

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

UNIVERSITY D'EL-OUED

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude
Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences de la technologie
Filière : électronique générale
Spécialité : télécommunication

Présenté par : **KHENNOUFA NABIL**

Thème

**Importance des capteurs optique à
modulation de phase dans l'instrumentation
optique**

Soutenu le 30 Juin 2013

Devant le jury composé de :

Mr.	BOULILA Mohamed	MA	Président
Mr	MEDJOURI Abdlkader	MA	Examineur
Mr.	FARHAT Rhouma	Pr.	Rapporteur

2012-2013

Tableau de Matière

Titre	Page
Tableau de matière	i
Liste des figures	iii
Résumé	v
Introduction générale	i
Chapitre I : les capteurs	
I-1-Introduction	01
I-2- Capteur classique	02
I-2-1-Définition du capteur	02
I-2-2-Constitution d'un capteur	02
I-2-3-Les caractéristiques métrologiques d'un capteur	03
I-2-4-Importance des capteurs physiques	06
I-3-Capteurs à fibres optiques	06
I-3-1-Importance des capteur à fibre optique	07
I-3-2-Capteur intrinsèque, capteur extrinsèque	07
I-3-3-Constitution d'un capteur à fibres optiques	09
I-3-4-Avantages des capteurs à fibre optique	09
I-4-Conclusion	11
Chapitre II les capteurs Optiques	
II-1-Introduction	12
II-2-L'onde lumineuse	13
II-3-Principes des capteurs optiques	13
II-4-Capteurs à modulation d'intensité	14
II-4-1-Micro-courbures périodiques	14
II-4-2-Champ évanescent	16
II-4-3-Couplage entre deux fibres	19
II-5-Capteurs à modulation de phase, capteurs interférométriques	20
II-5-1-Principes de fonction	20
II-5-2- Quelques types de modulation de phase	23
5-2-a Interféromètres à deux ondes	23
5-2-b Interféromètre à ondes multiples	26
5-2-c Interférométrie à deux longueurs d'onde	27
5-2-d Interférométrie à faible cohérence	28
5-2-e Détermination de la phase	30

Tableau de Matière

II-6- Capteurs à modulation de polarisation	32
II-6-1- Principes de fonction	32
6-1-a- Polarisation linéaire	32
6-1-b- Polarisation circulaire	33
6-1-c- Polarisation elliptique	34
II-6-2- Détermination de polarisation de la lumière	34
6-2-a matrices de Jones	34
6-2-b Retardeur optique : lame quart ou demie onde	36
6-2-c Fibre optique biréfringente	36
II-6-3-Capteurs polarimétriques	38
II-7-Conclusion	42
Chapitre III : Capteur a modulation de polarisation et de phase	
III-1-Captures polarimétriques de courant	44
III-1-1- Capteurs polarimétriques de courant	44
III-2-L'interféromètre de Mach-Zehnder	51
Chapitre IV : Résultat de La Simulation	
IV-1-Introduction	57
IV-2L'entre de séparateurs de faisceau(DLM1)	57
IV-3-La sortie de le séparateur de faisceau (DLM2)	58
IV- 4-La sortie de l'interféromètre de Mach-Zehnder (DLM4)	58
IV-5-Modélisation	59
IV-6-Description mathématique du DLM	62
IV-7-Prolongation à l'interféromètre de Mach-Zehnder	64
Conclusion générale	68
Références	69

Liste des figures

Titre	Page
Figure I-1: Schéma de principe du capteur	02
Figure II-1 Transducteur à base de micro-coubures périodiques	15
Figure II-2 Transducteur à base de micro-courbures à fibre multi-mode (gauche) et exemple d'amélioration de la sensibilité entre une structure hybride (SMS) et conventionnelle (droite)	16
Figure II-3 : a - Champ évanescent dans une fibre optique. b - Principe du transducteur à champs évanescent	17
Figure II- 4 : Exemple de frustration de la réflexion totale interne	18
Figure II- 5 Capteur de déplacement utilisant la frustration de la réflexion totale	19
Figure II-6 Exemple de couplage entre deux fibres en transmission (haut) et en réflexion (bas)	23
Figure II-7 Interféromètre de Mach-Zhender à fibre optique. CD1 et CD2 sont des coupleurs directionnels	24
Figure II- 8 Interféromètre de Michelson à fibre optique. CD est un coupleur directionnel	25
Figure II-9 Interféromètre de Sagnac à fibre	26
Figure II-10 Interféromètre de Fabry-Perot à fibre	26
Figure II-11 Transmission d'un Fabry-Perot en fonction du déphasage et pour deux	29
Figure II-12 Double interféromètre à fibre. l'OPD control permet de faire varier la différence de chemin optique du second interféromètre	30
Figure II-13 Représentation schématique des franges d'interférences d'un double interféromètre en fonction de la différence de chemin optique (DCO)	31
Figure II-14 Détermination de la phase pour deux points particuliers	
Figure II-15 Exemple de polarisation d'une onde électromagnétique	32
Figure II-16 Etat de polarisation pour différents déphasages	33
Figure II-17 Exemples de fibres optiques à haute biréfringence	34
Figure II-18 Représentation schématique d'un capteur polarimétrique	35
Figure III-1 L'analyse de la répartition du champ magnétique dans le cas d'un conducteur avec une forme rectangulaire et de section transversale circulaire.	45
Figure III-2 Schéma d'un capteur optique de courant	46

Liste des figures

Figure III-3 Capteur de courant à fibre optique	47
Figure III-4 Capteur à fibre optique à crystal magnéto-optique	47
Figure III-5 Capteur à fibre optique compensé en vibrations. OCT (Optical current transducer) représente la partie active du capteur	48
Figure III-6 Effet de la compensation en vibrations sur capteur à fibre optique de courant	49
Figure III-7 Courbes de variation de la constante de Verdet en fonction de la température (pour deux matériaux et deux longueurs d'onde 633 et 850 nm. FR5 (Faraday Rotator 5) est du verre et TGG est du Terbium Galium Grenat).	50
Figure III-8 interferometrie de mach zehender	51
Figure III-9 Illustrant localisation des franges dans l'interféromètre de Mach-Zehnder	53
Figure III-10 Le Bates onde avant interféromètre à décalage (a) disposition, (b) champ de vision avec cisailées fronts d'ondes.	54
Figure IV-1 le modèle équivalent à l'inter l'interféromètre de Mach-Zehnder	57
Figure IV-2 le modèle équivalent de séparateurs de faisceau 1	58
Figure IV-3 schéma de des résultats théoriques	59
Figure IV-4 modèle pour le séparateur de faisceau et l'interféromètre de Mach-Zehnder	59
Figure IV-5 En vert, les quatre chemins possibles ont suivi d'un photon d'entrée au '0'	60
Figure IV-6 En rouge, les quatre chemins possibles ont suivi d'un photon d'entrée au '1'.	61
Figure IV-7 Une ou une autre entrée du DLM reçoit un photon	63
Figure IV-8 prolongation à l'interféromètre de Mach-zehnder	64
La Figure IV-9 DLM2	65

هذا العمل عبارة عن دراسة نظرية و تطبيقية تبرز أهمية أجهزة الاستشعار (الواقط) باستخدام مختلف خصائص الألياف الضوئية.

الجزء النظري يتناول دراسة خصائص أجهزة الاستشعار وتطبيقه في مختلف المجالات. تهدف هذه الدراسة إلى معالجة على أكمل وجه ممكن هذه الظواهر من الجانب الفيزيائي والرياضي ، كل المبادئ التي تستخدم في قياس الظواهر الكهربائية و الفيزيائية من قبل الألياف الضوئية. تم التطرق في هذا العمل الى النقاط التالية:
انتشار الضوء في وسط ما (الموجة الضوئية).

التضمين عن طريق خاصية الشدة الضوئية أو الطور أو الاستقطاب الذي يعبر عن انتشار المجال الكهرومغناطيسي في الألياف وتغيير حالة الاستقطاب بواسطة الأوساط المتعددة الانكسار و الاستقطاب الهائري والخطي وآثارها مجتمعة. تحديد أبعاد التداخل و التعديل مع قانون التداخل مع الكمية المراد قياسها والفرص للحد من نفوذهم. دراسة أجهزة الاستشعار التي تعتمد على خاصية الاستقطابية كجهاز استشعار شدة الكهرباء عن آثار الاستقطاب الخطي في الألياف الضوئية.

دراسة جهاز التداخل لماك زيندر ، دراسة تحليلية تؤدي إلى تطوير بنية جهاز الاستشعار الجديد الذي يستند إلى ظاهرة التداخل.

ويتم تحليل أداء هذا الجهاز باستخدام المحاكاة العددية باستخدام بعض النظريات الرياضية و أنظمة المحاكات كمتلاب مع مراعاة الشكل الهندسي للنظام وآثاره الفعلية في الألياف الضوئية.

كلمات البحث:

- أجهزة الاستشعار بالألياف الضوئية ، الألياف الضوئية ، التضمين، أجهزة الاستشعار الفيزيائية ، أجهزة التداخل .

Ce travail est une étude de l'importance de capteur optique utilisant les caractéristique de la fibre optique .

La partie théorique concerne l'étude des caractéristique des capteurs et son application dans les différents domaines. Cette étude a pour but de traiter de manière aussi complète que possible, du point de vue physique et mathématique, l'ensemble des phénomènes susceptibles d'intervenir dans la mesure du phénomènes électrique et physique par des fibres optiques.

Les points suivants y sont développés:

Propagation de la lumière dans un milieu (l'onde lumineuse).

Modulation d'intensité et modulation de phase et plus modulation de polarisation qui exprime propagation du champ électromagnétique dans les fibres et évolution de l'état de polarisation en fonction des biréfringences circulaire et linéaire et de leurs effets combinés.

Détermination des grandeurs interférentes et modifiantes, de leur loi d'interaction avec la grandeur à mesurer et des possibilités de réduire leur influence.

Etude de capteur polarimétrique utilisé comme capteur de courant et des problèmes technologiques liés à sa réalisation pratique modifié permettant la mesure et la compensation des effets de la biréfringence linéaire dans les fibres.

Etude l'interféromètre de Mach Zehender.

Cette analyse débouche sur la mise au point d'une nouvelle structure de capteur basé sur l'interféromètre de Mach Zehender.

Les performance de ce capteur sont analysées à l'aide d'une simulation numérique tenant compte de la géométrie du système et des effets réels de déphaseur dans les fibres.

Mots-clés :

- Capteur à fibre optique , fibre optique , modulation , capteur physique , interférométrie

This work is a study of the importance of optical sensor using the characteristic of the optical fiber.

The theoretical part deals with the study of the characteristics of sensors and its application in various fields. This study aims to address as fully as possible, the physical and mathematical point of view, all phenomena that are used in measuring the electrical and physical phenomena by optical fibers.

The following points are there:

Propagation of light in a medium (the lightwave)

Intensity modulation and phase modulation and polarization modulation which expresses electromagnetic field propagation in the fiber and changing the state of polarization as a function of circular and linear birefringence and their combined effects.

Determination of interfering and modifying variables, their interaction with the law quantity to be measured and opportunities to reduce their influence.

Study polarimetric sensor used as a current sensor and technological issues related to its practical realization modified for measuring and compensating for the effects of linear birefringence in the fiber.

Study the Mach Zehender.

This analysis leads to the development of a new sensor structure based on the Mach Zehender.

The performance of this sensor is analyzed using a numerical simulation taking into account the geometry of the system and the actual effects of phase shifter in the fibers.

Keywords:

-Optic fiber sensor, fiber optic modulation, physical sensor, interferometry

Introduction général

I.I. Introduction général

Le grand nombre de publication éditées et de brevets déposés ces dernières années, montre l'importance de l'effort de recherche et de développement dans le domaine de télécommunication .

A la base de toute mesure, il ya un capteur premier maillon de la chaîne de mesure et résultat de l'exploitation judicieuse d'une loi physique. La conception d'un capteur fait appel en générale à toutes les disciplines physique, chimie, mécanique, électronique,...

Les capteurs sont des éléments essentiels de tout système complexe de contrôle et de mesure dans tous les domaines ainsi la télécommunication, ils assurent l'acquisition de paramètres externes ou internes au système, donc la surveillance et l'asservissement de ce système.

Tandis que les fibres optiques remplacent graduellement les connections en cuivre, il deviendra nécessaire pour de nombreux composants électroniques d'être remplacés par des composants optiques équivalents : composants de routage, commutateurs, composants émetteurs et filtres.

Une partie des capteurs actuels est basée sur des principes optiques et les technologies apparues ces dernières années (fibres par exemple) amènent des possibilités nouvelles et prometteuses.

La technologie des fibres optiques est à l'heur actuelle passée dans le domaine industriel en ce qui concerne les télécommunications .

Pour faire face à l'augmentation du trafic au cours des années, les équipementiers ont dû innover. La première révolution a eu lieu avec l'introduction des fibres optiques comme support de transmission .L'information codée sous forme de lumière est issue d'une source Laser modulée qui est guidée dans la fibre.

Les travaux de ce projet sont portés sur l'étude **de l'importance des capteurs optique**.

Ces derniers sont présents dans de nombreux composants de génération classique comme les capteurs classique de Vitesse, pression, mouvement ...etc qui sont basé sur les

Introduction général

composants électriques et de nouvelles générations comme et multi modes les fibres intégré et les fibres optiques monomodes, les composants de cette dernier technologie

Quel est le sujet d'étude et les capteur qui comptent sur fibre optique où l'étude en quatre grands chapitres

Le premier chapitre de fournir s'intéresse à tous les types de capteurs, ainsi que leurs caractéristiques, ainsi que d'une comparaison entre les différentes caractéristiques et les contraintes de chaque type

Chapitre II spécialisée dans le regarder sur les ondes optiques et puis collectionneurs qui s'appuient sur la fibre optique et le principe de son travail.

Troisième chapitre, nous examinons la comparaison entre les deux types de capteurs photovoltaïques, où nous résumons ces résultats obtenus dans les quatrièmes places trimestre avec cette recherche d'une conclusion leur poser quelques questions pour ouvrir les horizons pouvoir étude de suivi dans un tel sujet.

Chapitre I : les capteurs

I-1-Introduction

Lorsque l'on souhaite traduire une grandeur physique en une autre grandeur, on fait appel que l'on nomme classiquement « capteur ». Son rôle est de donner une image interprétable d'un phénomène physique de manière à pouvoir l'intégrer dans un processus plus vaste.

Ainsi, un capteur de température au sein d'un micro-processeur s'intègre dans le processus de stabilisation en température du composant de manière à assurer son bon fonctionnement. De cette mesure va dépendre la vitesse de rotation du ventilateur ou la commande en courant d'un module à effet Peltier...etc.

De nombreux phénomènes peuvent être traités à travers ce concept, Celui qui nous abordons dans ce chapitre la définition d' un capteur et qu'elle est les différents type de capteur actuellement et qui est le plus important entre eux .

Chapitre I : les capteurs

I-2- Capteur physique

Les capteurs sont des instruments de prélèvement d'information qui élabore à partir d'une grandeur physique, une autre grandeur physique de nature différente (très souvent électrique)[1]. Cette grandeur représentative de la grandeur prélevée est utilisable à des fins de mesure ou de commande.

I-2-1- Définition du capteur

Un capteur est un organe chargé de détecter une grandeur physico-chimique et de la transformer en un grandeur exploitable . la grandeur physico-chimique à mesurer, souvent appelée " mesurande ", n'est pas en générale accessible. La grandeur exploitable qui est souvent de nature électrique , constitue le signal de mesure (ou signal de sortie) du capteur.

I-2-2- Constitution d'un capteur

Les parties constitutives d'un capteur sont les suivantes (figure I.1):

- ✓ Corps d'épreuve ou élément sensible à l'espèce à détecter.
- ✓ Élément de transduction.
- ✓ Module électronique de conditionnement.

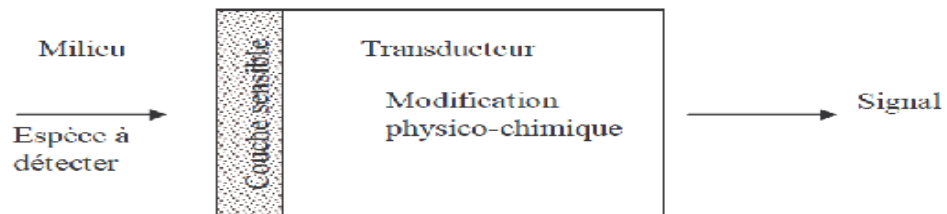


figure I.1: Schéma de principe du capteur

le corps d'épreuve est un élément physique ou chimique qui réagit sélectivement à la grandeur à mesurer. Il a pour rôle de transformer la grandeur à mesurer en une grandeur physique mesurable. L'élément de transduction est un élément sensible lié au corps d'épreuve. Il traduit les réactions du corps d'épreuve en une grandeur électrique constituant le signal de sortie. Le module électronique de conditionnement a , selon le cas , les fonctions suivantes:

- alimentation électrique du capteur.
- Alimentation du signal de sortie.
- Filtrage, correction, traitement du signal.

Chapitre I : les capteurs

Ce module électronique porte le nom de transmetteur. Il peut être ou non incorporé au capteur.

I-2-3- Les caractéristiques métrologiques d'un capteur

Les liens entre un capteur et la grandeur qu'il mesure sont définis par ses caractéristiques d'emploi.

a. Etendue de mesure

Domaine de mesure pour lequel les indications du capteur ne doivent pas être entachées d'une erreur supérieure à l'erreur maximale tolérée. On appelle les valeurs limites du domaine, « portée minimale » et « portée maximale ».

b. Sensibilité

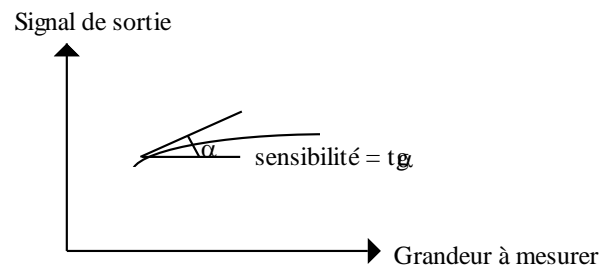
C'est le rapport de la variation du signal de sortie à la variation correspondante de la grandeur à mesurer.

C'est à dire à la pente de la courbe de réponse du capteur pour une valeur donnée :

$$S = ds/de$$

ds : variation de sortie

de : variation de l'entrée



c. Précision

C'est l'aptitude du capteur à donner des indications proche de la valeur vraie de la grandeur mesurée.

d. Fidélité et justesse

La justesse est la qualité d'un capteur à fournir des indications précises.

La fidélité est la qualité d'un capteur à fournir des indications identiques pour une même valeur de la grandeur à mesurer .

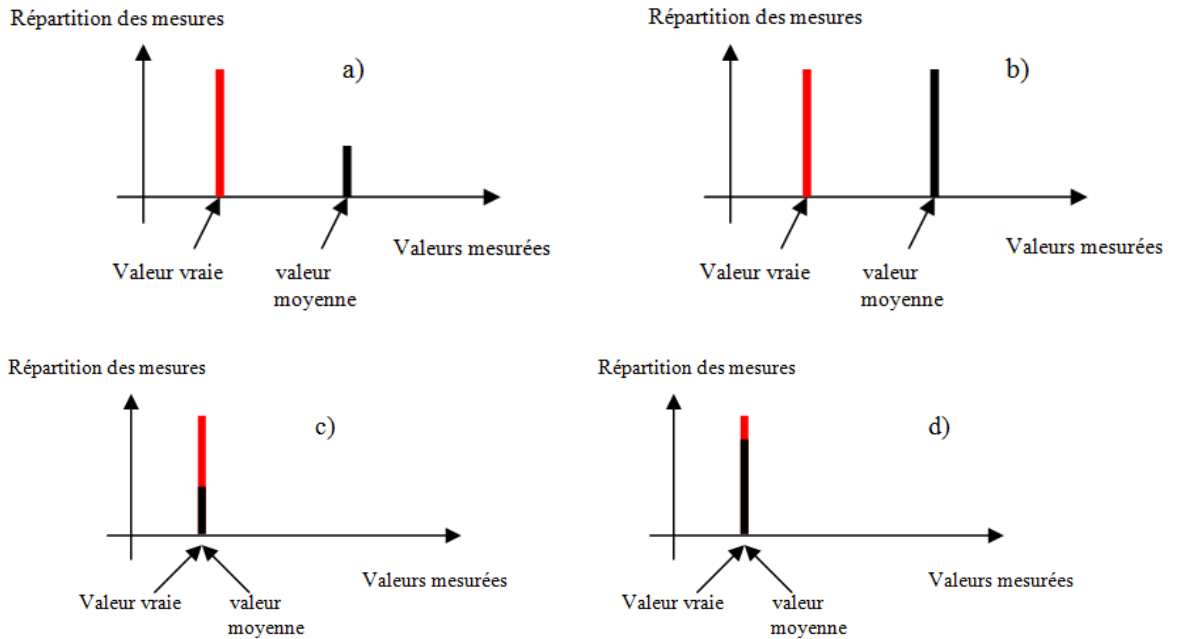
a : capteur ni fidèle, ni juste (erreurs et incertitudes de mesure importantes)

b : capteur fidèle mais non juste

c : capteur juste mais non fidèle

d : capteur juste et fidèle, donc précis (erreurs et incertitudes de mesure réduites)

Chapitre I : les capteurs



e. Rapidité

C'est l'aptitude du capteur à suivre dans le temps les variations de la grandeur à mesurer. Il faut donc tenir compte du temps de réponse, de la bande passante et la fréquence de coupure du capteur.

f. Stabilité

La stabilité qualifie la capacité d'un capteur à conserver ses performances pendant une longue durée (problème de dérive du zéro par exemple).

g. Répétabilité et Reproductibilité

La répétabilité est l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successifs d'une même grandeur effectuée avec la même méthode, par le même observateur, avec les mêmes instruments de mesure et à des intervalles de temps assez courts .

La reproductibilité est l'étroitesse de l'accord entre les résultats de mesures successifs d'une même grandeur dans le cas où les mesures sont effectuées dans les conditions différentes que pour la répétabilité .

h. Bruit de fond

C'est une variation parasite, souvent aléatoire, du signal de sortie, dont la valeur moyenne est nulle et qui vient se superposer à la valeur à mesurer .

Chapitre I : les capteurs

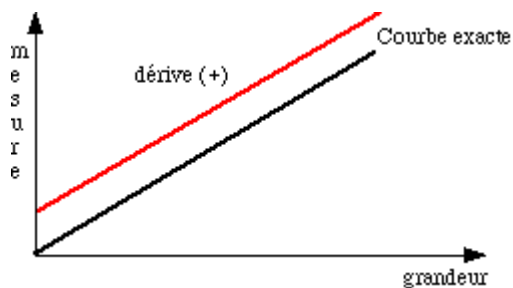
i. Erreur de mesure

Le capteur et toute la chaîne de traitement de la mesure introduisent des erreurs : bruit, décalage, référence, linéarité...

L'erreur globale de mesure ne peut être qu'estimée. Une conception rigoureuse de la chaîne de mesure permet de réduire les erreurs et donc l'incertitude sur le résultat.

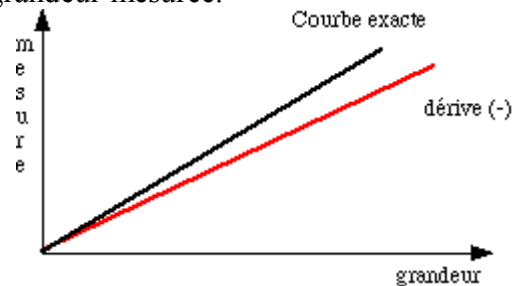
On parle de : fidélité, justesse, précision, incertitude, linéarité.[40]

- **L'erreur de zéro (offset)**



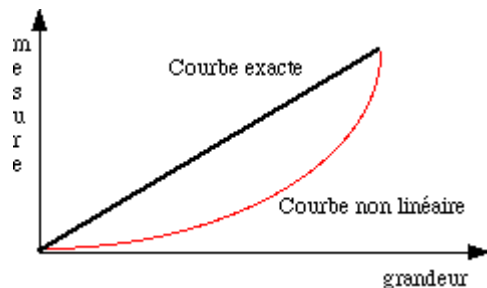
- **L'erreur d'échelle (gain)**

C'est une erreur qui dépend de façon linéaire de la grandeur mesurée.



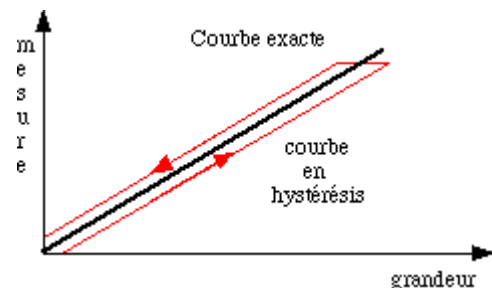
- **L'erreur de linéarité**

La caractéristique n'est pas une droite.



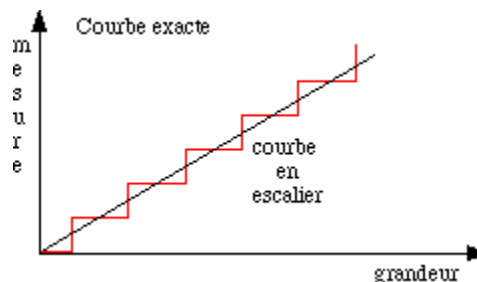
- **L'erreur due au phénomène d'hystérésis**

Il y a phénomène d'hystérésis lorsque le résultat de la mesure dépend de la précédente mesure.



- **L'erreur de mobilité**

La caractéristique est en escalier, cette erreur est souvent due à une numérisation du signal.



Chapitre I : les capteurs

I-2-4- Importance des capteurs physiques

Les capteurs physique sont présentent en plus un importance par leurs propres caractéristiques : La Mesure directes, l'exigent comparativement moins de ressources de calcul et robustesse vis-à-vis de certaines condition de fonctionnement dégradées, très peu intrusifs. Tout ça et plus sont des avantages des capteurs physiques ,mais elle réduit par des inconvénients comme interférences entre les capteurs du même type, sensibles aux conditions d'acquisition et plus le temps de répons et autre inconvénients désiré les capteurs physique .

A travers du développement de nouvelle technologie dans le domaine de semi conducteur (la découvert de la silice) elle donne un autre possibilité de capteurs sont les capteurs optique .

I-3- Capteurs à fibres optiques

Selon la définition normalisée, un capteur à fibre optique (ou à fibres optiques) est un dispositif dans lequel l'information est créée dans le chemin optique par réaction de la lumière à la grandeur à mesurer, avant d'être acheminée vers le récepteur optique par l'intermédiaire d'une ou de plusieurs fibres optiques.

Il permet de recueillir des informations représentatives des grandeurs mesurées sans autre apport d'énergie que celui des phénomènes observés et/ou des ondes lumineuses circulant dans la ou les fibres. Le chemin optique n'est donc pas passif, contrairement à une liaison optique où l'information est simplement transmise de l'entrée de l'émetteur vers la sortie du récepteur. Cette définition exclut du champ d'investigation des capteurs à fibres optiques, les assemblages comportant un capteur conventionnel et un système de transmission par fibres optiques. Toutefois, l'élément optique sensible à la grandeur à mesurer peut être la fibre elle-même ou bien un élément inséré dans le chemin optique.

Les applications sont très variées, et s'étendent du génie civil, des ouvrages d'art et de toute structure que l'on souhaite surveiller pour en améliorer le processus de fabrication, ou pour en assurer le suivi pendant toute la durée de vie... jusqu'à tous les domaines d'emploi des matériaux composites (aéronautique, marine, etc.). En outre, le capteur à fibre optique, grâce à son isolation galvanique, peut résoudre les problèmes de sécurité dans les ambiances explosives ou à haut risque

Chapitre I : les capteurs

I-3-1- Importance des capteur à fibre optique

Pourquoi les capteurs optiques présentent un intérêt particulier:

Parce que: - la lumière est une onde de haute fréquence qui peut porter une grande quantité d'information.

- la lumière permet de traiter l'information en parallèle (image).
- on peut exploiter les différentes grandeurs caractéristiques d'une onde lumineuse.
- la lumière n'est pas sensible aux perturbations électromagnétiques et qu'elle peut être utilisée dans un milieu explosif,
- les capteurs optiques utilisent généralement des méthodes non destructives.
- La sécurité dans les ambiances explosives ou à haut risque est l'un des soucis majeurs de certains secteurs industriels. Les capteur à fibre optique, par leur isolation galvanique, peuvent résoudre les problèmes liés à l'utilisation des capteur physiques.

I-3-2- Capteur intrinsèque, capteur extrinsèque

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.

Cette classification peut être jugée incomplète dans la mesure où il existe des zones intermédiaires, par exemple celle où la mesure s'effectue à l'interface entre la fibre et le milieu externe [41].

■ Dans les capteurs intrinsèques , c'est la fibre optique qui forme elle-même le transducteur : le phénomène à mesurer modifie une caractéristique de la propagation de la lumière (état de polarisation, biréfringence...). Ces capteurs permettent de réaliser des mesures dans les zones d'accès difficiles, en environnement très bruité [3]. Ils sont appréciés pour leur faible encombrement et la possibilité d'une mesure répartie.

Chapitre I : les capteurs

Une même fibre peut transporter plusieurs signaux de longueurs d'onde différentes : elle autorise à ce titre le multiplexage optique.

Le multiplexage optique de plusieurs zones sensibles de la fibre est possible : il s'effectue en repérant ces zones au moyen d'un marquage optique (réseau d'indice), inscrit par exemple dans le cœur de la fibre par un procédé optique. Le démultiplexage et la démodulation se font par analyse simultanée des signaux d'interférences issus des différentes zones. Cette technologie rend possible la mise en œuvre de mesures réparties, ou encore la mesure simultanée de deux grandeurs différentes, comme la température et la déformation.

■ Les capteurs extrinsèques mettent en jeu des fibres optiques pour transmettre la lumière entre une source optique et un instrument de mesure (tableau I-1).

Grandeur mesurable	Résolution	Gamme
Déformation	10^{-6}	$\pm 1\%$
Température	10^{-1} C°	-70 C° à $+375 \text{ C}^\circ$
Vibration	$\pm 1\%$ d'allongement à 10 KHz	

Tableau I-1 Exemple de grandeurs mesurables

I-3-3- Constitution d'un capteur à fibres optiques

La fibre optique est le plus souvent en silice, bien qu'elle puisse être en matière plastique.

Les fibres couramment utilisées ont une enduction extérieure en époxy acrylate : les fibres multimodes comme monomodes peuvent être obtenues avec une excellente précision sur le diamètre (valeur standard : 125 μm , à $\pm 0,5 \mu\text{m}$), qualité essentielle dès lors que la fibre doit être introduite dans un dispositif de maintien (férules des connecteurs). Leur température d'emploi dépend essentiellement de leur conditionnement : la silice a un point de fusion à 1850 °C, et peut transmettre la lumière jusqu'à 600 à 700 °C ; des problèmes d'atténuation forte, éventuellement de ramollissement apparaissent à plus haute température. Pratiquement, c'est l'époxyacrylate qui limite la température d'emploi de ces fibres entre -30 °C et $+60 \text{ °C}$. D'autres enductions polymères permettent au capteur de fonctionner à des températures supérieures : le polyimide par exemple tient jusqu'à 400 °C environ.

Des capteurs intrinsèques exploitent ces fibres préalablement bobinées sur un mandrin de diamètre relativement faible (25 à 30 mm) qui dépend de la tenue mécanique de la fibre (résistance à la traction : jusqu'à 4 à 5 GPa). Ils sont utilisés dans tous les milieux liquides, mais aussi les milieux solides, à condition de disposer d'une bonne transduction entre la fibre et le solide par l'intermédiaire d'une pâte ou d'un liquide.

Le bobinage de la fibre optique sur un faible diamètre engendre une contrainte de courbure, du fait de la différence de longueur de la circonférence entre la partie interne et la partie externe de la fibre.

I-3-4- Avantages des capteurs à fibre optique

■ L'intérêt porté aux capteurs à fibres optiques est lié aux propriétés intrinsèques de ces fibres, ainsi qu'à l'architecture du capteur lui-même.

Ce capteur a des avantages décisifs :

- il ne perturbe pas son environnement. Il peut notamment être employé en environnement explosif .
- son insensibilité électromagnétique est parfaite (très hautes tensions, parasites électromagnétiques) .

Chapitre I : les capteurs

— sa dimension transversale est très faible, ce qui lui ouvre la voie à de nombreuses applications, notamment en médecine humaine .

— sa légèreté (associée à l'absence de conduction de la chaleur) constitue un atout supplémentaire .

— sa distance d'action est grande : le capteur peut être positionné à grande distance, sans perte du signal.

■ À ces principaux atouts, uniques dans le domaine des capteurs, s'ajoutent d'autres avantages spécifiques à certains capteurs à fibres optiques :

— plus grande sensibilité et plus grande dynamique que les capteurs traditionnels : les montages interférométriques permettent d'atteindre des résolutions relatives de 10^{-6} de l'étendue de mesure .

— grande souplesse de configuration géométrique : le capteur autorise des mesures sans contact sur des objets en mouvement, ou dans des milieux interdisant tout contact physique entre l'unité sous test et les sondes de mesure .

— isolation électrique entre le processus et l'instrumentation : les matériels délicats sont protégés des risques électriques résultant de différences de potentiel .

— grande fiabilité : possibilité de fonctionner à haute température, bonne résistance aux rayonnements nucléaires ainsi qu'à l'impulsion électromagnétique qui serait due à une explosion nucléaire. La combinaison de la fiabilité et de la tenue à l'environnement justifie l'emploi du capteur à fibres optiques dans le domaine militaire .

— capacité à multiplexer les signaux dans un petit volume autorisant la mise en œuvre d'une technologie redondante : elle constitue un autre attrait pour certaines applications militaires critiques .

— sécurité intrinsèque généralement assurée par le faible niveau d'énergie lumineuse mise en jeu dans les capteurs à fibres optiques .

— bonne adaptation à toute mesure à distance : le capteur à fibres optiques se prête à la télétransmission pour le contrôle des processus industriels mettant en œuvre des matières toxiques ou dangereuses, ou encore des mesures par des moyens optiques (colorimétrie, réfractométrie, spectrofluorimétrie) .

— capacité à effectuer des mesures au moyen de capteurs répartis sur toute la longueur d'une même fibre optique : le déploiement des bus de terrain ouvre la voie à l'exploitation cohérente de réseaux de capteurs chargés de la saisie de données dans les processus industriels .

Chapitre I : les capteurs

— possibilité de fabriquer des capteurs à usage unique (capteurs à jeter) avec un bon rapport performances/prix : les capteurs à fibres optiques acquièrent une position intéressante dans le domaine médical.

■ La fibre présente bien entendu des inconvénients. Les plus fréquemment mentionnés sont :

— la complexité de la connectique associée .

— la limitation en température (+ 85 °C pour les fibres en matière plastique) .

— la difficulté de détecter un défaut dans les fibres (épissure, cisaillement) .

— le prix du capteur à fibre optique est plus élevé que celui d'un capteur traditionnel, sans pour autant être plus performant dans les applications usuelles .

— sa technologie n'a pas bénéficié des investissements réalisés par l'industrie des communications.

I-4- conclusion

Montrer l'efficacité des capteurs optique de plus que capteurs physiques par plusieurs des caractéristiques mentionnées ci-dessus, qui nous a fait se soucier de l'étude, c'est ce que nous chercherons à lui dans le deuxième trimestre, grâce à une connaissance approfondie du principe de travail et les différentes espèces de cette branche hors de lui.

Chapitre II les capteurs Optiques

II-1- Introduction

Les capteurs optique à fibres optiques sont constitués de deux éléments principaux : le transducteur à fibres optiques (aussi appelé capteur à fibres optiques, jauge à fibres optiques ou sonde à fibres optiques) et le conditionneur de signal (aussi appelé poste de lecteur). Dans le cas des capteurs dits extrinsèques, le transducteur à fibres optiques est fait d'un corps d'épreuve contenant un dispositif optique sensible à la grandeur physique du mesurer (le mesurande).

Il existe différentes technologies de capteurs à fibres optiques et elle se distinguent par la grandeur optique modifiée ou modulée par le mesurande. Dans ce chapitre on va voir ses différentes technologies .

Chapitre II les capteurs Optiques

II-2- L'onde lumineuse

Une onde optique est une onde électromagnétique $(\vec{E}, \vec{H}, \vec{v})$ et on admet que la variation optique correspond au champ électrique \vec{E} , \vec{v} étant la vitesse de propagation dans le milieu traversé. Lorsque l'onde n'est pas polarisée, elle s'écrit de manière générale sous la forme :

$$S = ae^{-\alpha z} \cos(\omega t - \varphi) \quad (\text{II. 1})$$

A laquelle on associe l'onde complexe:

$$\tilde{S} = ae^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \varphi)} \quad (\text{II. 2})$$

Avec $\varphi = kz$ pour une onde plane se déplaçant dans la direction z , \vec{k} est le vecteur d'onde de module $2\pi/\lambda$, α le coefficient d'absorption, z la coordonnée suivant la direction de propagation de l'onde plane, a est un terme d'amplitude, $\omega = 2\pi/T$ la pulsation, $\lambda = vT$ la longueur d'onde ($\lambda_0 = cT$ dans le vide). Pour une onde sphérique $\varphi = kr$, r étant la distance d'une source ponctuelle au point d'observation. L'intensité de l'onde est donnée par le produit :

$$I = \tilde{S} \tilde{S}^* = a^2 e^{-2\alpha z} \quad (\text{II. 3})$$

Où \tilde{S}^* désigne le nombre complexe conjugué de \tilde{S} .

Si la lumière est naturelle, le champ électrique, perpendiculaire au rayon lumineux, n'a pas de direction privilégiée. Par contre après passage dans certains milieux (polariseurs) le champ électrique peut avoir une direction privilégiée (polarisation rectiligne) ou avoir son extrémité qui tourne autour de l'axe de propagation (vibration elliptique). Si le milieu est biréfringent deux ondes se créent, (l'onde ordinaire d'indice n_o et l'onde extraordinaire d'indice n_e) suivant la direction de la propagation par rapport à celle de l'axe optique du milieu.

II-3- Principes des capteurs optiques

A partir de la représentation précédente on voit que plusieurs possibilités sont à la disposition des réalisateurs de capteurs optiques. On peut utiliser sur une onde optique des modulations de :

- L'intensité.
- La phase φ .
- La polarisation.

Sans entrer dans l'ensemble de l'instrumentation optique bien développée industriellement (spectrographes, spectromètres, appareils d'analyse divers), on peut rappeler les principes les plus courants des capteurs optiques.[4]

Chapitre II les capteurs Optiques

II-4- Capteurs à modulation d'intensité

Dans cette partie nous allons nous focaliser sur les capteurs à fibres optiques utilisant **la variation de l'intensité lumineuse** qui est induite par la quantité à mesurer ou mesurande (température, déformation, pression, ...). Cette approche est de loin la plus facile à mettre en œuvre car il existe de nombreuses configurations pour induire une modulation d'intensité, donc quasiment l'ensemble des mesurandes peuvent être détectés. Elle a aussi l'avantage d'être peu onéreuse ne nécessitant pas de fibres spéciales ou de montages très compliqués. Elle n'est pas très sensible comparativement aux autres techniques de modulation. La modulation d'intensité par le mesurande s'obtient par la création de pertes lors de la transmission, en d'autres termes en faisant sortir la lumière de la fibre optique. Il existe trois techniques de base pour obtenir ces pertes :

- les micro-courbures périodiques.
- l'interaction avec le champ évanescent.
- les modifications du couplage entre deux fibres.

II-4-1- Micro-courbures périodiques

La Figure II-1 représente un capteur basé sur le principe des micro-courbures périodiques. Cette technique s'appuie sur deux phénomènes. Le premier est **la création de pertes** dans une fibre optique sous l'effet de **petit rayon de courbure**, le deuxième est d'avoir un effet **raisonnant** grâce à la périodicité des **micro-courbures** qui va permettre de **coupler** deux modes entre-eux [8] [9]. La courbure va permettre à la lumière de sortir du cœur de la fibre optique et donc de créer des pertes soit en faisant sortir une portion du mode fondamentale LP01, soit en redistribuant l'intensité transportée par chaque mode par transfert dans les modes de gaines ou à fuites. La structure périodique va avoir l'effet d'un réseau de diffraction couplant préférentiellement dans un mode de gaine. L'intensité du couplage donc de la perte dans l'intensité du signal transmis sera proportionnel à la "force" des micro-courbures.

Pour définir la **période** des micro-courbures nous pouvons utiliser soit la formule des réseaux, soit la théorie des modes couplés qui donnent le même résultat. Il est alors facile de déterminer le pas connaissant les caractéristiques du mode de gaine ou inversement. La formule reliant les divers paramètres s'écrit :

Chapitre II les capteurs Optiques

$$\beta_{coeur} - \beta_{gaine} = \frac{2\pi}{\Lambda} \quad (II.4)$$

où β_{coeur} et β_{gaine} sont respectivement les constantes de propagation du mode fondamental et de gaine dans lequel la lumière sera couplée, Λ est le pas des micro-courbures.

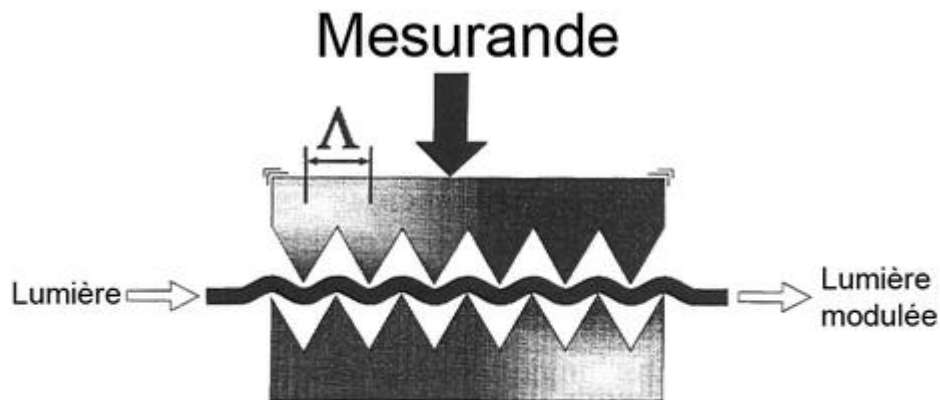


Figure II-1 Transducteur à base de micro-courbures périodiques

Comme mentionné plus haut il est possible d'engendrer des pertes de propagation uniquement en appliquant un certain rayon de courbure à la fibre, cet effet peut être utilisé seul pour réaliser un capteur. Les pertes engendrées par le couplage aux modes d'ordres supérieurs étant faibles dans les fibres mono-modes, on peut avoir recours à une fibre multi-mode dans la zone sensible pour augmenter cet effet comme présenté sur la Figure II-2. Ce capteur est une structure hybride formée par un segment de fibre mono-mode puis un de fibre multi-mode et de nouveau un de fibre mono-mode. L'injection dans la fibre multi-mode par la fibre mono-mode va produire l'injection dans différents modes dépendant du type de fibre multi-mode (gradient d'indice ou saut d'indice) et du positionnement relatif des deux fibres. L'effet d'une ou plusieurs courbures va donc changer l'intensité transportée par chaque mode. Pour finir le passage dans la fibre mono-mode ne va sélectionner que la lumière transportée par les premiers modes. La sensibilité de la structure hybride est largement supérieure, comme le montre la Figure II-2, à celle de la structure composée uniquement de fibre mono-mode [10].

Chapitre II les capteurs Optiques

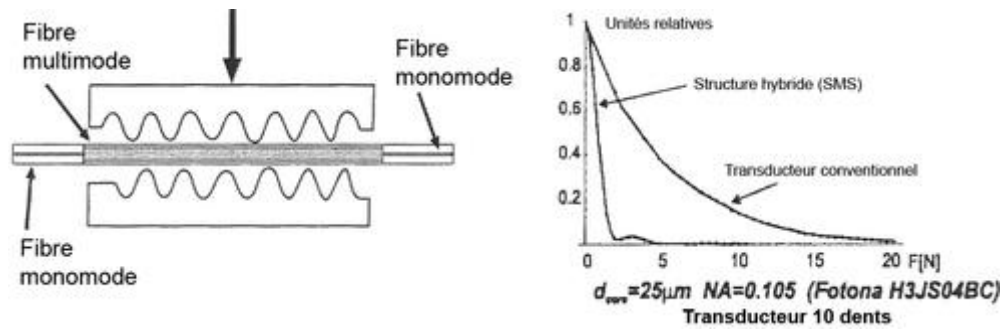


Figure II-2 Transducteur à base de micro-courbures à fibre multi-mode (gauche) et exemple d'amélioration de la sensibilité entre une structure hybride (SMS) et conventionnelle (droite)

Les capteurs à base d'une ou plusieurs courbures peuvent être utilisés pour des mesures de :

- Déplacement. En laissant libre un des deux blocs.
- Pression. En utilisant une membrane élastique pour le déplacement d'un des deux blocs.
- Contrainte. Plusieurs configurations sont possibles avec une seule courbure pour une fibre maintenue sur la pièce à mesurer ou des micro-courbures dont l'écartement entre les blocs est lié à déformation à détecter.
- Vibration. Un des deux blocs est relié à une masse subissant l'accélération provoquant son déplacement .
- Température. En utilisant les propriétés thermiques des divers matériaux utilisés.

II-4-2- Champ évanescent

Dans cette section, nous allons présenter une méthode de **modulation de l'intensité** basée sur **l'interaction directe** du mesurande et de **l'onde électromagnétique**. Les fibres conventionnelles mono- ou multi-mode assurent le guidage de la lumière par le même phénomène bien connu de réflexion totale interne. Il apparaît lorsque la relation **de Snell-Descartes** n'est pas vérifiée ou plus simplement à l'interface entre un milieu d'indice de réfraction élevé et un d'indice plus faible, les rayons arrivant sous certaines incidences sont totalement réfléchis. Néanmoins la lumière va franchir l'interface et pénétrer plus ou moins loin dans le milieu de bas indice. Cette partie du champ électromagnétique est appelé champ évanescent (voir Figure II-3-a) et à pour particularité de décroître de façon exponentielle.

Chapitre II les capteurs Optiques

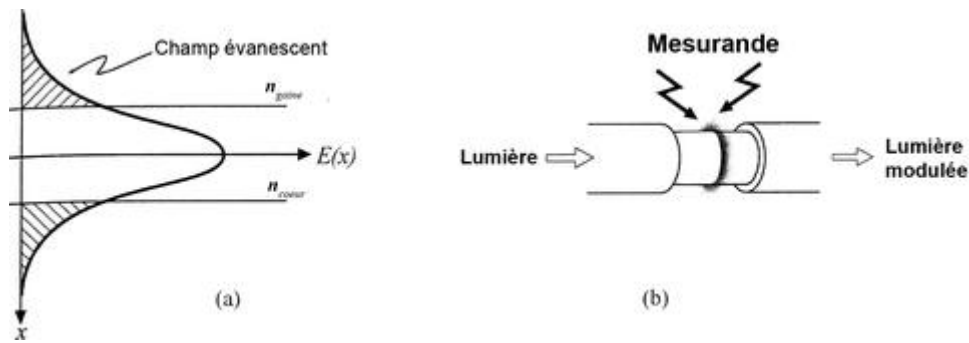


Figure II-3 : a - Champ évanescent dans une fibre optique. b - Principe du transducteur à champs évanescent

L'idée de base des capteurs à champ évanescent (voir Figure II-3-b) est de faire **interagir la quantité** à mesurer et cette partie du champ électromagnétique. Il est donc nécessaire de se rapprocher le plus possible de la partie guidant (i.e. cœur) pour obtenir une sensibilité suffisante.

Le **problème** majeur de ce type de capteur est la **faible interaction** entre le champ évanescent et le mesurande. Pour les guides d'ondes, cette interaction est proportionnelle à la profondeur de pénétration dans la gaine optique (i.e. Gaine). Cette profondeur est liée aux paramètres **opto-géométriques** de la fibre, résumés dans la fréquence normalisée V . De façon simple, plus la valeur de V est petite plus la profondeur de pénétration du champ évanescent est importante.

La configuration la plus simple de ce capteur est celle de la Figure II-3-b où la gaine protectrice de la fibre a été retirée et le Gaine a été réduit par polissage ou attaque chimique. Il est alors facilement possible de détecter des espèces chimiques ou gaz par le choix approprié de la longueur d'onde d'utilisation. La présence du mesurande se traduira par l'absorption de l'onde évanescente créant ainsi des pertes et donc une modulation de l'intensité lumineuse.

Afin d'augmenter l'interaction avec le champ évanescent il est possible d'utiliser des fibres spéciales : fibre en D ou fibre micro-structurées [11]. Il est aussi possible d'effiler la fibre en la chauffant jusqu'à la température de ramollissement et en l'étirant [12]. Il est très fréquent d'avoir recours au dépôt d'une couche plus ou moins fine sur la Gaine, ses caractéristiques optiques changeant avec la substance à détecter, l'onde évanescente sera donc aussi affectée.

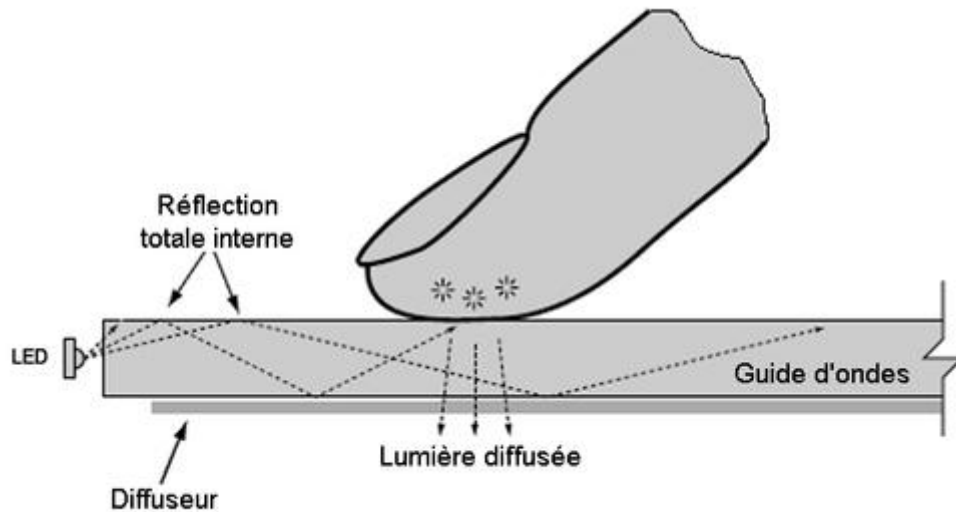


Figure II- 4 : Exemple de frustration de la réflexion totale interne

D'autres capteurs utilisent comme principe (Figure II-4) la frustration ou modification de la réflexion totale interne [13], [14], soit en déplaçant le milieu proche du cœur (capteur de déplacement), soit en faisant varier l'indice de réfraction du milieu (réfractomètre). Une modulation importante de l'intensité lumineuse peut être obtenue par cette technique. La Figure II-5 représente l'exemple d'un capteur de déplacement réalisé par ce principe [15]

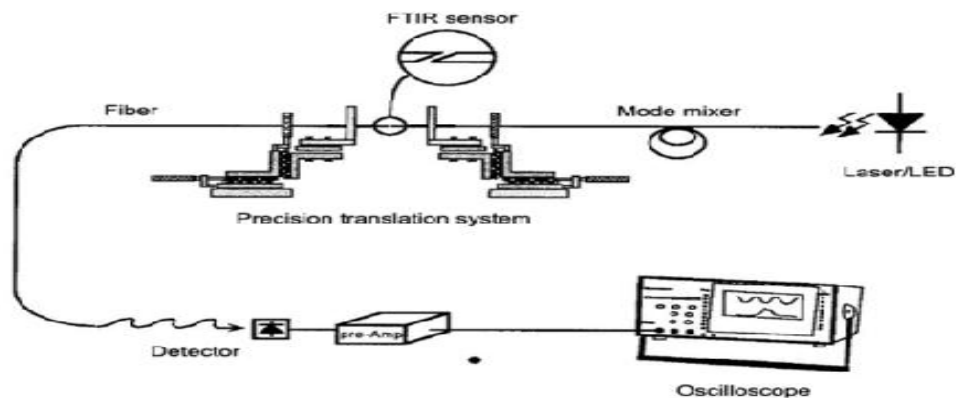


Figure II- 5 Capteur de déplacement utilisant la frustration de la réflexion totale

Finalement, le capteur à champ évanescent peut être utilisé dans de nombreuses configurations, il faut juste pouvoir faire interagir l'onde avec le mesurande directement ou indirectement.

II-4-3- Couplage entre deux fibres

Dans cette dernière section consacrée à **la modulation d'intensité** nous allons traiter des capteurs à **couplage** entre deux fibres ou plus généralement entre deux **guides d'onde**. En effet ce type de capteur englobe les configurations dans lesquelles la lumière est extraite d'un guide d'onde, interagit avec le mesurande et est couplée dans un autre ou le même guide d'onde. Ce type de capteur se décline sous de nombreuses architectures pouvant utiliser des fibres mono- et/ou multi-mode. Le couplage entre les deux fibres peut être en transmission ou réflexion comme on peut le voir sur la Figure II-6.

Le point majeur pour l'obtention d'un bon capteur à couplage est la parfaite connaissance du couplage entre les deux fibres utilisées. De nombreux articles traitent de ce sujet dans la littérature nous citerons notamment [16], [17], ces travaux étaient motivés pour déterminer les pertes au niveau des connecteurs. L'approximation gaussienne très utilisée pour décrire le mode fondamental permet de simplifier les calculs et donnent de très bons résultats lors de l'utilisation de fibre mono-mode.

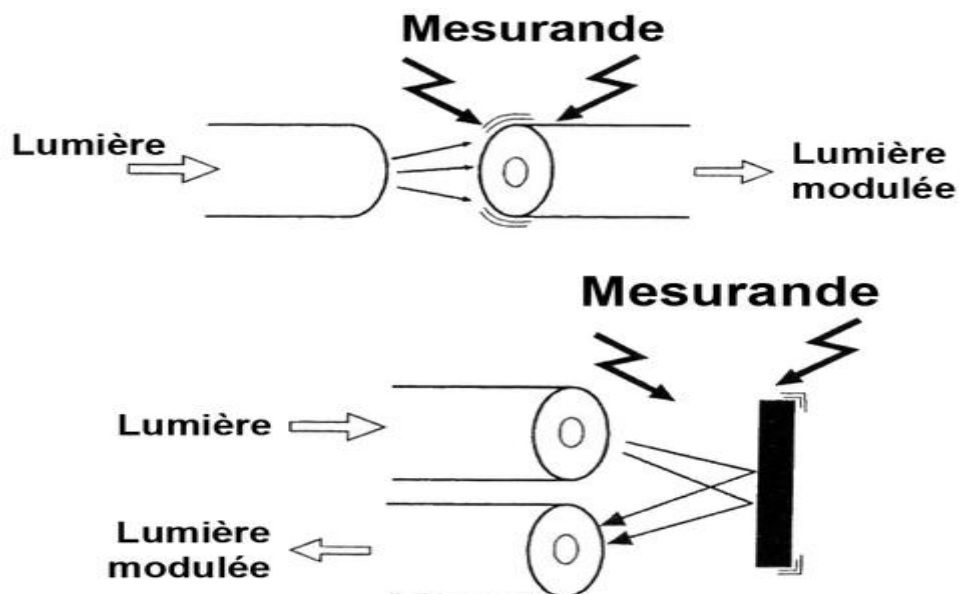


Figure II-6 Exemple de couplage entre deux fibres en transmission (haut) et en réflexion (bas)

Pour les fibres multi-modes, il faut utiliser des méthodes plus complexes et élaborées pour obtenir de bonnes prédictions. Certains modèles comme le tracé de rayon ou l'illumination uniforme qui consiste à supposer que la fibre émettrice éclaire de façon uniforme la fibre réceptrice, sont très utilisés pour leur simplicité malgré leur défaillance lors d'un désalignement important entre les deux fibres.

Chapitre II les capteurs Optiques

Ces capteurs à couplage entre deux fibres permettent de mesurer divers choses :

- Déplacement
- Pression
- Vibration
- Positionnement
- ...

Pour mettre en œuvre ce type de capteur, il suffit donc d'imaginer un montage mécanique pouvant se déplacer sous l'effet du mesurande voulu.

II-5- Capteurs à modulation de phase, capteurs interférométriques

L'**interférométrie** optique a toujours été associée avec la métrologie de précision. Un interféromètre est un instrument dans lequel au moins deux ondes optiques se **superposent** à un même endroit de l'espace. De plus, si ces ondes sont cohérentes, l'intensité résultante varie périodiquement en fonction de la différence de phase ou de chemin optique et la période est égale à la longueur d'onde. La variation du déphasage entre les ondes est de l'échelle des longueurs d'onde, la mesure est donc sensible.

L'utilisation des fibres mono-modes et leurs composants permet de réaliser des interféromètres très robustes pouvant être utilisés ailleurs que dans un laboratoire. Depuis le début de l'utilisation de la fibre optique, on s'est aperçu que ses propriétés de guidage étaient liées à son environnement (température, déformation, pression, ...). De fait, une différence de chemin optique permet de mesurer une variation de la température et la contrainte.

Ce titre concerne les capteurs dont le principe met en jeu la variation du chemin optique qui est induite par le mesurande. Par interférométrie on mesure la différence de chemin optique, on remonte ainsi au mesurande.

II-5-1- Principes de fonction

Un capteur peut être défini comme un composant dans lequel le signal optique va être modulé en réponse au mesurande. Prenons par exemple une source dont le spectre est connu et le champ électrique $E(\lambda)$ d'une onde optique à la longueur d'onde λ . Le champ $E'(\lambda)$ électrique après le capteur peut s'écrire :

Chapitre II les capteurs Optiques

$$E'(\lambda) = T(X, \lambda)E(\lambda) \quad (\text{II. 5})$$

où $E'(\lambda)$ est la matrice de passage du capteur et X est le vecteur caractérisant son environnement, incluant la température, la déformation, ... La configuration du capteur va nous permettre de déterminer T et ensuite il suffit d'inverser l'équation précédente pour obtenir le mesurande. Dans un capteur interférométrique, le mesurande va avoir pour effet de **moduler la phase** de l'onde électromagnétique, ce qui se traduit par un changement de l'intensité de l'interféromètre.

On peut prendre T comme le produit de terme chacun décrivant un effet observable sur le faisceau transmis :

$$T = ae^{i\phi} B \quad (\text{II. 6})$$

où a est la transmittance scalaire, ϕ est le retard de phase et B est la matrice de biréfringence du composant. a , ϕ et B sont dépendants de λ et du milieu environnant.

Nous pouvons donc ré-écrire l'équation (II. 7) à l'aide de l'équation (II. 8) en supposant que le capteur considéré ne modifie pas la polarisation de l'onde :

$$E'(\lambda) = aE(\lambda)e^{i\phi} \quad (\text{II. 7})$$

La modification de l'onde transmise est obtenue par a ou par ϕ . La transmittance a n'a en règle générale qu'une petite dépendance au milieu environnant, on peut supposer a constant. La sensibilité de la fibre aux trois grandeurs (température, déformation, pression) environnementales s'écrit :

$$\frac{\partial \phi}{\partial X} = \frac{2\pi}{\lambda} \left(n \frac{\partial l}{\partial X} + l \frac{\partial n}{\partial X} \right) \text{ avec } X = f(T, P, \Delta l) \quad (\text{II. 8})$$

Où l est la longueur de la fibre, n est l'indice effectif du mode fondamentale de la fibre. Le premier terme dans la parenthèse représente l'extension physique de la fibre et le second correspond aux variations de l'indice effectif.

La plus grande partie des interféromètres sont à deux ondes (i. e. fibres) dans lequel une fibre est soumise au mesurande et l'autre en est isolée pour servir de référence.

Chapitre II les capteurs Optiques

Par exemple, considérons un capteur à fibre optique de déformation. Par simplicité, nous supposons que l'élément sensible est une fibre optique de symétrie cylindrique et isotrope. Nous supposons aussi que le mesurande est purement axial sans composante transverse. L'application de cette déformation sur la fibre va avoir trois effets :

1. la fibre est physiquement étirée ou comprimée,
2. les indices de réfraction du cœur et de la gaine optique sont modifiés, donc l'indice effectif du mode fondamental varie,
3. les rayons du cœur et de la gaine optique vont être aussi affectés, par conséquent l'indice effectif du mode fondamental va varier.

Le premier effet est le plus dominant et si nous considérons les autres comme négligeables, il suffit de modifier la longueur de la fibre d'une longueur d'onde pour produire un changement d'une période dans l'interféromètre. Néanmoins, le second effet est de l'ordre de 20% du premier dans la silice fondue et est de signe opposé, ce qui réduit légèrement la sensibilité. Le troisième effet est plus compliqué. L'indice effectif des modes guidés de la fibre dépend des paramètres opto-géométriques que sont les indices de réfraction du cœur et de la gaine optique, des rayons du cœur et de la gaine optique et enfin de la longueur d'onde de travail. En pratique, le mode fondamental a un indice effectif proche de l'indice de réfraction du cœur. En réduisant (augmentant) le diamètre de cœur on fait diminuer (augmenter) l'indice effectif du mode fondamental et donc se rapprocher (s'éloigner) de l'indice de réfraction de la gaine optique. Toutefois le troisième effet est négligeable. En tenant compte de l'ensemble des contributions, la sensibilité aux déformations d'une fibre à $\lambda = 633nm$ vaut $6.5 \times 10^6 \text{ rad/m}$ [18].

Une étude similaire peut être menée pour la température où les trois effets sont :

1. allongement de la fibre sous l'effet de la chaleur,
 2. modification des indices de réfraction de la fibre via l'effet thermo-optique,
 3. augmentation des rayons de la fibre sous l'effet de la chaleur.
-

Chapitre II les capteurs Optiques

Dans la silice fondue le coefficient d'expansion thermique est très faible, par conséquent seul le second effet a de l'influence. En tenant compte de l'ensemble des contributions, la sensibilité thermique d'une fibre à $\lambda = 633\text{nm}$ vaut 100 rad/K pour un élément sensible de un mètre [19].

On peut aussi regarder les effets de la pression, qui va réduire les dimensions géométriques (longueur et diamètre) et modifier les indices de réfraction via le coefficient élasto-optique[20].

Nous savons qu'un interférogramme est périodique avec une période de 2π radians en terme de différence de phase ou en terme de différence de marche de λ . Afin de remonter à la valeur du mesurande avec la plus grande précision, il faut pouvoir remonter sans ambiguïté à la différence de phase ce qui n'est pas facile vue la périodicité de l'interférogramme.

II-5-2- Quelques types de modulation de phase

a. Interféromètres à deux ondes

La forme commune d'un interféromètre à deux ondes est la configuration de Mach-Zhender représenté sur la Figure II-7. La source est couplée dans une fibre optique mono-mode, l'amplitude est divisée dans deux fibres après le passage dans le coupleur directionnel CD1. Une fibre représente l'onde de référence (Référence fibre) tandis que l'autre est l'onde modulée (Signal fibre). Ensuite, les deux ondes sont recombinaées à l'aide du second coupleur direction CD2, il suffit donc de brancher un photodétecteur à l'une ou l'autre des sorties du CD2 pour obtenir un signal électrique proportionnel à la puissance optique incidente.

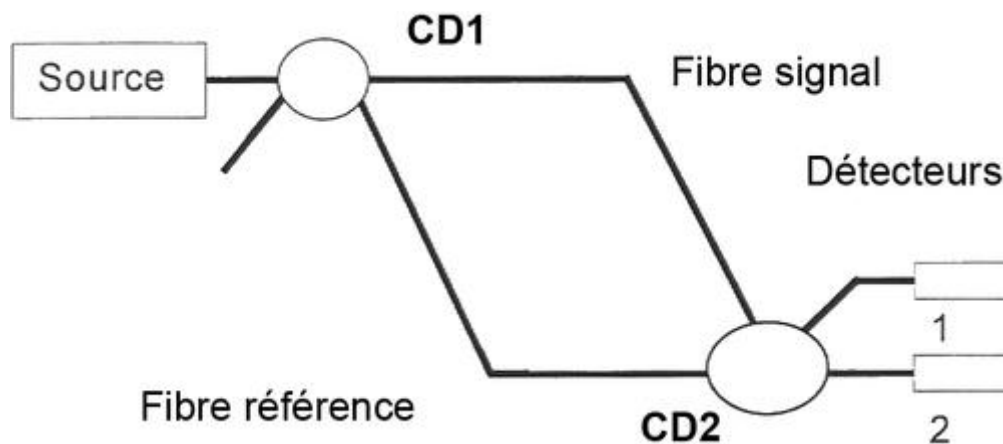


Figure II-7 Interféromètre de Mach-Zhender à fibre optique. CD1 et CD2 sont des coupleurs directionnels

Chapitre II les capteurs Optiques

On peut démontrer [21] que les intensités vues par les photodétecteurs 1 et 2 s'écrivent :

$$I_1 = I_0 |1 - V \cos(\phi_a - \phi_b)| \quad (\text{II. 9})$$

Et

$$I_2 = I_0 |1 + V \cos(\phi_a - \phi_b)| \quad (\text{II. 10})$$

où ϕ_a et ϕ_b sont les phases des ondes signal et référence, I_0 est l'intensité moyenne et V est la visibilité des interférences. La visibilité dépend de l'intensité relative des deux ondes signal et référence. La meilleure visibilité est obtenue lorsque les intensités sont identiques et que la différence de chemin optique entre les ondes signal et référence est plus petite que la longueur de cohérence de la source. Dans ces conditions, la visibilité est égale à un. La visibilité est généralement comprise entre zéro et un. Il est à noter que les deux intensités I_1 et I_2 sont en opposition de phase et que leur somme est constante. L'accès aux deux sorties peut permettre de compenser les fluctuations éventuelles de la source.

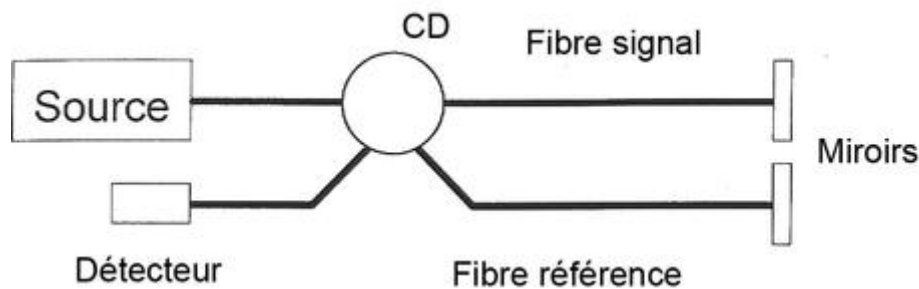


Figure II- 8 Interféromètre de Michelson à fibre optique. CD est un coupleur directionnel

La Figure II-8 montre l'interféromètre de Michelson qui est une légère variante de celui de Mach-Zhender. Les fibres référence et signal sont chacune terminées par des miroirs qui renvoient la lumière sur elle-même. Le coupleur directionnel CD sert à la fois à combiner et à diviser les faisceaux. La sensibilité de cet interféromètre est double par rapport à celui de Mach-Zhender grâce à l'aller et au retour du signal dans la zone sensible. Toutefois cette configuration a un inconvénient important en renvoyant du signal vers la source. Ce retour peut engendrer des instabilités au niveau de la source [22], spécialement dans le cas des diodes laser. Dans la pratique pour éviter ce problème on rajoute juste après la source un isolateur optique qui ne laisse passer la lumière que dans un sens, donc

Chapitre II les capteurs Optiques

empêche tout retour vers la source. Les isolateurs optiques utilisent l'effet Faraday, pour faire tourner la polarisation, et un polariseur pour bloquer ou non l'onde. L'autre inconvénient d'avoir ce retour sur la source est de ne plus avoir accès à l'intensité en opposition de phase et de ne plus pouvoir facilement compenser les fluctuations de la source.

Un autre interféromètre à deux ondes est celui de Sagnac, représenté sur la Figure II-9. Il a été principalement développé pour mesurer la vitesse angulaire, comme dans le cas du gyroscope [23].

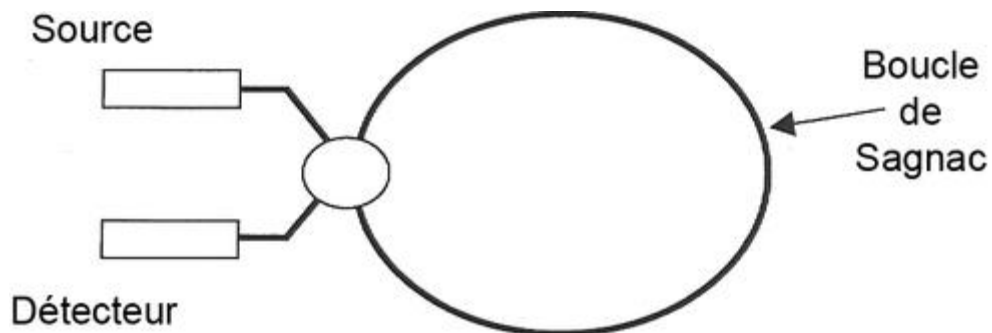


Figure II-9 Interféromètre de Sagnac à fibre

L'onde signal et référence se propagent maintenant dans la même fibre et tournent dans la boucle à fibre (fiber loop) dans le sens et le sens inverse des aiguilles d'une montre. A première vue, il apparaît que les deux ondes parcourent les mêmes chemins et sont donc toujours en phase, ceci est vrai si nous avons des effets réciproques. Cependant des effets non-réciproques peuvent produire des déphasages notamment : une vitesse angulaire [24], un champ magnétique [25] ou un mesurande dynamique [26]. Prenons pour exemple l'effet d'une déformation mécanique dynamique s'appliquant près d'une des extrémités de la boucle à fibre. A un instant donné, les ondes signal et référence arrivant sur le coupleur directionnel pour interférer n'auront pas "vu" la même déformation, donc le déphasage ne sera plus nul.

b. Interféromètre à ondes multiples

Jusqu'à présent, nous avons seulement considéré des interféromètres à deux ondes. Cependant des interféromètres à ondes multiples peuvent être aussi utilisés.

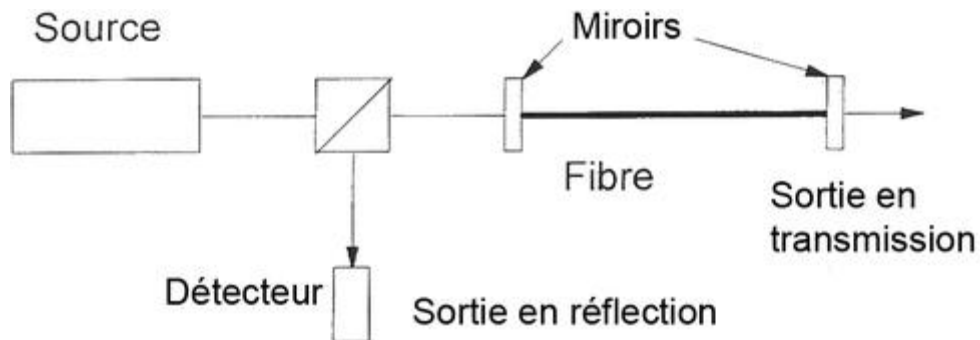


Figure II-10 Interféromètre de Fabry-Perot à fibre

L'exemple type est l'interféromètre de Fabry-Perot (FP), représenté sur la Figure II-10. La fonction de transfert d'un Fabry-Perot est bien connue [27] :

$$I = \frac{I_0}{1 + F \sin^2(\phi/2)} \quad (\text{II. 11})$$

où ϕ est la différence de phase subie par la lumière après un aller-retour dans la cavité et F est la finesse caractérisant la résolution en déphasage du composant et s'écrit :

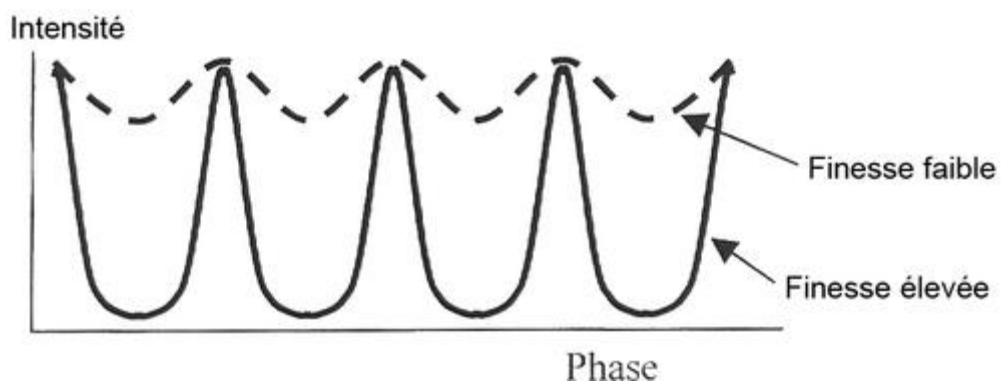


Figure II-11 Transmission d'un Fabry-Perot en fonction du déphasage et pour deux finesses différentes

$$F = \frac{4R}{(1 - R)^2} \quad (\text{II. 12})$$

où R le coefficient de réflexion des miroirs.

Chapitre II les capteurs Optiques

L'intervalle spectral libre, distance séparant deux pics consécutifs, est une autre caractéristique importante d'un interféromètre de Fabry-Perot.

$$\Delta\nu = \frac{c}{2Ln} \quad (\text{II.13})$$

où c est la vitesse de la lumière, L est la distance séparant les deux miroirs et n est l'indice de réfraction du milieu.

La sensibilité d'un tel dispositif est augmentée due aux nombreux aller-retours effectués par les ondes co-propagative et contra-propagative. La réponse typique d'un interféromètre de Fabry-Perot pour deux finesses est représentée sur la Figure II-11. Plus le coefficient de réflexion des miroirs est important plus le nombre d'aller-retour dans la cavité est élevé et la finesse est importante.

De façon pratique, il est relativement difficile de déposer des miroirs de haute-réflexivité en bout de fibre, cependant Stone [28] a montré qu'il était possible d'obtenir une finesse de 300. De fait, les interféromètres de Fabry-Perot les plus communs utilisent simplement la réflexion de Fresnel de 4% qui a lieu à chaque extrémité d'une fibre nue dans l'air, leurs transmission ressemblent à celle de la faible finesse de la Figure II-11. Il est aussi possible d'utiliser comme miroir de cavité des réseaux de Bragg comme l'ont démontré Henderson et al [28].

c. Interférométrie à deux longueurs d'onde

Nous l'avons vu précédemment un interférogramme est périodique lorsque l'on superpose des ondes monochromatiques. Afin d'élargir la plage d'utilisation, il est possible de faire interférer des ondes ayant des longueurs d'onde très proches [29], cette technique peut être aussi employée dans les interféromètres à fibre comme l'ont montré [36].

Lorsqu'un interféromètre à deux ondes est illuminé par deux sources monochromatiques de longueur d'onde λ_1 et λ_2 , chacune d'elles va donner un interférogramme avec une certaine visibilité (prenons un pour simplifier) et une certaine intensité moyenne I_0 (identique pour λ_1 et λ_2 , là encore pour simplifier), donc l'intensité finale est :

$$I = I_0 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi n l}{\lambda_1}\right) \right] + I_0 \left[1 + \cos\left(\frac{2\pi n l}{\lambda_2}\right) \right] \quad (\text{II.14})$$

Cette expression peut être ré-écrite :

Chapitre II les capteurs Optiques

$$I = I_0 \left[1 + V \cos \left(\pi n l \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{\lambda_1 \lambda_2} \right) \right] \quad (\text{II. 15})$$

où V représente la fonction visibilité des franges et s'écrit :

$$V = \cos \left(\pi n l \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} \right) \quad (\text{II. 16})$$

Dans cette configuration la mesure est équivalente à celle d'un interféromètre à une seule longueur d'onde. En revanche la plage sur laquelle la mesure est obtenue sans ambiguïté est reliée à la période de V , en conséquence la plage de mesure est augmentée d'un facteur $\frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$.

d. Interférométrie à faible cohérence

Nous l'avons déjà mentionné au début de ce chapitre, pour que les franges d'un interférogramme soient visibles il faut que la différence de chemin optique entre les ondes soit inférieure à la longueur de cohérence de la source l_c et vaut :

$$l_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} \quad (\text{II. 17})$$

où λ est la longueur d'onde centrale et $\Delta\lambda$ est la largeur spectrale de la source.

Typiquement, les diodes laser ont une longueur de cohérence comprise entre les dizaines de centimètres et les mètres, alors que pour les DEL (Diode Electro Luminescente) elle varie entre les dizaines et les centaines de micromètre. En conséquence, en illuminant un interféromètre avec une source à faible cohérence, il est possible d'identifier la position pour laquelle la Différence de Chemin Optique (DCO) est nulle en cherchant la position où les franges ont la meilleure visibilité. On peut donc utiliser cette technique pour lever l'ambiguïté sur l'ordre des franges (i.e. déplacement réel du système de franges) qui est un problème récurrent en interférométrie. Ainsi la plage de mesure est augmentée.

Chapitre II les capteurs Optiques

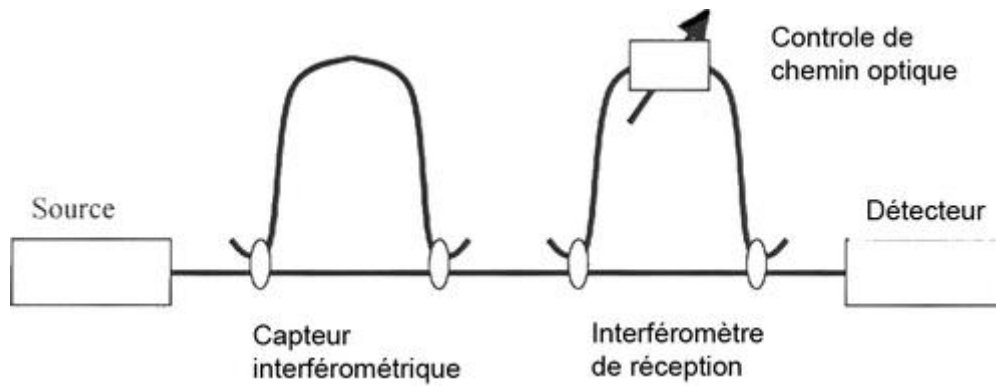


Figure II-12 Double interféromètre à fibre. l'OPD control permet de faire varier la différence de chemin optique du second interféromètre

Il est possible de mesurer la DCO d'un interféromètre en utilisant la configuration de la Figure II-12. Ce montage est constitué d'un double interféromètre, un pour la mesure et l'autre pour la référence, dont le deuxième à la possibilité de faire varier sa DCO propre. Pour mieux comprendre le rôle de ce deuxième interféromètre, étudions l'influence de la DCO variable du second interféromètre sur l'intensité vue par le détecteur. Si la DCO est proche de zéro des franges sont observées. Lorsque la DCO est augmentée au delà de la longueur de cohérence de la source les franges disparaissent. En continuant d'augmenter la DCO de façon à s'approcher de celle de l'interféromètre de mesure, des interférences peuvent alors réapparaître. Ces interférences sont obtenues entre les deux ondes suivantes et si leur déphasage est inférieur à la longueur de cohérence de la source :

- Onde 1 : l'onde prenant le long chemin de l'interféromètre de mesure et le petit chemin de l'interféromètre de référence.
- Onde 2 : l'onde prenant le petit chemin de l'interféromètre de mesure et le long chemin de l'interféromètre de référence.

En conséquence la visibilité des franges montre un maximum local, comme le montre la Figure II-13, lorsque les interféromètres de mesure et de référence ont leurs DCO égales. Une fois la DCO déterminée, l'obtention du mesurande est immédiate .

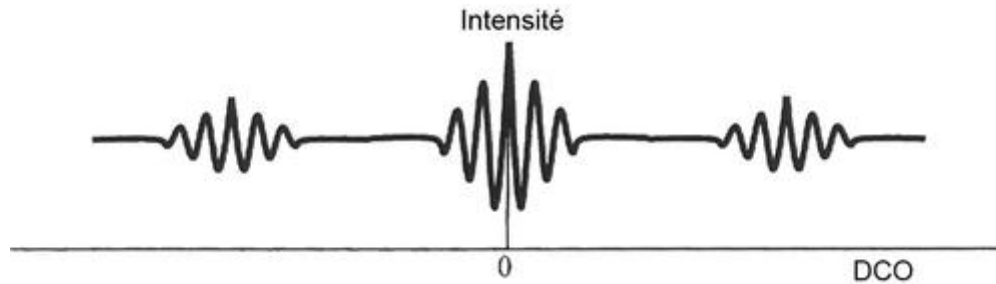


Figure II-13 Représentation schématique des franges d'interférences d'un double interféromètre en fonction de la différence de chemin optique (DCO)

Dans la pratique il existe différentes voies pour faire varier la DCO d'un interféromètre. Les méthodes les plus simples sont basées sur le déplacement d'un miroir, monté sur un platine motorisée de translation, afin de faire varier la longueur d'un des bras de l'interféromètre [30]. Cette technique est simple et offre une large gamme de variation mais possède l'inconvénient d'être en espace libre. Il faut donc extraire la lumière de la fibre puis la réinjecter, ce qui est source de pertes et demande une bonne précision de positionnement des éléments optomécaniques. Il est toutefois possible de réaliser cette variation de longueur sans faire sortir la lumière de la fibre, pour cela la fibre est collée sur un élément piézoélectrique se dilatant ou se contractant en fonction du signal électrique appliqué. Cette technique a cependant une gamme de variation très limitée.

II-5-3- Détermination de la phase

Dans un montage interférométrique, la clé pour déterminer le mesurande est la mesure sans ambiguïté et avec une bonne sensibilité de la différence de phase.

Si l'on suppose que la phase de l'onde signal (ϕ_a) est composée d'un terme continu et d'un harmonique d'amplitude faible, la détermination du mesurande sera liée à la configuration de l'interféromètre comme le montre la Figure II-14 et la meilleure sensibilité sera obtenue pour la position Q. On dit alors que les ondes (signal et référence) sont en quadrature.

Chapitre II les capteurs Optiques

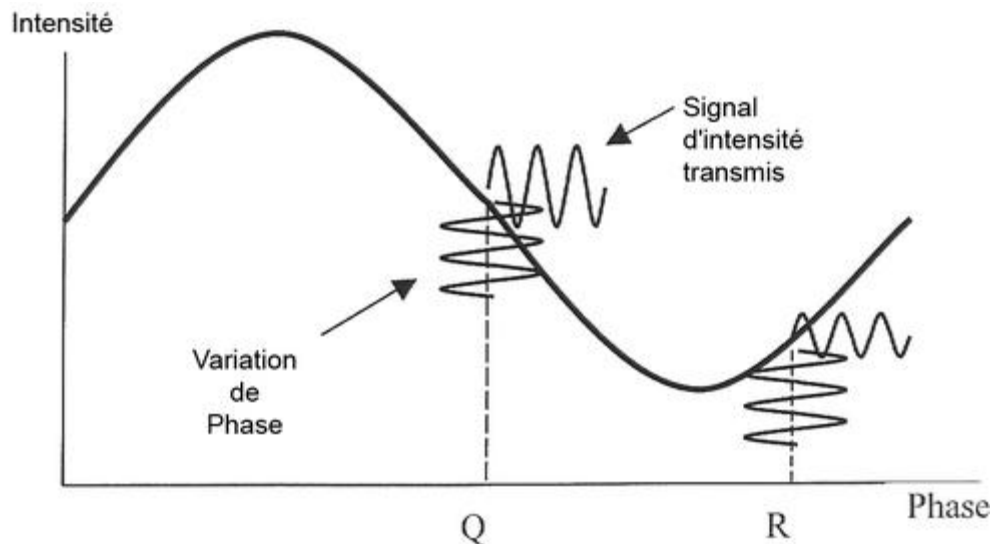


Figure II-14 Détermination de la phase pour deux points particuliers

Cette position est obtenue lorsque la différence de phase est :

$$\phi_a - \phi_b = \frac{\pi}{4} + N\pi \quad (\text{II. 18})$$

Certaines techniques sont basées sur l'ajustement de ϕ_b (phase de l'onde référence) pour maintenir l'interféromètre en quadrature. On peut donc soit :

- faire varier la longueur de la fibre à l'aide d'élément piézoélectrique
- faire varier la longueur d'onde de la diode laser en contrôlant le courant d'injection voire la température.

Des techniques passives sont aussi possibles, elles utilisent des séquences prédéterminées de déphasage de l'onde référence. Prenons par exemple les cas où l'on déphase successivement de $\frac{\pi}{2}$ radians, l'intensité en sortie est :

$$I_i = I_0 \left[1 + V \cos \left(\phi + i \frac{\pi}{2} \right) \right] \quad (\text{II. 19})$$

avec i variant entre 1 et 4.

Une combinaison des quatre intensités donne le déphasage :

$$\tan(\phi) = \frac{I_3 - I_1}{I_4 - I_2} \quad (\text{II. 20})$$

Pour finir, on peut citer la méthode basée sur l'ajout d'un décalage alternatif de ϕ_b qui s'apparente à la modulation de phase de la porteuse.

L'intensité s'écrit :

Chapitre II les capteurs Optiques

$$I = I_0[1 + V \cos(\phi_a - \phi_b - \omega_m t)] \quad (\text{II. 21})$$

La démodulation est obtenue par des techniques de boucle à verrouillage de phase (Phase-locked loop) très bien connues en électronique.

II-6- Capteurs à modulation de polarisation

Les capteurs à modulation de polarisation utilisent les changements de l'état de polarisation de la lumière se propageant dans la fibre optique induits par le mesurande à détecter. Dans ce titre, nous allons donner les bases sur les propriétés physiques et les techniques utilisées pour réaliser un capteur polarimétrique. Nous évoquerons aussi leurs limitations.

II-6-1- Principes de fonction

Avant de rentrer dans le détail des capteurs à modulation de polarisation, nous allons donner un bref rappel sur les propriétés des ondes se propageant dans les fibres en se focalisant sur la polarisation.

L'état de polarisation d'une onde électromagnétique se propageant suivant l'axe z peut être décrit par l'extrémité du vecteur champ électrique \vec{E} dans le plan xOy . La Figure II-15 montre un exemple de polarisation elliptique. Trois état de polarisation peuvent être définis: linéaire, circulaire et elliptique.

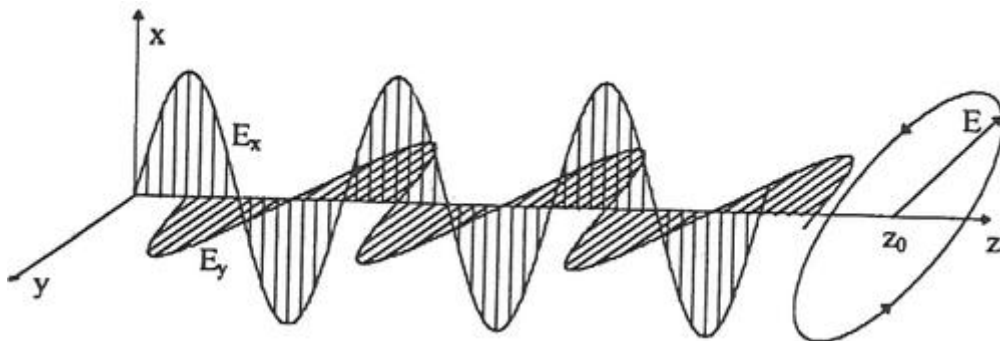


Figure II-15 Exemple de polarisation d'une onde électromagnétique

Seul le champ électrique \vec{E} est représenté.

a. Polarisation linéaire

Un état de polarisation linéaire est caractérisé par une oscillation du vecteur champ électrique suivant une droite. Dans le cas d'une onde se propageant suivant l'axe z , la droite décrite par \vec{E} appartient au plan xOy . Les composantes de E_x et E_y ont un déphasage de $\delta\phi = \phi_y - \phi_x = m\pi$. Si m est nul ou un entier pair les composantes

Chapitre II les capteurs Optiques

sont dites en phase. Si m est un entier impair la droite de polarisation est orientée orthogonalement à la précédente (voir Figure II-16).

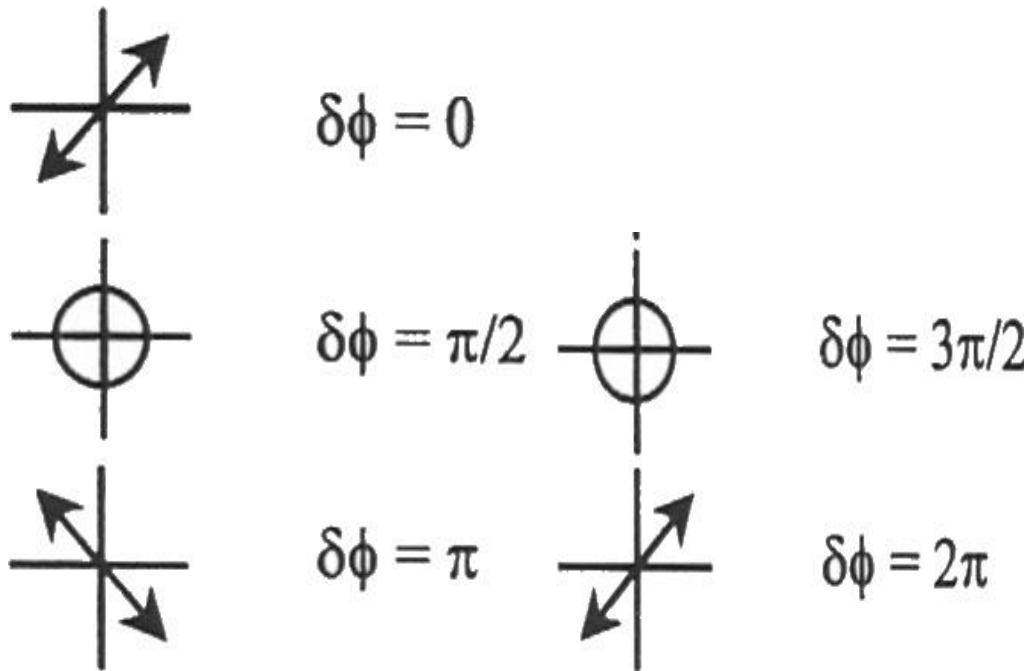


Figure II-16 Etat de polarisation pour différents déphasages

b. Polarisation circulaire

Un état de polarisation circulaire est caractérisé par une amplitude identique pour les deux composantes E_x et E_y et une différence de phase entre elle de :

$$\delta\phi = \phi_y - \phi_x = \pm \frac{\pi}{2} \quad (\text{II. 22})$$

Dans ces conditions l'extrémité du vecteur champ électrique décrit un cercle soit dans le sens des aiguilles d'une montre soit dans le sens inverse. Le sens de rotation est défini en regardant l'onde arrivé sur soi. Une polarisation circulaire droite (i.e. \vec{E} tourne dans le sens des aiguilles d'une montre) est obtenu lorsque

$$\delta\phi = \frac{-\pi}{2} + 2m\pi \quad \text{Où } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Par analogie un déphasage de

$$\delta\phi = \frac{\pi}{2} + 2m\pi \quad \text{Où } m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

donnera une polarisation circulaire gauche, \vec{E} tourne dans le sens trigonométrique.

Une polarisation circulaire peut être uniquement spécifiée par son amplitude et le sens, gauche ou droite, de rotation de \vec{E} .

Chapitre II les capteurs Optiques

c. Polarisation elliptique

Dans toutes les autres circonstances, l'extrémité du champ électrique décrit, dans le sens ou sens inverse trigonométrique, une ellipse dans le plan xOy lors de sa rotation (voir Figure II-15). L'amplitude des composantes E_x et E_y n'est pas identique et leur déphasage n'a pas de valeur caractéristique. Les polarisations circulaire et linéaire sont des cas particuliers de la polarisation elliptique.

Il existe plusieurs représentations formelles de la polarisation ainsi que de la modélisation de la transmission d'une lumière polarisée au travers d'un milieu polarisant par exemple les milieux biréfringents. La méthode la plus répandue est celle de Jones que nous allons détailler dans la suite.

II-6-2- Détermination de polarisation de la lumière

a. matrices de Jones

Le formalisme des matrices de Jones nous renseigne sur la polarisation de la lumière se propageant à travers un milieu complexe, l'état de polarisation peut être évalué en utilisant l'algèbre matricielle [33]. L'état de polarisation d'une onde est représenté par deux composantes à valeur complexe de la forme :

$$a = \begin{vmatrix} E_x e^{j\phi_x} \\ E_y e^{j\phi_y} \end{vmatrix} \quad (\text{II. 23})$$

où E_x et E_y représentent les amplitudes, et ϕ_x et ϕ_y sont les phases des composantes de \vec{E} dans le plan xOy .

L'expression précédente décrit le cas général d'une onde polarisée elliptiquement se propageant suivant l'axe z . Dans le cas d'une polarisation linéaire faisant un angle θ avec l'axe x , la matrice de Jones devient :

$$a = \begin{vmatrix} E_x \cos(\theta) \\ E_x \sin(\theta) \end{vmatrix} \quad (\text{II. 24})$$

Une polarisation circulaire sera décrite par :

$$a = \begin{vmatrix} E \cos(\omega t) + i \sin(\omega t) \\ -E \sin(\omega t) + i \cos(\omega t) \end{vmatrix} \quad (\text{II. 25})$$

En prenant la partie réelle de chaque composantes de l'onde on trouve :

Chapitre II les capteurs Optiques

$$\begin{aligned} E_x &= E \cos(\omega t) \\ E_y &= -E \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (\text{II. 26})$$

Lorsque $t=0$ le vecteur champ électrique est donné par $E_x=E$ et $E_y=0$, alors si t augmente, E_x diminue en restant positif et E_y augmente en étant négatif. Par conséquent \vec{E} décrit le cercle dans le sens des aiguilles d'une montre.

Maintenant intéressons nous aux matrices décrivant les différents milieux rencontrés par la lumière. L'exemple le plus simple est la matrice de Jones d'un milieu absorbant isotrope, donc qui atténue la transmission mais ne modifie pas l'état de polarisation. Un tel milieu est représenté par la matrice :

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & 0 \\ 0 & \alpha \end{bmatrix} \quad (\text{II. 27})$$

où α est l'atténuation du milieu.

Un polariseur idéal ne laissera passer qu'une seule direction du champ électrique et donc bloquera l'ensemble des autres. Un polariseur orienté suivant l'axe x aura pour matrice :

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

et une onde polarisée de façon quelconque n'aura après la traversée du polariseur plus de composante sur l'axe y :

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_x \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 28})$$

De façon générale, la matrice d'un polariseur dont l'axe de transmission fait un angle θ avec l'axe x dans le plan xOy s'écrit :

$$P = \begin{bmatrix} \cos^2(\theta) & \cos(\theta) \sin(\theta) \\ \cos(\theta) \sin(\theta) & \sin^2(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II. 29})$$

L'état de polarisation de sortie d'un système composé de plusieurs éléments est obtenu en multipliant l'état de polarisation d'entrée par la série des matrices individuelles des différents éléments rencontrés tout au long du trajet optique. La multiplication matricielle n'étant pas commutative, il faut donc faire très attention à l'ordre des matrices.

Chapitre II les capteurs Optiques

b. Retardeur optique : lame quart ou demie onde

Un retardeur optique est un composant réalisé avec un matériaux biréfringent et est utilisé pour changer l'état de polarisation de l'onde incidente. L'onde à l'entrée va se décomposer suivant les axes principaux du milieu, appelés axe ordinaire et extraordinaire. Les deux composantes vont se propager à des vitesses différentes caractérisées par les indices de réfraction ordinaire n_o et extraordinaire n_e . A la sortie les deux composantes n'ont plus le même déphasage et donc plus le même état de polarisation qu'à l'entrée.

La différence relative de phase $\Delta\phi$ entre les axes ordinaire et extraordinaire est donnée par :

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d |n_e - n_o| \quad (\text{II. 30})$$

où d est l'épaisseur du matériau et λ est la longueur d'onde.

L'épaisseur du matériau biréfringent d est choisie pour introduire le déphasage désiré. Les retardeurs optiques les plus connus sont les lames demie onde et quart d'onde. Une lame demie onde fait tourner la direction d'une polarisation linéaire de 90° . Une lame quart d'onde introduit un déphasage de $\pi/2$ entre les composantes de la lumière se propageant suivant les axes ordinaire et extraordinaire.

Une lame quart d'onde change une polarisation linéaire orientée à 45° de ses axes principaux en une polarisation circulaire. Dans le cas contraire, une polarisation circulaire donnera une polarisation linéaire à 45° des axes principaux de la lame.

c. Fibre optique biréfringente

Pour réaliser des mesures sur le principe de la modulation de polarisation, une des conditions essentielles est d'utiliser des fibres permettant de préserver l'état de polarisation des ondes lors de la propagation. En théorie, les fibres standards devraient garder l'état de polarisation mais dans la pratique une onde entrant avec un certain état de polarisation ressortira après quelques dizaines de centimètres avec une polarisation complètement aléatoire, ceci étant dû notamment à des micro-perturbations introduites lors de la fabrication. On a donc recours à des fibres optiques biréfringentes qui possèdent deux axes orthogonaux principaux. Ces deux axes sont appelés axe lent et rapide au vue de la différence de vitesse de propagation des ondes suivant ces axes. Une onde guidée polarisée suivant l'axe ayant un indice de réfraction

Chapitre II les capteurs Optiques

élevé (axe lent) aura une vitesse plus petite que l'onde polarisée suivant un axe orthogonal (axe rapide)

La biréfringence d'une fibre est donnée par la différence des indices de réfraction des deux axes :

$$B = n_s - n_f \quad (\text{II.31})$$

où n_s et n_f sont respectivement les indices de réfraction des axes lent et rapide. La biréfringence est communément définie par la longueur de battement L_B , traduisant la longueur de fibre nécessaire pour que la différence de phase entre les deux polarisations orthogonales soit de 2π :

$$L_B = \frac{\lambda}{n_s - n_f} = \frac{\lambda}{B} \quad (\text{II.32})$$

Si la fibre est soumise à des perturbations mécaniques de périodes comparable à L_B , il en résultera un fort couplage entre les deux polarisations orthogonales. Lors de la fabrication des fibres, de telles perturbations peuvent être introduites c'est pourquoi un effort particulier est fait pour éviter toute courbure et twist de la fibre lors de l'étirage. Le maintien de la polarisation sera assuré si la longueur de battement est plus petite que la dizaine de centimètres. Dans le cas où la lumière injectée a sa polarisation alignée sur l'un des axes principaux, elle sera guidée sans variation de son état de polarisation.

Il existe deux principales méthodes pour introduire de la biréfringence dans les fibres optiques :

1. On peut modifier les caractéristiques de guidage du cœur par altération de sa géométrie, par exemple en cassant la symétrie circulaire. On peut citer les fibres à cœur elliptique (voir Figure II-17) qui ont des longueurs de battement de quelques millimètres [34].
 2. Une autre possibilité est de soumettre le cœur de la fibre à une contrainte asymétrique, entraînant par la même occasion une asymétrie du profil d'indice. Ceci est réalisé en introduisant des régions à fort dopage autour du cœur (voir Figure II-17).
-

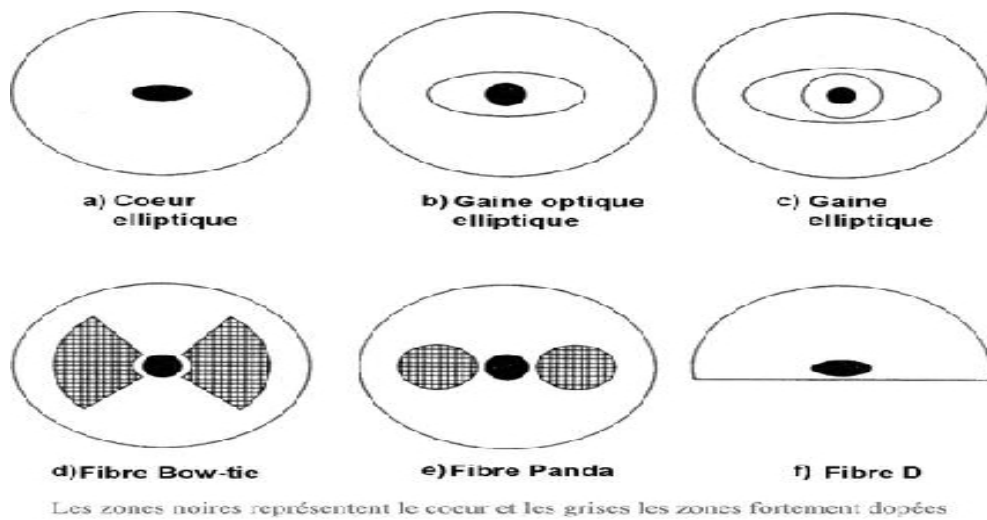


Figure II-17 Exemples de fibres optiques à haute biréfringence

La fibre bow-tie a la plus haute valeur de biréfringence de 0.5mm. Récemment, avec le développement des fibres microstructurées, de nouvelles fibres biréfringentes sont apparues avec des degrés de liberté plus grand concernant : la valeur de la biréfringence et surtout les caractéristiques de guidage (zone d'unimodalité, courbe de dispersion, ...).

II-6-3- Capteurs polarimétriques

Dans la majorité des cas les capteurs polarimétriques utilisent une source polarisée linéairement qui est injectée à 45° des axes principaux de la fibre biréfringente afin que les deux modes de propagation (lent et rapide) soient également excités.

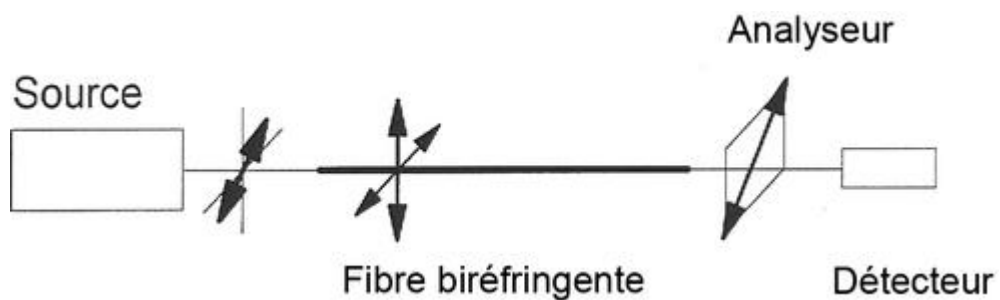


Figure II-18 Représentation schématique d'un capteur polarimétrique

L'utilisation d'une lame demie-onde peut grandement faciliter l'ajustement de l'orientation de la polarisation d'entrée. En sortie de la fibre biréfringente, un analyseur (i.e. polariseur) est placé devant le détecteur pour connaître l'état de polarisation (voir figure II-18). Le mesurande va faire tourner la polarisation

Chapitre II les capteurs Optiques

entraînant une variation d'intensité vue par le détecteur. Cette configuration possède l'inconvénient d'être sensible aux variations d'intensité de la source ou de l'injection.

L'utilisation d'un prisme de Wollaston décomposant la lumière en deux faisceaux avec des polarisations orthogonales permet de s'affranchir de ce problème, en utilisant des techniques similaires des paragraphes "Micro-courbures périodiques" et "Champ évanescent". Toutefois l'alignement entre le prisme, les deux détecteurs et les axes principaux de la fibre reste assez délicat.

Nous allons maintenant utiliser le formalisme des matrices de Jones pour analyser ce composant. Comme précisé précédemment, les deux modes de la fibre biréfringente, ayant des polarisations orthogonales, sont excités de façon identique. Dans ce cas, le champ électrique s'écrit :

$$E_0 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 33})$$

Le champ électrique incident sur le détecteur a pour expression :

$$E = ABE_0 \quad (\text{II. 34})$$

où A et B sont respectivement les matrices de Jones de l'analyseur et de la fibre biréfringente. La fibre peut être vue comme étant une lame de phase modifiant le déphasage entre les deux polarisations. La matrice B a pour expression :

$$B = \begin{bmatrix} e^{j(\phi_a + \frac{\Delta\phi}{2})} & 0 \\ 0 & e^{j(\phi_a - \frac{\Delta\phi}{2})} \end{bmatrix} \quad (\text{II. 35})$$

où ϕ_a est le déphase moyen et $\Delta\phi$ est le déphasage entre les deux polarisations. Ce déphasage est produit par la propagation à travers la fibre.

Dans le cas particulier où l'analyseur est orienté à 45° des axes principaux de la fibre, la matrice A est donnée par :

$$A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II. 36})$$

L'intensité après l'analyseur sera alors :

$$I = E^2 = \frac{I_0}{2} [1 + \cos(\Delta\phi)] \quad (\text{II. 37})$$

Chapitre II les capteurs Optiques

où I_0 est la puissance totale de sortie. En conséquence, comme le montre l'équation précédente un changement de l'état de polarisation entrainera une modification de l'intensité vue par le détecteur et produira un signal sinusoïdal. L'équation précédente est la même que les équations (II. 36) et (II. 37) décrivant l'interférométrie à deux ondes. Certaines techniques de mesure pourront être transposées pour améliorer la sensibilité.

La sensibilité du capteur est dépendante du degré de rotation de polarisation induite par le mesurande et de la rotation minimale détectable. L'influence du mesurande sur l'état de polarisation peut être déterminée comme suit. La phase d'une onde guidée par une fibre de longueur L est :

$$\phi = \beta L = n_{eff} k_0 L \quad (\text{II. 38})$$

où β est la constante de propagation du mode, n_{eff} est son indice effectif et $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda_0}$ le vecteur d'onde dans le vide, avec λ_0 la longueur d'onde dans le vide. La différence de phase entre deux modes guidés de la fibre après une longueur L est :

$$\Delta\phi = \Delta\beta L = \Delta n_{eff} k_0 L \quad (\text{II. 39})$$

où Δn_{eff} est la différence entre les indices effectifs des deux modes de polarisation.

Supposons que la fibre soit soumise à une déformation mécanique extérieure ε . Le déphasage créé par ε est proportionnel à la longueur de la fibre exposée à cette déformation. Il est donc important de considérer la réponse du capteur par unité de longueur. On a donc :

$$\frac{1}{L} \frac{\partial(\Delta\phi)}{\partial\varepsilon} = k_0 \frac{\partial(\Delta n_{eff})}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial\varepsilon} + k_0 \frac{\partial(\Delta n_{eff})}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial\varepsilon} + k \Delta n_{eff} \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial\varepsilon} \quad (\text{II. 40})$$

où D et n sont respectivement la dimension transverse et profil d'indice de la fibre.

Le premier terme de l'équation II. 40 décrit l'effet photo élastique qui est la variation de l'indice de réfraction d'un matériaux en fonction de la déformation mécanique. Dans le cas des fibres circulaires normales, cette variation peut être calculée par l'expression suivante :

$$\frac{\partial n}{\partial\varepsilon} = - \frac{n^3}{2} |p_{12} - \nu(p_{11} + p_{12})| \quad (\text{II. 41})$$

Chapitre II les capteurs Optiques

où ν est le coefficient de Poisson de la silice supposé identique pour le cœur et le Gaine, et p_{11}, p_{12} sont les coefficients élasto-optique de la silice [35].

Le second terme de l'équation II. 40 est relatif à la variation de la section de la fibre soumise à une déformation mécanique. Cette modification de la section va affecter les indices effectifs des modes et donc leurs différences (i.e. Δn_{eff}). Il a été montré que cette contribution à la variation de la différence de phase est très faible et peut être négligée dans la pratique.

Le dernier terme de l'équation II. 40 décrit la variation de longueur de la fibre sous l'effet de la déformation mécanique.

Une étude similaire à la précédente peut être menée pour décrire les changements induits par la température. La variation du déphasage dû à la température (T) est obtenue par :

$$\begin{aligned} \frac{1}{L} \frac{\partial(\Delta\phi)}{\partial T} = k_0 \frac{\partial(\Delta n_{eff})}{\partial n} \frac{\partial n}{\partial T} \\ + k_0 \frac{\partial(\Delta n_{eff})}{\partial D} \frac{\partial D}{\partial T} + k \Delta n_{eff} \frac{1}{L} \frac{\partial L}{\partial T} \end{aligned} \quad (\text{II. 42})$$

L'équation II. 42 comme II. 40 la comporte les mêmes deux premiers termes relatifs aux changements des paramètres opto-géométriques de la fibre (n et D) engendrant une variation de Δn_{eff} . Les variations de l'indice de réfraction sont dues à l'effet thermo-optique. Le troisième terme traduisant ici la compression ou l'expansion thermique, qui a pour valeur :

$$\frac{\partial L}{\partial T} = \alpha L \quad (\text{II. 43})$$

où α est le coefficient dilatation thermique.

La variation du déphasage est principalement due à la modification de l'indice de réfraction avec la température.

Les équations II. 40 et II. 42 sont utilisées pour calculer les sensibilités thermique et mécanique des fibres circulaires. Pour les fibres biréfringentes, le calcul des sensibilités est plus compliqué à cause de la complexité des formes et des matériaux constituant la fibre. On a donc souvent recours à la détermination expérimentale de ces sensibilités pour les fibres les plus exotiques.

Chapitre II les capteurs Optiques

II-7- Conclusion

On peut dire que les capteurs à modulation d'intensité ont des inconvénients, faible sensibilité et stabilité, nécessité d'avoir une compensation pour avoir une utilisation sur le long-terme, mais ont l'énorme avantage d'être faciles à mettre en œuvre et les capteurs polarimétriques peuvent être utilisés pour la détection de différents mesurandes. Si la quantité à mesurer a peu ou pas d'effet sur la polarisation de l'onde, il faut comme pour les capteurs à modulation d'intensité et de phase imaginer un dispositif mécanique pour l'augmenter.

Néanmoins les capteurs polarimétriques sont plus compliqués à mettre en œuvre et plus chers que les capteurs à modulation d'intensité ou de phase. Premièrement il faut utiliser des fibres biréfringentes donc plus onéreuses. Deuxièmement, lors du montage l'alignement et l'orientation des divers composants est délicat.

Ces capteurs sont principalement utilisés pour la mesure de grandeurs électriques.

Mais les capteurs interférométriques sont très largement utilisés pour la détection de divers mesurandes. Le plus commun et le plus simple des capteurs interférométriques est sûrement le capteur de déformation, il permet de suivre l'évolution de la structure. Il peut être par exemple noyé facilement dans une pièce en matériau composite. Les faibles dimensions de la fibre permettent de ne pas altérer les caractéristiques de la pièce. Des configurations où la zone sensible est très longue sont aussi envisageable néanmoins on a plus souvent recours à des capteurs distribués. Pour surveiller par exemple les ouvrages d'art (ponts, barrages, ...) la méthode la plus courante est à base de réseaux de Bragg. Cependant l'interférométrie peut être plus appropriée. L'utilisation d'un double interféromètre est alors utile pour interroger les différentes zones sensibles (via la variation de la DCO).

Il est aussi possible de mesurer des déformations transverses. Néanmoins elles induisent de la biréfringence dans la fibre et sont donc mieux détectées par un capteur à modulation de polarisation.

Chapitre II les capteurs Optiques

L'ensemble des mesurandes induisant une déformation sur la zone sensible est facilement détectable, d'autres quantités sont mesurables comme les champs électrique et magnétique par effet magnéto- et électro-optique.

Les techniques interférométriques permettent des mesures fines et très sensibles mais sont limitées par les techniques qu'il faut mettre en œuvre pour obtenir le déphasage sans ambiguïté. C'est pourquoi les réseaux de Bragg leurs sont préférés.

La sensibilité intrinsèque de la fibre optique à la température est l'un des ses inconvénients majeurs, il faut utiliser des techniques discriminatoires pour séparer les mesurandes. Cet effet est bien-entendu très intéressant si l'on veut faire un thermomètre.

III-1- Captures polarimétriques de courant

Dans ce titre nous allons traiter le cas d'un capteur polarimétrique de courant. Ces capteurs peuvent être utilisés pour mesurer les mesurandes classiques (température, déformation mécanique et pression), néanmoins leur domaine de prédilection est la mesure de courant ou de tension.

III-1-1- Capteurs polarimétriques de courant

Le principe de ces capteurs est de déterminer l'intensité de courant passant dans un conducteur par la mesure de la densité de flux magnétique créé autour du conducteur par le déplacement des charges.

La densité de flux magnétique est déterminée par l'intermédiaire de la rotation de l'état de polarisation de l'onde lumineuse se propageant dans la fibre ou dans le matériau magnéto-optique. Cette rotation est due à l'effet magnéto-optique qui est proportionnel à la longueur d'interaction (L) et à **la constante de Verdet** (la constante de Verdet du matériau considéré (en $rad T^{-1}m^{-1}$). Cette constante varie en fonction de la longueur d'onde de la lumière et de la température. Une constante de Verdet positive correspond à une rotation vers la gauche ou lévogyre, et une constante de Verdet négative correspond à une rotation vers la droite ou dextrogyre. Certains matériaux présentent une constante de Verdet très élevée ($\approx -40 rad T^{-1}m^{-1}$) du matériau utilisé pour le capteur. La rotation angulaire θ (mesuré en degrés) de la polarisation de l'onde traversant le composant est donnée par :

$$\theta = VBL \quad (III.1)$$

où B est l'induction magnétique (Tesla) qui est fonction du courant circulant dans le conducteur ainsi que de sa géométrie.

En raison de la géométrie du capteur optique, de ses dimensions géométriques finies, la distribution du champ magnétique autour du conducteur de phase dû à analyser. L'objectif de ces analyses était de choisir le fil d'étanchéité avec la géométrie appropriée.

Chapitre III : Capteur a modulation de polarisation et de phase

Le fil d'étanchéité choisi a une section transversale rectangulaire. Conducteur avec une section transversale circulaire a également été considéré (Figure III-1).

La Figure III-1a montre la distribution du champ magnétique le long de l'axe "x", situé transversalement par rapport à la canalisation, à une distance de 1 mm au-dessus de celui-ci (Figure III-1b). Le schéma de la Figure III-1c présente pour fins de comparaison de la répartition des champs magnétiques le long de l'axe "x" situé transversalement par rapport à un conducteur circulaire (Figure III-1d). Par souci de comparaison, la distance de l'axe "x" du conducteur était supposé être de 7,3 mm, en se basant sur l'hypothèse que l'axe "x" est située à 1 mm au-dessus du conducteur (avec la même section).

Le schéma III-1a et III-1c montrent que le conducteur avec une section transversale rectangulaire génère une valeur plus uniforme de la tangente de l'élément à l'axe "x" du champ magnétique, que le conducteur circulaire. C'est cette composante du champ magnétique qui est responsable de l'effet Faraday dans le matériau sensoriel situé le long de l'axe "x". Les conclusions tirées de cette analyse ont abouti à l'élaboration d'une tête légèrement modifiée du capteur avec un support spécial.

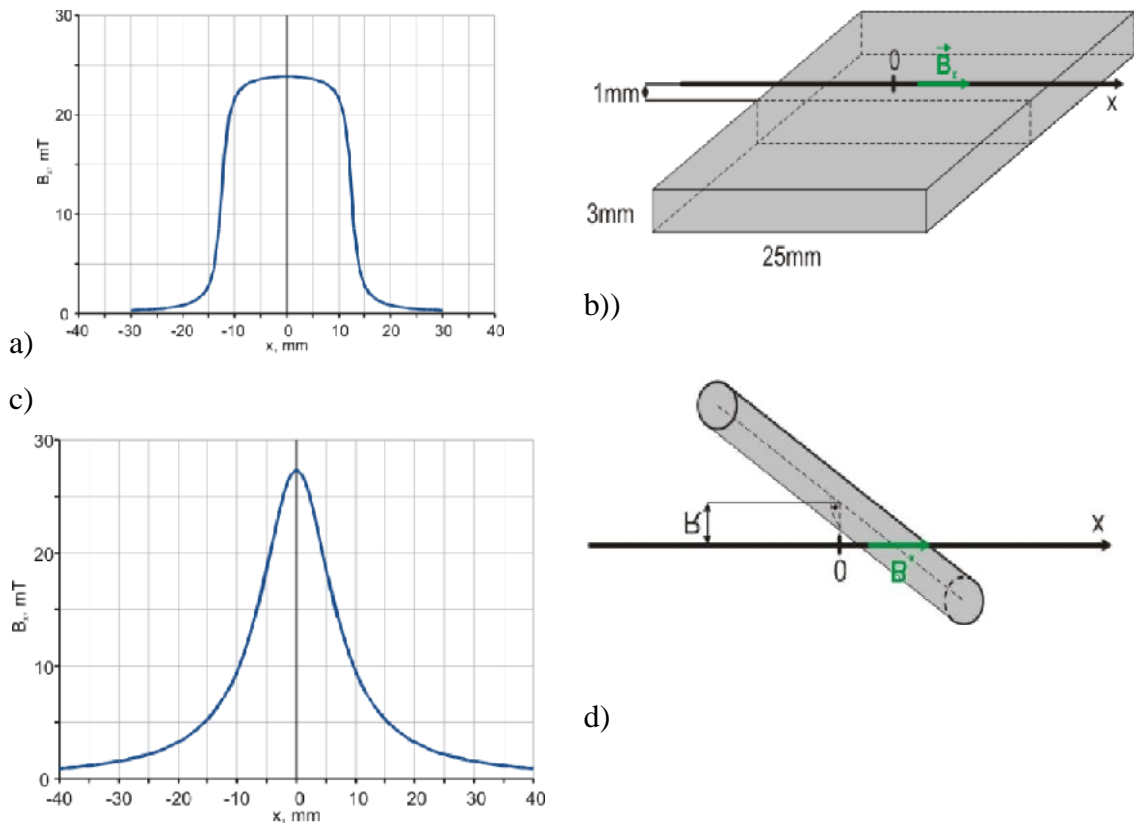


Figure III-1 L'analyse de la répartition du champ magnétique dans le cas d'un conducteur avec une forme rectangulaire et de section transversale circulaire. Les calculs portent sur un courant de 1000 A circulant dans le conducteur.

Chapitre III : Capteur a modulation de polarisation et de phase

Différentes méthodes peuvent être utilisées pour mesurer l'angle θ . La méthode de base étant de faire passer dans un premier temps la lumière dépolarisée par un polariseur. Puis cette onde polarisée est modifiée par l'influence du champ magnétique et pour finir cette rotation est convertie en changement d'intensité par l'analyseur placé devant le détecteur (voir figure III-2).

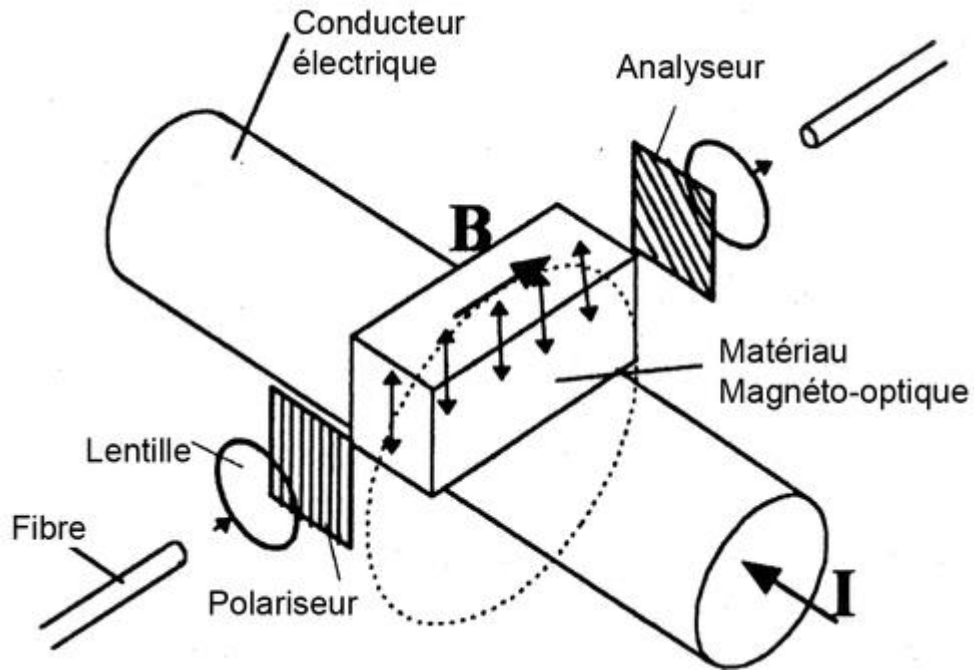


Figure III-2 Schéma d'un capteur optique de courant

L'intensité transmise a pour expression :

$$I = I_0 \frac{1 + \sin(2\theta)}{2} \quad (III.2)$$

où I_0 est l'intensité de la source. L'utilisation des matrices de Jones simplifie grandement l'étude.

L'implémentation la plus simple d'un capteur à fibre optique de courant est représentée sur la figure III-3.

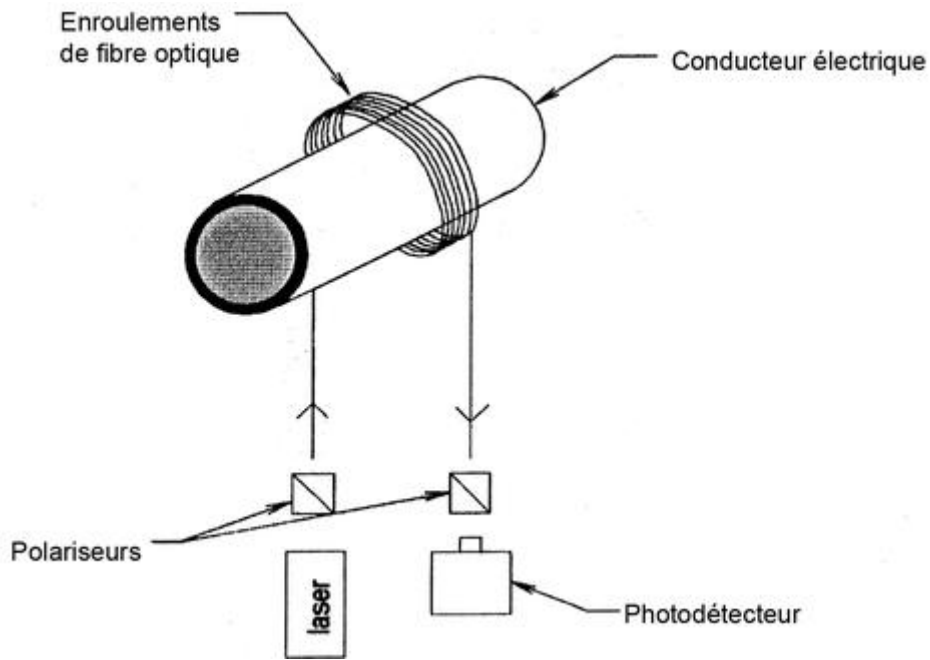


Figure III-3 Capteur de courant à fibre optique

Le milieu magnéto-optique est utilisé la fibre optique elle-même. Cette solution est très facile à mettre en œuvre et est très peu chère. L'inconvénient majeur est la faible constante de Verdet de la fibre de silice ($\sim 8 \times 10^{-6}$ rad/A) qui est significativement inférieure à celles des matériaux cristallins communément utilisés. Il est possible d'augmenter légèrement la sensibilité de cette configuration en effectuant un double passage dans la zone où règne le champ magnétique, soit en rajoutant un miroir en bout de fibre, soit en utilisant un montage identique à l'interféromètre de Sagnac. Il est bien-entendu nécessaire de rajouter un coupleur. Une autre possibilité est d'utiliser un matériau ayant une grande constante de Verdet comme sur la Figure III-4.

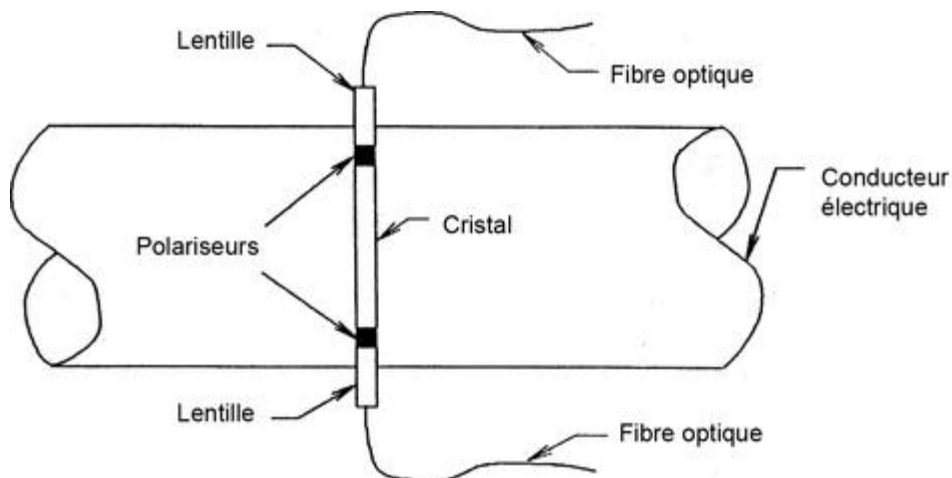


Figure III-4 Capteur à fibre optique à cristal magnéto-optique

Chapitre III : Capteur a modulation de polarisation et de phase

Les sensibilités aux variations de température et aux vibrations des capteurs optiques de courant ont poussé les chercheurs à imaginer et à mettre au point des montages plus complexes. Une possibilité est représentée sur la figure III-5 pour compenser les perturbations.

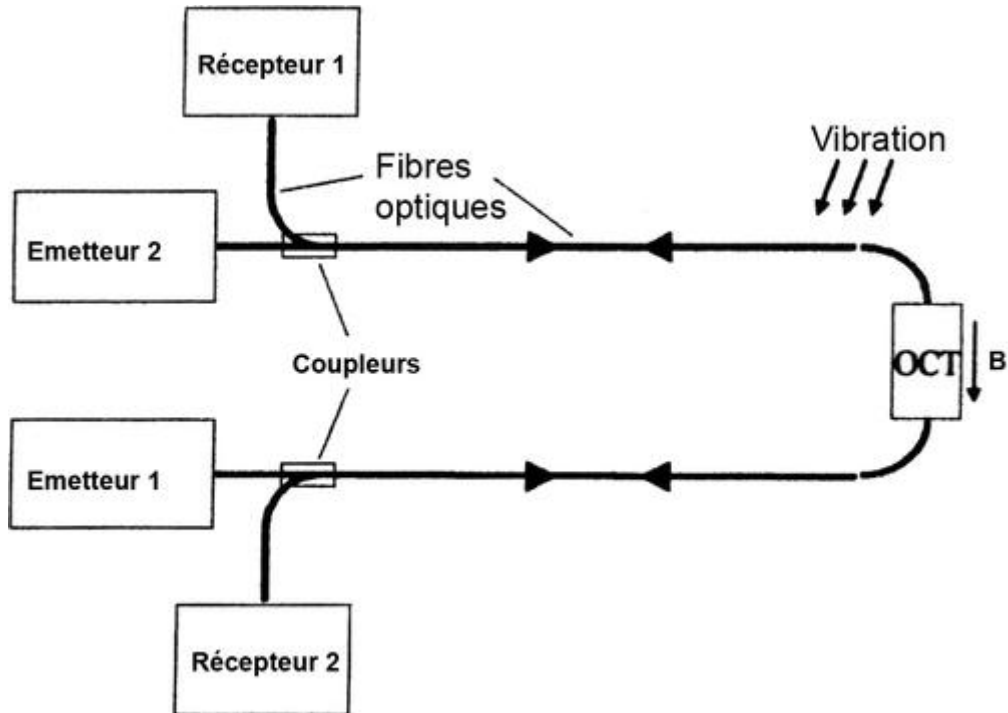


Figure III-5 Capteur à fibre optique compensé en vibrations. OCT (Optical current transducer) représente la partie active du capteur

Deux sources de lumière indépendantes sont injectées et se propagent dans des directions opposées. La rotation de l'état de polarisation est dépendante du sens de parcours de l'onde dans le capteur, en revanche l'intensité des deux sources n'en est pas affectée. En conséquence, on peut utiliser les signaux pour corriger la mesure des vibrations comme le montre la Figure III-6. On peut s'apercevoir que la compensation améliore grandement la mesure pour les faibles courants, par contre pour les fortes intensités elle n'est plus vraiment nécessaire.

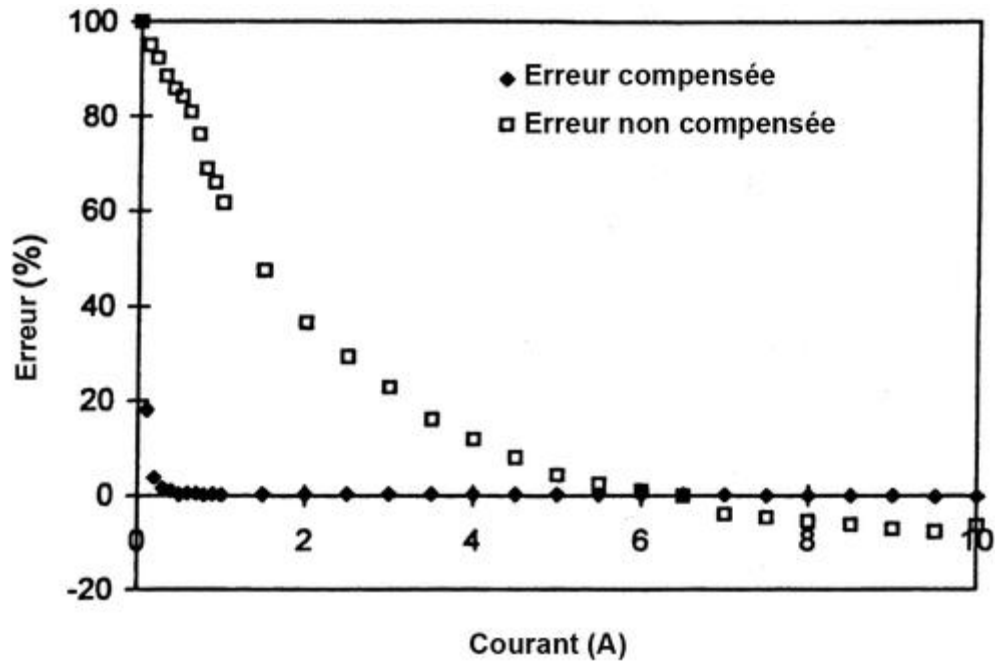


Figure III-6 Effet de la compensation en vibrations sur capteur à fibre optique de courant[37] .

Les erreurs dues à la température proviennent, en majorité, de la grande variation de la constante de Verdet des matériaux comme le montrent les courbes de la figure III-7.

Dans la figure III-7 on peut constater que les deux matériaux FR5 (Faraday Rotator 5 verre) et TGG (Terbium Galium Grenat) sont très sensibles à la température. Néanmoins, cette sensibilité peut être diminuée en utilisant une longueur d'onde de travail adéquate. Si l'on veut réaliser un capteur optique de courant ayant une faible sensibilité à la température le matériaux FR5 est tout indiqué en travaillant à $\lambda = 850nm$ bien que sa constante de Verdet soit plus faible que celle du TGG.

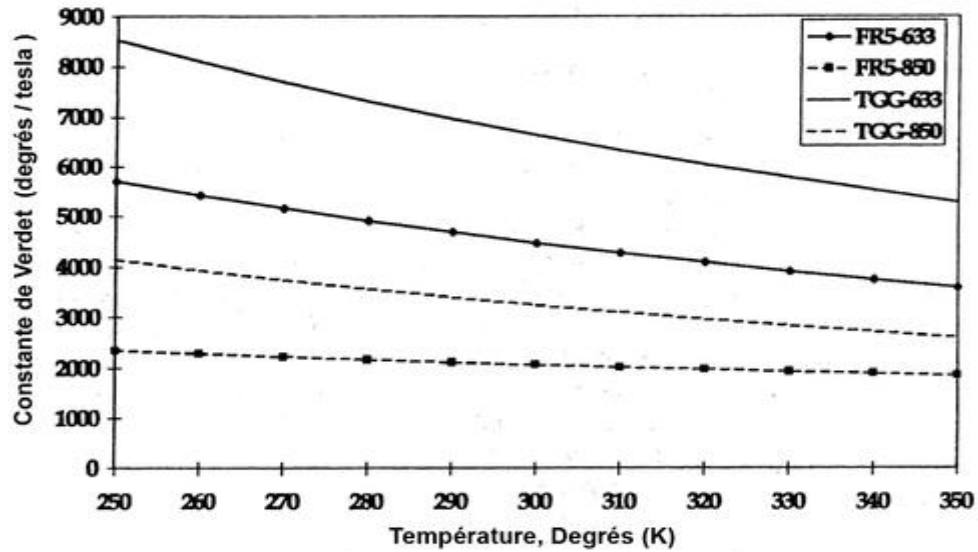


Figure III-7 Courbes de variation de la constante de Verdet en fonction de la température (pour deux matériaux et deux longueurs d'onde 633 et 850 nm. FR5 (Faraday Rotator 5) est du verre et TGG est du Terbium Galium Grenat).

Expérimentalement ce capteur a été réalisé et testé. Ses principales caractéristiques sont les suivantes : Premièrement tous les effets susceptibles de modifier l'intensité d'interférence tels que les variations d'intensité de la source, pertes ou couplage de mode sont compensés.

Deuxièmement tout le capteur excepté la bobine de fibre sensible à l'effet Faraday est réalisé en technologie à maintien de polarisation de manière à minimiser l'influence des perturbations extérieures, à éviter les problèmes de changement d'état de polarisation lorsque la lumière est divisée ou recombinaée par les coupleurs et finalement à être compatible avec les éléments d'optique intégrée sur substrat LiNbO₃.

III-2- L'interféromètre de Mach-Zehnder

Un instrument beaucoup plus souple, dans lequel les faisceaux peuvent être largement séparés, est obtenue lorsque les diviseurs de faisceaux et des miroirs sont des éléments séparés c'est le basilec de l'interféromètre Mach-Zehnder, qui est utilisé pour mesurer des variations d'indice de réfraction, et donc de la densité, dans les flux de gaz compressibles.

L'agencement est représenté dans la figure III-8. La lumière d'une source S dans le plan focal d'une lentille L_1 ainsi corrigée est divisée à la surface semi-réfléchissante A_1 d'un plan parallèle

plaque de verre D_1 en deux faisceaux, qui, après réflexion sur les miroirs plans M_1 , M_2 , sont recombines au A_2 d'une seconde plaque parallèle plane identiques D_2 surface semi-réfléchissante, et émergent à un bien corrigée collecte lentille L_2 . Les quatre surfaces de réflexion sont généralement agencés de manière à être sensiblement parallèles, avec leurs centres au niveau des coins d'un parallélogramme. Supposons que la source est une source ponctuelle de lumière quasi-monochromatique. Soit W_1 soit un plan de front d'onde dans le faisceau entre M_1 et D_2 ; W_2 le plan correspondant de front d'onde dans le faisceau entre M_2 et D_2 , et W'_1 du plan virtuel de front d'onde entre M_2 et D_2 qui ressortiront de D_2 coïncident et co-phraser avec W_1 . à un point P sur W_2 , la différence de phase virtuelle entre les faisceaux émergents est ensuite

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda_2} nh \quad (III. 3)$$

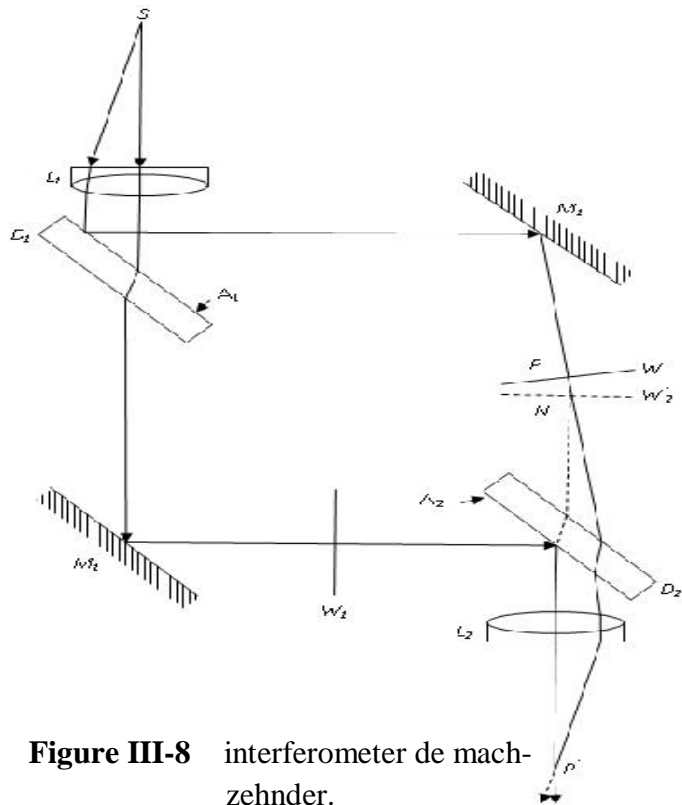


Figure III-8 interferometer de mach-zehnder.

Chapitre III : Capteur a modulation de polarisation et de phase

Où $h = PN$ est la distance normale de P à W_1' et n est l'indice de réfraction du milieu entre W_2 et W_1' . Au point P' dans les faisceaux émergents, conjuguée à P , il y aura une frange brillante si

$$nh = m\lambda_0, \quad |m| = 0,1,2, \dots, \quad (III.4.a)$$

Et le frange noire si

$$nh = m\lambda_0, \quad |m| = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots, \quad (III.4.b)$$

Lorsque W_1' et W_2 sont parallèles, l'intensité est la même pour tout P , et dans ces circonstances, une source étendue donnerait franges à l'infini (c'est à dire dans le plan focal de L_2) similaires à ceux de l'interféromètre JAMIN. En général, cependant, W_1' et W_2 sont inclinés mutuellement, et les franges sont droites parallèles à leur intersection. Ce sont ces franges de coin qui sont normalement utilisés dans l'examen des flux de gaz, et en raison de considérations d'intensité, il est souhaitable de former épine avec la plus grande extension de la source possible sans perte de visibilité. les franges deviennent alors localisé dans la région où les rayons se croisent ont la plus petite séparation angulaire à la sortie S. La position de cette région de la localisation peut être modifiée en faisant varier la combinaison des rotations des éléments utilisés pour produire [39] l'inclinaison mutuelle des W_1' et W_2 . Par exemple, si les surfaces réfléchissantes sont initialement parallèles, et si, pour simplifier, nous considérons le cas des rotations autour d'axes perpendiculaires au plan des centres. la région virtuelle. de localisation est proche M_2 lorsque M_2 est mis en rotation (Figure III-9 (a)), mais se situe entre M_2 et D_2 lorsque les deux M_2 et D_2 sont mis en rotation (Figure III-9 (b)). Cette propriété distingue les franges de coin de l'interféromètre de Mach-Zehnder de ceux donnés par l'interféromètre de Michelson avec la lumière collimaté , qui sont pratiquement localisée dans le voisinage des miroirs.

Dans l'utilisation technique de l'instrument, la région C_1 où le débit de gaz doit être examiné, communément la section de travail d'une soufflerie ou onde de choc tube et une compensation chambre C_2 , sont dans les bras opposés de l'interféromètre, qui est

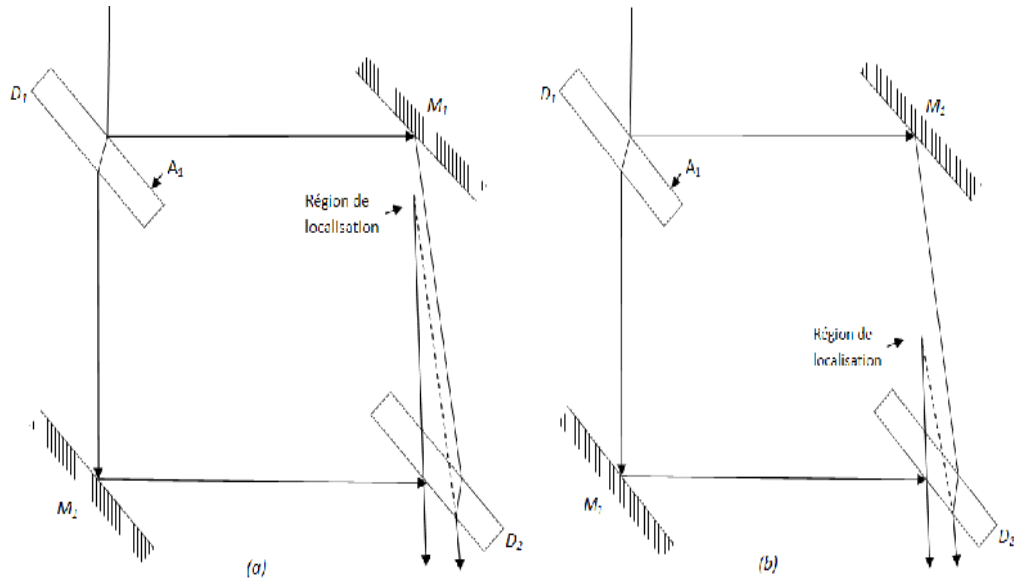


Figure III-9 Illustrant localisation des franges dans l'interféromètre de Mach- Zehnder.

réglé pour donner franges près d'ordre zéro, de l'orientation et de l'espacement désiré, et la quasi-localisé à proximité d'un plan choisi à l'intérieur de C_1 , la normale à la direction de la lumière incidente. Ce plan est mis en image sur une plaque photographique par l'intermédiaire de L_2 et un objectif de caméra hautement corrigée. Les photographies de la figure de franges sont obtenues avec et sans flux de gaz, et la commande de déplacement Δm des deux motifs en des points sélectionnés P du plan de l'image est mesurée, des franges de lumière blanche étant utilisé si nécessaire pour identifier les commandes correspondantes. Si n est l'indice de réfraction du gaz non perturbé en C , et n' l'indice de réfraction dans des conditions d'écoulement, on a

$$\Delta m = \frac{1}{\lambda_0} \int (n' - n) ds, \quad (III.5)$$

où l'intégration est prise le long du trajet du rayon passant par C_1 et atteignant P' . Soit O_x, O_y, O_z soit axes de coordonnées rectangulaires en C_1 , d'origine O dans le plan choisi en C et O_z dans la direction de la lumière incidente, et soit P coordonnées (x, y, o) , soit le point conjugué à P «Quand il n'ya pas de flux en C_1 . Ensuite, si les écarts de réfraction des rayons causés par l'écoulement sont négligeables (III. 5) peut s'écrire

$$\Delta m(x, y) = \frac{1}{\lambda_0} \int_0^s \{n'(x, y, z) - n\} dz, \quad (III.6)$$

où s est la longueur de C_1 et lorsque l'écoulement satisfait à certaines conditions de symétrie (III.6) ne peut être résolue pour $(n' - n)$ en fonction de la Δm mesurée. La

Chapitre III : Capteur a modulation de polarisation et de phase

variation de la densité $d\rho$ en raison de l'écoulement peut alors être déterminée depuis $d\rho$ est proportionnelle à $(n' - n)$.

Dans une forme modifiée en raison de BATES, l'arrangement de Mach-Zehnder peut également être utilisé pour mesurer l'asphéricité de convergence fronts d'ondes sans la nécessité d'une substantiellement exempt d'erreurs référence de front d'onde, comme cela est nécessaire pour la méthode TWYMAN-VERT . L'arrangement, qui est particulièrement avantageux pour tester les performances des grands systèmes d'ouverture, est montré dans la figure III-10 (a).

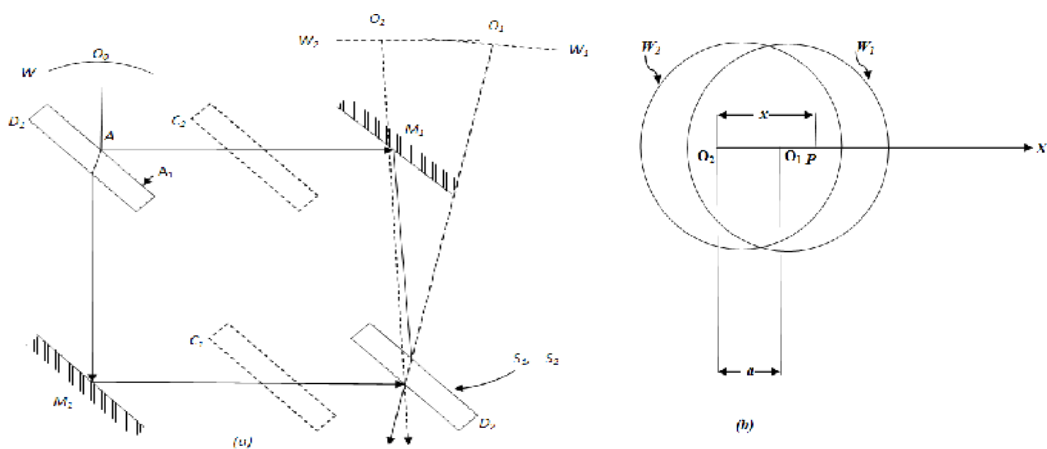


Figure III-10 Le Bates onde avant interféromètre à décalage (a) disposition, (b) champ de vision avec cisailées fronts d'ondes.

Le convergent faisceau à tester, avec principal axe OA dont on prend pour être horizontale, est divisé à D_1 en deux faisceaux convergents aux images S_1, S_2 d'un niveau suffisamment petite source quasi-monochromatique. Au départ, les quatre surfaces réfléchissantes sont verticaux et parallèles, et positionnés de façon que S_1 et S_2 coïncident sur la surface semi-réfléchissante de D_2 . Correspondant à un incident de front d'onde W_1 , le virtuel émergente fronts d'onde W_1 et W_2 , avec des axes principaux O_1S_1 and O_2S_2 , sont alors exactement superposées, et un œil placé derrière D_2 voir le champ de vision éclairé de façon uniforme. D_1 et M_1 sont maintenant tourné dans son ensemble autour d'un axe parallèle à OA , de sorte que O_1S_1 et O_2S_2 sont donnés une petite séparation verticale. Ceci est sensiblement équivalente à inclinaison W_2 , par rapport à

Chapitre III : Capteur a modulation de polarisation et de phase

W_1 un axe horizontal, et le champ est traversé par des franges horizontales équidistantes, qui sont visibles en lumière blanche.

Supposons maintenant que D_2 tourne autour d'un axe vertical passant par S_1 et S_2 , O_1S_1 tourne alors sur S_1 dans un plan horizontal, c'est W_1 est cisailé par rapport à W_2 . Lorsque W_1 et W_2 sont parfaitement sphériques, le motif de franges observée dans la région où ils chevauchement n'est pas affectée par le cisaillement, mais sinon, les franges sont déplacées d'une quantité qui dépend de l'asphéricité de W . Ainsi, si O_2X est un axe de coordonnées dans la direction de cisaillement, avec O_2 de l'origine, de l'ordre de déplacement $\Delta m(x, a)$ à le point P de coordonnées x , est

$$\Delta m(x; a) = \frac{1}{\lambda_0} \{\varphi(x) - \varphi(x - a)\}, \quad (III. 7)$$

où φ le trajet optique entre W_2 et une sphère de centre S_2 et de rayon O_2S_2 , et a est la distance de cisaillement (Figure III-10 (b)). De (III. 7), puisque φ c'est zéro à O_2 ($x = 0$),

$$\Delta m(a; a) = \frac{1}{\lambda_0} \varphi(a); \quad (III. 8a)$$

Et similaire

$$\Delta m(2a; a) = \frac{1}{\lambda_0} \{\varphi(2a) - \varphi(a)\};$$

Et

$$\Delta m(a; a) + \Delta m(2a; a) = \frac{1}{\lambda_0} \varphi(2a); \quad (III. 8b)$$

De la même manière, nous pouvons trouver des expressions $\varphi(3a), \varphi(4a), \dots etc$, et on voit que $\varphi(x)$ l'on peut déterminer à des intervalles d'une à partir des mesures de Δm . Sinon, quand une n'est pas trop grand, nous avons de (III. 7)

$$\Delta m(x; a) \sim \frac{a}{\lambda_0} \frac{d\varphi(x)}{dx}, \quad (III. 9)$$

montrant que Δm est proportionnelle à l'aberration angulaire $\frac{d\varphi(x)}{dx}$ du rayon laissant P . évidence lorsqu'il n'y a pas de symétrie de révolution de l'ensemble du front d'onde peut en principe être examinée en faisant varier la direction du cisaillement,

Chapitre III : Capteur a modulation de polarisation et de phase

Lorsque les fronts d'ondes sont cisailés, les rayons émergents qui se croisent pratiquement à P croisent les diviseurs de faisceau à des angles différents, et si le déplacement des franges sur tonte est de dépendre uniquement de l'asphéricité, cette différence doit être compensée. A cet effet, deux plaques de compensation, identiques aux plaques utilisées pour les diviseurs de faisceau sont introduits dans les bras de l'interféromètre. l'une d'entre elles, C_1 , est fixé parallèlement à D_2 et tourne avec lui pendant la tonte, et l'autre, C_2 , D_2 est reliée au moyen d'une liaison mécanique, ce qui provoque sa rotation à deux fois le taux de D_2 dans le sens opposé. Plus récemment Drew a développé une forme plus simple de l'interféromètre dans lequel des plaques de compensation sont inutiles.



Chapitre IV : Résultat de La Simulation

IV-1- Introduction

Après avoir identifié le principe de fonctionnement l'interféromètre de Mach-Zehnder dans le chapitre précédent, nous allons aborder dans ce chapitre la réalisation de ce interféromètre par des logiciels de simulation MATLAB

L'interféromètre de Mach-Zehnder est un dispositif simple constitué par deux séparateurs de faisceau et deux miroirs suivant les indications du figure III-8 ci-dessus. Le séparateur de faisceau coupe le faisceau lumineux entrant en deux parts.

Chaque faisceau lumineux de fente heurte sur un miroir. Le miroir change la phase du faisceau lumineux sortant.

La figure IV-1 est ci-dessous est une transformation de l'interféromètre de Mach-Zehnder décrit sur la Figure III-8 comme proposé par le prof. Dr. De Raedt.[42]

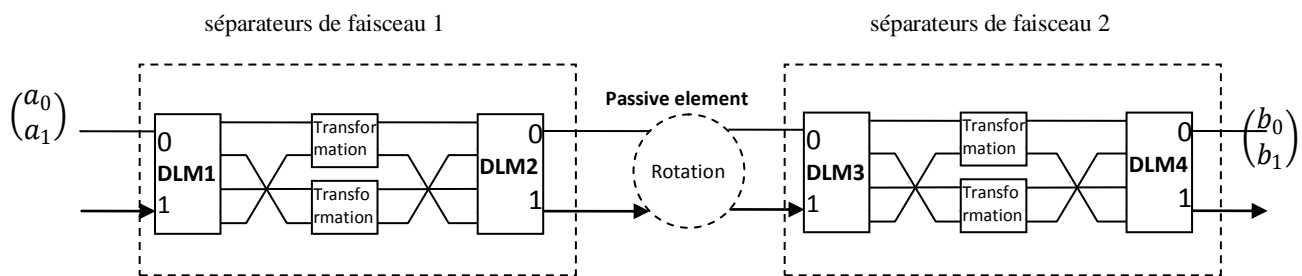


Figure IV-1 le modèle équivalent à l'inter l'interféromètre de Mach-Zehnder

IV-2 L'entre de séparateurs de faisceau(DLM1)

En théorie de quantum la présence d'un photon à un de l'entrée du séparateur de faisceau, a laissé indiquer pour entrer '0' comme montré sur La figure IV-2 ci-dessus est représentée par les amplitudes complexes (a_0, ψ_0) et (a_1, ψ_1) , où ψ_0 et ψ_1 sont les phases liées à a_0 et a_1 respectivement. Ces amplitudes complexes sont également écrites comme suivent :

$$a_0 = \sqrt{P_0}e^{i\psi_0} \quad , \quad a_1 = \sqrt{1 - P_0}e^{i\psi_1} \quad (IV.1)$$

La formule (IV.1) montre clairement cet a_0 et a_1 la représentation des amplitudes de probabilité, depuis $|a_0|^2 = P_0$ et $|a_1|^2 = 1 - P_0$.

Chapitre IV : Résultat de La Simulation

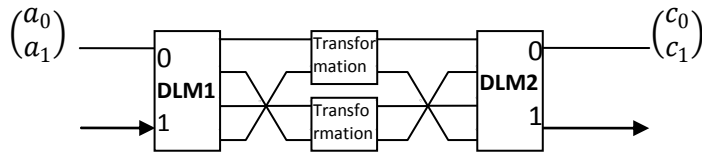


Figure IV-2 le modèle équivalent de séparateurs de faisceau 1

IV-3- La sortie de le séparateur de faisceau (DLM2)

La présence d'un photon a la sortie au '0' ou au '1' du DLM2 est donnée par les amplitudes complexes (c_0, c_1) suivant les indications du figure IV-2 ci-dessus. Selon la théorie de quantum, (c_0, c_1) est donné par :

$$\begin{pmatrix} c_0 \\ c_1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} \quad (IV.2)$$

La combinaison de la formule (IV.1) et (IV.2) donne :

$$\begin{aligned} |c_0|^2 &= \frac{1 + 2\sqrt{P_0(1-P_0)}\sin(\psi_0 - \psi_1)}{2} \\ |c_1|^2 &= \frac{1 - 2\sqrt{P_0(1-P_0)}\sin(\psi_0 - \psi_1)}{2} \end{aligned} \quad (IV.3)$$

IV- 4- La sortie de l'interféromètre de Mach-Zehnder (DLM4)

La présence d'un photon à la sortie '0' ou '1' de l'interféromètre est donnée par les amplitudes complexes (b_0, b_1) suivant les indications de la figure ci-dessus. Selon la théorie de quantum, (b_0, b_1) est juste une prolongation de l'expression donnée par la formule (IV.2) à la caisse de deux séparateurs de faisceau liés aux miroirs. Si (ϕ_0, ϕ_1) représentent le déphasage provoqué par les miroirs, (b_0, b_1) est alors donné par :

$$\begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\phi_0} & 0 \\ 0 & e^{i\phi_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & i \\ i & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} \quad (IV.4)$$

Développer l'expression ci-dessus (IV.4) donne :

$$\begin{aligned} b_0 &= a_0 |a_0|^{-1} e^{i(\phi_0 + \phi_1)/2} \sin \frac{\phi_0 - \phi_1}{2} \\ b_1 &= a_1 |a_1|^{-1} e^{i(\phi_0 + \phi_1)/2} \cos \frac{\phi_0 - \phi_1}{2} \end{aligned} \quad (IV.5)$$

De la relation (IV.5), la probabilité pour trouver un photon de sortie au '0' ou au '1' de l'interféromètre de Mach-Zehnder peut alors être déduite.

Chapitre IV : Résultat de La Simulation

$$\begin{aligned} |b_0|^2 &= \sin^2 \frac{\phi_0 - \phi_1}{2} \\ |b_1|^2 &= \cos^2 \frac{\phi_0 - \phi_1}{2} \end{aligned} \quad (IV.6)$$

La relation (IV.6) montre ci-dessus, clairement la phase-dépendance des photons sortie au '0' ou au '1' de l'interféromètre de Mach-Zehnder.

Parcelle de terrain des résultats théoriques : La figure IV-3 au-dessous de la parcelle de terrain théorique d'expositions de $|b_0|^2$.

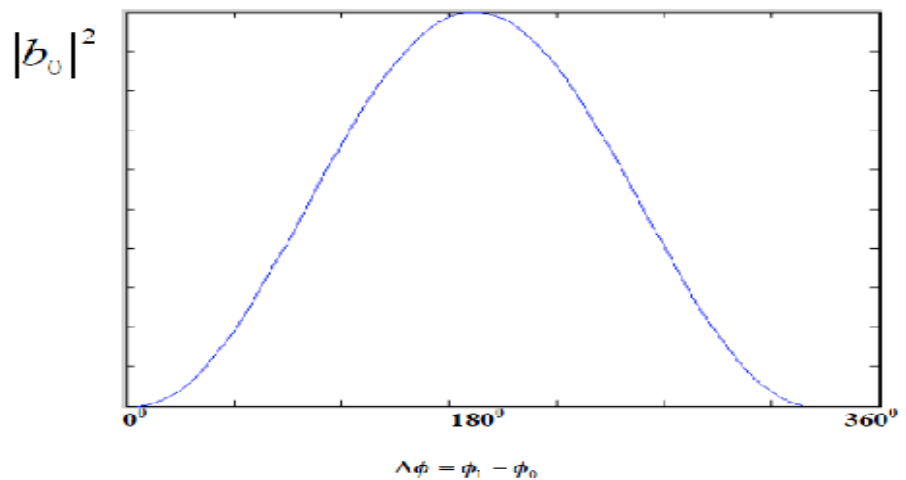


Figure IV-3 schéma de des résultats théoriques

IV-5- Modélisation

Description générale du modèle l'interféromètre de Mach-zehnder définie dans la partie (voir que La figure III-8) peut être modelé suivant les indications du figure IV-4 ci-dessous. [43]

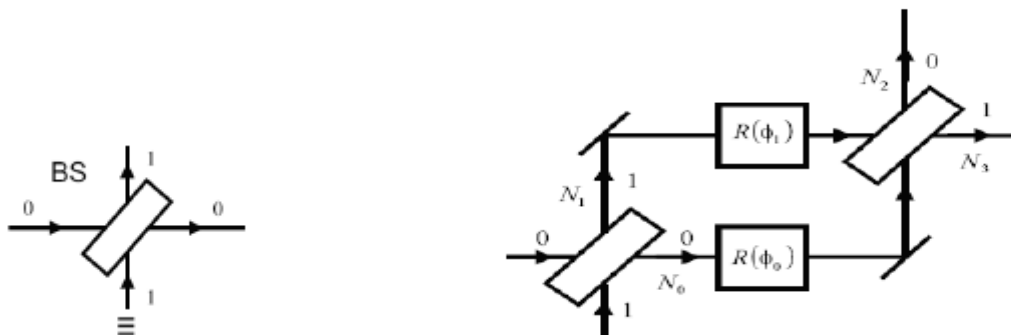


Figure IV-4 modèle pour le séparateur de faisceau et l'interféromètre de Mach-Zehnder

Chapitre IV : Résultat de La Simulation

Chaque photon arrivant d'entrée au '0' ont un choix plus de quatre chemins suivant les indications du vert sur La figure IV-4 ci-dessous. La probabilité qu'une photo entrante d'entrée au '0' choisit un chemin spécifique est la même pour tous les quatre chemins.

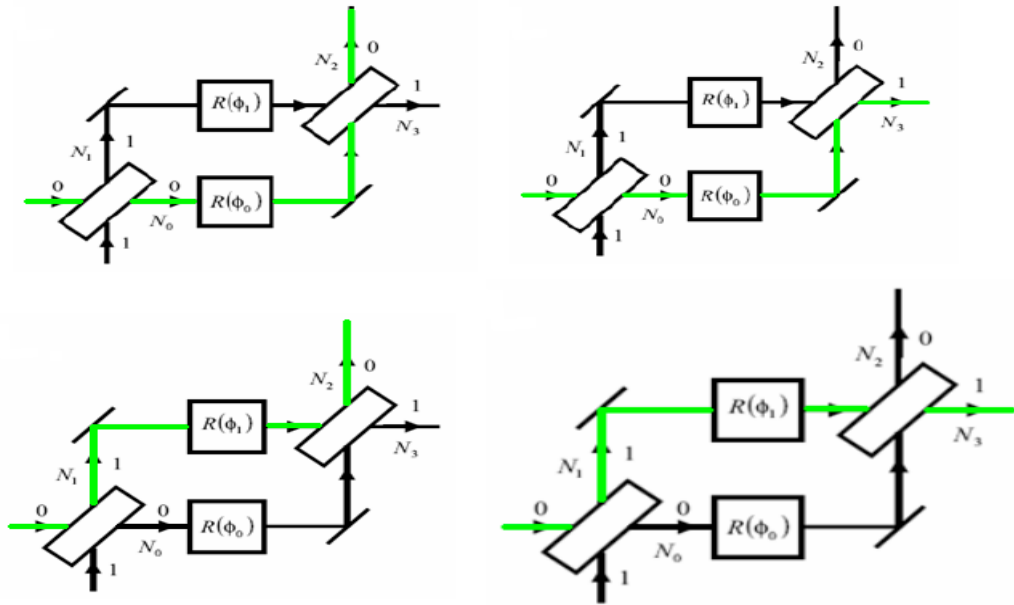
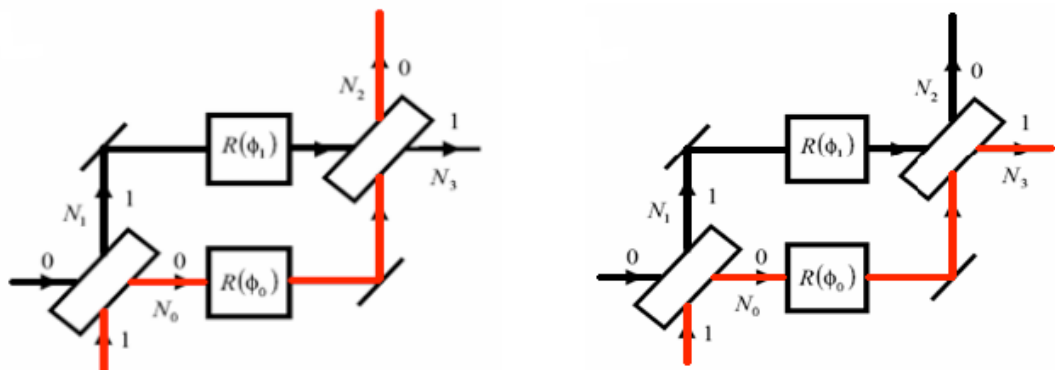


Figure IV-5 En vert, les quatre chemins possibles ont suivi d'un photon d'entrée au '0'

De même chaque photon arrivant d'entrée au '1' a un choix plus de quatre chemins suivant les indications du rouge sur La figure IV-5 ci-dessous. La chance qu'une photo entrante d'entrée au '1' choisit un chemin spécifique est la même pour tous les quatre chemins.



Chapitre IV : Résultat de La Simulation

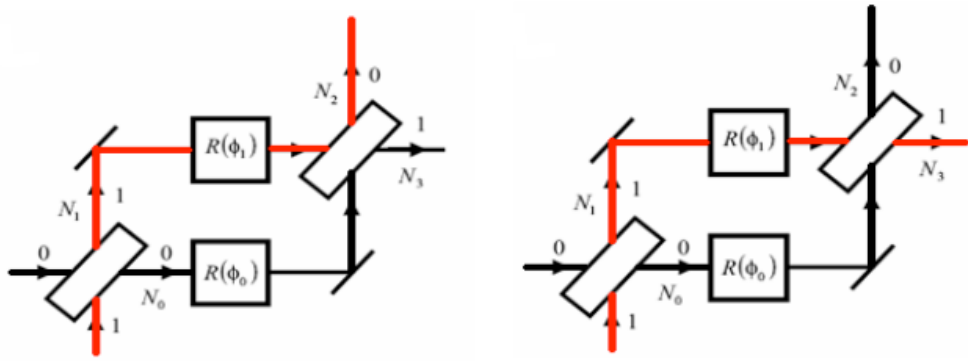


Figure IV-6 En rouge, les quatre chemins possibles ont suivi d'un photon d'entrée au '1'.

Dans le modèle ci-dessus décrit, les séparateurs de faisceau sont remplacés par DLMs. La particularité d'un DLM est sa capacité de mettre à jour son information interne comme fonction d'information entrante et décider la cuvette qui achemine l'information sortante doit être envoyée. Pendant ce processus, la probabilité pour envoyer à une cuvette de l'information un canal spécifique est la même pour tous les canaux.

Chapitre IV : Résultat de La Simulation

IV-6- Description mathématique du DLM

quand seulement un entré est en activité, a laissé dire d'entrer le '0', chaque photon entrant à cette entrée ont un choix plus de quatre chemins possibles suivant les indications du vert sur le La figure IV-5 dans la section 3.1. Dans la section 2, la présence d'un photon d'entrée au '0' du séparateur de faisceau a été représentée par les amplitudes complexes (a_0, a_1) . Dans cette description mathématique du DLM, la notation semblable sont employées. La présence d'un photon d'entrée au '0' du séparateur de faisceau est maintenant représentée par (y_0, y_1) et l'état interne est représenté par (x_0, x_1) . Pour mettre à jour son état interne, le DLM doit choisir plus de quatre candidats possibles. Appel laissé (w_0, w_1) le candidat pour l'état interne. Depuis des les deux (w_0, w_1) sont sur un cercle, ils a satisfait l'équation de cercle :

$$w_0^2 + w_1^2 = 1 \quad (IV.7)$$

$$\alpha^2 x_0^2 + w_1^2 = w_0^2 + \alpha^2 x_1^2 = 1 \quad (IV.8)$$

Des équations ci-dessus, les quatre candidats pour la mise à jour peuvent être déduits :

$$\begin{aligned} (w_0, w_1)_1 &= W1 = (+\sqrt{1 - \alpha^2(1 - x_0^2)}, \alpha \cdot x_1) \\ (w_0, w_1)_2 &= W2 = (-\sqrt{1 - \alpha^2(1 - x_0^2)}, \alpha \cdot x_1) \\ (w_0, w_1)_3 &= W3 = (\alpha \cdot x_0, +\sqrt{1 - \alpha^2(1 - x_1^2)}) \\ (w_0, w_1)_4 &= W4 = (\alpha \cdot x_0, -\sqrt{1 - \alpha^2(1 - x_1^2)}) \end{aligned} \quad (IV.9)$$

En mettant à jour son état interne, le DLM choisira un des quatre états donnés dans l'équation (IV. 9).

La règle de choix appliquée est basée sur la minimisation d'une fonction de coût donnée par :

$$C_j = -(w_0, w_1)_j \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \end{pmatrix} \text{ or } C_j = -W_j^T x \quad (IV.10)$$

Généralement un photon l'un ou l'autre arrive d'entrée au '0' ou au '1' avec la même probabilité. Chaque photon entrant arrivant d'entrée au '0' aura un choix plus de quatre chemins comme mentionné précédemment et suivant les indications de vert sur le La figure IV-5. De même, chaque photon arrivant d'entrée au '1' aura également un choix plus de quatre chemins suivant les indications du rouge sur La

Chapitre IV : Résultat de La Simulation

figure IV-6. Il y a ainsi au total pour un photon entrant dans les chemins possibles de DLM huit.

Au lieu d'employer un vecteur bidimensionnel comme dans la section précédente, laisser maintenant définir le photon entrant au '0' par un vecteur quadridimensionnel $(y_0, y_1, 0, 0)$ et la photo entrante d'entrée au '1' par $(0, 0, y_2, y_3)$. Puisqu'une photo ne peut pas être présente à entre le '0' et le '1' simultanément, ces deux vecteurs quadridimensionnels peut être combiné dans un vecteur quadridimensionnel unique (y_0, y_1, y_2, y_3) .

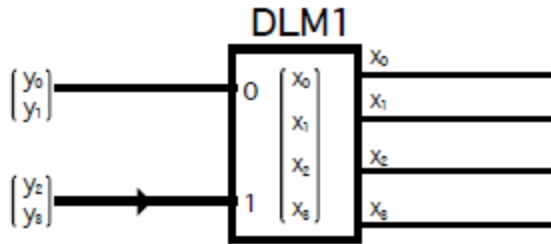


Figure IV-7 Une ou une autre entrée du DLM reçoit un photon

De même, l'état interne peut être défini par un vecteur quadridimensionnel donné par (x_0, x_1, x_2, x_3) suivant les indications du La figure IV-6. Pour mettre à jour son état interne, le DLM doit choisir plus de huit candidats. Appel laissé un tel candidat (w_0, w_1, w_2, w_3) . Ces huit candidats sont donnés par :

$$\begin{aligned}
 (w_0, w_1, w_2, w_3)_1 &= W1 = (+\sqrt{1 - \alpha^2(1 - x_0^2)}, \alpha \cdot x_1, \alpha \cdot x_2, \alpha \cdot x_3) \\
 (w_0, w_1, w_2, w_3)_2 &= W2 = (+\sqrt{1 - \alpha^2(1 - x_0^2)}, \alpha \cdot x_1, \alpha \cdot x_2, \alpha \cdot x_3) \\
 (w_0, w_1, w_2, w_3)_3 &= W3 = (\alpha \cdot x_0, +\sqrt{1 - \alpha^2(1 - x_1^2)}, \alpha \cdot x_2, \alpha \cdot x_3) \\
 (w_0, w_1, w_2, w_3)_4 &= W4 = (\alpha \cdot x_0, -\sqrt{1 - \alpha^2(1 - x_1^2)}, \alpha \cdot x_2, \alpha \cdot x_3) \\
 (w_0, w_1, w_2, w_3)_5 &= W5 = (\alpha \cdot x_0, \alpha \cdot x_1, +\sqrt{1 - \alpha^2(1 - x_2^2)}, \alpha \cdot x_3) \\
 (w_0, w_1, w_2, w_3)_6 &= W6 = (\alpha \cdot x_0, \alpha \cdot x_1, -\sqrt{1 - \alpha^2(1 - x_2^2)}, \alpha \cdot x_3) \\
 (w_0, w_1, w_2, w_3)_7 &= W7 = (\alpha \cdot x_0, \alpha \cdot x_1, \alpha \cdot x_2, +\sqrt{1 - \alpha^2(1 - x_3^2)}) \\
 (w_0, w_1, w_2, w_3)_8 &= W8 = (\alpha \cdot x_0, \alpha \cdot x_1, \alpha \cdot x_2, -\sqrt{1 - \alpha^2(1 - x_3^2)})
 \end{aligned} \tag{IV.11}$$

Chapitre IV : Résultat de La Simulation

Un photon entrant au '0' sous la forme d'entrée $(y_0, y_1, 0, 0)$ fera changer le DLM son état interne en (y_0, y_1, x_2, x_3) . De même, une photo entrante d'entrée au '1' sous la forme $(0, 0, y_2, y_3)$ fera le changer le DLM état interne en (x_0, x_1, y_2, y_3) . Par la mise à jour sa l'état interne, le DLM choisit un les huit états donnés ci-dessus dans l'équation (IV. 11). La règle de choix appliquée est basée sur la minimisation de la fonction de coût donnée par :

$$C_j = -(w_0, w_1, w_2, w_3)_j \begin{pmatrix} x_0 \\ x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} \text{ or } C_j = -W_j^T x \quad (IV. 12)$$

IV-7- Prolongation à l'interféromètre de Mach-Zehnder

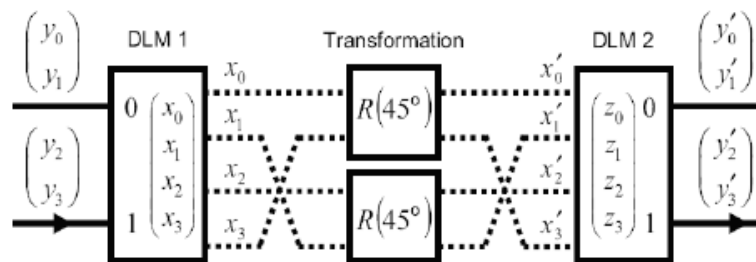
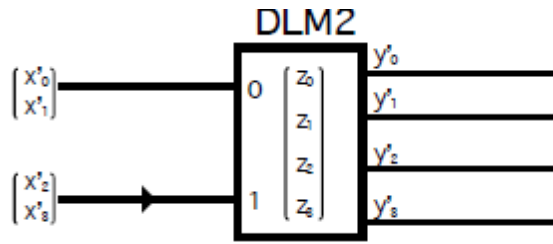


Figure IV-8 prolongation à l'interféromètre de Mach-zehnder

Une fois le principe du DLM est discuté, cette idée peut être prolongée à l'interféromètre de Mach-zehnder qui est simplement un réseau de quatre DLMs ou à deux séparateurs de faisceau liés à deux miroirs. Appel laissé la première machine à enseigner déterministe DLM1 et l'un deuxième DLM2 comme montré sur la Figure IV-8 . Le photon entrant à DLM1 est représenté par (y_0, y_1, y_2, y_3) . Le vecteur interne de DLM1 est représenté par (x_0, x_1, x_2, x_3) .

Le signal de sortie de DLM1 est couplé au phasor $R(\phi)$ ce qui change la phase de ce signal. Le signal sortant du phasor est représenté par (x'_0, x'_1, x'_2, x'_3) . Ce nouveau signal est couplé à DLM2. Le vecteur interne de DLM2 est représenté par (z_0, z_1, z_2, z_3) . L'événement de sortie de DLM2 est représenté (y'_0, y'_1, y'_2, y'_3) suivant les indications du Figure IV-9 ci-dessous.

Chapitre IV : Résultat de La Simulation



La Figure IV-9 DLM2

Le phasor est mathématiquement décrit par la matrice de rotation :

$$R(\phi) = \begin{pmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{pmatrix}, \quad \phi = 45^\circ \quad (IV.13)$$

Comme discutent dans la section précédente, DLM2 la mettra à jour vecteur interne par choisissant un des huit candidats donnés par :

$$\begin{aligned} (w_0, w_1, w_2, w_3)_1 = W1 &= (+\sqrt{1 - \alpha^2(1 - z_0^2)}, \alpha \cdot z_1, \alpha \cdot z_2, \alpha \cdot z_3) \\ (w_0, w_1, w_2, w_3)_2 = W2 &= (+\sqrt{1 - \alpha^2(1 - z_0^2)}, \alpha \cdot x_1, \alpha \cdot z_2, \alpha \cdot z_3) \\ (w_0, w_1, w_2, w_3)_3 = W3 &= (\alpha \cdot z_0, +\sqrt{1 - \alpha^2(1 - z_1^2)}, \alpha \cdot z_2, \alpha \cdot z_3) \\ (w_0, w_1, w_2, w_3)_4 = W4 &= (\alpha \cdot z_0, -\sqrt{1 - \alpha^2(1 - z_1^2)}, \alpha \cdot z_2, \alpha \cdot z_3) \\ (w_0, w_1, w_2, w_3)_5 = W5 &= (\alpha \cdot z_0, \alpha \cdot z_1, +\sqrt{1 - \alpha^2(1 - z_2^2)}, \alpha \cdot z_3) \\ (w_0, w_1, w_2, w_3)_6 = W6 &= (\alpha \cdot z_0, \alpha \cdot z_1, -\sqrt{1 - \alpha^2(1 - z_2^2)}, \alpha \cdot z_3) \\ (w_0, w_1, w_2, w_3)_7 = W7 &= (\alpha \cdot z_0, \alpha \cdot z_1, \alpha \cdot z_2, +\sqrt{1 - \alpha^2(1 - z_3^2)}) \\ (w_0, w_1, w_2, w_3)_8 = W8 &= (\alpha \cdot z_0, \alpha \cdot z_1, \alpha \cdot z_2, -\sqrt{1 - \alpha^2(1 - z_3^2)}) \end{aligned} \quad (IV.14)$$

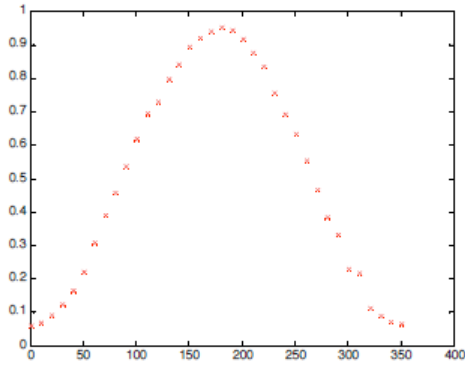
La règle de choix est basée sur la minimisation de la fonction de coût donnée par:

$$C_j = -(w_0, w_1, w_2, w_3)_j \begin{pmatrix} z_0 \\ z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{pmatrix} \text{ or } C_j = -W_j^T z \quad (IV.15)$$

si le 'j' est 1.2.3 ou 4, le signal de sortie de DLM2 sera (y'_0, y'_1, z_2, z_3) et si le 'j' est 5.6.7 ou 8 le signal de sortie de DLM2 sera (z_0, z_1, y'_2, y'_3) .

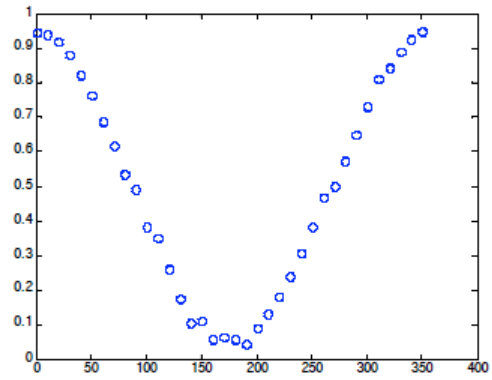
Chapitre IV : Résultat de La Simulation

les résultats de simulation sont présentés dans les figures suivantes:



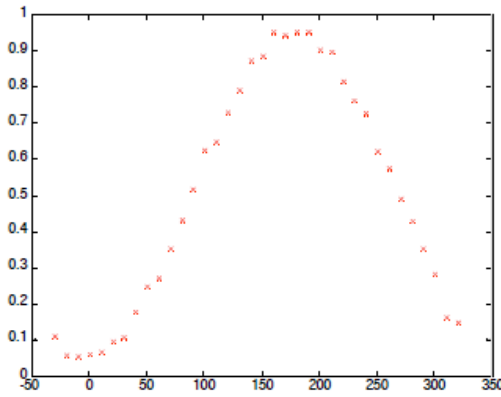
N2 / N probability(0,0,0,10000)

$$P_2 = \frac{N_2}{N}, \text{phi1} = 0^\circ$$



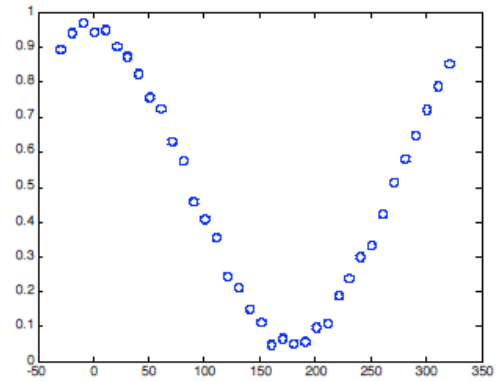
N3 / N probability(0,0,0,10000)

$$P_3 = \frac{N_3}{N}, \text{phi1} = 0^\circ$$



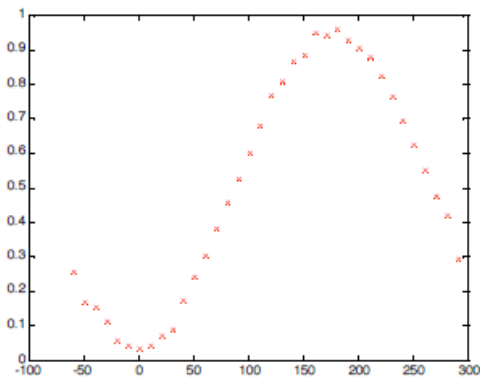
N2 / N probability(0,0,30,10000)

$$P_2 = \frac{N_2}{N}, \text{phi1} = 30^\circ$$



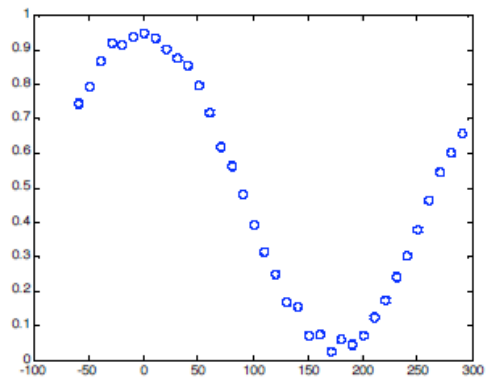
N3 / N probability(0,0,30,10000)

$$P_3 = \frac{N_3}{N}, \text{phi1} = 30^\circ$$



N2 / N probability(0,0,60,10000)

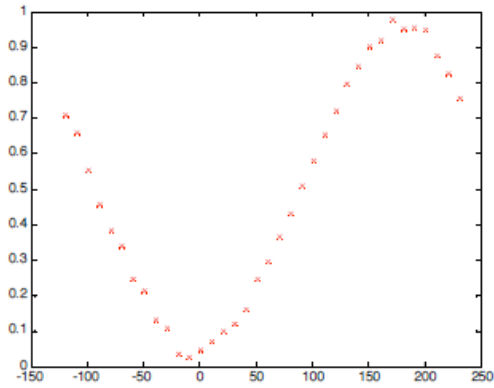
$$P_2 = \frac{N_2}{N}, \text{phi1} = 60^\circ$$



N3 / N probability(0,0,60,10000)

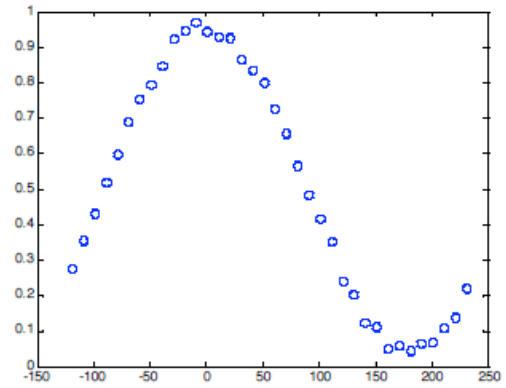
$$P_3 = \frac{N_3}{N}, \text{phi1} = 60^\circ$$

Chapitre IV : Résultat de La Simulation



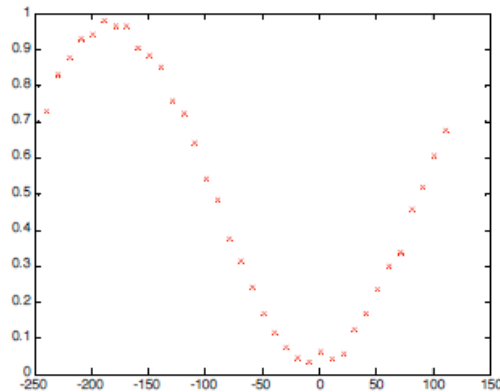
N2 / N probability(0,0,120,10000)

$$P_2 = \frac{N_2}{N}, \text{phi1} = 120^\circ$$



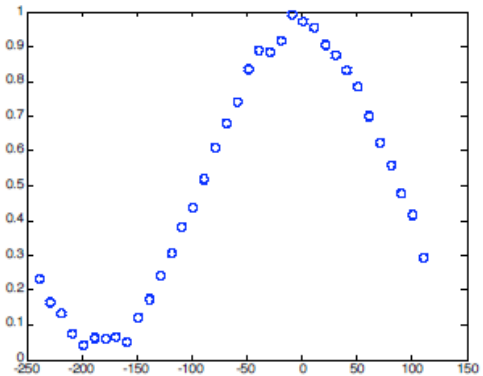
N3 / N probability(0,0,120,10000)

$$P_3 = \frac{N_3}{N}, \text{phi1} = 120^\circ$$



N2 / N probability(0,0,240,10000)

$$P_2 = \frac{N_2}{N}, \text{phi1} = 240^\circ$$



N3 / N probability(0,0,240,10000)

$$P_3 = \frac{N_3}{N}, \text{phi1} = 240^\circ$$

L'intensité de la lumière enregistrée sur chaque détecteur varie comme fonction de la différence de phase relative entre les deux chemins.

Un résultat particulier apparaît quand la phase relative différence entre les deux chemins est zéro, l'intensité de la lumière enregistrée par un détecteur est alors maximale, en même temps l'intensité de la lumière enregistrée par l'autre détecteur est simplement zéro.

La chemin-dépendance ou la phase-dépendance de la lumière enregistrée par chaque détecteur est largement développée en mécanique quantique.

Conclusion général

Conclusion général

Cet travail donne quelques indications sur le développement des capteurs optiques. De très nombreux capteurs ont été pensés, conçus ou réalisés en laboratoire. La plupart sont encore des appareils qui n'ont pas encore atteint le stade industriel. Ils se trouvent en concurrence avec d'autres techniques bien établies et souvent économiques. Cependant les capteurs à fibres optiques ont des potentialités d'utilisation importantes. L'une d'entre elles est la spécificité de cette technologie liée à son utilisation dans des atmosphères explosives ou en présence de parasites électriques. Les autres résident dans la dimension, dans les possibilités offertes de mesures sans contact, voire même d'environnement à haute température. Il faut ajouter à cela la précision et les possibilités offertes par le multiplexage. De plus, le développement des appareillages à fibre (coupleur, polariseur, amplificateur...) qui peuvent se mettre en ligne avec la fibre est un facteur favorable tout comme l'optique intégrée. En effet la tendance actuelle est de travailler en réseau en géant plusieurs capteurs à partir d'une même centrale de mesure.

Références

- [1] Georges Asch et collaborateur, Les Capteurs en instrumentation industrielle, Edition Dunod, Paris, 1991.
- [2] Spécification générique pour les capteurs à fibres optiques. - Association Française de Normalisation -. 1999.
- [3] François Flory, Les Capteurs optiques pour l'environnement, Universités Paul Cézanne, Provence et sud Toulon-Tar, Mai 2011 .
- [4] JP GOURE ,capteurs optiques- capteurs à fibres optiques ,
- [5] Lopez-Higuera J.M., Morante M.A., Cobo A., -, Journal of lightwave Technology, 1996--, Vol. 54, pp. 1120-30.
- [6] Bois E., Huard S.J., Boisdé G., -, Applied Optics, 1989--, Vol. 28, pp. 419-20.
- [7] Fang X., Wang A., Claus R.O., A modified AC/DC compensation technique for DC mesurands, Proc. SPIE, 1996--, Vol. 2594.
- [8] Berthold III. J. W., -, Journal of lightwave Technology, 1995--, Vol. 13, pp. 1193-99,.
- [9] Snyder A. W., Love J.D., Optical Waveguide theory, Chapman & Hall, London England, 1983.
- [10] Donlagic D., Culshaw B., -, Journal of Lightwave Technology, 1999--, Vol. 17, pp. 1856-68,.
- [11] Monoro T.M., Richardson D.J., Bennet P.J., -, Electronics letters, 1999--, Vol. 35, pp. 1188-89.
- [12] Henry W., Use of tapered optical fibers as evanescent field sensors, Proc. SPIE, 1994--, Vol. 2293.
- [13] Spillman W.B., McMahon D.H., -, Applied Optics, 1980--, Vol. 19, pp. 113-6,.
- [14] Sincerbox G.T., Gordon J.G., - (p.pp. 55-8), Laser Focus, 1981--, .
- [15] K. Rahnavardy, V. Arya, A. Wang, and J. M. Weiss, -, Applied Optics, 1997, Vol. 36, pp. 6399-406.
-

References

- [16] Snyder A. W., Love J.D., Optical Waveguide theory, Chapman & Hall, London England, 1983.
- [17] Ghatak A.K., Thyagarajan K., An introduction to fiber optics, Cambridge University Press, Cambridge, 1998.
- [18] Akhavan leilabady P., -, Optics Letters, 1985--, Vol. 10, pp. 576.
- [19] Corke M., -, Electronics Letters, 1983--, Vol. 19, pp. 471.
- [20] Giallorenzi T.G., -, IEEE Journal Quantum Electronics, 1982--, Vol. 18, pp. 626.
- [21] Jackson D.A., Jones J.D.C., Interferometers in Optical fibre sensors : systems and applications, -, 1989--, Artech House, Norwood MA , Vol. 2 (Ed, B. Culshaw and J. Dakin).
- [22] Anderson D., Jones J.D.C., -, Journal of Modern Optics, 1992--, Vol. 39, pp. 1837-47.
- [23] Lefevre H., Fibre Optic Gyroscope, Artech House, Boston, 1993.
- [24] Smith R.B., Fiber optic gyroscopes : a bibliography of published literature, Proc. SPIE,, 1991--, Vol. 1585,.
- [25] Akhavan leilabady P., -, Optic Communication, 1986--, Vol. 59, pp. 173-6,.
- [26] Harvey D., McBride R., Jones J.D.C., -, Measure and Science Technology, 1992--, Vol. 3, pp. 1077-83.
- [27] Born M., Wolf E., Principles of Optics, Pergamon, Oxford, 1986.
- [28] Henderson P.J., -, Measure and Science Technology, 1998--, Vol. 9, pp. 1837.
- [29] Steele W.H., Cambridge Studies in Modern Optics : Interferometry, Cambridge University Press., Cambridge, 1983.
- [30] Wang D.N., -, Journal of Lightwave Technology, 1994--, Vol. 12, pp. 909-16,.
- [31] Inaudi D., -, Sensor and Actuatos A, 1994--, Vol. 44, pp. 125-30.
- [32] Bosselmann T., Electric and Magnetic field Seinsing for High Voltage Applications, Proc. SPIE, 1997--, Vol. 3097.
-

References

- [33] Hecht E., Zajac A., Optics, Addison-Wesley, -, 1974.
 - [34] Dyott R.B., Cozens J.R., Morris D.G., -, Electronics Letters, 1979--, Vol. 15, pp. 380-2,.
 - [35] Mondanos M., Damage detection in composite structures using polarimetric low coherence i, Proc. SPIE, 2000--, Vol. 4185.
 - [36] Kersey A.D., -, Electronics Letters, 1986--, Vol. 22, pp. 18.
 - [37] Francis - T. S. Yu Shizhuo Yin, Fiber optics sensors, Marcel Dekker, New-York,2002.
 - [38] Madden W. I., -, Optical Engineering, 1999--, Vol. 38, pp. 1699-707.
 - [39] L. ZEUNDER, Zeitachr.J, Instrkde, 11 (1891), 275.
 - [40] François Lepoutre, Principes généraux des capteurs, paris , 1982.
 - [41] Jean-Claude, Capteurs à fibres optiques FESTINGER,2007.p2-4.
 - [42] E. Detsi,Simulation of the single-photon Mach-Zehnder Interferometer,University of Groningen, The Netherlands.
 - [43] H. De Raedt, K. De Raedt, and K. Michielsen, Event-based simulation of single-photon beam splitters and Mach-Zehnder interferometers, Europhys. Lett. 69, 861 - 867 (2005)
-