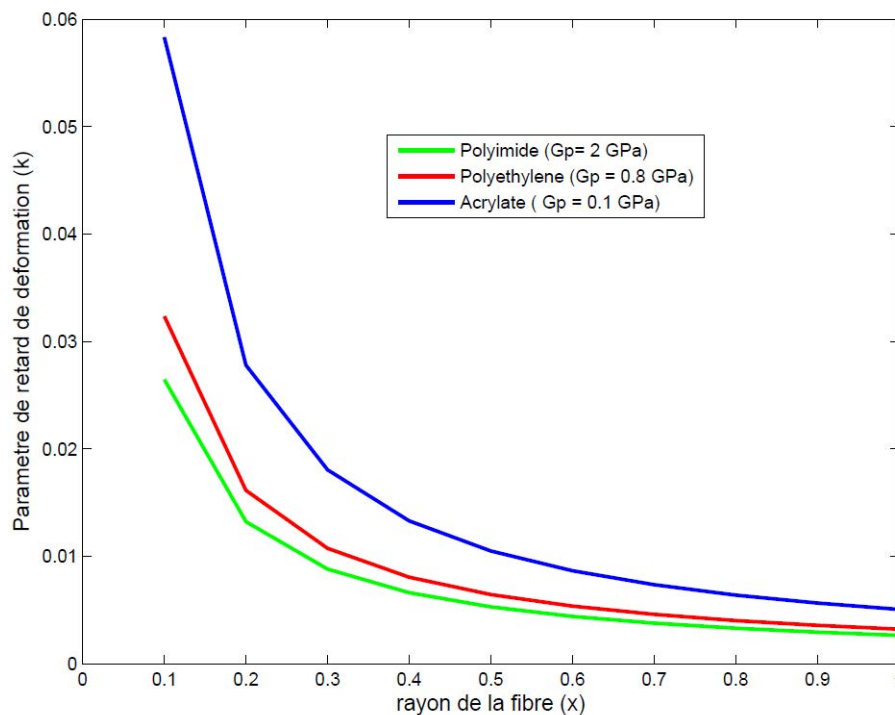


FIGURE 3.6 – variation du paramètre de retard de déformation en fonction du rayon de la fibre noyée dans le béton. Pour le cas(i) ( $G_p=2$  GPa, courbe verte); pour le cas (ii) ( $G_p=0.8$  GPa, courbe rouge); pour le cas (iii) ( $G_p=0.1$  GPa, courbe bleue).

Nous observons aussi que les courbes sont décroissantes en fonction du rayon de la fibre en  $\mu\text{m}$  et du module de cisaillement, ce qui montre que plus le rayon utilisé est grand et la fibre rigide, on aura un coefficient de retard décroissant et par ricochet une transmission de moins en moins bonne des contraintes. On peut conclure comme précédemment qu'une fibre en silice sera moins efficace lorsque son revêtement sera en polyimide qu'en acrylate.

En comparant les courbes obtenues aux figures (3.5) et (3.6) nous nous rendons compte que malgré les tracés sensiblement identiques, Les valeurs maximales des paramètres de retard de déformations sont différentes et plus élevés lorsque la fibre est noyée; ce qui traduit que la fibre optique en silice présenterait de meilleurs résultats lorsque celle-ci est noyée avec le revêtement en acrylate qu'exposée à l'extérieur.

### **3.2.7 Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre en silice colée en surface en fonction de la longueur de la fibre.**

Nous considérons chaque fibre précédente avec les propriétés respectives et les coefficients de retard de déformation maximaux obtenus à partir des courbes précédentes. En faisant varier la longueur de la fibre pour des paramètres de retard de déformation différents nous obtenons les courbes suivantes.

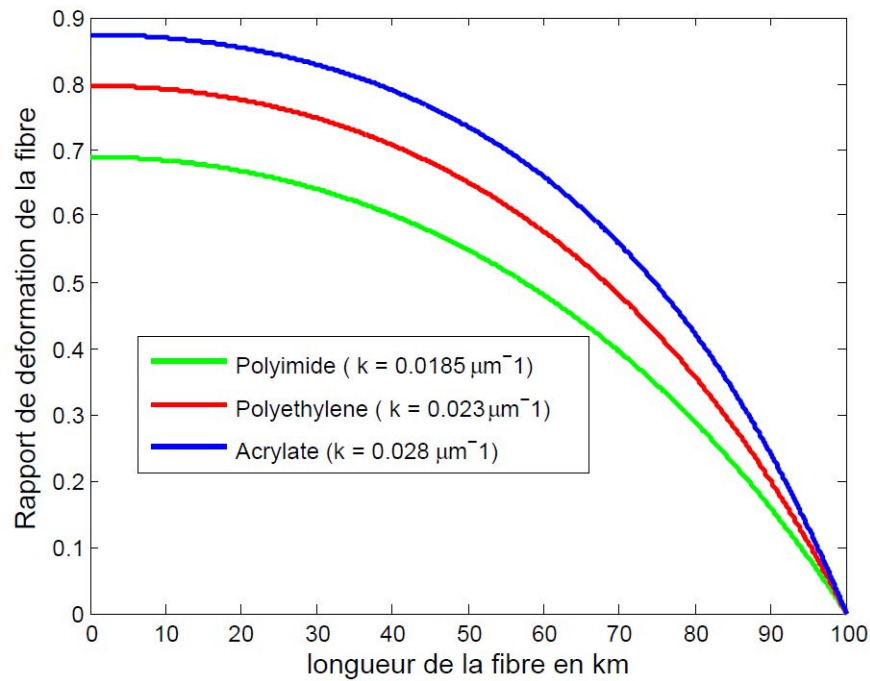


FIGURE 3.7 – Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre en silice colée en surface en fonction de la longueur de la fibre. Pour le cas (i) ( $k = 0.0185 \mu\text{m}^{-1}$ , courbe verte) ; pour le cas (ii) ( $k = 0.023 \mu\text{m}^{-1}$ , courbe rouge) ; pour le cas (iii) ( $k = 0.028 \mu\text{m}^{-1}$ , courbe bleue).

Nous observons que les courbes sont concaves et décroissantes en fonction de la longueur de la fibre. La décroissance du rapport de déformation en fonction de la longueur de la fibre montre que la sensibilité de la fibre n'est pas la même tout au long de la fibre ; on voit donc que la transmission de contraintes est atténuée tout au long de la fibre optique. En considérant chaque courbe de manière particulière, on voit que leurs valeurs maximales sont différentes et de plus en plus grandes en fonction des paramètres de retard de déformation élevés ; ce qui nous confirme une fois de plus qu'une fibre en silice est moins efficace lorsqu'elle aura un revêtement en polyimide que lorsqu'elle sera en acrylate ou en polyéthylène.

### 3.2.8 Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre en silice noyée en fonction de la longueur de la fibre.

Nous considérons dans la même logique chaque fibre précédente avec ses propriétés et son coefficient de retard de déformation maximal obtenu à partir des courbes précédentes (figure 3.5 et figure 3.6). En faisant varier la longueur de la fibre pour des paramètres de retard de déformation différents nous obtenons les courbes suivantes.

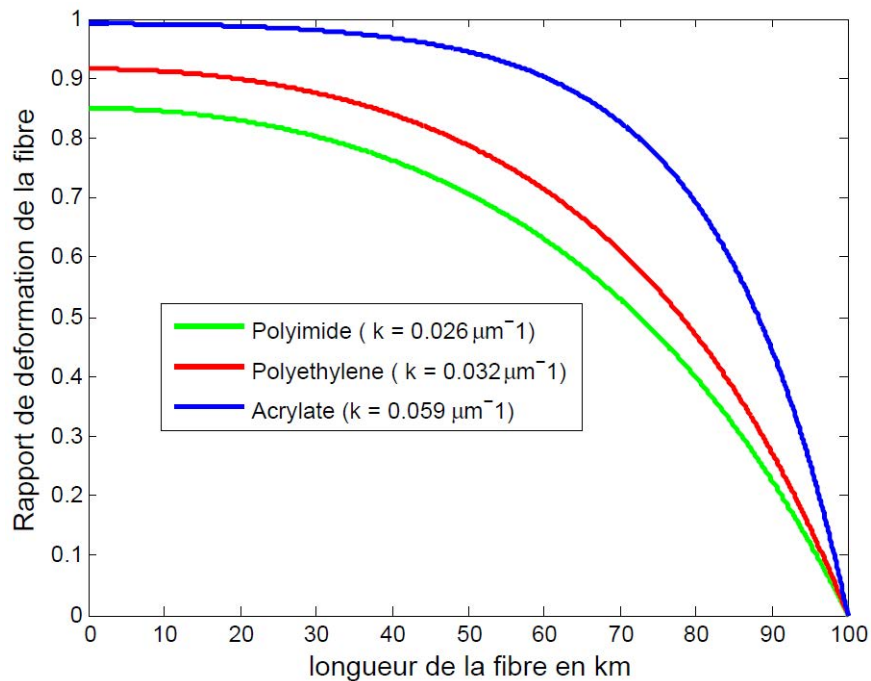


FIGURE 3.8 – Effet du coefficient de retard de déformation sur le rapport de déformation pour une fibre en silice noyée en fonction de la longueur de la fibre. Pour le cas (i) ( $k = 0.026 \mu m^{-1}$ , courbe verte); pour le cas (ii) ( $k = 0.032 \mu m^{-1}$ , courbe rouge); pour le cas (iii) ( $k = 0.059 \mu m^{-1}$ , courbe bleue).

Nous observons que les courbes dans le cas d'une fibre noyée sont aussi décroissantes en fonction de la longueur de la fibre. En considérant chaque courbe individuellement, on voit que les valeurs maximales sont différentes et de plus en plus grandes en fonction des paramètres de retard de déformation élevés ; ce qui nous confirme une fois de plus qu'une fibre en silice est moins efficace avec un revêtement en polyimide que celle en polyéthylène et aussi en acrylate comme précédemment.

En comparant les courbes obtenues aux figures (3.7) et (3.8) bien qu'elles possèdent des mêmes allures, présentent du moins une différence dans les plages de variation. Les variations du rapport de déformation sont plus faibles (en terme de valeurs maximales atteintes) pour une fibre optique collée en surface que celle d'une fibre optique noyée dans le béton. Les rapports de déformation plus élevés dans le cas d'une fibre noyée nous permettent de dire qu'il y'a une meilleure transmission des contraintes dans celle-ci que lorsqu'elle est collée en surface.

### 3.3 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre nous avons considérés trois fibres optiques dont les coeurs sont faits des trois matériaux suivants : silice (Si), phosphate de plomb (PbP), Tellure d'indium (InTe) et d'un revêtement commun fait en polyimide. Dans la seconde partie, nous prenons trois fibres avec un coeur en silice (Si) et des revêtements différents en polyimide, acrylate et polyéthylène. L'objectif étant d'évaluer l'impact du choix des matériaux sur le transfert des contraintes (choix du type de coeur et choix du revêtement) dans le cas où la fibre optique est noyée dans le béton ou collée en surface. Pour réaliser tout cela nous avons dans

un premier temps étudié l'effet du type de coeur sur les coefficients de retard de déformation pour une fibre optique noyée dans le béton ou encore colée en surface. Dans un second, nous avons étudié le rapport de déformation dans les deux cas (fibre noyée dans le béton ou encore colée en surface) pour les différents types de matériaux constituant le coeur de la fibre. Il ressort premièrement que le type de matériau constituant le coeur de la fibre a une très grande influence en qualité de transfert de contraintes du matériau hôte à la fibre. On observe que les valeurs maximales des paramètres de retard de déformations sont différents et plus élevés lorsque la fibre est noyée ; ce qui traduit qu'une fibre optique présenterait de meilleurs résultats lorsque celle-ci est noyée qu'exposée à l'extérieur. Les mêmes résultats sont perceptibles lorsqu'on étudie les rapports de déformation. Dans la seconde partie, nous avons étudié l'impact du type de revêtement sur la fibre en silice en se servant toujours du rapport de déformation et du coefficient de retard de déformation. À travers notre étude, nous constatons d'une part que malgré le fait d'avoir noyé les fibres, on pourrait avoir de meilleurs résultats en choisissant une fibre en phosphore de plomb ou encore Tellure d'indium par rapport au silice qui est le matériau le plus utilisé. Ce-ci est explicable par la rigidité des matériaux possédant des modules d'Young de plus en plus grands et donc pas très efficaces pour la transmission fidèle des contraintes. D'autre part nous voyons aussi qu'une fibre en silice avec pour revêtement en acrylate sera bien meilleure que celle en polyimide très utilisée.



---

## Conclusion générale et Perspectives

---

L'objectif du travail était de présenter l'effet du type de matériau constituant la fibre dans la transfert des contraintes. Nous avons montré dans un premier temps l'influence des propriétés physiques des matériaux constituant le coeur de la fibre optique sur le transfert des contraintes. Dans un second, nous avons étudié l'impact du type de revêtement sur le transfert des contraintes en utilisant une fibre optique en silice ; toutes ces analyses en considérant deux cas de figure : lorsque les fibres sont noyées dans le béton ou colées à l'extérieur de la structure. Pour atteindre ces objectifs, nous avons dans le chapitre I présenté la notion d'auscultation dans un sens général, ses différentes mutations depuis l'inspection visuelle, l'auscultation traditionnelle jusqu'à l'avènement de la fibre optique. l'auscultation dite traditionnelle utilisant de multiples capteurs ponctuels, ces multiples capteurs avaient beaucoup de limites pour la surveillance des ouvrages de grand linéaire ; manquements auxquelles la solution novatrice fut l'avènement de la fibre optique.

Dans le chapitre 2, nous avons présenté notre modèle, celui de **Shiuh-Chuan et Chih-Ying Huang** dont nous nous sommes inspirés et les propriétés relatives de fibres optiques dans les deux cas (fibre optique noyée et fibre optique colée en surface). La méthode utilisée pour l'étude a été présentée à travers l'équation

d'équilibre aux différentes surfaces latérales des matériaux constituant la fibre après avoir mis sur pied des hypothèses de travail. La progression analytique nous a permis de mettre en évidence le coefficient de retard de déformation qui exprime la vitesse de transmission des contraintes de la structure à la fibre et le rapport de déformation (déformation du matériau hôte et déformation du cœur de la fibre). Au chapitre 3 nous avons dans un premier temps choisi trois matériaux différents utilisables comme cœur de fibre (Silice, Phosphate de plomb, et Tellure d'indium) ; montré l'effet des propriétés de ces matériaux sur le transfert des contraintes. Dans un second, nous avons étudié l'impact du type de revêtement sur le transfert des contraintes à travers une fibre en silice. Toutes ces analyses ont été faites en étudiant les paramètres de retard de déformation chaque fois ainsi que les rapports de déformation ; pour une fibre collée en surface ou noyée dans le béton. Il ressort de ce travail premièrement que le type de matériau constituant la fibre a une grande influence dans le transfert des contraintes. Un constat fait est qu'une fibre optique présenterait de meilleurs résultats lorsque celle-ci est noyée qu'exposée à l'extérieur. Un autre constat est que malgré le fait d'avoir noyé les fibres, on pourrait avoir de meilleurs résultats en choisissant une fibre en phosphore de plomb ou tellure d'indium par rapport à celle en silice qui est le plus utilisée. Pour ce qui est du choix du revêtement pour une fibre en silice, on s'est rendu compte qu'un revêtement en acrylate ou encore en polyéthylène donnerait de meilleurs résultats que le matériau en polyimide qui est plus utilisé. En faisant une comparaison avec les résultats obtenus par Shih-Chuan et Chih-Ying Huang sur la fibre de silice dans le cas où celle-ci est collée en surface, les résultats obtenus sont très satisfaisants.

En terme de perspective, nous aimerons étendre nos études dans un domaine non linéaire, l'anisotropie des couches, intégrer les facteurs climatiques, pour évaluer le comportement de la fibre en climat tropical afin d'avoir des paramètres idéaux pour une fibre optique efficace et adaptée à nos conditions africaines.

---

# Bibliographie

---

- [1] ZAGO, Lorenzo. Bases de la Métrologie. Cours de Métrologie-Orientation, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, 2011.
- [2] PASCAL, DIMBIHARIZAFY Ando. Etudes analytique et expérimentale de l'arc électrique amorcé dans l'air et dans l'eau.
- [3] HENAULT, Jean-Marie. Approche méthodologique pour l'évaluation des performances et de la durabilité des systèmes de mesure répartie de déformation : application à un câble à fibre optique noyé dans le béton. 2013. Thèse de doctorat. Université Paris-Est.
- [4] MERIEM, Iratni. Contribution à l'étude théorique des propriétés thermo-électriques des matériaux (Cas : l'oxychalcogénure). 2021. Thèse de doctorat. Faculté des Sciences et Technologies.
- [5] MOREAU, Gabriel Pierre André et D'AUMONT, Géraud Danzel. Taser et sabre laser, une petite guerre du carbone. In : Congrès JRES : Les Journées Réseaux de l'Enseignement et de la Recherche. 2017.
- [6] COURTOIS, Alexis, HENAULT, Jean-Marie, SIMON, Alexandre, et al. La surveillance en exploitation des enceintes de confinement et des aéroréfrigérants à tirage naturel du parc nucléaire d'EDF. Revue Générale Nucléaire, 2011, no 2, p. 49-59.

- [7] BALAYSSAC, Jean-Paul et GARNIER, Vincent. Évaluation non destructive des ouvrages en génie civil. ISTE Group, 2018.
- [8] ROSIN-CORRE, N., NORET, C., et BORDES, J. L. L'auscultation par capteurs à corde vibrante, 80 ans de retour d'expérience. In : Proceedings of the Colloque CFBR. Auscultation Des Barrages ET Des Dignes-Thème. 2012.
- [9] OUEDRAOGO, Evariste, ROUSEFID, Mohsen, PROMPT, Nicolas, et al. Comportement thermomécanique d'un béton réfractaire en compression uniaxiale. In : CFM 2007-18ème Congrès Français de Mécanique. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue Louis Blanc-92400 Courbevoie, 2007.
- [10] MAMDEM, Yolande Sikali. Capteurs à fibres optiques répartis par effet Brillouin : séparation de la dépendance à température et à la déformation. 2012. Thèse de doctorat. Télécom ParisTech.
- [11] WANG, Jian-Neng et TANG, Jaw-Luen. Photonic crystal fiber Mach-Zehnder interferometer for refractive index sensing. *Sensors*, 2012, vol. 12, no 3, p. 2983-2995.
- [12] BASSIL, Antoine, CHAPELEAU, Xavier, LEDUC, Dominique, et al. Concrete crack monitoring using a novel strain transfer model for distributed fiber optics sensors.
- [13] HER, Shiuh-Chuan et HUANG, Chih-Ying. Effect of coating on the strain transfer of optical fiber sensors. *Sensors*, 2011, vol. 11, no 7, p. 6926-6941.
- [14] INAUDI, Daniele et VURPILOT, Samuel. SOFO : Surveillance douvrages par senseurs à fibres optiques. *Ingénieurs et Architects Suisses*, 1995, vol. 121, no 26, p. 45-52.

- [15] SONNE, Abdelkader. Etude, conception et simulation des fibres optiques à base de nouveaux matériaux. 2016. Thèse de doctorat. Université Amar Telidji de Laghouat, Département D'Electron.
- [16] Y. Lecieux, E. Rozière, V. Gaillard, C. Lupi, D. Leduc, J. Priou, R. Guyard, M. Chevreuil, et F. Schoefs, « Monitoring of a reinforced concrete wharf using structural health monitoring system and material testing », *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 7, no 4, p. 1-26, 2019.
- [17] DUPONT, James. Comportements de Capteurs à Fibres Optiques, noyés ou fixés en surface d'ouvrages en béton. 2002. Thèse de doctorat. Ecole des Ponts ParisTech.
- [18] ALJ, Ismail. Durabilité des capteurs à fibre optique destinés aux mesures réparties de déformation dans les ouvrages en béton. 2020. Thèse de doctorat. Paris Est.