



Habilitation à Diriger les Recherches

Caractérisation structurelle et analyse fonctionnelle de composants et dispositifs photoniques Application aux capteurs à fibre

Présentée par Laurent, Renaud GABET,
Maître de Conférences à Télécom ParisTech

Soutenue le 15 octobre 2012 devant le jury composé de :

Mme F. de Fornel, Directeur de Recherche CNRS, ICB, Dijon

M. P. Mégret, Professeur, Université de Mons

M. F. Benabid, Directeur de Recherche CNRS, GPPMM XLIM, Limoges

M. P. Besnard, Professeur, Directeur du laboratoire CNRS FOTON, Lannion

M. A. Benlarbi-Delaï, Professeur, UPMC, Paris

M. Y. Jaouen, Professeur, Télécom ParisTech

Rapporteur

Rapporteur

Rapporteur

Examineur

Examineur

Examineur

Sommaires

1. CURRICULUM VITAE	5
2. RÉSUMÉ DE MES RESPONSABILITÉS À TÉLÉCOM PARISTECH.....	7
2.1. Enseignement.....	7
2.2. Recherche	7
2.3. Représentation dans les instances de Télécom ParisTech	7
3. ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT	9
3.1. Maître de Conférences à Télécom ParisTech	9
3.2. ATER IUT de Lannion (2000-2001).....	11
4. ACTIVITÉS DE RECHERCHE	12
4.1. Co-directions de thèse.....	12
4.2. Contrats de recherche et valorisations	12
4.3. Publications et conférences.....	12
4.4. Collaborations extérieures	13
4.4.1. Universités	13
4.4.2. Institutions publiques de recherche	13
4.4.3. Entreprises.....	13
4.4.4. Entreprises émergentes.....	13
5. RÉSUMÉ DE MES TRAVAUX DE RECHERCHE	15
5.1. Contexte de ma recherche	15
5.2. Vue générale de mes thèmes de recherche.....	16
5.2.1. Thème 1 : Caractérisation structurelle et analyse fonctionnelle de composants et dispositifs photoniques 17	
5.2.2. Thème 2 : Capteurs à fibre optique distribués basés sur l'effet Brillouin	21
5.2.3. Conclusion	22
6. DÉTAIL DE MES TRAVAUX DE RECHERCHE.....	23
6.1. Caractérisation structurelle et analyse fonctionnelle de composants et dispositifs photoniques.....	23
6.1.1. Analyse fonctionnelle de composants et dispositifs photoniques à 10Gb/s.....	23
6.1.2. Interférométrie à faible cohérence sensible à la phase	25
6.1.2.1. Description du montage expérimental	26
6.1.2.2. Mesure de la dispersion chromatique (GVD)	27
6.1.2.3. Performances et résolution.....	28
6.1.2.4. Mesure de la biréfringence	28
6.1.2.5. Caractérisation de différentes fibres spéciales	29
6.1.2.6. Caractérisation de guides à cristal photonique.....	34
6.1.2.7. Conclusion	38
6.1.3. Caractérisation de FBG par Luminescence bleue (LB)	38
6.1.3.1. Caractérisation de FBG par luminescence bleue	39

6.1.3.2.	Conclusion sur la méthode de Luminescence bleue	42
6.1.4.	Perspectives	42
6.1.5.	Collaborations	43
6.2.	Capteurs à fibre optique	45
6.2.1.	Contexte général de la diffusion Brillouin dans les fibres	45
6.2.2.	Spectre de gain Brillouin dans les fibres optiques	47
6.2.2.1.	Interaction acousto-optique	47
6.2.2.2.	Modélisation du BGS en fonction du matériau et du profil géométrique	48
6.2.2.3.	Mesure expérimentale du BGS	50
6.2.2.4.	Mesure auto-référencée du coefficient d'efficacité Brillouin C_B	51
6.2.3.	Spectre de gain Brillouin dans les fibres passives	52
6.2.3.1.	Importance des contraintes internes	52
6.2.3.2.	Prise en compte des conditions de fabrication	53
6.2.3.3.	Influence des contraintes liées à un fort dopage	54
6.2.4.	Conclusion et perspectives	55
6.2.5.	Collaborations	56
7.	PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS	61
8.	EXEMPLES D'ARTICLES	67

1. CURRICULUM VITAE

GABET Laurent, Renaud (prénom usuel)

Marié, 2 enfants

Né le 25/04/1974

Maître de conférences

Groupe Télécommunications Optiques

Département Communications et Électronique, CNRS – UMR 5141

Télécom ParisTech

46, rue Barrault 75634 PARIS Cedex 13

renaud.[gabet@telecom-paristech.fr](mailto:renaud.gabet@telecom-paristech.fr)

- 2001-2012 **Maître de conférences à l'École Nationale Supérieure des Télécommunications** (ENST ≡ Télécom ParisTech) dans le groupe Télécommunications Optiques, département Communications et Électronique
Chef de département : Dr Bruno THEDREZ
Chef de groupe : Pr Didier ERASME
Thèmes de recherche : techniques optiques de caractérisation, capteurs Brillouin pour le génie civil, communications optiques haut-débit
Remarque : *Télécom ParisTech est sous la tutelle du Ministère de l'industrie*
- 2000-2001 **ATER** :
Enseignement : IUT Lannion
 -1/2 poste en Mesures Physiques
 -1/2 poste en Génie Électrique et Informatique Industrielle
Recherche : Laboratoire d'Optronique de l'ENSSAT, actuellement laboratoire Foton (UMR CNRS 6082)
- 1997-2000 **Doctorat de Physique** à l'Université de Rennes I
 Thèse soutenue le 24 novembre 2000

 Titre : « Étude des propriétés spectrales de lasers semi-conducteurs soumis à injection optique : application à la détection de faibles signaux cohérents à 1.55µm »

 Lieu : Laboratoire d'Optronique de l'ENSSAT

 Mention : Très honorable avec Félicitations du jury

 Directeur de Thèse : Pr Pascal BESNARD (ENSSAT LANNION)

 Rapporteurs : J. BAUDON (Univ. Paris Nord)
 J.P. GOEDGEBUER (Univ. Franche-Comté)
 Examineurs : J. DUPONT-ROC (CNRS, ENS, président du jury)
 M. TETU (Univ. Laval, Québec)
 G.M.STEPHAN (ENSSAT LANNION, co-directeur de thèse)

Mots clés : Laser à semi-conducteur DFB, injection optique, amplificateur de lumière cohérente, détection ultrasensible, fonction de transfert d'un laser

- 1996-1997 **DEA Électronique et Optronique**, option **Communications Optiques**, *mention bien*, à la faculté de sciences et techniques de BREST (29)
Stage DEA (5 mois), « Etudes de lasers à semi-conducteurs injectés », Laboratoire d'Optronique, ENSSAT, Lannion
- 1994-1997 **Diplôme d'ingénieur ENSSAT**, spécialité **Optronique** à LANNION (22)
Formation à double compétence :
 - Optique
 - Electronique et Informatique Industrielle
- 1992-1994 **DUT Mesures Physiques**, option **Mesures et Contrôle Physico-Chimiques** à ORSAY (91)
Stage DUT (3 mois) : « Technique de métrologie des rayonnements ionisants, application à la radio-protection », CEA Fontenay aux Roses, Laboratoire d'Études et de Recherche en Dosimétrie Externe.
- 1992 **Bac C**

2. RÉSUMÉ DE MES RESPONSABILITÉS À TÉLÉCOM PARISTECH

2.1. Enseignement

- Enseignements : Optique et Photonique (1^{ère} année, filière apprentissage), Semi-conducteur (1^{ère} année), Communications optiques (2^{ème} année), Laser à fibre, TP photonique, projets étudiants. Enseignements sous forme de cours, TD, TP et projets
- Coordinateur du module Optique de tronc commun première année (Depuis 2001)
- Coordinateur et unique enseignant du module Optique dans la filière par apprentissage (Depuis 2010)
- Coordinateur d'un module de spécialité 2^{ème} année (COM220, Depuis 2001)
- Membre nommé du groupe de travail sur la réforme de l'enseignement en 1^{ère} année (2010)
- Responsable du matériel pédagogique du groupe optique (Depuis 2001)
- Responsable de la réforme des Travaux Pratiques (Depuis 2001)
- Cours de soutien aux élèves admis sur titre, tuteur
- Représentant pédagogique à la SFO (Société Française d'Optique)

2.2. Recherche

- Activité « capteurs à fibre optique »
- Activité « Caractérisation structurelle et analyse fonctionnelle de composants et dispositifs photoniques innovants »
- Responsable d'une plate-forme DWDM 10 Gbit/s (2001 -2010)
- Implication dans des projets ANR (AROME, L2CP, SUPERCODE)
- Co-direction de thèses :
 - o une qui débute (Caractérisation de filtres ultra-fins)
 - o deux en cours de finalisation (Caractérisation de FBG et Capteurs Brillouin)
 - o trois soutenues (Injection optique (2004), Capteurs Brillouin (2009), Caractérisation OLCR (2009))
- Responsable de la maintenance des laboratoires d'optique: intendance, commandes, support technique aux doctorants (2001-2010)

2.3. Représentation dans les instances de Télécom ParisTech

- Membre élu au comité d'enseignement (Depuis 2005).
- Membre élu à la commission dévaluation des appellations (2005-2011).
- Membre élu au comité de la recherche (2003-2005).
- Membre élu suppléant au conseil d'école (Depuis 2005).

- Représentant du personnel au CHSCT, à la CCP et aux Comités Techniques de Télécom ParisTech et de l'Institut Télécom.

3. ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT

Cela fait maintenant quatorze ans que j'enseigne à des étudiants de tous niveaux, de l'IUT au Master recherche en passant par le niveau ingénieur et la formation continue.

J'ai enseigné des matières aussi différentes que la physique, l'électronique, l'informatique, le traitement du signal et les mathématiques. Ceci m'a permis de parfaire ma pédagogie et, après toutes ces années, ma motivation pour enseigner reste intacte.

Parallèlement à mes activités d'enseignement, j'ai représenté mon département dans le cadre d'une réforme des enseignements de tronc commun de première année et suis engagé dans la principale instance de l'école qui concerne l'enseignement. Je suis responsable du renouvellement des travaux pratiques en optique et optoélectronique. Je tiens particulièrement à concilier à parts égales mes activités d'enseignement et de recherche qui font la richesse de mon métier, comme l'ont montré les 11 années passées à Télécom ParisTech.

Enfin, de par ma sensibilité, mes goûts et ma formation, je porte un intérêt tout particulier à la formation par les travaux pratiques ou les projets. Je monte également des expériences de vulgarisation à l'occasion de manifestations de type « Fête de la science ».

3.1. Maître de Conférences à Télécom ParisTech

Les contenus des enseignements concernent les domaines de la physique appliquée, des technologies liées à l'optoélectronique et des systèmes de télécommunications optiques. J'interviens notamment au niveau des cours magistraux, des TD, TP et projets d'élèves et me suis beaucoup investi dans l'organisation du laboratoire comme dans la création de nouveaux TP. Cela représente une des plus grosses charges d'enseignement du département.

J'ai en charge la coordination du module OPTIQUE de 1^{ère} année (tronc commun, 140 étudiants), celui consacrée à la filière par apprentissage ainsi que celle d'un module de spécialité en optoélectronique (2^{ème} et 3^{ème} année). La coordination consiste, en plus de l'enseignement, à définir les orientations des cours en collaboration étroite avec mes collègues, coordonner les emplois du temps, rédiger les examens, et corriger les copies.

Par ailleurs, je suis représentant élu des Enseignants-Chercheurs au comité d'enseignement. Ce comité est équivalent au conseil de classe à l'université ou aux jurys de passage et d'obtention du diplôme. Il définit également le règlement scolaire.

De plus, je suis responsable du matériel pédagogique et de son renouvellement (modernisation fréquente des TP).

Je participe au suivi des étudiants en étant tuteur d'élèves Admis Sur Titre, en donnant des cours de soutien aux élèves en difficulté et des cours de mise à niveau à des élèves non-physiciens.

Dernièrement, je pris en main l'ouverture de la filière par apprentissage en optique et photonique en assurant seul l'intégralité de son enseignement et en rédigeant un cours ad-hoc avec les TD et les TP associés.

Outre les photocopiés de TP que j'ai pour la plupart réécrits depuis 2001 tout comme les TD d'optique en 2011, j'ai également rédigé 3 photocopiés de cours :

- *Optique et photonique* (filière apprentissage)

- *Holographie* (première année)
- *Introduction à l'optique* pour les admis sur titre

Voici sous forme de tableau une vue synthétique des différents enseignements que je donne, le type et les contenus :

<i>Matière</i>	<i>Type</i>	<i>Contenu</i>
Propagation dans les fibres optiques	Cours (3h)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modes de propagation. ▪ Effets linéaires : atténuation, dispersion chromatique, dispersion de polarisation. ▪ Procédés de fabrication.
Lasers à fibre	Cours (1h30)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Étude des différents fonctionnements d'un laser à fibre (état de l'art).
Optique et Photonique Filière Apprentissage	Cours + TD + TP (33h)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Généralités sur les ondes électromagnétiques ▪ Interférences ▪ Diffraction et optique de Fourier ▪ Fibre optique ▪ Laser
Holographie	Cours (1h30)	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Principe de base ▪ Mise en œuvre ▪ Applications actuelles
Optique et Optique de Fourier	TD	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Principe de fonctionnement du laser et de la fibre optique. ▪ Optique de Fourier : spectroscopie, diffraction et filtrage.
Micro et Nano-physique	TD	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Modèle de base du puits quantique, des puits quantiques couplés. ▪ Physique statistique ▪ Modèle de Kronig Peney : notion de bandes d'énergie permises et interdites. ▪ Jonction PN et du Transistor CMOS.
TEL	TD	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Exemples concrets dans le domaine des antennes et des fibres optiques.
Travaux Pratiques 1ère année	TP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Spectroscopie par Transformée de Fourier. ▪ Holographie. ▪ Diffraction. ▪ Jonction PN. ▪ Transmission sur fibre optique.
Travaux Pratiques de Physique 2ème et 3ème année	TP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Diode laser. ▪ Amplificateur Optique. ▪ Détection optique cohérente. ▪ Analyse spectrale d'un laser DFB à semi-conducteurs. ▪ Mesure de la dispersion chromatique d'une fibre optique. ▪ Mesure de BER (Bit Error Rate).
Les technologies et les systèmes WDM.	Format° continue	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Démonstration en laboratoire d'une transmission 10Gb/s au travers d'une boucle à recirculation toute optique. ▪ Technique de mesure de taux d'erreurs binaires.

Encadrement de projets et de stage

Un grand nombre de projets d'étudiants (30h.ég.TD) est lié aux activités de recherche du laboratoire. La proximité géographique entre les laboratoires d'enseignement et de recherche facilite grandement cette interaction. J'encadre donc régulièrement des élèves aussi bien en tronc commun de première année que dans les cours de spécialité. J'ai également encadré des stagiaires.

3.2. ATER IUT de Lannion (2000-2001)

Département Mesures Physiques (96h éq TD)

<i>Matière</i>	<i>Type</i>	<i>Contenu</i>
Traitement du signal (42h)	TD	<ul style="list-style-type: none">▪ Énergie, puissance valeur efficace.▪ Écran à cristaux liquides.▪ Séries de Fourier et Transformées de Fourier.▪ Modulation.
Logique combinatoire (12h)	TD	<ul style="list-style-type: none">▪ Code binaire, hexadécimal.▪ Algèbre Booléenne.▪ Multiplexeurs et décodeurs, bascules et registres, compteurs et séquenceurs.
Traitement du signal (54h)	TP	<ul style="list-style-type: none">▪ Applications directes des TD précités.
Initiation à l'algorithmie (6h)	TP	<ul style="list-style-type: none">▪ Enchaînement séquentiel, Structures conditionnelles.▪ Structures répétitives.

Département Génie Électrique et Informatique Industrielle (96h éq TD)

<i>Matière</i>	<i>Type</i>	<i>Contenu</i>
Mathématiques (24h)	TD	<ul style="list-style-type: none">▪ Calcul matriciel.▪ Courbes paramétrées.▪ Équations différentielles du premier ordre, du second ordre, à coefficients non constants.▪ Fonctions de 2 variables, polynômes.
Électronique analogique (108h)	TP	<ul style="list-style-type: none">▪ Théorème de Thévenin et Norton.▪ Alimentation stabilisée.▪ Loi des mailles, des nœuds. Montage amont et aval.▪ Dipôles linéaires et non-linéaires.

4. ACTIVITÉS DE RECHERCHE

4.1. Co-directions de thèse

- Vincent Henry : direction (90%) avec Y. Jaouen, Télécom ParisTech, démarrée en sept 2011
Caractérisation d'une nouvelle génération de composants optiques filtrants (thèse en convention CIFRE avec Yenista, Lannion) ;
- Yolande Sikali : co-direction (60%) avec Y. Jaouen, Télécom ParisTech, soutenance prévue en oct. 2012
Capteurs à fibre optique répartis par effet Brillouin : séparation de la dépendance à la température et à la déformation. (thèse en convention CIFRE avec EDF et LCPC) ;
- Serge Tsyier : co-direction (60%) avec Y. Jaouen, Télécom ParisTech, soutenance prévue en oct. 2012
Caractérisation de réseau de Bragg photoinscrit de grande longueur ;
- Vincent Lanticq : co-direction (50%) avec Y. Jaouen, Télécom ParisTech, soutenue en juin 2009
Mesure répartie de température et de déformations par diffusion Brillouin : de la fibre optique au capteur pour le génie civil. (thèse en convention CIFRE avec EDF et LCPC) ;
- Philippe Hamel : co-direction (50%) avec Y. Jaouen, Télécom ParisTech, soutenue en mars 2009
Réflexométrie à faible cohérence sensible à la phase : principes et application à l'étude de composants optiques innovants ;
- Fabien Kéfélian : co-direction (20%) avec Y. Gallion, Télécom ParisTech, soutenue en 2005
Corrélation du bruit de phase de lasers à réseau de Bragg par injection optique. Application à la génération et au transport sur fibre de signaux radiofréquence ;

4.2. Contrats de recherche et valorisations

Contrats de recherche

- | | |
|------------------------------------|--|
| - Contrat BNM / Alcatel | 2004 (Mise à niveau du banc OLCR) |
| - Projet ANR SUPERCODE | 2006-2009 |
| - Projet ANR AROME | 2007-2009 |
| - Projet ANR L2CP | 2007-2009 (représentant Télécom ParisTech) |
| - Projet Institut Télécom INOPTech | 2008-2010 (responsable du projet) |
| - 2 Conventions CIFRE EDF | 2006-2012 (codirection de 2 thèses) |
| - Projet FUI 8 CHRONOS | 2009-2011 (représentant Télécom ParisTech) |
| - Convention CIFRE « Henry » | sept 2011-2013 (directeur de thèse) |

Expertises

- Contrat de la région Aquitaine
- Brevets et contrats de l'Institut Télécom
- Relectures d'articles

4.3. Publications et conférences

- 20 publications dans les revues scientifiques
- 55 communications dans les congrès nationaux et internationaux
- 1 rédaction conjointe d'un chapitre de livre

4.4. Collaborations extérieures

4.4.1. Universités

- XLIM Limoges: fibre multi-matériaux (J.L. Auguste, J.M. Bondy), fibre à cristaux photoniques (P. Leproux, S. Février)
- FOTON Lannion : étude d'un laser à fibre (T. Chartier, P. Besnard)
- OFS (USA) : fibres faiblement multimodes (S. Ramachandran)
- Univ. de Lille : réseau de Bragg photo-inscrit, fibres à cristaux photoniques (M. Douay)
- CCLO : micro-résonateurs polymère (M. Gadonna)
- Télécom SudParis : nouveaux outils de traitement du signal de réflectogrammes OLCR (Y. Gottesman)
- Supélec : montage plateforme WDM 40Gb/s (Z. Toffano)
- Université de St Etienne : sensibilité des capteurs Brillouin aux rayonnements ionisants (Y. Ouardane, A. Boukenter)

4.4.2. Institutions publiques de recherche

- LNE : mise au point d'un banc OLCR sensible à la phase (A.F. Obaton)
- CNRS/LPN : caractérisation d'un modulateur à électro-absorption (G. Aubin, A. Ramdane)

4.4.3. Entreprises

- EDF R&D : capteurs optiques distribués (G. Moreau)
- LCPC : sensibilité à la déformation du phénomène Brillouin (F. Taillade)
- ANDRA : capteur Brillouin pour le stockage des déchets radioactifs, effets des rayons ionisants (S. Lessolle)
- Draka Comteq : caractérisations Brillouin de fibres (E. Burov, L.-A. De Montmorillon), caractérisation de fibres à cristal photonique par OLCR (P. Sansonetti, G. Melin)
- France télécom R&D : architecture CWDM pour l'accès optique (P. Chanclou)
- Alcatel III IV Lab : caractérisation fonctionnelle de SOA (B. Thedrez, R. Brenot)
- Thales R&T : guides à Cristaux Photoniques (A. De Rossi, S Combré)
- 3S Photonics : développement d'une technique de caractérisation de FBG par luminescence bleue (D. Sauvage)

4.4.4. Entreprises émergentes

- IDIL Fibres Optiques : capteurs Brillouin (L. Quétel)
- Coractive : mesure du GVD de fibres dopées Er³⁺ (S. Chaligny)
- Teem Photonic : analyse fonctionnelle d'EDWA (D. Barbier)
- Yenista Optics: nouvelles générations de filtres ultra-fins (M. Van Der Keur, A. Poudoulec)
- iXFiber (N. Traynor)

5. RÉSUMÉ DE MES TRAVAUX DE RECHERCHE

5.1. Contexte de ma recherche

Ce document est une synthèse de mes travaux de recherche effectués depuis 2001 au sein du groupe *Télécommunications Optiques* (GTO) de Télécom ParisTech. Le groupe est animé par Didier Érasme et le département dirigé par Bruno Thedrez. L'équipe se compose de 6 enseignants-chercheurs (dont 3 professeurs et 3 maîtres de conférences) et depuis 2010 d'un ingénieur de recherche. Cette équipe encadre en moyenne une douzaine de doctorants ou post-doctorants.

L'évolution des systèmes de communications optiques est une ligne directrice particulièrement stimulante pour les activités de recherche qui se déroulent dans le groupe GTO de Télécom ParisTech. En plus des sujets directement reliés à l'amélioration des réseaux optiques, des architectures, des dispositifs ou des composants, notre domaine d'activités concernent également des thématiques de caractérisation et d'analyse de composants et dispositifs de télécommunications ainsi que d'accompagnement de la diffusion des technologies initialement développées pour les télécommunications vers de nouveaux domaines (laser de puissance, capteurs optiques).

Après s'être focalisées pendant plusieurs années sur les solutions techniques du réseau d'accès (FTTx) pour combler le « dernier kilomètre » par des moyens optiques, les dernières évolutions dans le domaine des communications optiques nécessitent d'y associer les communications numériques ainsi que l'électronique numérique rapide et affecte tous les niveaux du réseau optique. Les prévisions montrent une augmentation constante de la demande de débit pour les réseaux de l'ordre de 40 à 60% par an (selon la feuille de route du pôle de compétitivité Systématique Paris-Région). Cette tendance est soutenue actuellement par l'augmentation des applications vidéo associées à de nouvelles installations terminales. À l'heure actuelle, les trois sous-ensembles traditionnels du réseau sont concernés par un processus d'évolution forte :

- Le réseau d'accès impose une contrainte forte sur les composants (spécifications techniques, coût, consommation, empreinte écologique) conduisant à un besoin important en nouvelle génération de sources ou de récepteurs;
- le réseau métropolitain doit faire face à une connectivité améliorée et certaines contraintes liées au coût d'équipement exigent de nouvelles solutions techniques entraînant des études sur de nouvelles architectures réseau depuis l'émission jusqu'à la réception;
- dans le réseau de cœur, le canal individuel traditionnel (modulé à des débits sans cesse améliorés jusqu'à 40 Gbit/s) est remplacé par des solutions qui font appel à des connaissances en communications numériques et en électronique rapide qui ont été par le passé la clef du développement des communications mobiles RF : la détection cohérente. Les modulations numériques multi-niveaux ou multi-porteuses associées à un traitement numérique du signal permettent l'amélioration indispensable de l'efficacité spectrale requise.

Dans ce vaste panorama, le groupe GTO s'appuie sur ses compétences théoriques et son savoir-faire en modélisation et en expérimentation pour développer de nouveaux concepts et participer à la recherche collaborative de pointe sur les systèmes optiques.

Ainsi, au laboratoire GTO, un premier axe de recherche concerne le développement de nouvelles techniques optiques de traitement du signal et l'analyse fonctionnelle de nouveaux composants pour les systèmes de communication. Ce champ couvre plusieurs études connexes concernant l'émission,

l'amplification et la transmission de la lumière et les nouvelles techniques de détection. Bien que le cœur de l'activité se situe dans le domaine des télécommunications, celle-ci se développe autour des domaines d'application tels que l'énergie, les procédés industriels et la défense. C'est dans cet axe que se situent la plupart de mes thèmes de recherche.

Le deuxième axe de recherche se situe plus près des réseaux réels et systèmes de transmission et concernent des sujets tels que les techniques de multiplexage, les communications haut-débit ou les architectures réseau. Comme je le présenterai par la suite, j'ai fortement contribué à cet axe en étant responsable de la plate-forme d'émission/réception à 10Gb/s.

Enfin, un dernier axe de recherche spécifique est lié aux communications quantiques et en particulier à la distribution quantique de clés pour les systèmes de cryptographie.

Les recherches expérimentales s'appuient sur un laboratoire plutôt bien équipé qui comprend une plateforme de transmission 4*10Gbit/s, des équipements « pico-seconde » permettant des expériences à 40 Gbit/s, un générateur de séquence aléatoire associé à un oscilloscope temps réel permettant l'évaluation des systèmes de transmission cohérente (100Gb/s), des expériences de caractérisation spécifiques et des expériences « capteur ».

La stratégie du laboratoire est définie de manière collégiale lors de réunions régulières. Ainsi, les thèmes de recherche résultent généralement d'un compromis entre stratégie de recherche (compétence internes, priorités, disponibilité d'équipements spécifiques, niveau des investissements) et autonomie de chaque chercheur dans le choix de ses propres axes de recherche en fonction de ses goûts et de ses compétences personnelles. L'école n'impose pas à chaque enseignant/chercheur un ratio enseignement/recherche/administration. Il n'y a par exemple pas de contraintes particulières sur la charge individuelle d'enseignement mais une charge collective à assurer au sein d'une discipline. L'équilibre prend en compte les souhaits de chacun.

Dans ce contexte, hormis mes activités de recherche, que je vais décrire plus en détail dans la suite du document, l'importance que j'accorde à l'esprit d'équipe et l'idée que je me fais du travail collectif font que :

- j'ai une forte implication en enseignement (sous toutes ses formes) par rapport à la moyenne des enseignants-chercheurs de l'école ainsi que dans tout ce qui s'y rapporte (organisation, réformes, etc.);
- j'ai également une forte implication dans les différentes instances représentatives de l'école sous des formes diverses;
- j'ai eu en charge la gestion du laboratoire pendant mes 9 premières années. Ainsi, je me suis investi dans les tâches collectives comme responsable de l'intendance du laboratoire, des commandes, achats et réparations du matériel et du soutien technique et logistique aux doctorants du laboratoire jusqu'en 2010, date de l'embauche d'un ingénieur de recherche. Je reste en charge de la partie enseignement du laboratoire.

5.2. Vue générale de mes thèmes de recherche

Avant d'être accueilli en 2001 au sein du groupe GTO, j'ai effectué ma thèse sous la direction de P. Besnard, au laboratoire d'optronique de l'ENSSAT à Lannion devenu depuis le laboratoire FOTON. Ce laboratoire était à l'époque dirigé par G. M. Stéphan et axé principalement sur l'étude de la physique des lasers. C'est sur ce sujet que portait ma thèse et plus précisément sur l'étude de l'évolution de la largeur de raie d'un laser à semi-conducteur de type DFB soumis à injection optique. J'ai alors acquis des compétences théoriques et surtout expérimentales dans les méthodes de caractérisation (analyseur Fabry-Perot, détection hétérodyne et self-hétérodyne (largeur de raie)). J'ai appliqué cette étude à la détection de signaux cohérents de très faible puissance atteignant des niveaux de puissance aussi faibles que le femto-watt. Sans aucun doute les prémisses de mon goût pour la caractérisation et les capteurs, thèmes centraux de mes activités de recherche depuis plus de dix ans à Télécom ParisTech

que je vais présenter dans ce manuscrit. Ma thèse a été à l'origine de 5 articles [1][2][3][5][16] et 18 conférences [22][23][24][25][26][27][28][29][30][31][33][35][38][40][39][42][43][44]. Celui portant sur la détection de faibles signaux cohérents par un laser est mis en annexe du document. Certaines de ces publications résultent d'un travail sur l'injection postérieure à mon doctorat dans le cadre d'une thèse que j'ai co-dirigée à Télécom ParisTech, celle de Fabien Kéfélian, et dont je ne parlerai pas dans ce document. Ma thèse m'a permis d'acquérir des compétences plus générales dans le domaines des fonctions optiques, des composants et dispositifs ainsi que des systèmes de détection et leur intégration dans les systèmes de télécommunications optiques, renforcées par l'arrivée de J.C. Simon durant mon doctorat et le développement des thèmes tournés vers les télécommunications.

Tout naturellement, j'ai donc souhaité utiliser ces connaissances pour travailler sur les systèmes en intégrant le groupe GTO et sa plateforme d'émission/réception à 10Gb/s dans un laboratoire de surcroît historiquement spécialisé dans l'injection optique.

5.2.1. Thème 1 : Caractérisation structurelle et analyse fonctionnelle de composants et dispositifs photoniques

- **Responsable d'une plate-forme de communications optiques à 10 Gb/s**

A mon arrivé, j'ai eu comme responsabilité de mettre en place une plate-forme WDM et une boucle à recirculation sur du matériel d'émission/réception récemment acquis au débit binaire de 10Gb/s ainsi que des modélisations sur des logiciels de simulation. Mes objectifs principaux étaient de conforter des modèles théoriques et d'analyser et de valider des solutions technologiques innovantes. Cette mission m'a permis de participer à différentes activités du laboratoire comme celles concernant le CDMA¹ optique ou la génération de porteuse micro-onde par injection optique en relation avec l'ensemble des collègues de mon groupe.

Je suis donc intervenu au laboratoire dans tous les thèmes de recherche nécessitant une analyse des performances systèmes à 10 Gb/s. Cette plate-forme a permis de concrétiser plusieurs études menées en partenariat avec des laboratoires publics et industriels dans des cadres contractuels ou informels mais aussi avec des entreprises émergentes dans le domaine. Durant toutes ces années, soucieux de travailler avec les membres de mon équipe, c'est avec l'ensemble de ceux-ci que j'ai rédigé mes publications.

Ceci m'a permis d'aborder des sujets aussi variés que :

- **CDMA optique** à l'aide de codeurs à base de réseaux de Bragg fibrés (Partenariat avec l'Université de Lille),
- **conversion en longueur d'onde** et démultiplexage temporel optique par mélange à quatre ondes dans les SOA,
- **récupération d'horloge** toute optique à l'aide d'une boucle à verrouillage de phase (C. Ware et D. Érasme),
- **modulateur à électro-absorption** à base de multi-puits quantiques pour la conversion en longueur d'onde (Partenariat avec le CNRS/LPN),
- **commutation de paquets** tout-optique à 10Gb/s (D. Érasme),
- **ralentissement de la lumière** par effet Brillouin dans une fibre optique (Y. Jaouen),
- **supercontinuum** généré par fibre optique à cristal photonique pour l'accès multiple à répartition par code (Projet ANR SUPERCODE, démarrage 2006),

¹ CDMA : Code Division Multiple Acces

- **caractérisation d’amplificateurs** à semi-conducteurs pour le Coarse WDM (Projet ANR AROME, démarrage 2007).

Ces études ont été à l’origine de 4 articles [4][6][10][11] et 10 publications en conférences [32][34][37][41][46][47][49][52][54][62] et permis d’encadrer 5 doctorants.

Les 15 dernières années ont vu des avancées technologiques majeures en photonique dont les fibres microstructurées ou les guides à cristaux photoniques dans des guides à semi-conducteur sont des éléments phares, ouvrant la voie à de nouvelles applications ou l’amélioration d’applications existantes et notamment dans les télécommunications. La conception de sources supercontinuum fibrées, de fibres infiniment monomodes, de systèmes de compensation de dispersion intégrables ou encore de lignes à retard optique a ainsi progressé de manière considérable. Ces nouveaux composants engendrent parallèlement à leur développement un besoin important en termes d’outils théoriques mais aussi en termes de mesures et de caractérisations efficaces de leurs propriétés spatiales et spectrales. Ces techniques d’analyses doivent amener une compréhension détaillée de l’impact des processus de fabrications sur les caractéristiques et propriétés des composants et dispositifs photoniques. C’est à ce besoin majeur en instrumentation que répond en premier lieu ce thème de recherche et les activités que j’ai développées. A ce titre, je me suis intéressé au développement de plusieurs techniques de caractérisation comme la réflectométrie à faible cohérence sensible à la phase (OLCR), la caractérisation de réseau de Bragg de grande longueur et plus récemment la caractérisation de nouvelles générations de filtres ultra-fins. A la différence des études menées sur la plateforme à 10Gb/s qui concernent l’analyse « système » de dispositifs vus sous forme de « boîtes noires », l’OLCR concerne la caractérisation structurelle de composants.

- ***Interférométrie à faible cohérence sensible à la phase (OLCR)***

En 2005, un contrat a été signé entre le LNE, Alcatel et Télécom ParisTech afin de faire évoluer le banc d’interférométrie à faible cohérence développé au laboratoire par Y. Jaouen. Il s’agissait de le rendre sensible à la phase pour étendre son champ d’application. Ce thème sera développé en détail au paragraphe 6.1.2.

La réflectométrie à faible cohérence en amplitude (Optical Low-Coherence Reflectometry ou OLCR) permet la mesure de la réflectivité en fonction de l’espace à l’intérieur de composants photoniques (localisation et quantification de discontinuités, irrégularités réfléchissantes dans les guides d’ondes optiques, détermination de coefficients locaux d’absorption ou de gain de matériaux). Pour accéder à la position précise des franges d’interférences afin de déterminer la réflectivité spectrale en amplitude et en phase, appelée alors réflectivité complexe, nous avons ajouté un interféromètre cohérent permettant de connaître la position précise du miroir de référence. J’ai mené à bien le développement complet de l’OLCR de Télécom ParisTech, depuis le choix de la configuration expérimentale et de ses composants, jusqu’à la mise en place du montage optique y compris l’acquisition des données en temps réel (Labview) et le traitement de celles-ci (Matlab).

En 2006, les potentialités énormes que laissait présager cette technique nous ont poussés à lancer un travail de thèse portant sur l’étude de fibres spéciales et de guides à cristaux photoniques. Cette thèse a été co-dirigée avec Y. Jaouen et soutenue par P. Hamel en mars 2009.

Un travail spécifique sur le traitement des données nous a permis d’accéder à des cartographies temps/longueur d’onde des différentes réflexions d’un composant apportant des informations jusque là inaccessibles de façon aussi simple : composants multimodes, rétrodiffusion dans des guides à cristaux photoniques etc. Parallèlement, des outils théoriques ont été développés afin de permettre de mieux appréhender les signatures OLCR mesurées.

Cet OLCR est une aide précieuse pour le développement de composants innovants. Il fait partie aujourd'hui de l'état de l'art international et a donné lieu à 9 articles [7][8][9][12][13][14][17][18][19] et 15 communications [45][48][50][51][55][56] [57][58][59][63][64][65][66][67][69]. L'article portant sur la caractérisation de fibres spéciales et celui sur la caractérisation de guides à cristaux photoniques sont joints en annexe. Cette thèse a amené l'OLCR à un niveau de polyvalence jamais atteint. Nous avons notamment étudié les composants qui suivent :

- **Lasers** : analyse des régimes de fonctionnement d'un laser DFB à fibre dopée (FOTON).
- **Réseaux de Bragg** : mesure du temps de groupe T_g d'un réseau "chirpé" photo-inscrit dans une fibre. Validation du banc en termes de métrologie par rapport au banc du LNE (Lab. Nat. D'Essais).
- **Fibres microstructurées** : détermination de la dispersion chromatique et de la biréfringence (Alcatel). Analyse de l'évolution longitudinale des paramètres tels que la dispersion chromatique ou la biréfringence engendrée par les procédés de fabrication.
- **Composants multimodes** : mesure de la dispersion chromatique de modes LP dans une fibre multimode (OFS, Draka Comteq). Traitement des données permettant l'accès à toutes les caractéristiques de dispersion de chaque mode en une mesure unique et rapide, sans convertisseur de mode.
- **Guide à cristaux photoniques membranaires** : mesure du temps de groupe et études des défauts structurels de ces composants (Contrat ANR L2CP (Thales) dont j'ai été le représentant Télécom ParisTech). Application d'un traitement des données permettant une mise en évidence unique de tout un ensemble de phénomènes dans ces guides comme la rétrodiffusion, l'impact de la mini-bande interdite dans l'évolution du temps de groupe et ayant aidé à la compréhension des liens entre vitesse de groupe, pertes, rétrodiffusion et désordre dans la structure.
- **Micro-résonateurs polymères** : études des propriétés spectrales, de la rétrodiffusion et de la dépendance en polarisation de ces guides fabriqués par le CLO (dans le cadre du projet INOPTech dont j'ai été le coordonnateur).

La réflectométrie à faible cohérence sensible à la phase offre désormais une étendue très vaste de possibilités, une très grande capacité d'adaptation à la plupart des composants photoniques et une alternative très complète et polyvalente dans sa capacité à extraire de nombreuses propriétés afin de maîtriser les processus de fabrication et les caractéristiques physiques des composants. Le grand nombre de publications montre une réelle reconnaissance internationale.

- ***Caractérisation de réseau de Bragg fibré (FBG) par luminescence bleue***

En 2009, suite aux différentes collaborations menées dans le cadre de l'OLCR, nous avons participé au montage d'un projet FUI dont le partenaire central 3S Photonics souhaitait industrialiser des réseaux de Bragg de grandes longueurs (>30cm). Les applications de ce genre de filtre sont nombreuses comme par exemple la compensation de dispersion chromatique de la bande C toute entière (Alcatel Submarine Network) par des FBG chirpés large bande, le CDMA optique (réalisation des décodeurs/encodeurs) ou encore des applications capteur.

Cependant, la fabrication de ce type de filtre est un défi technologique car les méthodes de photo-inscription consistent à concaténer des réseaux d'une centaine de micromètres de long, les uns à la suite des autres. Cette juxtaposition engendre des sauts de phase au niveau des transitions, provoquant un phénomène appelé « ripple » dans la réponse spectrale et éloignant ainsi les caractéristiques du filtre du cahier des charges souhaité.

Pour faire progresser les méthodes de fabrication et de photo-inscription développées par 3S Photonics et l'université de Lille, il fallait développer des nouveaux moyens de caractérisation, permettant d'extraire le profil d'indice et les défauts éventuels, les méthodes existantes n'étant adaptées qu'aux FBG courts. C'est dans ce contexte que s'est créé le projet FUI 8 CHRONOS dans lequel j'étais

représentant Télécom ParisTech et qui nous a permis de financer la thèse de Serge Tsyer que j'ai co-dirigée qui s'achève en septembre 2012 et qui a donné lieu à trois 3 articles de congrès [70][71][75] et une publication en cours de soumission.

Après avoir démontré l'inefficacité des méthodes de reconstruction itératives de type Layer Peeling² à retrouver la modulation d'indice d'un réseau dépassant quelques millimètres de longueur, nous avons développé une méthode basée sur l'étude de la luminescence bleue. La photo-inscription consiste à insoler une fibre photo-sensible par des franges d'interférence dans l'UV. La luminescence bleue est émise lorsque ces franges d'interférences UV relisent le réseau après l'inscription. Le signal est détecté en sortie de fibre de deux manières différentes, ce qui permet d'extraire les variations DC et AC de l'indice de réfraction ainsi que les sauts de phase. Elle s'applique à des longueurs de réseau jusqu'au mètre. Cette méthode est une aide précieuse à la fabrication. Des perspectives sont à l'étude avec l'université de Lille en vue d'un transfert industriel.

- **Technique de caractérisation de filtres ultrafins**

Depuis novembre, je m'intéresse en collaboration avec la société Lannionaise Yenista Optics à la caractérisation de filtres ultra-fins. Yenista Optics conçoit et fabrique des filtres et des lasers accordables, un testeur de composants et une plate-forme de test multifonction. La société fournit également des modules optiques et des instruments sur une base OEM³. Les nouvelles générations de systèmes de télécommunications permettant des débits supérieurs à 100 Gb/s font appel à la détection cohérente, thème de recherche qui est par ailleurs développé par d'autres membres de GTO. Elle permet l'utilisation de formats de modulation à haute efficacité spectrale (QAM⁴, OFDM⁵...). L'insertion/extraction de bandes spectrales requiert l'utilisation de filtres optiques ultra-fins (quelques dizaines de picomètres), flat-top de surcroit et de pentes ultra-raides (plusieurs centaines de dB/nm). L'étroitesse de la bande passante et la raideur des pentes imposent de disposer d'une très grande résolution pour échantillonner correctement la fonction de transfert et en extraire les paramètres pertinents tels que la PDL⁶, la PMD ou la dispersion chromatique. Cependant, les techniques de caractérisation actuelles de ce genre de paramètres atteignent leurs limites. Le but de cette collaboration est de développer de nouvelles techniques de caractérisation pour permettre à Yenista de certifier les paramètres de ces filtres. Elle s'est traduite par une convention CIFRE dont je suis directeur de thèse (Vincent Henri).

Ce sujet de recherche s'inscrit donc parfaitement dans mon champ de compétences et est parfaitement cohérent avec mes activités de recherche menées depuis dix ans. Elle s'est traduite pour l'instant par un poster au JNOG'12 [77].

Dans la plupart des cas, ces outils d'analyse au développement desquels j'ai contribué ont permis des interactions fortes avec des industriels et des fabricants de composants et ont même abouti à une rétroaction visant à redéfinir et/ou améliorer les processus de fabrication comme avec Thales R&T pour les guides à cristaux photoniques et avec 3S Photonics pour les réseaux de Bragg de grande longueur. Le détail ainsi que les différentes collaborations seront présentés dans la partie 6 : « détail de mes thèmes de recherche ».

D'un point de vue plus fondamental, cela m'a permis de comprendre et d'assimiler de nombreux mécanismes physiques et théoriques qui régissent le fonctionnement de ces composants.

² La méthode de Layer Peeling permet de reconstruire un profil de modulation à partir de l'enregistrement de sa réflectivité complexe (par OLCR ou OFDR)

³ Electro-Optical Module

⁴ Quadrature Amplitude Modulation

⁵ Optical Frequency Domain Multiplexing

⁶ PDL : Polarization Dependance Loss, PMD : Polarization Modal Dispersion

5.2.2. Thème 2 : Capteurs à fibre optique distribués basés sur l'effet Brillouin

Ce projet répond à un besoin de diversification du laboratoire historiquement axé sur les thématiques de télécommunications et correspond à mon goût pour la recherche appliquée.

Passer d'un thème « caractérisation de composants photoniques » à un thème « capteur » est finalement assez cohérent. En effet, s'intéresser aux communications optiques et vouloir en augmenter le débit consiste sans cesse à essayer de s'affranchir de certains phénomènes physiques qu'il faut appréhender. La responsabilité de la plateforme 10Gb/s ainsi que le développement de l'OLCR m'ont ainsi permis de parfaire mes connaissances de nombreux phénomènes physiques. Passer au domaine des capteurs consiste simplement à se servir de ces phénomènes, à tenter de les exacerber pour détecter des phénomènes physiques. Ce domaine nécessite également une bonne connaissance en instrumentation.

En 2006, j'ai donc développé un thème de recherche portant sur les capteurs à fibres optiques distribués. Les applications étudiées actuellement sont la mesure de la température et des déformations dans les structures de génie civil pour la surveillance des ouvrages d'art (pont, tunnel, route, ...). Nos études se sont concentrées sur la mesure des variations des propriétés de la lumière dans les fibres optiques par effet Brillouin, en amont de l'application directe des capteurs. L'effet Brillouin étant un phénomène non-linéaire qui se caractérise par la génération de fréquences supplémentaires dans le spectre rétro-diffusé, le paramètre étudié est la variation de la fréquence de ces raies quand les mesurandes changent. En revanche, de nombreuses interrogations subsistent notamment parce que l'effet Brillouin est à la fois sensible aux deux paramètres étudiés sans qu'on sache les discriminer. Séparer ces deux effets reste donc un verrou technologique à lever. Il est également d'améliorer la sensibilité en déformation C_ϵ du décalage Brillouin ($20 \mu\epsilon/\text{MHz}$, état de l'art actuel⁷). Cette thématique a été amorcée en 2006 et sera détaillée dans le paragraphe 6.2. Il est le fruit d'une collaboration entre EDF R&D, le LCPC, l'ANDRA et Télécom PARISTECH.

Nous avons montré qu'il est indispensable de prendre en compte les caractéristiques physico-chimiques et géométriques de fabrication pour prédire correctement le spectre Brillouin afin de pouvoir concevoir une fibre possédant un spectre Brillouin adapté. Dans ce cadre, il a été développé des outils numériques qui permettent de prédire le spectre Brillouin de toute fibre optique dont les paramètres d'élaboration sont connus (profil de dopage, contraintes internes) en lien avec des fabricants de fibres (Draka, XLIM, iXfiber). L'outil numérique permet également aujourd'hui de prédire l'évolution du spectre Brillouin en fonction de l'état de déformation de la fibre (i.e. calculer la sensibilité à la déformation C_ϵ du spectre Brillouin d'une fibre donnée), le but étant de pouvoir définir une fibre, inexistante actuellement, compatible avec nos applications. Les codes de calcul sont désormais au niveau de l'état de l'art international et s'appliquent à différentes familles de fibres telles que les fibres à symétrie de révolution et les fibres à maintien de polarisation et ce quelque soit le niveau de dopage ou de contraintes internes (méthode FEM, vectoriel ou scalaire).

Nous avons également mis en place un banc de mesure réflectométrique temporelle par effet Brillouin (B-OTDR : réflectométrie temporelle par effet Brillouin) pour confronter modélisation et expérience. Un banc de traction de fibre a été créé, en partenariat avec le LCPC et la société lannionaise IDIL pour pouvoir réaliser des calibrations systématiques des fibres en température et en

⁷ La déformation ou allongement relatif ϵ d'un élément unidimensionnel de longueur L_0 est défini comme : $\epsilon = \Delta L/L_0$. La déformation est donc une grandeur sans dimension mais on l'exprime souvent en % ou en $[\mu\epsilon]$ qui est équivalent à $[\mu\text{m}/\text{mm}]$.

déformation. Enfin, nous effectuons des essais terrains sur des capteurs commerciaux en partenariat avec l'ANDRA et la SNCF afin de confronter les différentes solutions actuelles (commerciales ou non).

Cette étude m'a permis d'encadrer deux thèses, celle de V. Lanticq soutenue en 2009 puis celle de Y. Sikali en cours de finalisation. Ce travail a donné lieu à 3 articles [15][20][21] et 8 conférences [53][60][61][68][72][73][74][76].

Les études menées sur toutes ces fibres à l'aide de notre modèle théorique, nous laisse penser qu'un fort dopage Al_2O_3 dans une fibre silice offrirait une augmentation d'au moins 50% de la sensibilité de la fibre à la déformation, un des buts d'EDF pour ses applications. Ceci pourrait permettre également de résoudre le problème de la discrimination de la température et de la déformation. Une autre étude est également envisagée avec la société Cementys sur la mise au point d'un capteur acoustique distribué bas-coût.

5.2.3. Conclusion

En résumé, mes activités de recherche sont centrées sur l'instrumentation, la caractérisation et la modélisation fonctionnelle des dispositifs optoélectroniques et optiques et sur leur insertion dans les systèmes et dans les réseaux optiques. Je les ai étendues au domaine des capteurs à fibres optiques répartis dans le génie civil pour la surveillance des ouvrages d'art. Elles m'ont permis de co-diriger 6 thèses et de publier régulièrement.

La réalisation technologique des composants et des dispositifs optoélectroniques ne correspond pas à la vocation ni aux potentialités de Télécom ParisTech. Ces études s'effectuent donc dans le cadre de nombreux partenariats, souvent internationaux, contractuels ou informels, avec les laboratoires de technologie et les laboratoires développant des systèmes et des réseaux. Ces partenariats s'élargissent, aujourd'hui, aux nombreuses industries émergentes du domaine. Il est à noter que toutes ces thématiques de recherche proches des applications permettent une interaction très forte avec l'enseignement, en particulier de spécialisation en 2^{ème} et 3^{ème} années.

6. DÉTAIL DE MES TRAVAUX DE RECHERCHE

6.1. Caractérisation structurelle et analyse fonctionnelle de composants et dispositifs photoniques

Cette partie détaille la plupart des thématiques que j'ai résumées dans le paragraphe 5.2.1.

6.1.1. Analyse fonctionnelle de composants et dispositifs photoniques à 10Gb/s

Comme je l'ai montré dans le résumé, la responsabilité de la plateforme à 10Gb/s m'a amené à étudier de nombreux composants et dispositifs photoniques en termes de performances « système ». Plutôt que de détailler tous les sujets que j'ai abordés, depuis les composants à semi-conducteur jusqu'aux fonctions optiques fibrés, je préfère me concentrer sur l'étude du CDMA optique. Ce thème a été l'objet de deux thèses au laboratoire. Bien que je n'ai pas participé à la direction de ces thèses, j'ai participé activement à leur encadrement au laboratoire, œuvrant ainsi à la bonne réussite de leurs expérimentations.

Le but des systèmes OCDMA est de réaliser des « réseaux optiques partagés » où la bande passante de la fibre est allouée à plusieurs usagers. N utilisateurs sont connectés à un simple coupleur optique, chacun d'eux ayant une séquence de code qui lui est propre. Le signal codé en provenance de l'émetteur est diffusé à tous les abonnés du réseau. A la réception, chaque abonné reçoit la somme de tous les signaux diffusés et extrait celui qui lui est destiné s'il connaît la séquence du code utilisée par l'émetteur.

Le codage et le décodage étaient effectués à l'aide de réseau de Bragg superstructurés. Ce type de FBG est une structure composée de réseaux de Bragg uniformes séparés par des sections de fibre optique de longueurs variables. Ce sont des dispositifs clés de ces systèmes car ils permettent d'implémenter les codes et de reconnaître les utilisateurs. En particulier, l'adaptation entre le codeur et le décodeur doit être quasiment parfaite afin de restituer correctement l'information codée. Il est donc important d'analyser les caractéristiques et les performances de ces dispositifs et d'évaluer l'impact des différences technologiques observées entre les codeurs et les décodeurs sur les performances d'un système OCDMA.

Nous avons analysé les performances de notre système en termes de taux d'erreurs binaires (TEB) face aux différentes sources de bruit présentes et en fonction du type de code utilisé. Les principales sources de bruit sont les interférences d'accès multiples et le bruit de battements. La présence de différents utilisateurs dans les systèmes OCDMA introduit un bruit d'interférences d'accès multiples. Ce niveau d'interférences est conditionné par les propriétés de corrélation de la famille de code utilisée. De plus, dans la majorité des systèmes OCDMA, une détection quadratique est utilisée. Un bruit de battement aura alors lieu entre le signal utilisateur et les signaux interférants et entre les signaux interférants eux-mêmes. Ce bruit est particulièrement important dans le cas des systèmes cohérents.

Le montage expérimental était relativement complexe à mettre en œuvre. Il consistait à créer, avec le matériel disponible au laboratoire, un train d'impulsions de largeur 100ps, de fréquence de répétition de 1GHz à 2.5 GHz suivant l'étude et modulé de manière PRBS⁸ à la même fréquence. J'ai pour cela proposé un montage utilisant une première valise d'émission à 10Gb/s servant à générer ce train d'impulsions RZ (Figure 1, premier étage). Puis une deuxième baie d'émission permettait cette fois de générer la séquence PRBS voulue (second étage). La séquence est alors envoyée via un amplificateur

⁸ Pseudo Random Bit Sequence

et un coupleur vers les deux codeurs S-FBG-PS1 et S-FBG-PS2. Afin de simuler une transmission provenant de deux utilisateurs différents, le premier codeur est précédé de 1km de fibre afin de décorréler les deux signaux.

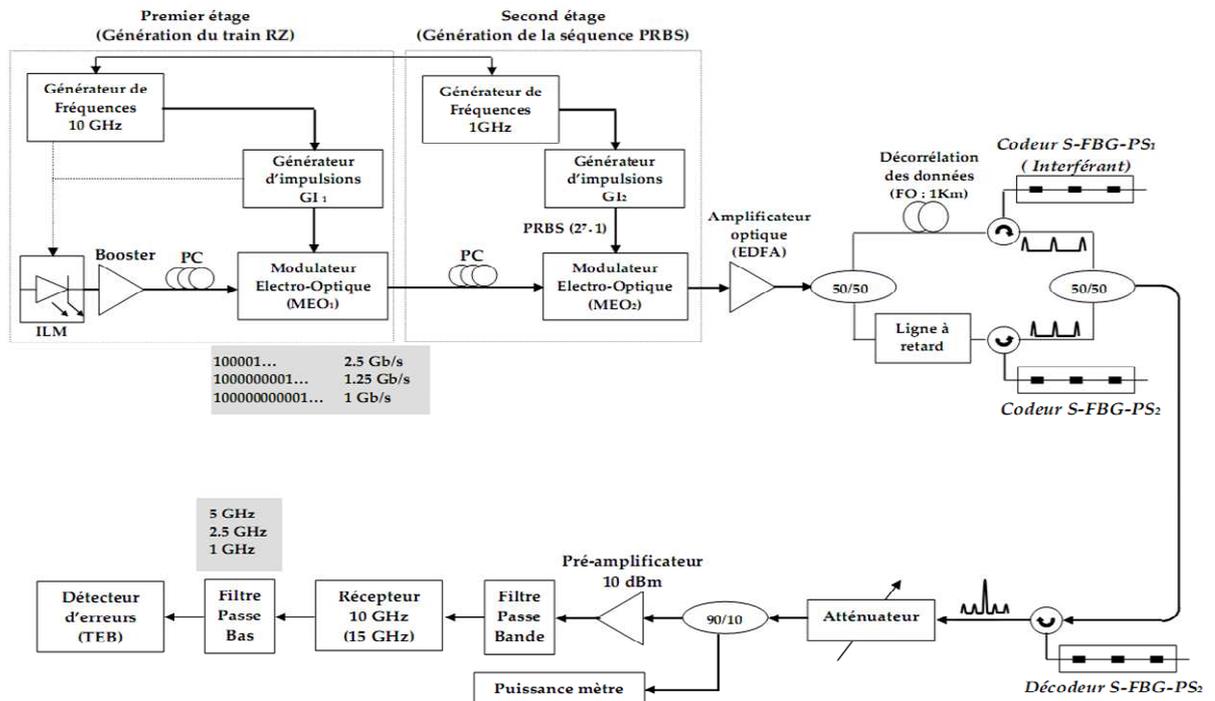


Figure 1. Banc expérimental pour la mesure du TEB avec multiplexage de deux utilisateurs

Le signal est ensuite transmis puis décodé par le décodeur adapté à l'utilisateur 2. Ce signal décodé est ensuite analysé en termes de TEB, via un pré-amplificateur optique, par la valise de taux d'erreurs à 10Gb/s cadencée pour l'occasion au débit souhaité de 1 à 2.5Gb/s.

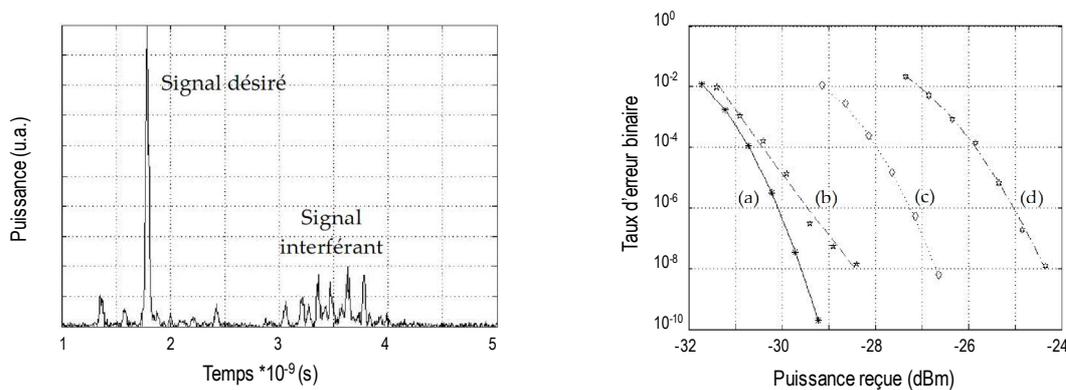


Figure 2. Gauche : fonction d'auto-correlation dans une configuration à deux utilisateurs. Droite : Mesures de TEB (1Gb/s par utilisateur) : a) « Back to back », b) mono-utilisateur, c) deux utilisateurs en configuration asynchrone, d) configuration synchrone.

La Figure 2, gauche, montre le signal d'autocorrelation après le décodeur, en présence d'un interférant dans le cas asynchrone. On constate que le système de codage/décodage permet de retarder l'interférant par rapport au signal désiré. Le signal désiré est ici décodé correctement, présentant un pic central important et des lobes secondaires relativement faibles.

La Figure 2, droite, présente l'évolution du taux d'erreurs binaires en fonction de la puissance optique reçue par le pré-amplificateur. La trace a) représente le cas en « back-to-back, courbe de

référence permettant de s'affranchir de la chaîne d'émission/réception. La trace b) montre le TEB en configuration mono-utilisateur, les traces c) et d) en configuration bi-utilisateurs asynchrones et synchrones respectivement. On constate que la pénalité entre les cas synchrone et asynchrone est de 2dB à $TEB=10^{-9}$. Les performances du système sont peu dégradées par la synchronisation des deux signaux, le cas synchrone étant considéré comme le pire des cas en OCDMA, les bruits de battements générés augmentant lors du recouvrement des impulsions utilisateurs et interférants.

6.1.2. Interférométrie à faible cohérence sensible à la phase

Les composants photoniques innovants peuvent être constitués de fibres optiques de toutes sortes mais également de guides optiques à semi-conducteur, en polymère, en silice, etc. Leur optimisation requiert une connaissance très précise de leurs paramètres tels que la dispersion chromatique, les pertes en fonction de la longueur d'onde, la biréfringence, le gain, les sauts de phase, etc.

Concernant la dispersion chromatique d'une fibre optique, de nombreuses techniques ont été proposées pour la mesurer comme la méthode de la modulation de la phase (Phase Shift Method : PSM) [6.1][6.2], la réflectométrie optique dans le domaine fréquentiel (Optical Frequency Domain Reflectometry : OFDR) [6.1][6.4][6.5], l'interférométrie en lumière blanche (White Light Interferometry : WLI) [6.6][6.7], la méthode du temps de vol [6.8], l'analyseur Fabry-Pérot [6.9], etc. La plupart de ces méthodes sont peu polyvalentes. Soit elles nécessitent une longueur relativement grande de fibre (>20m) tout en ayant une faible dynamique de mesure, soit leur temps d'acquisition est long, soit elles sont peu adaptées à la caractérisation de composants multimodes.

La technique dite de réflectométrie à faible cohérence (Optical Low Coherence Reflectometry : OLCR) est apparue à la fin des années 1980 [6.10][6.11]. Au départ, cette technique ne permettait l'accès qu'à l'enveloppe des interférences et ses applications étaient donc limitées à la mesure de pertes, la détection de défauts localisés ou d'inhomogénéités d'indice. Elle est ensuite devenue une des techniques les plus polyvalentes en ajoutant l'accès à la phase du réflectogramme, permettant ainsi de déterminer précisément le temps de groupe et la dispersion. La connaissance de la réflectivité complexe permet alors de caractériser une grande variété de composants et de paramètres comme l'extraction de la modulation d'indice d'un réseau de Bragg, la variation d'indice complexe dans un laser DFB, le coefficient de couplage d'une cavité en anneau, etc.

Au contraire des autres méthodes précédemment citées, l'OLCR n'a besoin que d'un tronçon très court (i.e. < 50cm) pour extraire les informations sur la dispersion. Elle permet donc de caractériser des fibres optiques aussi bien de type télécom (SMF, DSF, LEAF...) que spéciales (dopées, micro-structurées, faiblement multimodes...) qu'elles soient monomodes ou multimodes. La spécificité de l'OLCR à ne nécessiter que des tronçons très courts permet de caractériser également des composants de type semi-conducteur (lasers, SOA, guides à cristaux photonique, guides polymères...).

Dans cette partie, je commencerai par présenter le principe de fonctionnement de l'OLCR sensible à la phase et la méthode utilisée pour caractériser une fibre optique. Plus spécifiquement, je montrerai comment extraire les données telles que le temps de groupe (GD), la dispersion chromatique (GVD) et la biréfringence (B) d'une fibre optique et les différentes performances (résolution, sensibilité, etc.) du montage que j'ai mis en place.

La suite concernera la caractérisation de fibres spéciales et de composants à cristaux photoniques afin de démontrer les potentialités multiples de l'OLCR qui ont été développées au laboratoire de Télécom ParisTech. Nous verrons que l'OLCR est une technique polyvalente pour déterminer la dispersion chromatique de chaque mode LP simultanément, quelque soit leur GD respectif. Nous verrons également la capacité de l'OLCR à déterminer la dépendance à la longueur d'onde des pertes par propagation ou des pertes par courbure de chaque mode. La fin de cette partie sera consacrée aux guides à cristaux photoniques (PhC). La polyvalence de la technique OLCR joue un rôle important dans

l'étude des PhC et la compréhension de l'influence du désordre structural sur les propriétés de ces composants et notamment dans des régions spectrales très dispersives.

Le but de cette partie n'est pas de dresser un catalogue exhaustif de toutes les fibres et composants qui ont pu être étudiés ces dernières années au laboratoire à travers divers partenariats ou projets mais de présenter quelques résultats illustrant toutes les potentialités de ce banc développé à Télécom ParisTech, au niveau de l'état de l'art international.

6.1.2.1. Description du montage expérimental

L'OLCR repose sur le principe de l'interféromètre de Michelson éclairé par une source large bande dont l'un des bras est composé d'un miroir de translation et l'autre du composant sous test comme montré sur la Figure 3. Une source Er³⁺ super-fluorescente de type flat-top permet la caractérisation de composants sous test sur la totalité de la bande C+L (i.e. 1525-1605nm). Le réflectogramme est obtenu en faisant varier la différence de chemin optique τ entre les deux bras de l'interféromètre via le miroir de translation à une vitesse constante ($\sim 1.0\text{mm/s}$). Le signal d'interférence est recueilli sur un photo-détecteur équilibré faible bruit permettant de s'affranchir du fond continu. Les interférences n'apparaissent que lorsque la différence de chemin optique est inférieure à la longueur de cohérence de la source blanche ($\sim 40\mu\text{m}$ dans l'air). Un polariseur variable peut être placé à l'entrée de l'OLCR pour caractériser séparément chaque mode de polarisation du composant étudié si celui-ci se révèle biréfringent.

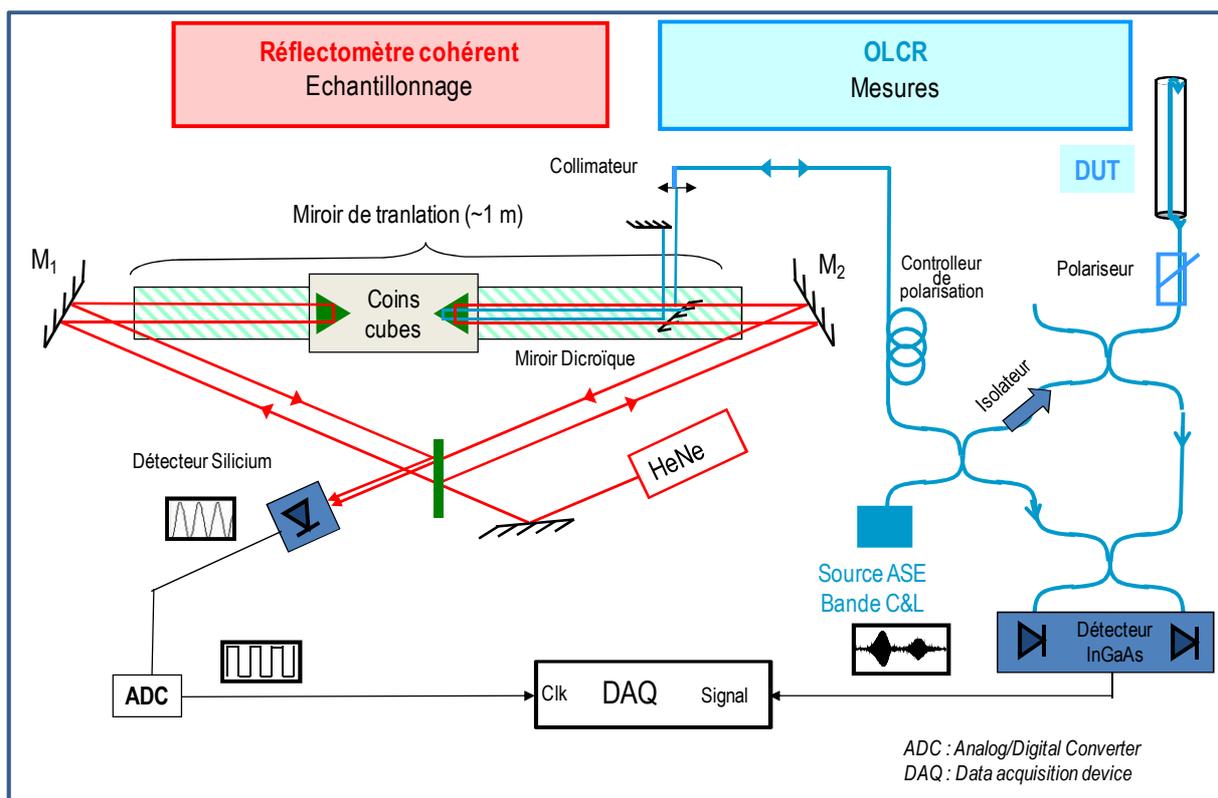


Figure 3. Schéma expérimental de l'OLCR

Pour connaître précisément la position du miroir de référence et ainsi avoir accès à la phase du réflectogramme, le signal d'un interféromètre cohérent à la longueur d'onde de 632.8nm est inséré sur le miroir mobile, associé à une boucle à verrouillage de phase (PLL) comme signal de déclenchement d'une carte d'acquisition permettant l'échantillonnage du signal issu de l'OLCR avec une période de

80nm. Cette configuration d'interféromètre permet d'éviter toute réflexion vers le laser (les coins cubes décalant spatialement ce retour) et ainsi maximiser sa stabilité. Le réflectogramme $I(\tau)$ peut être exprimé en fonction de τ par :

$$I(\tau) \propto \frac{1}{4\pi} R \left\{ \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) \tilde{r}(\omega) d\omega \right\} \quad (1)$$

où $S(\omega)$ représente la densité spectral de puissance de la source blanche et $\tilde{r}(\omega) = |\tilde{r}(\omega)| \exp[j\varphi(\omega)]$ la réflectivité complexe du composant sous test. On constate que le réflectogramme est essentiellement une transformée de Fourier de la réflectivité complexe pondérée par la densité spectrale de la source.

Ainsi, enregistrer l'interférogramme permet :

- de retrouver la réflectivité complexe du composant sous test par transformée de Fourier de $I(\tau)$,
- de retrouver l'évolution spatiale de l'amplitude $A(z)$ et de la phase $\varphi(z)$ de $\tilde{r}(\omega)$ par transformée de Hilbert.

6.1.2.2. Mesure de la dispersion chromatique (GVD)

Le balayage sur la longueur complète de la fibre permet d'obtenir 2 interférogrammes correspondant respectivement aux réflexions sur les faces d'entrée et de sortie de la fibre comme le montre la Figure 4. L'interférogramme de la face de sortie est clairement élargi par rapport à celui de la face d'entrée à cause de la dispersion chromatique. Les deux réflectogrammes sont ensuite isolés numériquement puis une transformée de Fourier rapide (FFT) est appliquée à chacun pour obtenir les réflectivités complexes associées. Le temps de groupe relatif T_g est alors déduit de la différence entre l'entrée et la sortie d'après l'expression :

$$T_g = \frac{d}{d\omega} [\varphi_{sortie}(\omega) - \varphi_{entrée}(\omega)] \quad (2)$$

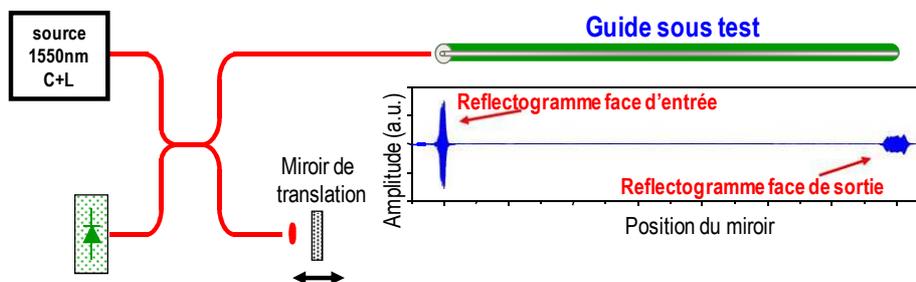


Figure 4. Principe de fonctionnement de l'OLCR pour la caractérisation d'une fibre optique. La translation du miroir de référence permet d'enregistrer 2 interférogrammes correspondant respectivement aux faces d'entrée et de sortie. La dispersion chromatique induit un élargissement de l'interférogramme.

Une approximation des moindres carrés est ensuite appliquée à la courbe d'évolution du temps de groupe pour en déduire l'évolution du GVD. Le type d'approximation dépend de la dispersion étudiée : une approximation de Sellmeier à 3 ou 5 termes quand la dispersion matériau prédomine ou un polynôme du second au cinquième ordre quand la dispersion du guide est supérieure. L'évolution du paramètre de dispersion à travers l'intégralité de la bande C+L peut être déduite par différentiation du temps de groupe en fonction de la longueur d'onde suivant la formule :

$$GVD = \frac{1}{2L} \frac{dT_g}{d\lambda} \quad (3)$$

où L est la longueur de la fibre étudiée.

Généralement, pour ne pas dépasser les capacités de mémoire de l'ordinateur et pour minimiser le temps de mesure, les interférogrammes des faces d'entrée et de sortie de la fibre sont enregistrés séparément. Ceci engendre que la pente de la phase est donnée à une constante près : la mesure du temps de groupe n'est alors que relative. Dans le cas de guide très petits (<qq mm), le temps de groupe peut être déterminé de manière absolue.

6.1.2.3. Performances et résolution

Comme nous l'avons dit, la longueur de cohérence de la source dans le vide est $40\mu\text{m}$. Compte tenu d'un déséquilibre entre les deux bras en termes de distance parcourue dans le verre ou dans l'air, la résolution spatiale sur la face d'entrée est de $100\mu\text{m}$.

La résolution spectrale est elle liée au pas d'échantillonnage et au nombre de points enregistrés. Pour une excursion du miroir de 10cm, la résolution spectrale est de 10pm.

Concernant la sensibilité en intensité, le montage permet d'identifier la réflexion sur un connecteur PC mais aussi sur un connecteur APC. Sur ce dernier connecteur, le niveau du signal retour est de l'ordre de -60dB. Compte tenu de la puissance de la source, le niveau de puissance réfléchi par la face de sortie du composant doit être supérieur à -60dBm.

Enfin, il convient de déterminer la sensibilité de la mesure de dispersion. Pour une longueur de composant donné, plus la dispersion est importante, plus la précision sur la différence de phase est bonne. Plus que de valeur de dispersion chromatique limite, il est donc plus judicieux de parler de dispersion cumulée limite. Sur notre montage, au delà d'une dispersion cumulée de l'ordre de $0.05\text{ps}\cdot\text{nm}^{-1}$, la valeur de la dispersion chromatique est donnée avec une erreur inférieure à 1.5%.

6.1.2.4. Mesure de la biréfringence

En plus de la dispersion chromatique, l'OLCR permet de connaître d'autres paramètres comme la différence de temps de groupe entre deux axes propres de polarisation, que ce soit dans une fibre à forte ou faible biréfringence. Pour illustrer cela, nous avons caractérisé un tronçon de 80.1cm de fibre à maintien de polarisation (PM) de type Fujikura PANDA®. Une variation périodique dans le contraste des franges est observée lorsque le polariseur n'est pas inséré en entrée du montage. Si le polariseur est inséré et la polarisation ajustée en entrée de la fibre sous test de façon rectiligne et orientée à 45° des axes propres, les mêmes oscillations sont observées (Figure 5, gauche, 45°). Elles résultent du recouvrement de deux interférogrammes correspondant aux deux modes de polarisation se propageant avec des vitesses de groupe différentes (Figure 5, gauche, 0° and 90°). En ajustant l'orientation de la polarisation en entrée de la fibre, une réduction significative de ce phénomène de battement est observée : on privilégie alors un des axes propres confirmant ainsi l'existence de la biréfringence. Le réflectogramme correspondant à la polarisation 0° est spatialement décalé de celui de polarisation 90° d'une différence de marche Δd . De cette manière, la biréfringence de groupe $B_g = 2\Delta d/L$ peut facilement être déduite.

Le spectre correspondant à la face de sortie de la fibre sous test est présenté Figure 5 (droite) et comparé à celui de la source. Un battement est également observé et la biréfringence peut simplement être déduite du spectre sachant que $B_g = \lambda^2/(\Delta\lambda \cdot 2L)$ où $\Delta\lambda$ correspond à la période de battement. De cette manière, la valeur minimale de la biréfringence mesurable correspond à la valeur max de $\Delta\lambda$ égale à la largeur de la source ($\sim 80\text{nm}$) : pour une fibre de 1m, B_{min} est de l'ordre de 2×10^{-5} à 1550nm . Pour la fibre PM caractérisée, on retrouve pour les deux techniques une biréfringence $B_g = 4 \cdot 10^{-4}$, valeur correspondant à celles présentées par le constructeur. La détermination de B_g via le spectre plutôt que via les interférogrammes est généralement privilégiée car plus précise.

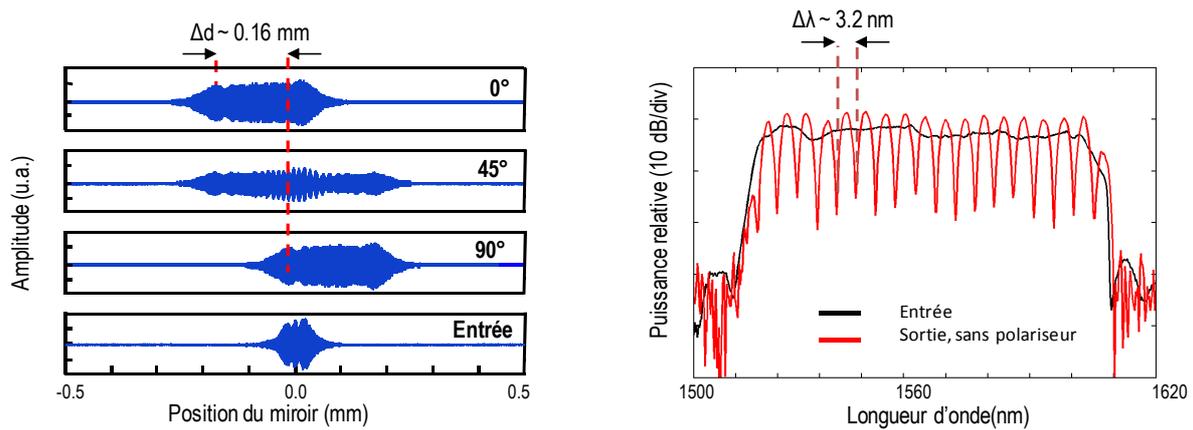


Figure 5. Gauche : Réflectogrammes correspondant aux faces d'entrée et de sortie d'un tronçon de fibre Panda. La face de sortie est caractériser pour trois orientations de la polarisation rectiligne en entrée : 0°, 45°, and 90°. Droite : Spectre de la face de sortie de la fibre Panda, sans polariseur, comparé au spectre de la source ASE de l'OLCR.

6.1.2.5. Caractérisation de différentes fibres spéciales

- *Fibre micro-structurées*

Les années 2000 ont vu apparaître les fibres micro-structurées ou fibre à cristaux photoniques (PCF) [6.12][6.13]. Elles peuvent reposer sur le guidage classique par réflexion totale interne (RTI) mais aussi sur le guidage par bande photonique interdite avec un indice du cœur plus faible que l'indice de la gaine. Les applications de ce type de fibres sont nombreuses (génération de supercontinuum, transport de forte puissance, contrôle de la dispersion chromatique, capteur...).

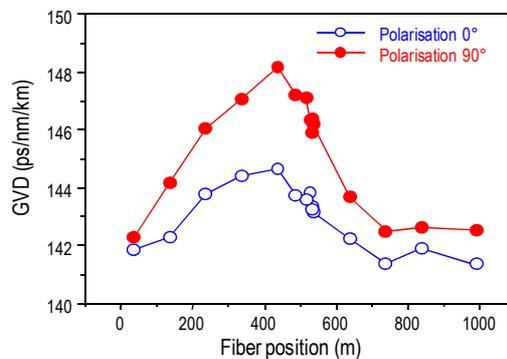


Figure 6. Dépendance de la dispersion chromatique en fonction de la longueur d'une fibre PCF à cœur plein

La complexité de fabrication de ces fibres peut engendrer des variations géométriques comparées à la structure périodique idéale souhaitée. Ainsi, les valeurs de la dispersion chromatique ou de la biréfringence peuvent s'en trouver modifiées et ainsi varier le long de la fibre pendant la fabrication. Plusieurs techniques ont été proposées pour caractériser le GVD de ce type de fibre. Puisque l'OLCR ne nécessite que des tronçons très courts de fibre, elle se montre très adaptée pour ce type de fibre compte tenu des difficultés de fabrication. Nous l'avons utilisée, en collaboration avec le fabricant de fibre Draka Comteq pour étudier l'influence des conditions de fibrage sur la valeur de la dispersion chromatique (Figure 6). Les mesures ont été réalisées sur des tronçons de fibre de 50cm de long répartis sur 1km de fibre. On peut observer une variation du GVD le long de la fibre de l'ordre de 3%.

Les mesures sur l'évolution de la biréfringence ont également été menées mais restées confidentielles, tout comme l'utilisation que Draka a fait de ces résultats concernant ses procédés de fabrication.

- *Fibres Multimodes*

Utilisant la capacité de certains guides optiques à propager simultanément plusieurs modes avec des propriétés propres, de nombreux composants fibrés ont été développés aussi bien pour les communications optiques que pour des applications innovantes telles que la compensation de dispersion, la génération ou la transmission de forte puissance [6.14][6.15]. Dans tous les cas, ces fibres faiblement multimodes, appelées fibre HOM (pour High Order Mode), requiert une connaissance précise des propriétés de propagation. Les fibres PCF peuvent également revêtir un caractère plus ou moins multimode et donc être concernées par ce type de caractérisation. Si la PSM est particulièrement adaptée aux cas des fibres monomodes, 2 convertisseurs de modes (comme des réseaux de Bragg longue période) sont nécessaires dans le cas de fibres multimode pour déterminer le GD de chaque mode LP. Pour surmonter ce problème, des techniques interférométriques ou électriques ont été proposées. Cependant, ces techniques ne fournissent que des valeurs de dispersion différentielle entre les modes et ne permettent pas de caractériser des composants où plus de 2 modes peuvent se propager. La technique OLCR est capable de caractériser ce type de fibres. La valeur absolue du GVD de chaque mode peut-être obtenue simultanément sans avoir recours à un convertisseur de mode et en n'utilisant qu'un court tronçon de fibre. Les études sur les fibres HOM ont été menées en collaboration étroite avec OFS, fabricant de fibre.

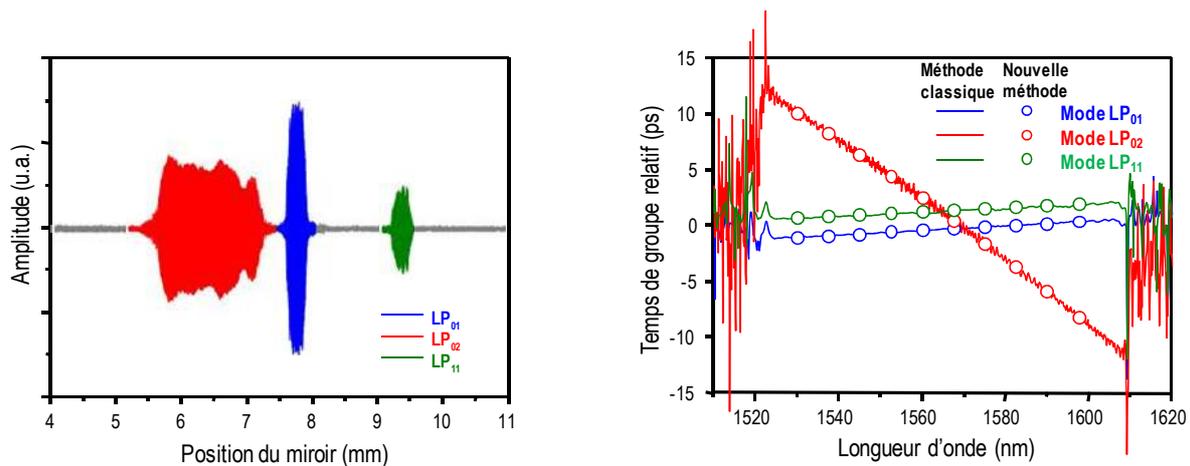


Figure 7. Gauche : Réflectogramme de la face de sortie d'une fibre multimode (longueur = 472 mm). Les enveloppes colorées correspondent aux contributions des différents modes LP. Droite : Évolution du GD de chaque mode LP: les courbes en trait plein correspondent aux résultats obtenus avec un traitement des données habituel, les ronds (o) correspondent à ceux traités avec la méthode de la cartographie temps-longueur d'onde des réflexions.

L'interférogramme correspondant à la face de sortie d'une fibre HOM est présenté Figure 7 (gauche). On observe clairement trois enveloppes distinctes correspondant à la propagation de trois modes LP distincts (LP₀₁, LP₁₁ et LP₀₂ respectivement). Leur amplitude relative est essentiellement déterminée par les conditions d'injection. La contribution de chaque mode LP peut être isolée numériquement si les indices de groupe sont suffisamment différents. Naturellement, l'élargissement de ces modes LP dépend de la valeur spécifique de leur GVD respectif. Le spectre de chaque mode peut être obtenu en utilisant le module de la réflectivité complexe et comparé à celui de la face d'entrée. Ainsi, les pertes en fonction de la longueur d'onde pour chaque mode peuvent être déduites aisément par méthode « cut back ». La Figure 7 (droite) montre l'évolution du GD pour chaque mode. On estime l'erreur sur la valeur de dispersion chromatique à 3% comparée à la valeur prédite par un modèle

théorique. Cette erreur est minime grâce à la capacité de notre banc à réaliser de multiples acquisitions dans un temps très court. Le GVD obtenu pour la fibre testée, à la longueur d'onde de 1550nm, est de 21.0ps/nm/km pour le mode LP₀₁, 20.0ps/nm/km pour le mode LP₁₁ et -273.4ps/nm/km pour le mode LP₀₂.

Cependant, le problème de séparation des différentes contributions peut s'avérer beaucoup plus complexe si les valeurs des différents indices de groupe sont suffisamment proches pour que cela engendre un recouvrement des différents interférogrammes (Figure 9). Les battements induits dans les courbes d'évolution du GD rendent difficile voire impossible la séparation des différentes contributions. Pour s'affranchir de ce recouvrement modal, une méthode appelée « cartographie temps/longueur d'onde des réflexions » a été implémentée pour extraire les propriétés du GD de chaque mode indépendamment des autres. La Figure 8 décrit les différentes étapes du processus : à partir du réflectogramme de la fibre multimode précédente (Figure 8.a.), nous appliquons numériquement un filtre passe-bande glissant pour pouvoir traiter chaque longueur d'onde séparément (Figure 8.b.). La bande passante du filtre de type Gaussien (typiquement ~2nm) est choisie par compromis entre la longueur de cohérence de la source et la valeur de la dispersion du milieu afin d'optimiser la résolution spatiale. Enfin, à l'aide d'une transformée de Fourier inverse sur le signal filtré, on obtient un réflectogramme pour chaque longueur d'onde. La Figure 8.c. présente trois « couches » de réflectogrammes spatiaux correspondant à trois longueurs d'onde différentes.

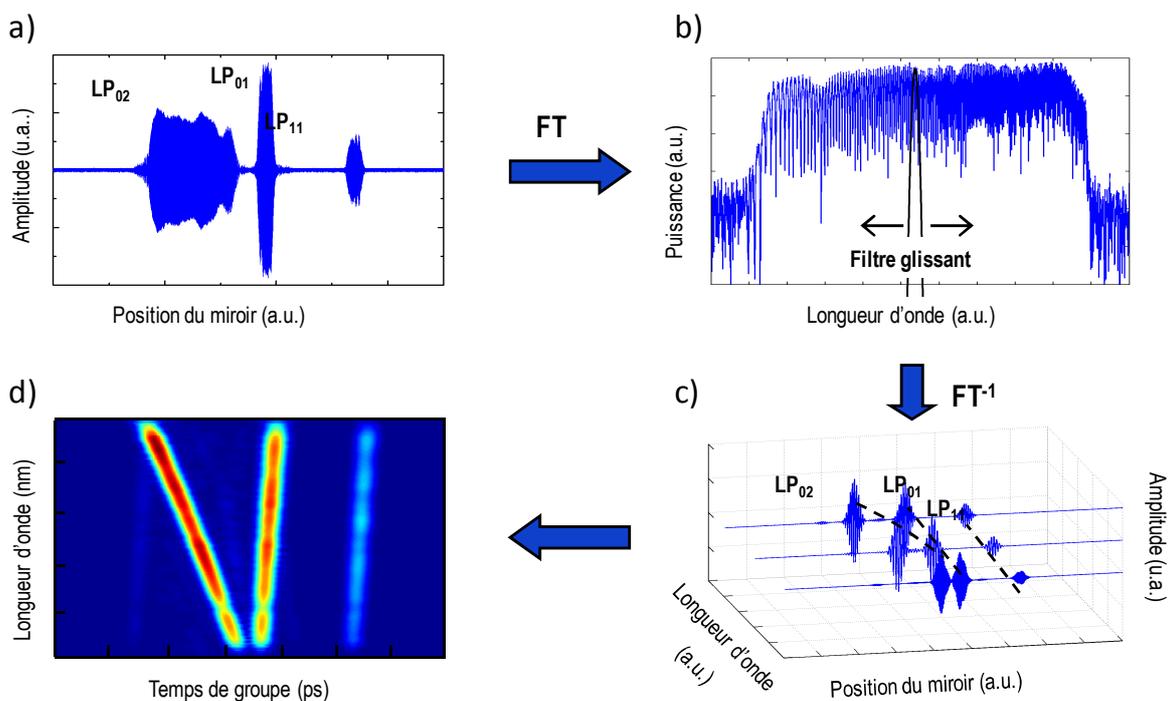


Figure 8. Principe de la cartographie 3D des réflexions. a) Réflectogramme OLCR b) Filtrage numérique c) Dépendance du réflectogramme avec la longueur d'onde. d) Cartographie temps/longueur d'onde des réflexions de la fibre HOM

La cartographie temps-longueur d'onde des réflexions correspondante est présentée Figure 8.d. Chaque réflexion est présentée par des lignes de couleurs dont la « chaleur » dépend de l'amplitude. Il est ensuite très simple d'isoler numériquement la position de chaque mode en fonction de la longueur d'onde puis de déduire l'évolution de son GD. Dans ce cas, on identifie clairement les trois modes LP. Naturellement, la pente et la courbure du maximum de chaque réflexion permet de remonter à la valeur spécifique du GVD de chaque mode. On peut observer sur la Figure 7 (droite) un très bon accord entre

la méthode classique et cette nouvelle méthode. De plus, on peut constater qu'on arrive à identifier d'autres modes de très faible amplitude dans la cartographie qui sont parfaitement invisibles par le traitement classique.

La technique de cartographie temps-longueur d'onde est particulièrement adaptée lorsque les enveloppes des différents modes LP se recouvrent (Figure 9). Sur la gauche, on peut voir l'interférogramme et la cartographie associée. Le GVD en fonction de la longueur d'onde peut être extrait (sur la droite). L'interférogramme est également analysé à l'aide d'un modèle de prédiction théorique afin d'identifier chaque mode LP par l'évolution de son indice de groupe. Pour le cas des fibres PCF, ces prédictions théoriques sont réalisées à partir d'une photographie de coupe transverse des fibres, réalisées au microscope électronique à balayage (MEB) puis une résolution FDTD.

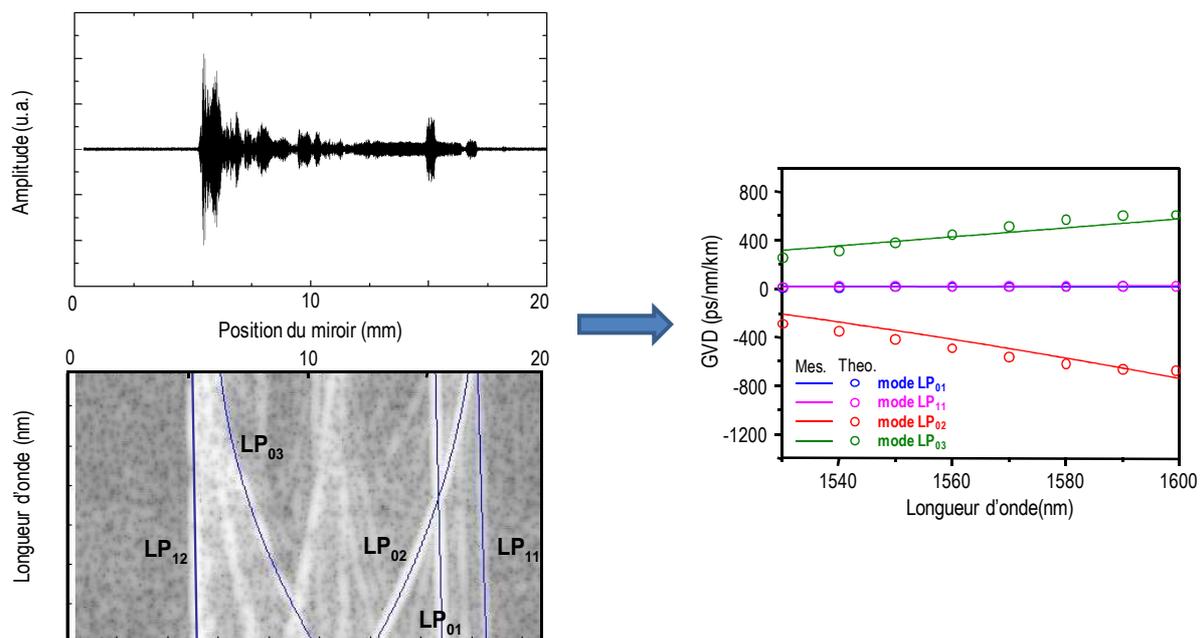


Figure 9. La technique de cartographie temps/longueur d'onde des réflexions est particulièrement adaptée quand les enveloppes des différents modes LP se recouvrent. Sur la gauche : interférogramme et cartographie. Sur la droite : évolution du GVD en fonction de la longueur d'onde (mesures et modélisations).

- *Pertes ou gain en fonction de la longueur d'onde*

Utilisant la capacité de l'OLCR d'obtenir la densité spectrale complexe, la technique OLCR peut être utilisée pour analyser les pertes par courbure (Figure 10) d'une fibre. On peut en effet avoir accès simultanément à la valeur du GD ainsi qu'aux pertes par courbure de chaque mode. Dans cet exemple, on peut constater une très forte dépendance des pertes du mode LP₀₂ avec le rayon de courbure de la fibre HOM précédente.

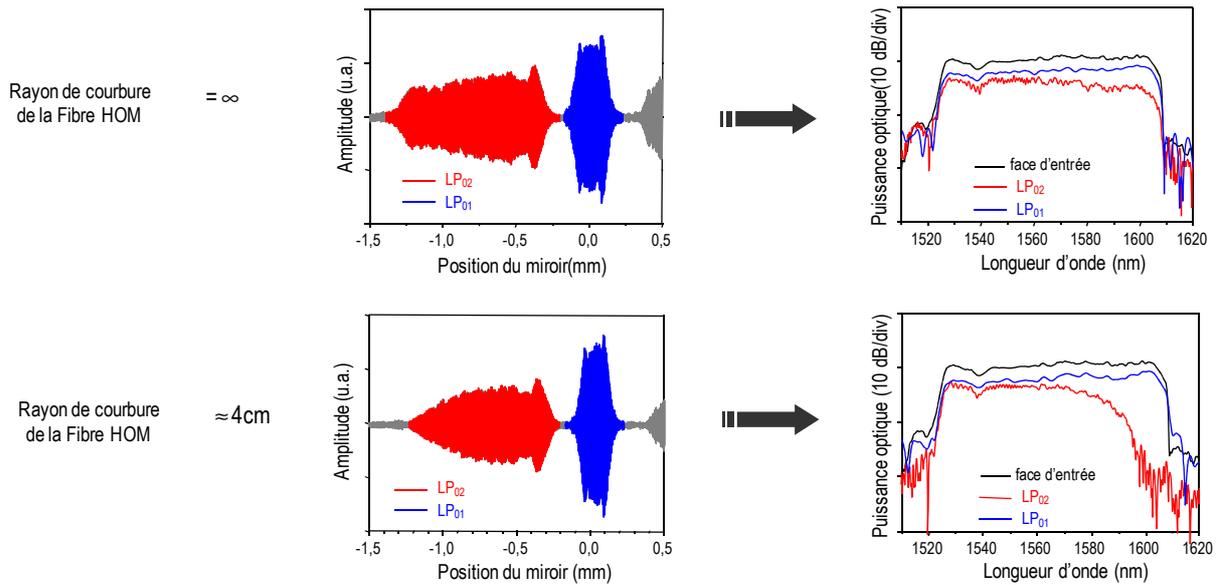


Figure 10. Analyse des pertes par courbure des modes LP d'une fibre HOM. Sur la gauche : interférogammes de la fibre HOM avec un rayon de courbure infini et de 4 cm. Sur la droite : Spectre de chaque mode correspondant.

Des études ont également été menées en relation avec la société Coractive sur des fibres dopées Er^{3+} et ont permis de caractériser les variations de temps de groupe en fonction du gain pour différentes puissances de pompe sur toute la bande C+L, en accord avec les relations de Kramers-Kronig qui relie l'indice de réfraction à l'absorption (ou au gain). Par exemple, sur la Figure 11, on peut voir à gauche l'évolution de la courbe de gain en fonction de la longueur d'onde de la fibre Erbium pour plusieurs puissances de pompe, c'est-à-dire la différence entre le module de la transformée de Fourier du réflectogramme pour une puissance de pompe nulle et ce même module pour la puissance de pompe indiquée. Parallèlement, on peut voir sur la droite l'évolution de la dispersion. A 1535nm, longueur d'onde du maximum de la courbe de gain, la dispersion varie entre -10ps/nm/km et 30ps/nm/km en accord avec les relations de Kramers-Kronig. Cette méthode, outre sa rapidité est complète dans le sens où elle fournit une observation simultanée de l'amplification, de l'indice et de la dispersion pour toutes les longueurs d'onde de la source large bande avec une précision inférieure à 1ps/nm/km pour un tronçon de fibre de 50cm. L'OLCR est la seule technique de caractérisation capable de faire ce type de mesure, compte tenu des niveaux d'absorption de ces fibres de 3 à 10dB/m.

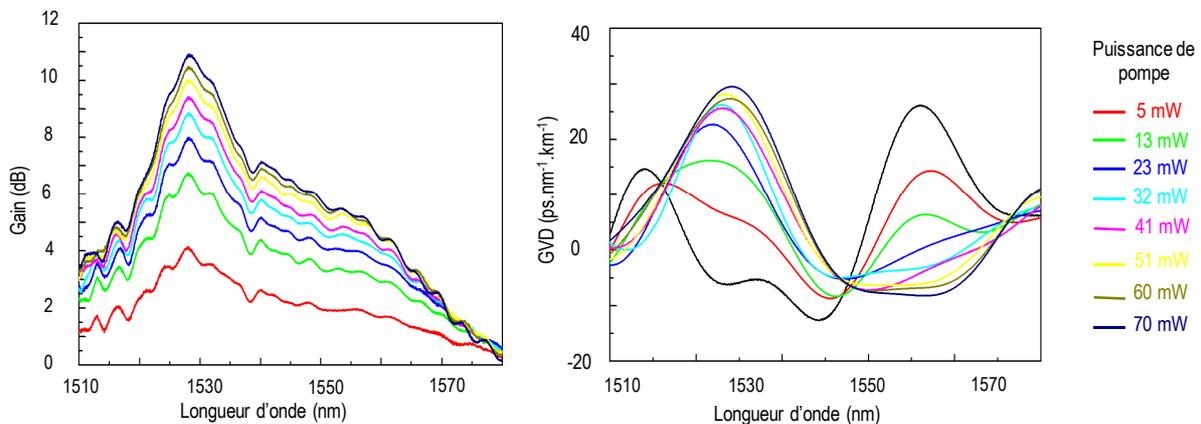


Figure 11. Gauche : Gains mesurés dans la fibre dopée Erbium en fonction de la longueur d'onde pour différentes puissances de pompe. Droite : Évolution de la dispersion chromatique avec la puissance de pompe.

6.1.2.6. Caractérisation de guides à cristal photonique

Une ligne de défauts dans un cristal photonique (PhC) à deux dimensions peut permettre de réaliser un fort confinement optique dans une certaine gamme de longueur d'onde, selon des propriétés particulières. Par exemple, la dispersion des modes permis dans le guide PhC peut être choisie de telle manière que la vitesse de groupe soit fortement réduite dans certaines régions tout en contrôlant la dispersion. Ceci permet d'envisager de nouvelles perspectives dans la réalisation de fonctions optiques ultra-compactes et intégrées (ligne à retard, compensation de GVD, ...). Par exemple, des vitesses de groupe aussi faibles que $V_g \sim c/100$ pour des composants de $37\mu\text{m}$ de long [6.16][6.17] ou quasi-constante sur une bande passante de l'ordre du THz [6.18] ont été obtenues. Le temps de groupe et la dispersion sont, en particulier, deux paramètres essentiels sur lesquels il est possible d'influer nettement [6.19][6.20][6.21]. De plus, l'utilisation des phénomènes de lumière lente (« slow-light ») ouvre des perspectives pour la réalisation de fonctions optiques (ligne à retard, compensation de dispersion..) compactes et intégrées.

Cependant, les procédés de fabrication ne sont pas parfaits et engendrent un phénomène de désordre dans la structure périodique matérialisé par des fluctuations de la taille, de la position, de la rugosité ou de la verticalité des trous. Or, les propriétés de ces guides dépendent grandement de leur géométrie et notamment de l'espacement, de la taille ou encore de la forme des trous. Par exemple, le lien entre le désordre, les pertes par propagation, la rétro-diffusion et la vitesse de groupe a fait l'objet de nombreuses recherches. En particulier, la relation vitesse de groupe/pertes [6.22][6.23][6.24] reste encore inconnue, l'interaction lumière/matière étant plus importante à vitesse lente. Ainsi, la nécessité de mesurer les paramètres critiques de ces guides d'onde apparaît essentielle pour adapter précisément ses paramètres aux applications voulues.

Nos échantillons de guides PhC ont été réalisés par Thales R&T, sur Arsénure de Gallium (AsGa) en vue de fabriquer des lignes à retard optique ajustable. Le partenariat a été effectué dans le cadre du projet ANR L2CP dans lequel j'étais le représentant côté Télécom ParisTech.

Les procédés de fabrication sont standards, basés sur l'utilisation de masques de phase associés à une lithographie par faisceau d'électrons suivie par gravure ionique réactive (RIE). Le transfert au semi-conducteur est réalisé par gravure plasma haute-densité. Par nécessité, le concept de membrane a été introduit pour pouvoir utiliser le guidage par bande photonique interdite sans trop souffrir de pertes importantes. En effet, dans le cas d'hétérostructures, c'est le seul moyen de réduire suffisamment le cône de lumière en augmentant le contraste entre le milieu environnant et le matériau dans lequel le mode est guidé et ainsi réduire le couplage de ce mode avec les modes radiatifs. Les pertes ainsi obtenues ont atteint des valeurs de l'ordre de 7dB/cm dans ce genre de guide à $1,3\mu\text{m}$ [6.25].

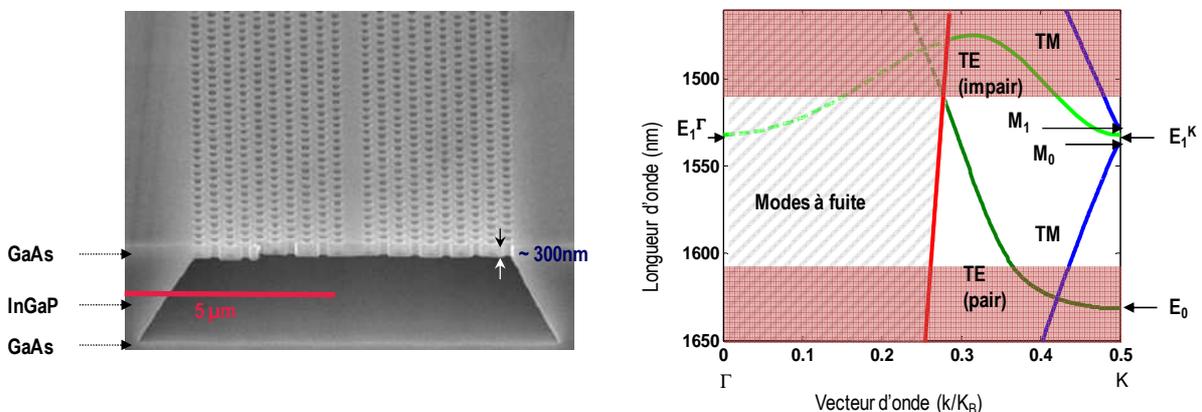


Figure 12. Gauche : Photographie MEB d'un guide à cristal photonique membranaire sur GaAs. Droite : Diagramme de dispersion modélisé par FDTD-3D pour les modes TE (vert) et le mode TM (bleu).

Une photographie réalisée au microscope électronique à balayage (MEB) d'un guide typique caractérisé est présentée Figure 12 (gauche). Une fine membrane de 270nm (0.64a) en GaAs est obtenue en supprimant une couche sacrificielle en InGaP par gravure humide. La période du réseau est $a=418\text{nm}$, avec un diamètre de trou $r=0.26a$. Le guide d'onde consiste en une rangée de trous manquants (largeur $W = 1.057\sqrt{3}a$) le long de la direction ΓK . Le diagramme de dispersion correspondant, calculé par Thales par une méthode par éléments finis (FDTD-3D) dans le domaine temporel est montré Figure 12 (droite). La ligne de lumière représente le bord du cône de lumière. Par conséquent, tout ce qui se situe à l'intérieur du cône de lumière (en hachuré sur la figure) correspond à des modes à fuites du guide. Nous distinguons trois modes différents situés à l'extérieur du cône de lumière dans la bande C+L analysable par l'OLCR : deux modes TE pair et impair et un mode TM. La courbure des bandes est proportionnelle à la vitesse de groupe. Une droite correspond donc à une dispersion nulle. Le mode TE pair (courbe gris foncé) présente un comportement typique d'une ligne de défaut unique. La vitesse de groupe est quasiment constante à basse longueur d'onde jusqu'à 1610nm. Le mode TE impair n'est quasiment pas observable car presque en totalité en dehors de la bande C+L. Concernant le mode TM, il est intéressant de noter un « mini-gap » situé entre les points M_0 et M_1 et qui provient de la modulation périodique de l'indice le long du guide marquant une réflexion totale pour les longueurs d'onde situées entre ces deux points.

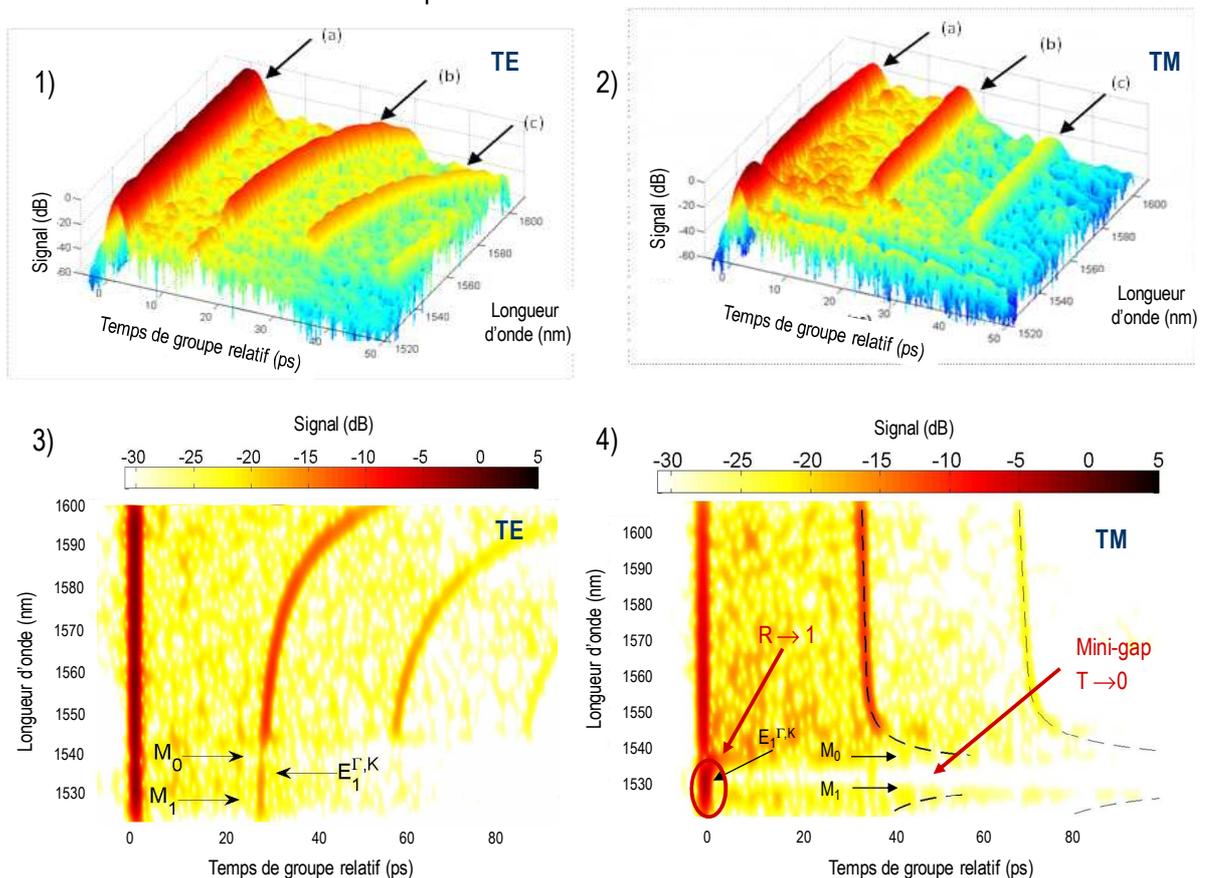


Figure 13. Cartographie temps/longueur d'onde des modes TE (1 et 3) et TM (2 et 4). En haut, vues en 3D. En bas, vues de dessus. On peut clairement observer les réflexions sur la face d'entrée (a) et après plusieurs allers-retours dans le guide (b,c).

Les mesures de GD après plusieurs allers-retours dans le guide d'onde ont été tracées sous forme de cartographie temps-longueur d'onde des réflexions (Figure 13), technique précédemment décrites. Les cartographies 1) et 2) représentent respectivement les cas TE et TM vus en relief. Les cartographies 3) et 4) représentent les mêmes cartographies mais vues de dessus. Les cartographies

des réflexions TE et TM révèlent toutes les deux plusieurs traces. Les traces à $GD = 0$ ps correspondent aux réflexions sur la face d'entrée du composant ((a)). Les suivantes correspondent aux réflexions multiples dans le composant ((b) et (c)).

Toutes les caractéristiques prévues par le diagramme de bande précédant sont retrouvées expérimentalement :

- Cas TM : on constate que le temps de groupe au dessus de 1550nm est quasi-constant montrant une dispersion effectivement faible. Nous distinguons clairement une mini-bande interdite entre 1530nm et 1540nm (Points M_0 et M_1). Sur les bords de cette mini-bande, on constate une forte divergence du temps de groupe. En effet, la variation importante des pertes engendre, par la relation de Kramers-Kronig, une variation importante de l'indice et donc du temps de groupe. Il apparait également clairement que le niveau de signal réfléchi sur la face d'entrée augmente nettement aux longueurs d'onde correspondant à cette mini-bande puisque pratiquement aucun signal n'est transmis.
- Cas TE : On constate qu'aux longueurs d'onde correspondant à la mini-bande, le signal transmis est plus faible marquant un couplage qui s'opère entre les modes TE et TM. Pour le reste de la bande C+L, le temps de groupe est quasi-constant jusqu'à ~1580nm. Au delà, le temps de groupe augmente marquant un fort ralentissement de la lumière, compatible avec la courbure de bande du mode TE pair dans la Figure 12.b.

Les mesures suivantes concernent un deuxième guide pour lequel la cartographie des réflexions montre un grand nombre d'informations (Figure 14). Il s'agit toujours d'un guide membranaire, d'épaisseur 265nm, de 1mm de long avec un guide $W = 1.057\sqrt{3}a$, ayant cette fois une période $a = 400$ nm et un rayon de trous $r=0.242a$. Le diagramme de dispersion est donné sur la figure de gauche. On constate que dans la bande C+L, seul le mode TE est visible. Sur la cartographie, l'arrière plan montre, à titre de comparaison, la trace du module du réflectogramme « classique » rendant ainsi très bien compte de l'apport du traitement numérique. On observe en *a* la réflexion sur la face d'entrée du guide, en *b*, *c* et *d* les réflexions successives sur la face de sortie après plusieurs allers-retours dans le composant.

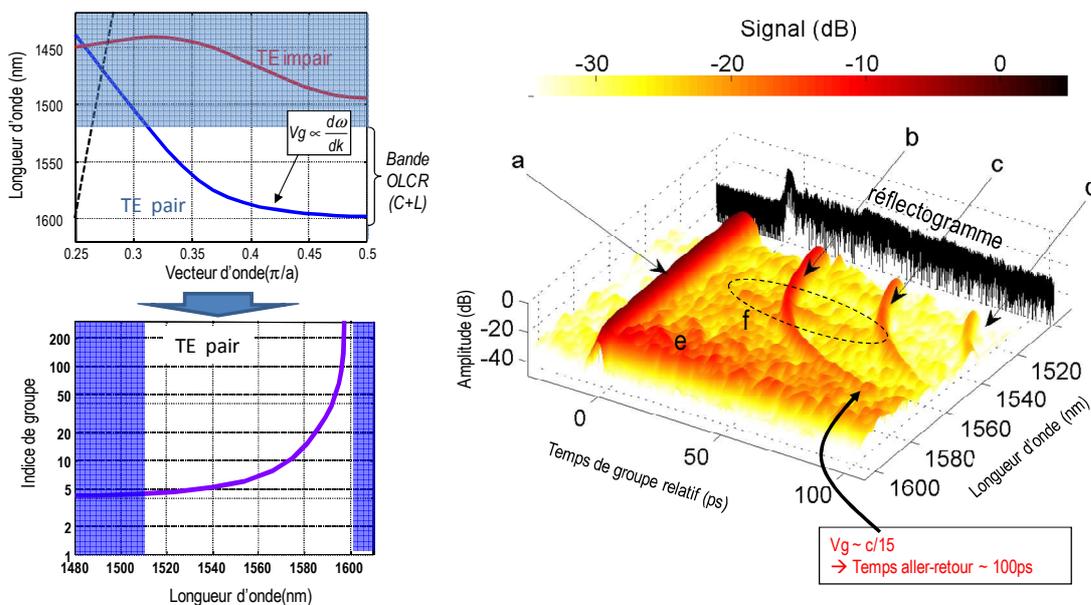


Figure 14. Modélisation (gauche) et cartographie des réflexions (droite) de l'échantillon 2. *a* : face d'entrée. *b*, *c*, *d* : réflexions successives après plusieurs allers-retours. *e* : rétrodiffusion. *f* : trace du couplage avec une cavité.

Comme le laisse présager le diagramme de dispersion et la courbure de bande du mode TE au delà de $\sim 1560\text{nm}$, la cartographie des réflexions fait apparaître une très forte augmentation du temps de groupe dans cette gamme de longueur d'onde jusqu'à 100ps marquant un très fort ralentissement de la lumière de l'ordre de $c/15$. La coupure apparaît clairement sur la cartographie puisqu'à partir de 1600nm , seule la réflexion sur la face d'entrée subsiste. Cette cartographie montre également une évolution significative du niveau de signal rétrodiffusé avec la vitesse de groupe (en e) : en régime lent (ici pour les hautes longueurs d'onde), ce signal augmente très nettement. A l'époque de cette étude, ce phénomène n'était pas expliqué.

Enfin, en f , on peut observer une trace laissée par une cavité intentionnellement insérée dans le cristal photonique. Ceci est réalisé en déplaçant de manière intentionnelle certains trous par rapport à la maille idéale. Ceci fait apparaître un niveau d'énergie dans la bande interdite permettant de coupler le guide principal avec la cavité [6.26][6.27]. Les très petits volumes des cavités associés à de forts confinements permettent des facteurs de qualité très élevés supérieurs aux centaines de milliers. Un exemple de modélisation OLCR représentant une cavité insérée à 1mm de la face d'entrée du guide est présenté Figure 15.a. Sur la figure b), on peut voir qu'il est aisé d'extraire le temps de vie de la cavité.

La capacité de l'OLCR à mesurer la durée de vie des photons à l'intérieur d'une cavité couplée au guide s'est avérée utile à d'autres fins. En effet, les phénomènes de diffusion apparaissent comme un continuum dans toutes les cartographies (voir Figure 14, f). Cependant, en améliorant la résolution spectrale au détriment de la résolution spatiale en réduisant la largeur spectrale du filtrage numérique utilisé pour le traitement numérique, la cartographie fait apparaître la rétrodiffusion comme une somme de phénomènes discrets (Figure 15.c). Il est alors possible de mesurer le temps de vie des photons pour chaque trace. Dés lors, on peut penser que ce phénomène de rétrodiffusion consiste en un couplage de la lumière avec une succession de défauts dans le guide liés au désordre engendré par les procédés de fabrication. La relation précise entre le temps de groupe et la durée de vie des photons rétrodiffusés reste à établir.

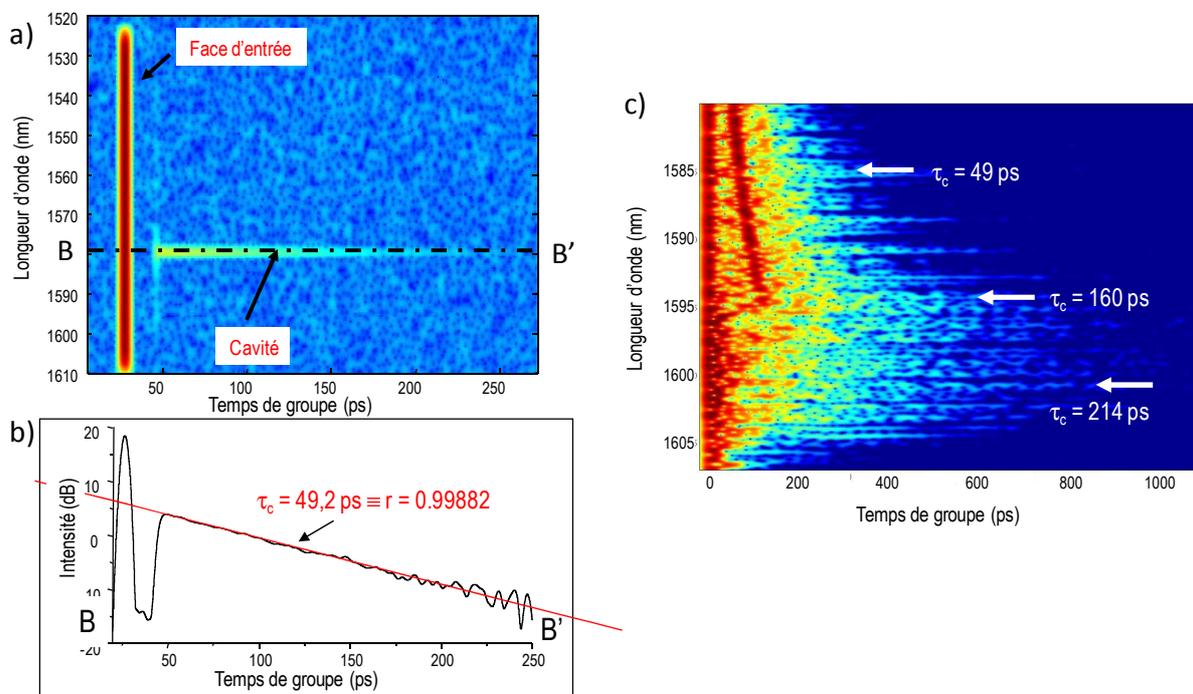


Figure 15. Cavités et rétrodiffusion. a) Modélisation de la trace laissée par une cavité couplée au guide PhC dans la cartographie temps/longueur d'onde. b) Évolution de l'intensité en fonction du temps de groupe à 1580nm . Déduction du temps vie du photon dans la cavité. c) Cartographie de l'échantillon 2 pour une résolution spectrale élevée.

6.1.2.7. Conclusion

La réflectométrie à faible cohérence sensible à la phase offre une étendue très vaste de possibilités et une très grande capacité d'adaptation à la plupart des composants photoniques et offre une alternative très complète et polyvalentes dans sa capacité à extraire de nombreuses propriétés afin de maîtriser les processus de fabrication et les caractéristiques physiques des composants. Cette méthode est non destructive, rapide et sa résolution tant dans le domaine temporel que spectral en fait un des outils les plus adaptés à l'étude de composants photoniques innovants. Elle a permis depuis plusieurs années à Télécom ParisTech d'interagir avec un grand nombre de laboratoires aussi bien du monde académique qu'industriel à travers des projets ou des collaborations informelles. Nous avons étudié un grand nombre de fibres ou de composants innovants, des fibres microstructurées aux composants PhC. Ceci nous a permis d'accroître nos connaissances aussi bien dans les méthodes de caractérisation que dans la physique des composants ainsi qu'un grand nombre de publications.

Elle m'a permis également de co-diriger la thèse de P. Hamel qui a soutenu en mars 2009.

6.1.3. Caractérisation de FBG par Luminescence bleue (LB)

Les liaisons sous-marines installées lors des dernières décennies ne sont pas à leur maximum de capacité. L'augmentation de ces dernières peut s'effectuer par l'utilisation de longueurs d'onde non encore utilisées ou l'augmentation des débits. On parle alors d'*Upgrade*. Le marché de l'*Upgrade* est tiré par les besoins de capacité de l'Internet qui augmente de plus de 50% par an. L'augmentation du débit fait apparaître une problématique supplémentaire : le contrôle plus précis de la dispersion chromatique.

L'objet du projet CHRONOS, démarré en 2009 était de développer une solution alternative, à base de réseaux de Bragg fibrés (FBG). Comparé aux solutions existantes, le but était de créer un réseau agissant sur l'ensemble du spectre contrairement aux FBG multicanaux. Pour les équipementiers, cette solution est passive, évolutive et s'adapte à tout type de ligne. Elle permet dans certains cas de s'affranchir d'amplificateurs optiques. L'enjeu pour l'équipementier était donc une solution qui simplifie grandement l'architecture, l'encombrement et la consommation électrique des terminaux. Cette solution peut par ailleurs se développer par sous-bande et évoluer vers différents formats de modulation et d'espacements entre longueurs d'onde. La contrepartie est que ces FBG sont longs (>30cm).

La photo-inscription de réseaux longs est un défi technologie, la photo-inscription durant plusieurs dizaines de minutes et mettant en œuvre des systèmes d'asservissement de pointe. Il est en effet important de gérer les transitions de phase dans le réseau pour minimiser le ripple dans la réponse spectrale en temps de groupe puisque comme je l'ai dit au chapitre 5, un tel réseau est fabriqué par la concaténation de réseaux courts (~100 μ m) et de surcroît à pas variables.

Le rôle de Télécom ParisTech était donc de proposer une méthode de caractérisation permettant de connaître la qualité des réseaux photo-inscrits et l'origine des différentes erreurs afin que 3SP et l'université de Lille puissent proposer des solutions pour les résoudre et faire progresser la méthode de photo-inscription de haute-précision adaptés aux réseaux de 1m développée parallèlement. Actuellement aucune méthode ne permet de caractériser les sauts de phase pour des réseaux longs. Seule la méthode de Krug, où le FBG est analysé par diffraction latérale, permet de mesurer des variations de phase mais à condition que ces variations soient lentes (étalées sur 1mm). De plus, le montage est très compliqué à mettre en place [6.28].

Toutes ces études ont été menées en étroite collaboration avec 3S-Photonics et le laboratoire Phlam dans le cadre d'un projet FUI8 dont j'étais le correspondant côté Télécom ParisTech. Serge Tsyier, recruté en thèse de doctorat que j'ai codirigée a d'ailleurs passé une bonne partie du projet chez 3SP pour travailler directement à proximité du banc de photo-inscription. Sa thèse doit être soutenue à la rentrée 2012.

Le profil de modulation d'indice d'un réseau de Bragg est généralement représenté par une fonction harmonique de période Λ_0 qui peut être modulée en amplitude et/ou en phase et s'exprimer par la fonction :

$$\Delta n(z) = \Delta n_{ac}(z) \sin\left(\frac{2\pi}{\Lambda_0}z + \theta(z)\right) + \Delta n_{dc}(z) \quad (4)$$

où $\theta(z)$ est la phase, Δn_{ac} l'amplitude de modulation d'indice (ou profil d'apodisation), Δn_{dc} la variation de l'indice moyen.

La première partie du projet a consisté à explorer la méthode du Layer Peeling Algorithm permettant de remonter à l'expression $\Delta n(z)$ d'un réseau à partir de sa réflectivité complexe. Cette méthode a montré sa capacité pour des réseaux courts de l'ordre de quelques millimètres mais s'est montrée limitée pour les réseaux plus longs. En effet, le 'Layer Peeling' est un algorithme causal de synthèse récursif engendrant une propagation d'erreurs de calcul et donc de précision numérique au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'entrée du composant. La méthode LPA est difficilement exploitable pour des réseaux longs (> quelques dizaines de mm).

6.1.3.1. Caractérisation de FBG par luminescence bleue

Pour lever le verrou de la longueur, nous avons développé une nouvelle méthode de caractérisation des FBGs post-inscription en module et en phase basée sur l'étude de la fluorescence induite par l'irradiation de la fibre par des franges d'interférence dans l'UV.

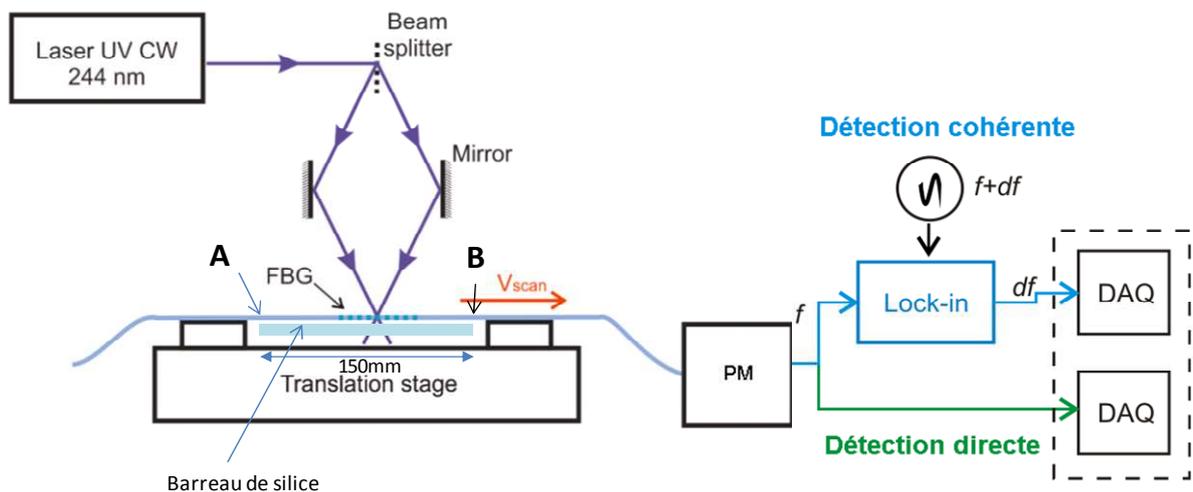


Figure 16. Banc de caractérisation LB à 3SPhotonics

Le schéma expérimental présenté ci-dessus a l'avantage d'utiliser le même montage que celui ayant servi à la photo-inscription. Après la photo-inscription, les franges d'interférences dans l'UV ayant servies à l'écriture re-balaye à nouveau le FBG inscrit. Le signal de luminescence généré en fonction de la position des franges sur le réseau, dont le spectre est maximum à la longueur d'onde de 400 nm, est

enregistré par un photo-multiplicateur puis traité de deux façons différentes afin d'extraire les données pertinentes.

- *Extraction de la modulation d'indice Δn_{ac} et de la période du réseau $\Lambda(z)$*

La détection hétérodyne réalisée à l'aide d'une détection cohérente (lock-in amplifier) (Figure 16) permet d'extraire le signal en le ramenant à une fréquence plus basse. Une transformée de Hilbert permet ensuite d'extraire les fonctions spatiales de l'amplitude et de la phase de la modulation d'indice Δn_{ac} , $\Lambda(z)$ et $\theta(z)$.

- *Extraction de la variation de l'indice moyen Δn_{dc}*

En mesurant la variation de l'intensité du signal de LB avec la détection directe, nous pouvons établir la fonction d'évolution des variations de l'indice moyen $\Delta n_{dc}(z)$ dans la fibre. Il suffit de filtrer numériquement les hautes fréquences du signal reçu. L'obtention de la fonction $\Delta n_{dc}(z)$ du réseau caractérisé permet de mettre en évidence les erreurs d'inscription dues à l'instabilité de la puissance du laser UV ou un décalage éventuel du faisceau lors de l'inscription.

- *Caractéristiques principales du signal de LB et principales limites*

Bien que le signal de LB enregistré permette de remonter aux informations recherchées sur Δn , il est impossible sans correction d'obtenir les valeurs absolues des variables recherchées. En effet, l'étude de l'évolution dans le temps de la LB dans la fibre montre que ce phénomène est fortement non-linéaire, dépendant de plusieurs paramètres (distance de fibre traversée jusqu'au détecteur, courbures éventuelles de la fibre, positionnement du faisceau, vitesse de balayage v_{scan} , valeur des variations de l'indice moyen Δn_{dc} dans la fibre et donc du nombre de balayages de caractérisation, etc.) et qu'il n'y a donc pas de relation linéaire entre l'intensité du faisceau UV et l'intensité de luminescence bleue ou de variation d'indice.

La conséquence de cette non-linéarité est qu'il est très difficile voire impossible de déterminer la valeur absolue de Δn_{ac} . Cependant, nous avons mis au point une méthode permettant de contourner ce problème et s'affranchir de cette atténuation. Pour cela, nous avons modélisé l'atténuation par une fonction exponentielle :

$$I(z) = I_0 e^{-\alpha z}$$

où $I(z)$ est l'intensité de LB en fonction de la position z , I_0 son intensité à l'origine du balayage et α le coefficient d'atténuation linéique ([mm⁻¹]).

En utilisant l'approximation des moindres carrés, il est possible de déduire le coefficient α à partir de l'intensité de luminescence enregistrée $I(z)$ par la détection directe. A partir de cette mesure, on peut corriger les mesures obtenues par la détection cohérente et ainsi s'affranchir des non-linéarités.

Pour illustrer cette méthode, un FBG comprenant huit réseaux uniformes, concaténés sur la même fibre, ayant la même amplitude de modulation d'indice $\Delta n_{ac} = 8.10^{-5}$ a été fabriqué (Figure 17.a.). Chaque réseau mesure 10 mm de long et est séparé des autres par une zone de 10mm. La photo-inscription augmentant la valeur de Δn_{dc} et afin d'obtenir une valeur constante de Δn_{dc} sur et entre les réseaux, chaque tronçon de fibre non-photo-inscrit a reçu une quantité d'UV équivalente à celle reçue pendant la photo-inscription mais sans modulation d'indice ($\Delta n_{ac}=0$).

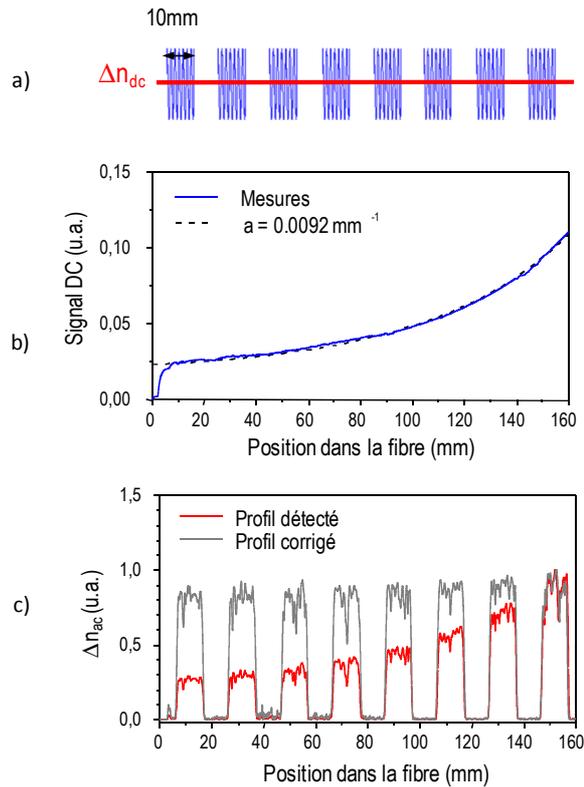


Figure 17. Caractérisation du réseau précédant dont la valeur de Δn_{dc} est constante
a) Profil d'indice du réseau b) Détection directe et calcul de α . c) Profil mesuré à la détection cohérente et profil corrigé.

Nous avons caractérisé ce réseau avec la méthode de LB suivi simultanément de la détection directe (Figure 17.b.) et de la détection cohérente (cf. Figure 17.c.). Chaque mesure directe est approximée par une fonction exponentielle par la méthode des moindres carrés afin de déduire le coefficient d'atténuation. Les valeurs de coefficient α extrait de ces mesures varient de 0.0082 à 0.0092 mm^{-1} . Cette augmentation entre chaque mesure est due à l'augmentation de Δn_{dc} engendrée par l'irradiation UV, la fibre étant photosensible.

Les résultats de caractérisation présentés Figure 17.c représentent l'évolution de Δn_{ac} en fonction de la position dans le composant non corrigée de l'atténuation. Comme prévu, au lieu d'obtenir un réseau uniforme, on obtient un réseau dont l'amplitude est d'autant plus grande que l'on est proche du détecteur PM. Après correction avec le coefficient d'atténuation déduit de la détection directe, on constate que le profil correspond bien au profil du réseau réellement inscrit.

On peut également confirmer sur ces deux séries de mesures que la détection cohérente n'est pas sensible au Δn_{dc} car la composante continue du signal de LB est filtrée par le lock-in. D'autre part, la détection directe est elle, à son tour, insensible au Δn_{ac} car nous ne sommes pas en mesure de distinguer les zones de la fibre où $\Delta n_{ac} = 0$ de celle où $\Delta n_{ac} \neq 0$. Ainsi il devient possible de mesurer le Δn_{ac} et le Δn_{dc} séparément via deux mesures simultanées sur le même montage expérimental.

Nous avons donc démontré la possibilité de corriger la caractérisation du profil de FBG avec une fonction exponentielle à partir du coefficient d'atténuation α qui peut être obtenu par la détection directe de LB.

- **Résultats de caractérisation d'un réseau à profil en sinus cardinal**

Pour finir, je présente la caractérisation d'un réseau de 1 cm de long au profil apodisé par une fonction sinus cardinal et comportant 8 sauts de phase de valeur $\pm\pi$ entre les lobes adjacents (Figure 18). La Figure 18.a montre le profil de l'indice de modulation du réseau obtenu aussi bien avec la méthode de LB qu'avec la méthode de LPA associée à une mesure OFDR. Les deux méthodes montrent un bon accord avec la courbe théorique. La Figure 18.b montre les mesures de l'évolution de la phase obtenues également avec les deux techniques. Les sauts de phase de π sont clairement retrouvés avec la caractérisation par LB (courbes bleues). Les sauts de phase sont étalés sur une distance de $\sim 200\mu\text{m}$ ce qui peut être vue comme la valeur de la résolution spatiale de la méthode. Par contre, la précision de la méthode de LPA concernant la reconstruction des sauts de phase décroît le long du réseau à cause de l'accumulation des erreurs comme décrit plus tôt dans le rapport.

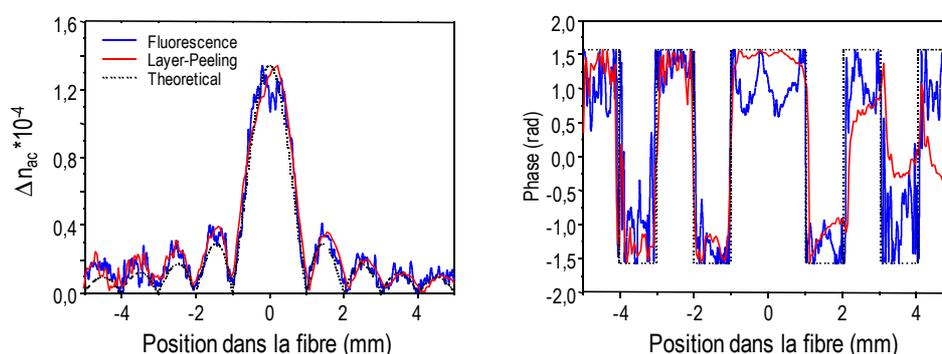


Figure 18. Caractérisation d'un réseau à profil en forme de sinus cardinal par luminescence bleue. a) Profil Δn_{dc} b) Variation de phase

On peut remarquer également que des fluctuations de l'amplitude et de la phase sont observées au centre du réseau ($z=0\text{mm}$) que nous attribuons à des erreurs d'inscription.

6.1.3.2. Conclusion sur la méthode de Luminescence bleue

Nous avons donc proposé une méthode basée sur la fluorescence induite par la radiation UV qui permet, d'obtenir l'information complète (amplitude et phase de modulation d'indice) d'un FBG. Cette méthode a une grande dynamique, une bonne reproductibilité et peut être utilisée pour caractériser des FBGs long (plus de 10 mm) avec des profils complexes en post-inscription, directement sur le banc de photo-inscription, sans en modifier le montage, ce qui en fait un de ses principaux atouts.

6.1.4. Perspectives

Ce thème de recherche « Caractérisation structurelle et analyse fonctionnelle de composants et dispositifs photoniques » a permis au laboratoire d'acquérir des compétences reconnues dans le domaine de la caractérisation de composants photoniques innovants.

Les études de la luminescence bleue ne sont pas finalisées. La suite consiste à analyser la luminescence bleue non plus en analysant celle-ci longitudinalement mais transversalement. Ceci pourrait nous permettre de nous affranchir de ces problèmes de non-linéarité et d'atténuation. Cette étude n'a pas encore été menée car il nous a été impossible ces derniers temps d'accéder à cette LB émise transversalement, le montage étant utilisé pour la réalisation de FBG à des fins commerciales. La

méthode présentée dans ce rapport ne nécessitait pas de s'approcher de l'expérience ni de la modifier ce qui en fait un de ses principaux atouts.

Les nouvelles générations de systèmes de télécommunications permettant des débits supérieurs à 100Gb/s font appel à la détection cohérente. Elle permet l'utilisation de formats de modulation à haute efficacité spectrale (QAM, OFDM). L'insertion/extraction de bandes spectrales requiert des filtres optiques ultrafins, flat-top de surcroît, et de pentes ultra-raides de plusieurs centaines de dB/nm. La connaissance précise de ces paramètres est très importante pour ce type d'application, mais les ordres de grandeur de ceux-ci rendent délicate leur évaluation avec les résolutions des appareils de mesure actuels.

Les filtres ultrafins invitent à prendre des précautions particulières lors de l'évaluation de leurs paramètres physiques. L'étroitesse de la bande passante et la raideur des pentes imposent de disposer d'une très grande résolution pour échantillonner correctement la fonction de transfert et d'une électronique réactive pour reproduire fidèlement la dynamique. Si on prend l'exemple d'un dispositif de mesure dont la résolution est de l'ordre du picomètre, seules quelques dizaines de points permettront de reconstruire la bande passante du filtre, ce qui est vraiment peu et pénalise fortement la justesse de la mesure. Il faut donc envisager une résolution sub-picométrique permettant d'échantillonner raisonnablement la fonction de transfert.

En outre, les ordres de grandeur en jeu favorisent l'apparition d'effets de second ordre qui appellent à une interprétation plus fine de certains paramètres physiques et requièrent une optimisation particulière pour limiter leur influence. Enfin, notamment au travers de l'exemple de la perte dépendante de la polarisation, on voit apparaître les limitations des appareils de mesure disponibles sur le marché, leurs incertitudes intrinsèques devenant non négligeable devant les échelles des grandeurs à mesurer.

C'est dans ce contexte que j'ai développé un partenariat avec Yenista Optics, entreprise émergente fabricant de ce genre de filtre, dans le cadre d'une thèse CIFRE, dans l'optique de développer de nouvelles techniques de caractérisation pour permettre à Yenista Optics de certifier les paramètres de ses filtres notamment en terme de PDL, de PMD et de dispersion chromatique. Cette thèse a démarrée en octobre 2011. Le doctorant s'appelle Vincent Henri.

Enfin, bien que l'activité plateforme 10Gb/s ne soit plus le centre de ma recherche, je continue à m'y intéresser. Ainsi, prochainement, en relation avec le groupe « Optique Quantique » de Télécom ParisTech, nous étudierons la capacité à transmettre une clé quantique dans une fibre dans laquelle plusieurs canaux DWDM sont présents.

6.1.5. Collaborations

Ce thème de recherche « caractérisation structurelle et analyse fonctionnelle de composants et dispositifs photoniques » a permis en grand nombre de collaborations depuis 2001 dont voici la liste spécifique.

LNE (A.F. Obaton), Alcatel III IV Lab (B. Thedrez), OFS (S. Ramachandran), Coractive (S. Chaligny), Univ. de Lille (M. Douay), XLIM (P. Leproux, S. Février), Draka Comteq (P. Sansonetti, G. Melin), Thales R&T (A. De Rossi, S. Combrié), CCLO (M. Gadonna), INT Evry (Y. Gottesman), Yenista (M. VanDerKeur, A. Poudoulec), 3SP (D. Sauvage, A. Millaud), CNRS/LPN (G. Aubin, A. Ramdane), Supélec (Z. Toffano), Alcatel Thales III V Labs (R. Brenot, G.D. Duan), France télécom R&D (P. Chanclou), ENSSAT/FOTON (T. Chartier, P. Besnard).

6.2. Capteurs à fibre optique

6.2.1. Contexte général de la diffusion Brillouin dans les fibres

Des mesures de température et de déformation sont régulièrement nécessaires, en de nombreuses zones, afin de contrôler la santé des structures (SHM pour Structural Health Monitoring) et prévenir les risques qui les menacent comme les risques naturels (glissements de terrain, tremblements de terre, etc.), les dangers humains (accidents industriels, terrorisme), ou le vieillissement (fissures, corrosion, etc.). Ces mesures concernent des paramètres aussi bien mécaniques (déplacements, déformations, accélération, ...), thermiques qu'hygrométriques. L'essor de la fibre optique grâce aux télécommunications a ouvert la voie à de nouvelles applications, notamment dans le domaine des capteurs. Les avantages de la fibre sont nombreux : faible intrusivité, conductivité thermique très faible, très forte immunité aux rayonnements électromagnétiques, rapidité de transfert d'information, faibles pertes, etc.

Les capteurs à fibre optique (CFO) sont une véritable rupture dans le domaine des capteurs. La fibre optique peut aussi bien servir à faire transiter l'information que constituer elle-même l'élément sensible permettant de faire des mesures d'un bout à l'autre de celle-ci. La fibre optique peut alors être vue comme une infinité de capteurs permettant de localiser un événement continûment sur toute sa longueur. On parle alors de CFO « répartis » ou « distribués ». La fibre est alors un atout majeur lors de la détection d'événements lorsque l'utilisateur ne connaît pas à l'avance les zones critiques qu'il conviendrait d'instrumenter et permet de surcroît de faciliter le multiplexage. Les CFO marquent donc une rupture technologique par rapport aux capteurs ponctuels ou quasi-ponctuels de type réseau de Bragg ou plus généralement la plupart des capteurs mécaniques ou électroniques traditionnels du génie civil.

La réflectométrie par OTDR (Optical Time Domain Reflectometer) introduite par Barnoski [6.34] consiste à envoyer une impulsion laser dans une fibre à étudier puis à analyser l'intensité rétrodiffusée successivement par la fibre au fur et à mesure de sa propagation. La connaissance de l'indice de réfraction permet de convertir l'échelle de temps en distance et ainsi localiser l'origine des variations de l'onde rétrodiffusée. Cette technique a permis, dans le domaine des télécommunications, de quantifier les pertes linéaires dans le réseau ou de détecter et localiser des défauts dans la fibre [6.35].

C'est dans ce contexte qu'un partenariat s'est constitué entre Électricité de France (EDF), le Laboratoire des Ponts et Chaussées (devenu IFFSTAR depuis) et Télécom ParisTech en 2006. Il concerne le contrôle statique des structures, c'est-à-dire les modifications à long terme des paramètres (causées par le vieillissement par exemple) et notamment les déformations provenant du fluage⁹ des matériaux. Nos recherches se sont donc orientées vers un capteur permettant de détecter aussi bien les variations de température que les variations de déformation.

Cette thématique très diversifiée m'a permis de nouer de nombreux contacts notamment avec des fabricants de fibres (XLIM, iXfiber et DRAKA) mais aussi avec le milieu industriel (Cementys, IDIL et ANDRA) ou académique (Université de St Etienne).

Les CFO répartis peuvent utiliser plusieurs effets physiques, chacun ayant leurs propres spécificités (Figure 19):

- Soit directement la rétro-diffusion de la lumière dans les fibres comme l'effet Rayleigh, cet effet linéaire provenant de la diffusion d'une onde incidente sur les imperfections de la silice

⁹ Le **fluage** est le phénomène physique qui provoque la déformation *irréversible* d'un matériau soumis à une contrainte constante inférieure à la limite d'élasticité du matériau, pendant une durée suffisante

(responsable majoritairement des pertes linéaires passives dans les fibres). Les photons diffusés gardent leur énergie et ont donc la même fréquence que l'onde incidente.

- Soit la génération de nouvelles fréquences dans le spectre par effets non-linéaires comme l'effet Raman ou l'effet Brillouin : les photons perdent (composante Stokes) ou gagnent (composantes anti-Stokes) de l'énergie décalant leur fréquence de l'onde incidente.

La diffusion Rayleigh permet de mesurer les variations de température et de déformation qui engendrent des variations locales du chemin optiques. On ne peut discriminer les deux paramètres qu'en l'associant à une autre technique de mesure comme par exemple la biréfringence. De plus, cette technique, popularisée par l'appareil OBR de la société Luna Technologie est limitée à une excursion de l'ordre du kilomètre, ce qui n'est pas suffisant pour nos applications.

La diffusion Raman est liée au couplage de l'énergie d'une onde incidente dans un milieu avec une onde rétro-diffusée via un changement de niveau d'énergie des molécules du matériau. La puissance portée par l'onde de fréquence plus élevée que l'onde incidente, dite anti-stokes, est théoriquement très dépendante de la température. L'effet Raman est ainsi utilisé commercialement pour réaliser des capteurs distribués de température [6.29][6.30]. Insensibles aux déformations mécaniques, cette technique est très utilisée dans l'industrie (surveillance des pipelines, détection d'incendie, etc.) avec une excursion de l'ordre de 20km pour une résolution spatiale de 1m, un seuil de discrimination en température de 0.1°C (pour un temps d'acquisition de 60min) [6.31]. Cette technique étant insensible à la déformation, elle ne convient pas non plus à notre étude.

Le spectre de rétrodiffusion Brillouin provient de l'interaction d'une onde optique avec des variations de l'indice de réfraction causées par la propagation d'ondes acoustiques et est sensible à la fois à la température et à la déformation [6.32]. Plusieurs solutions ont été envisagées pour mesurer ces deux grandeurs et notamment, la mesure du décalage de la fréquence Brillouin ν_B . Sa dépendance par rapport à la température et à la déformation suit la loi :

$$\nu_B = C_T \Delta T + C_\epsilon \epsilon \quad (5)$$

avec $C_T \approx 1\text{MHz}/^\circ\text{C}$ et $C_\epsilon \approx 0.05\text{MHz}/\mu\epsilon$.

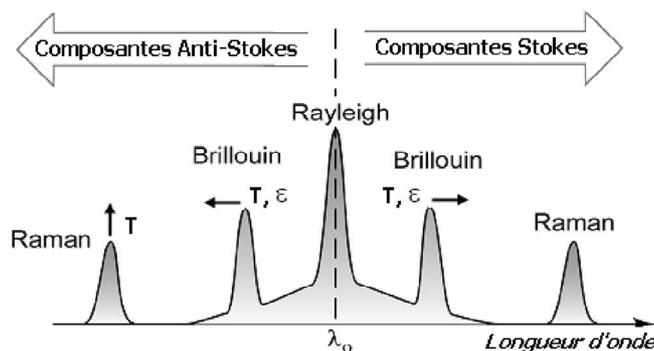


Figure 19. Évolution du spectre de rétro-diffusion de la silice traversée par une onde de longueur d'onde λ_0 avec la température ou l'élongation

La sensibilité conjuguée à la déformation et à la température peut être un atout pour la polyvalence de ce genre de capteur mais elle constitue également son plus gros inconvénient. En effet, pour réaliser une mesure juste de l'un de ces paramètres, il convient de pouvoir s'affranchir totalement de l'autre. Cela nécessite, faute de solution de compensation directe, une deuxième mesure à l'aide d'un autre système (Raman par exemple) engendrant des surcoûts très importants.

Dans le génie civil, l'intérêt de ce genre de capteur est grand puisque comme je l'ai dit, il permet de détecter des déformations sans connaître a priori le lieu où elles risquent d'apparaître. Cependant, les appareils utilisant ce principe et basés sur le B-OTDR¹⁰ ou B-OTDA¹¹ offrent une résolution spatiale de 0.1 à 1m pour des seuils de discrimination de $5\mu\epsilon$, des résolutions de 0.1 à 1°C en température et $20\mu\epsilon$ en déformation pour des distances maximales de l'ordre de 50km. Ces performances demeurent insuffisantes pour des détections de fissures (étirement très localisé $\approx 1\text{mm}$) ou des mesures de fluage (de faible amplitude $\approx 10\mu\epsilon$). C'est pourquoi ce type de système fait encore l'objet d'une recherche intense.

Les objectifs de cette étude sont donc d'une part de définir une fibre dont les caractéristiques permettent de discriminer température et déformation, et d'autre part d'augmenter la sensibilité aux déformations de cette fibre, c'est-à-dire d'augmenter le facteur C_ϵ .

Pour cela, depuis 6 ans, ces études ont consisté à réaliser des études en amont de la problématique « capteur » en nous munissant d'outils expérimentaux et théoriques pour la caractérisation de l'effet Brillouin dans les fibres : modélisation de l'effet Brillouin dans une fibre en fonction de ses caractéristiques géométriques, optiques, chimiques ou mécaniques, mesure de spectre et gain Brillouin, étalonnage en température et élongation. Puis de porter cette technologie sur le terrain et de la confronter aux solutions existantes.

6.2.2. Spectre de gain Brillouin dans les fibres optiques

L'effet Brillouin est un effet très connu et a fait l'objet de nombreuses études notamment dans le domaine des télécommunications. Ces travaux avaient pour but de mieux le comprendre en vue de le limiter voire l'éliminer notamment en essayant d'augmenter le seuil d'apparition de cet effet, de mieux comprendre son interaction avec le signal transmis et son influence sur le bruit. Cependant, les modélisations du spectre jusqu'à présent montraient toujours un petit écart en termes de fréquence absolue par rapport à l'expérience, compensé par un ajustement plus ou moins arbitraires de certains paramètres de modélisation. Cet écart de quelques MHz à quelques dizaines de MHz, négligeable pour les applications télécom s'est avéré très gênant pour les aspects capteur, comme je le montrerai par la suite. Comprendre plus précisément les raisons de ces décalages est donc devenu indispensable. Pour cela, nous avons mis en place des outils de modélisation permettant d'étudier l'influence de différents paramètres (profil géométrique, composition chimique, tensions internes) sur le spectre Brillouin pour des fibres au profil divers. Cette étude est donc une étude amont, préalable à la réalisation du capteur recherché. C'est la raison principale pour laquelle nous nous sommes limités à l'étude de l'effet Brillouin spontané, pour que nos spectres ne dépendent pas de la puissance injectée.

6.2.2.1. Interaction acousto-optique

Comme nous l'avons dit, la diffusion Brillouin provient de l'interaction entre l'onde incidente (champ optique) et une variation caractéristique de la densité volumique du matériau dans la fibre engendrée par la propagation d'une onde acoustique. Lorsque la variation de la densité est liée à l'agitation thermique à laquelle est soumis le matériau, on parle de diffusion Brillouin spontanée. Dans ce cas, la diffusion Brillouin peut être expliquée comme une réflexion de Bragg de l'onde optique incidente sur l'onde acoustique de fréquence ω_a mobile à la vitesse V_a . C'est cette variation de densité volumique qui peut être modifiée par la température locale et la déformation que subit la fibre.

¹⁰ Brillouin Optical Time Domain Reflectometry

¹¹ Brillouin Optical Time Domain Analysis

Le couplage des ondes acoustiques et de l'onde optique (fibre monomode) se propageant dans la fibre optique est régi par l'équation de Navier Stokes [6.36] qui permet d'exprimer l'évolution du vecteur déplacement des ondes acoustiques en fonction de la densité volumique, du champ optique, des constantes électrostrictives¹² (en régime stimulé) et des constantes visco-élastiques des ondes acoustiques longitudinales et transverses.

Le calcul du spectre Brillouin se calcule en résolvant cette équation en régime spontané dans un milieu homogène et isotrope [6.37] qui permet d'obtenir le diagramme des vitesses de phase des modes acoustiques et l'intensité de chaque raie avec comme hypothèse que les modes propres acoustiques doivent remplir la condition de Bragg $\beta_{\text{acoust}}=2\beta_{\text{opt}}$ ¹³. Puis on calcule l'intégrale de recouvrement acousto-optique A_{ao} qui permet de déterminer le spectre de gain Brillouin (BGS).

La résolution est alors obtenue en cherchant une solution du vecteur déplacement de forme harmonique, de manière vectorielle ou scalaire.

- Dans le cas vectoriel, on prend en compte les ondes longitudinales (ondes de dilatation/compression) et les ondes transverses (ondes de cisaillement) pour la détermination des modes acoustiques.
- Dans le cas scalaire, on néglige les composantes transverses du vecteur déplacement devant la composante axiale. Les modes qui se propagent en plus du mode optique LP₀₁ (fibre monomode) sont alors les modes acoustiques longitudinaux appelés modes L_{0m} (m correspondant au numéro du mode acoustique).

L'indice de réfraction $n(x,y)$ ainsi que le profil de vitesses acoustiques $V_{\text{Longitudinal}}(x,y)$ et $V_{\text{Transverse}}(x,y)$ sont calculés à partir du profil de dopant en prenant en compte les contraintes internes $\sigma(x, y)$.

Il est donc indispensable de connaître la composition chimique de ces fibres tout comme leur profil géométrique.

6.2.2.2. Modélisation du BGS en fonction du matériau et du profil géométrique

Différents modèles ont été développés au laboratoire, dans le cadre de 2 thèses successives, celles de V. Lanticq puis de Y. Sikali.

- Modèle matriciel

Le premier modèle basé sur une approche multi-couches consistait à découper la fibre en domaines annulaires d'indice uniforme afin de définir des expressions de solutions analytiques sur chaque domaine. Puis à partir des conditions aux limites et des conditions de convergence de la solution trouvée au centre et à l'extrémité de la fibre, d'en déduire les profils de modes acoustiques pour pouvoir calculer le spectre de gain Brillouin. Ce modèle est bien-sûr limité au spectre Brillouin de fibres classiques à symétrie de révolution telles que la SMF¹⁴ ou la LEAF¹⁵. De plus, il est limité à des profils d'indice relativement simples ne dépassant pas quelques couches, l'augmentation du nombre de matrices entraînant une propagation des erreurs lors du calcul des modes se propageant dans la fibre. La prise en compte du profil réel mesuré devient alors impossible et des écarts significatifs, compte tenu des applications visées, entre modèles et expériences sont observés.

¹² L'**électrostriction** est une propriété de tout matériau non-conducteur, ou diélectrique, qui consiste en une modification de sa forme sous l'effet d'un champ électrique appliqué.

¹³ β_{acoust} = vecteur d'onde acoustique. β_{opt} =vecteur d'onde du mode optique

¹⁴ Single Mode Fiber

¹⁵ Large Effective Mode Area

- Modèle par éléments finis (FEM-2D)

Le but de ce modèle est de pouvoir modéliser des spectres Brillouin dans le cas de fibres complexes (fibres anti-guides acoustiques, fibres sans symétrie de révolution, fibres à fortes concentrations de dopants, etc.). Ce modèle permet de faire des modélisations plus poussées du spectre Brillouin en intégrant plus facilement d'autres interactions physiques subies par la fibre : composition en dopants, géométrie, contraintes résiduelles dues à sa fabrication.

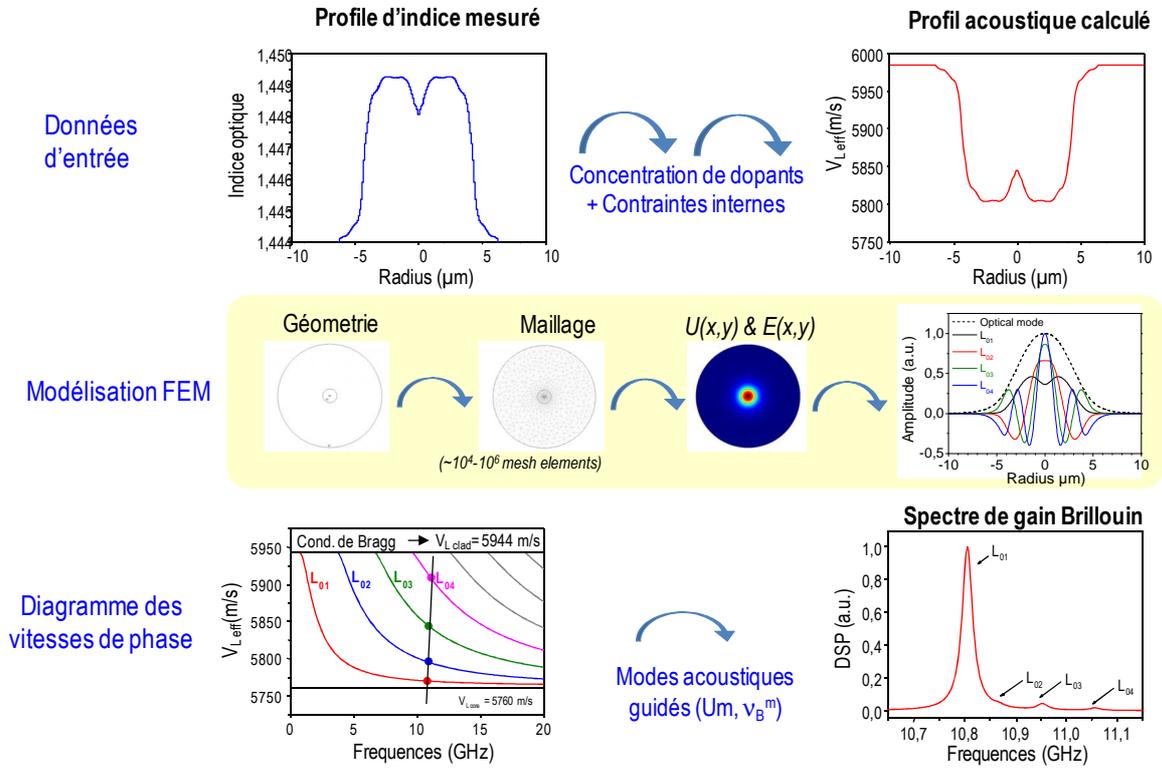


Figure 20. Schématisation des étapes de calcul du spectre Brillouin d'une fibre optique

Ces équations sont résolues par un solveur de type éléments finis 2D (FEM-2D). Un résumé de la méthode de modélisation des spectres Brillouin est illustré Figure 20. Les coefficients de dépendance de l'indice de réfraction et des vitesses acoustiques en fonction des dopants ont été déterminés grâce à des mesures vibratoires sur des portions de préformes [6.38].

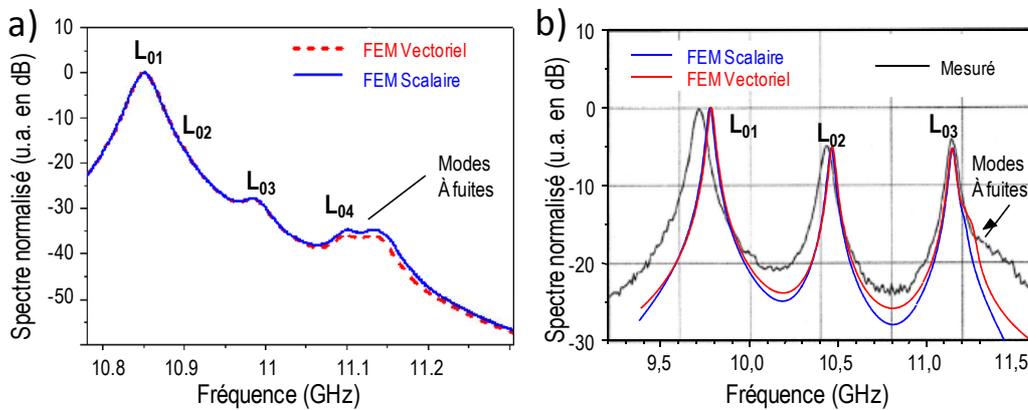


Figure 21. Comparaison du spectre Brillouin modélisé d'une fibre SMF (a) et d'une fibre très fortement dopée au GeO_2 (b) avec le modèle scalaire et vectoriel.

Le modèle a été testé pour une fibre SMF classique dopée en GeO_2 à 6mol% (Figure 21.a) ainsi qu'une seconde très fortement dopée (28mol%)(Figure 21.b). Cette seconde fibre présente un très grand écart d'indice de réfraction cœur/gaine ($\Delta n \cong 4.10^{-2}$) comparé aux fibres optiques standards ($\Delta n \cong 10^{-3}$).

Pour la SMF standard, on observe 4 pics Brillouin provenant de l'interaction du mode optique LP_{01} avec les modes acoustiques L_{01} , L_{02} , L_{03} et L_{04} . On n'observe pas de différence significative entre les modèles vectoriel et scalaire. Seule une différence d'intensité est observée pour les modes à fuites ou modes radiatifs (constante de propagation complexe), modes qui ne sont pas utilisés dans les capteurs à fibres.

Concernant la seconde fibre, on observe cette fois 3 pics et, pour ce niveau de dopage, une différence de décalage Brillouin de l'ordre de 10MHz entre la résolution vectorielle et scalaire. On observe également un élargissement du spectre obtenu en utilisant le modèle vectoriel causé par les modes à fuites, mieux résolus en mode vectoriel. En conclusion, la prise en compte des modes transverses (en plus des ondes longitudinales) dans le calcul des spectres ne modifie pratiquement pas le résultat pour des fibres aux concentrations de dopants classiques. Par contre, il faut les considérer pour des concentrations plus importantes.

Nous avons donc été capables de valider notre modèle numérique par l'expérience pour différents types de fibres. Cependant, de légers décalages fréquentiels, que nous avons dans un premier temps comblés avec des variations de vitesse acoustique de la silice pure, ont été systématiquement constatés durant nos modélisations. La solution pour y remédier est de considérer les contraintes résiduelles qui sont emprisonnées dans la fibre durant sa fabrication et qui modifient ses constantes d'élasticité.

6.2.2.3. Mesure expérimentale du BGS

Le banc de spectroscopie Brillouin développé au laboratoire caractérise la rétro-diffusion Brillouin spontanée amplifiée (B-OTDR). Les résultats obtenus avec ce banc ont été validés par des solutions commerciales fonctionnant sur le principe du B-OTDA qui analysent la diffusion Brillouin stimulée (DITEST-STA-R et DSTS).

Notre réflectomètre étudie le spectre spontané amplifié intégré sur l'ensemble de la fibre (régime continu ou CW) ou de façon distribué en tout point de cette dernière (régime impulsionnel). La mesure de spectre intégré sur l'ensemble de la fibre est effectuée avec le dispositif de la Figure 22. Une source laser accordable est séparée en deux par un coupleur. L'un des deux bras est envoyé vers la fibre sous test. Le signal rétro-diffusé est recombinaé via un circulateur avec le signal provenant de l'autre bras sur un photo-détecteur équilibré. Le brouilleur de polarisation sert à pallier à une éventuelle sensibilité à la polarisation du système.

Pour l'obtention d'un spectre distribué, le laser continu est remplacé par un laser impulsionnel. L'analyseur de spectre électrique est alors utilisé comme simple filtre passe-bande accordable. Le signal en sortie d'analyseur de spectre est étudié sur un oscilloscope.

L'intérêt de se doter d'une telle expérience est de pouvoir valider nos modèles théoriques avec une expérience polyvalente dont on maîtrise tous les paramètres.

En pratique, lorsque le modulateur acousto-optique n'est pas inséré sur le bras de référence dans le montage précédent, le spectre enregistré consiste en la superposition des parties Stokes et anti-Stokes du spectre Brillouin spontané amplifié. Dans le cas asymptotique du spectre Brillouin spontané (non amplifié), les spectres Stokes et anti-Stokes ont des formes similaires, le spectre total est alors exactement la forme du spectre d'efficacité Brillouin. C'est d'ailleurs, comme je l'ai dit plus haut, la raison pour laquelle nous avons centré nos études sur l'effet Brillouin spontané.

Lorsque le décaleur en fréquence est inséré, les raies Stokes et anti-stokes ne sont plus symétriques par rapport à la fréquence de l'oscillateur local si bien qu'ils se retrouvent séparés dans le spectre total (Figure 23).

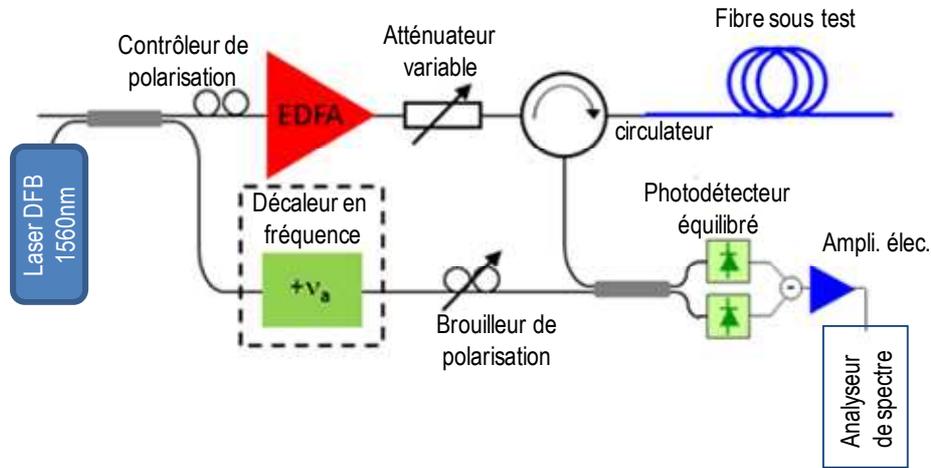


Figure 22. Banc de mesure auto-hétérodyne du spectre de gain Brillouin

6.2.2.4. Mesure auto-référencée du coefficient d'efficacité Brillouin C_B

Ce décalage nous a permis de mettre au point une méthode pour caractériser le coefficient d'efficacité Brillouin C_B qui est le facteur de proportionnalité entre l'aire de recouvrement acousto-optique A_{ao} et le gain Brillouin g_B [6.42]. En effet, on montre que si on mesure les puissances des maxima des pics Stokes, et anti-stokes, on peut en déduire C_B par la formule :

$$Y = \frac{1}{L} \ln \left(\frac{DSP_{elec}(\nu_B + \nu_a)}{DSP_{elec}(\nu_B - \nu_a)} \right) = \frac{1}{2} C_B P_0 \quad (6)$$

où L est la longueur de la fibre, ν_a la fréquence de décalage acousto-optique, et P_0 la puissance de pompe et DSP la puissance électrique à la fréquence considérée.

Pour mesurer C_B , il suffit donc de tracer l'évolution du paramètre Y pour plusieurs puissances de pompe P_0 . La principale source d'incertitude provient de la connaissance plus ou moins bonne de ces niveaux de puissance, liée à la justesse du puissance-mètre utilisé. Par contre, l'utilisation d'un rapport entre les deux pics permet de s'affranchir de toute calibration du système (pertes linéaires, sensibilité du détecteur, etc.), contrairement aux méthodes pompe-sonde traditionnellement utilisées pour mesurer le gain Brillouin g_B qui nécessitent d'évaluer le gain sur l'intensité de l'onde sonde comme le rapport de deux mesures de puissance, l'une en entrée de fibre et l'autre en sortie [6.39][6.40][6.41]. C'est pourquoi on qualifie notre expérience de mesure auto-référencée. L'autre avantage est que cette technique ne nécessite qu'un côté de fibre testée. Enfin, le brouilleur permet d'être insensible à la polarisation.

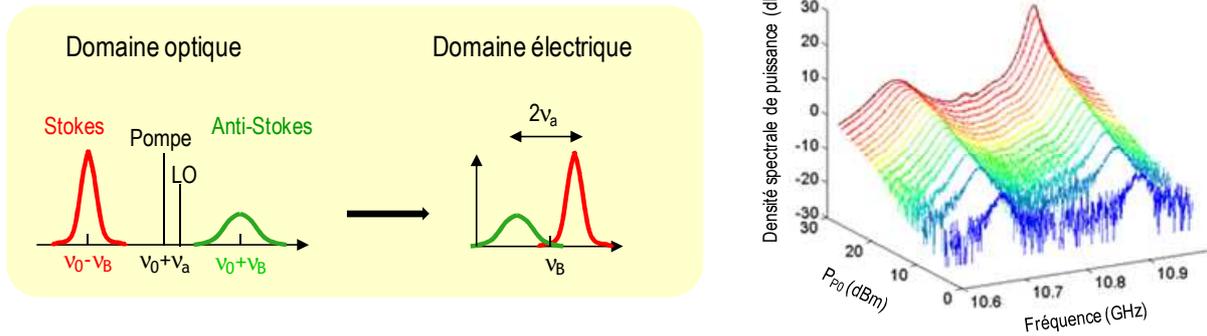


Figure 23. Spectre Brillouin d'une fibre standard avec un modulateur acousto-optique inséré sur le bras de référence. Les contributions Stokes et anti-stokes se retrouvent séparées.

Nous avons tracé l'évolution du paramètre Y d'une fibre SMF28 (66m) et de 2 échantillons de fibres LEAF de longueur différentes (10m et 100m)(Figure 24). Connaissant l'aire de couplage acousto-optique de chaque fibre, calculé par modélisation, on peut en déduire $g_B = C_B \cdot A_{ao}$. Par exemple, pour la SMF28, nous avons trouvé une valeur de gain Brillouin $g_B^{SMF28} = 1,68 \pm 0.03 \times 10^{-11} \text{ m.W}^{-1}$ qui est compatible avec les valeurs trouvées dans la littérature [6.39][6.43]. Les résultats sur la LEAF confirment que cette technique est insensible à la longueur de la fibre. Bien que l'aire effective de la LEAF soit moins grande que celle de la SMF, son efficacité Brillouin est moindre. On aurait pu s'attendre à l'inverse mais cela est dû au fait que ce n'est pas l'aire effective du mode optique mais bien l'aire de recouvrement acousto-optique qui détermine l'efficacité de l'effet Brillouin et celle-ci est effectivement plus importante pour la LEAF ($A_{ao}^{LEAF} = 160 \mu\text{m}^2$) que pour la SMF ($A_{ao}^{SMF} = 87 \mu\text{m}^2$).

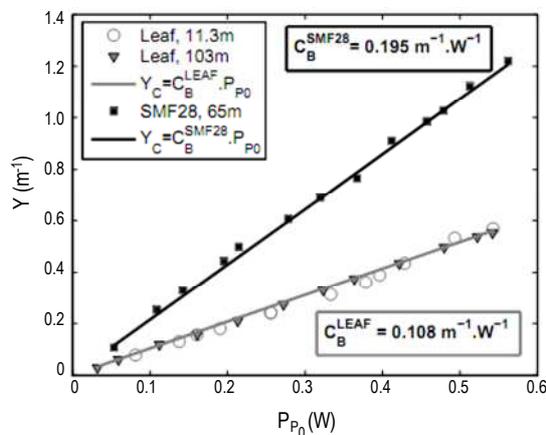


Figure 24. Évaluation des efficacités Brillouin d'une fibre SMF28 et de 2 échantillons de fibres LEAF de longueurs différentes (10m et 100m) à partir de mesures de Y .

6.2.3. Spectre de gain Brillouin dans les fibres passives

6.2.3.1. Importance des contraintes internes

Le modèle de simulation que nous avons développé permet de prédire de façon précise les spectres Brillouin de fibres optiques. Nous nous en sommes servi pour simuler l'influence des paramètres de fabrication des fibres optiques sur leur spectre Brillouin, notamment à travers les contraintes internes résiduelles emprisonnées dans les fibres pendant le processus de fabrication. En

effet, des écarts entre modèle et expérience ont subsisté malgré la prise en compte du profil d'indice et du dopage, y compris avec le modèle vectoriel.

Les conditions de fabrication des fibres déterminent les contraintes résiduelles qui s'y figent. On sait que l'indice optique change en fonction des contraintes internes résiduelles dans la fibre (phénomène opto-élastique)[6.44]. Il en est de même pour les vitesses acoustiques [6.45][6.46]. Les contraintes emprisonnées sont dues à la fois :

- au changement de température, depuis la température de fusion à la température ambiante : ce sont les contraintes thermiques,
- aux forces de tirage : ce sont les contraintes mécaniques créées par une différence de propriétés visco-élastiques entre le cœur et la gaine.

Ces contraintes vont donc modifier le comportement du spectre de gain Brillouin. La compréhension de l'influence des conditions de fabrication, en plus de celle du design (géométrie, composition) de fibres optiques est donc indispensable pour affiner nos modèles de prédiction.

Le modèle a été validé sur une fibre G.652. Son rayon de cœur est de $5\mu\text{m}$ dope à 6mol% en germanium dans le cœur avec une gaine de rayon $62.5\mu\text{m}$ en silice pure.

On observe un décalage des pics Brillouin d'environ 7MHz par rapport au cas où l'on ne prend pas en compte les contraintes internes (Figure 25) mesurées par mesures polarimétriques. Ce décalage correspond à une variation de fréquence Brillouin observée dans le cas d'une déformation de la fibre $\varepsilon=140\mu\text{m}/\text{m}$ ($\mu\varepsilon$), non négligeable pour des applications capteurs (fluage $\approx 10\mu\text{m}/\text{m}$).

On constate alors que même si l'amplitude des contraintes dans cette fibre n'est pas très élevée ($\cong -20\text{MPa}$ dans le cœur), leur prise en compte permet de se rapprocher du spectre Brillouin mesuré dans la fibre.

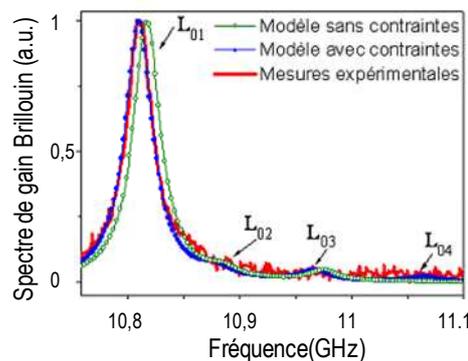


Figure 25. Comparaison des spectres Brillouin de la fibre G.652 avec ou sans prise en compte des contraintes

6.2.3.2. Prise en compte des conditions de fabrication

Pour mieux comprendre l'impact sur le gain Brillouin des contraintes dues au tirage, une collaboration avec la société Draka, fabricant de fibre optique, a été mise en place. Nous avons étudié un lot de 6 fibres ayant les mêmes compositions de dopants et la même géométrie, la même température de fusion mais avec des tensions de tirage différentes allant de 20g à 160g.

Les fibres étudiées, de type BI-SMF (Bend Insentive), ont pour principale utilité d'être déployées dans les réseaux FTTH¹⁶ grâce à leurs très faibles pertes par macro-courbures. Cette insensibilité aux courbures peut être également intéressante pour des applications capteurs Brillouin de température et

¹⁶ FTTH : Fiber To The Home

de déformation. Ces fibres correspondent à la norme G.652 mais présentent une tranchée dans la gaine.

Comme pour la fibre G.652 testée précédemment, on observe un pic principal dans le spectre, à la fréquence de 10.615GHz. Les contraintes internes permettent une meilleure correspondance entre modélisation et mesures. Sur la Figure 26, on peut voir l'évolution du spectre pour 3 des 6 fibres. On constate que la fréquence de décalage ν_B décroît lorsque la tension de tirage augmente.

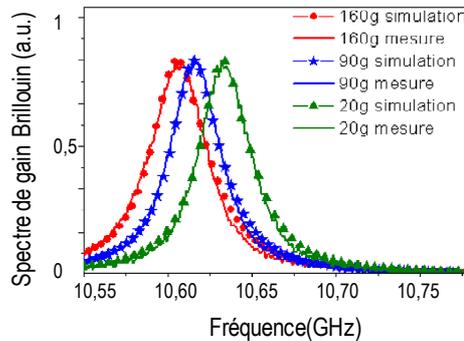


Figure 26. Comparaison modélisations / mesures du gain Brillouin pour plusieurs tension de tirage

La décroissance de ν_B suit une approximation linéaire de pente de l'ordre de $-20\text{MHz}/100\text{g} \pm 2.4\text{MHz}/100\text{g}$. On observe également un élargissement du spectre avec la tension de tirage de près de 6MHz. Cela peut être expliqué par les changements de structure dans la silice causés par l'augmentation des niveaux de contraintes.

Une très bonne concordance des mesures et des modélisations nous confirme l'importance d'intégrer les contraintes internes à la fibre dans le calcul du spectre Brillouin. Les décalages fréquentiels observés lorsqu'on ne considère pas ces contraintes internes sont considérables comparés à des décalages fréquentiels dus à des contraintes externes. Pour la fibre optique précédente tirée à 160g, le décalage observé sans prendre en compte les contraintes internes est d'environ 40MHz, ce qui correspond à une déformation de l'ordre de $\epsilon=800\mu\epsilon$ (classiquement un décalage de 1MHz correspond à une déformation de $20\mu\epsilon$). Cette étude nous permettra dans la suite de nos travaux de comprendre et modéliser le comportement du spectre Brillouin en fonction des changements externes appliqués à la fibre. C'est-à-dire de pouvoir prévoir pour une fibre donnée, sa sensibilité à la température et à la déformation auxquelles elle est soumise.

6.2.3.3. Influence des contraintes liées à un fort dopage

Une fois l'importance de la prise en compte des contraintes mécaniques dues aux différentes conditions de tirage établie, nous avons voulu étudier l'influence des contraintes résiduelles causées par de très fortes concentrations de dopants. En effet, le second objectif consiste à spécifier une fibre optique possédant une sensibilité Brillouin accrue à la déformation. La connaissance de l'influence de l'origine des contraintes internes sur le spectre Brillouin est un premier pas vers cet objectif. Pour cela, nous avons choisi une fibre photosensible CMS¹⁷ fabriquée par iXFiber.

Il s'agit d'une fibre dopée à 28%mol en GeO_2 (valeur à peu près dix fois plus élevée qu'une fibre classique) avec un diamètre de cœur de $2.4\mu\text{m}$. Avec un tel niveau de dopage, le cœur et la gaine ont des coefficients visco-élastiques très différents. De ce fait, de très fortes contraintes se créent au moment du passage de la température de fusion à la température ambiante durant la fabrication,

¹⁷ Cladding Mode Shifted

d'amplitudes environ dix fois plus élevées dans le cœur comparées à une fibre standard (de l'ordre de 200MPa).

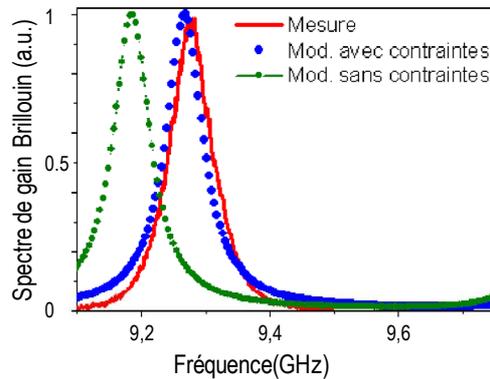


Figure 27. Comparaison des spectres Brillouin mesuré et modélisés avec ou sans contraintes : modes L_{01}

La résolution des équations mécaniques en mode vectoriel est alors plus adaptée, comme nous l'avons vu précédemment. Cette fibre fait de plus l'objet d'une étude plus poussée sur l'influence des rayonnements ionisants UV et Gamma, en collaboration avec l'Andra et l'Université de St Etienne.

Sur la Figure 27, on constate qu'en considérant les contraintes résiduelles dans la fibre pour le calcul du spectre de gain Brillouin, on se rapproche, pour le mode principal L_{01} , du spectre mesuré. Un écart de près de 100MHz est observé entre les modes L_{01} modélisés avec et sans contraintes. Leur prise en compte est encore une fois indispensable sur les fibres très fortement dopées.

6.2.4. Conclusion et perspectives

Nous avons donc depuis quelques années développé au laboratoire des modèles de prédictions théoriques ainsi que des outils d'analyse expérimentale dans le but de définir une fibre capable de discriminer température et déformation par effet Brillouin. Nous avons montré qu'une résolution en mode scalaire convient aux fibres monomodes standards et une résolution en mode vectoriel aux fibres avec des concentrations très élevées de dopants. La diversité des fibres étudiées nous a permis de définir l'étendue du domaine d'application de nos modèles. Nous avons également montré l'importance de la prise en compte des contraintes internes, de diverses origines, emprisonnées dans les fibres lors de la fabrication pour modéliser de manière plus précise le spectre de gain Brillouin. Ces modélisations et ces expériences constituent désormais des outils solides pour aborder l'étude de la sensibilité à la température et à la déformation du spectre Brillouin.

L'outil numérique a permis également, à partir de données bibliographiques d'identifier qu'un fort dopage Al_2O_3 (>10 mol-%) dans une fibre silice offrirait une augmentation d'au moins 50 % du C_ϵ par rapport aux données de la littérature sur l'ensemble des fibres. L'INO à Québec a une bonne expérience de la fabrication des fibres dopées Al_2O_3 . Après une première vérification expérimentale sur une fibre contenant un codopage Al_2O_3 de ~4 mol %, nous préparons un partenariat consistant en la réalisation d'une fibre répondant au cahier des charges des capteurs désirés pour les applications visées. Une telle proportion de dopage n'ayant jamais été réalisée par l'INO, il subsiste une incertitude connue des partenaires sur l'atténuation en ligne résultante.

J'étudie également en ce moment la faisabilité d'un capteur acoustique répartis avec la société Cementys, société spécialisée dans l'instrumentation, la surveillance et l'optimisation de la maintenance des structures du génie civil et des réseaux d'infrastructures.

6.2.5. Collaborations

EDF R&D, LCPC (F. Taillade, S. Lessoille), BAM (K. Krebber), SNCF (J.P. Dubois), IDIL Fibres Optiques (L. Quetel), ANVAR (L. Dieleman), Draka Comtek (P. Nouchi, E. Burov), XLIM (J.L. Auguste, J.M. Bondy), LunaTechnologies (A. Sang), EPFL (L. Thévenaz)

Bibliographie

- [6.1] M. Monerie et al., "Polarisation mode dispersion measurement in long single mode fibres", *Electronics Letters*, 16(24) : 907-908, 1980.
- [6.2] B. Costa et al., "Phase shift technique for the measurement of chromatic dispersion in optical fibers using leds", *IEEE Transactions on microwave theory and techniques*, 30(10) : 1497-1503, 1982.
- [6.3] W. Eickhoff et al., "Optical frequency domain reflectometry in single-mode fiber", *Applied Physics letters*, 39(9) : 693-695, 1981.
- [6.4] B. Soller et al., "High resolution optical frequency domain reflectometry for characterization of components and assemblies", *Optics express*, 13(2) : 666-674, 2005.
- [6.5] S. Kieckbush et al., "Fast and accurate characterization of fiber bragg gratings with high spatial and spectral resolution", *Optical Fiber Communications*, Atlanta, Georgia, 2003.
- [6.6] J.Y. Lee et al., "Versatile chromatic dispersion measurement of a single mode fiber using spectral white light interferometry", *Optics express*, 14(24) : 11608-11615, 2006.
- [6.7] S. Diddams et al., "Dispersion measurement with white light interferometry", *Journal of the Optical Society of America*, 13(6) : 1120-1129, 1996.
- [6.8] N. Kawai, et al., "Transmittance and time-of-flight study of $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ -based photonic crystal waveguides", *Physical. Review. B*, 63, 153313, 2001.
- [6.9] S. Combrié et al., "Detailed analysis by Fabry-Perot method of slab photonic crystal line-defect waveguides and cavities in aluminium-free material system", *Optics Express*, 14, n°16, 7353, July 2006.
- [6.10] H. Gilgen et al., "Submillimeter optical reflectometry", *Journal of lightwave technology*, 7(8) : 1225-1233, 1989.
- [6.11] K. Takada et al., "New measurement system for fault location in optical waveguide devices based in an interferometric technique", *Applied Optics*, 26(9) : 1603-1606, 1987.
- [6.12] E. Yablonovitch, "Interview with Eli Yablonovitch", <http://optics.org>, 2002.
- [6.13] P. Russel, "Photonic crystal fibres", *Science*, 299 : 358-362, 2003.
- [6.14] S. Ramachandran, "Dispersion tailored few-mode fibres : a versatile platform for in-fiber photonic device", *IEEE J. Lightwave. Technol.*, vol. 23, no. 11, pp. 3426-3443, Nov. 2005.
- [6.15] S. Ramachandran, S. Ghalmi, J.W. Nicholson, M.F. Yan, P. Wisk, E. Monberg, and F.V. Dimarcello, "Anomalous dispersion in a solid, silica-based fiber", *Optics Letters*, vol. 31, no. 17, pp. 2532-2534, Sept.2006.
- [6.16] M. Notomi et al., "Extremely Large Group-Velocity Dispersion of Line-Defect Waveguides in Photonic Crystal Slabs", *Physical Review Letters*, 87 : 253902, 2001.
- [6.17] Y.A. Vlasov et al., "Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides", *Nature*, 438 : 65-69, 2005.
- [6.18] A. Yu. Petrov et al., "Zero dispersion at small group velocities in photonic crystal waveguides", *Appl. Phys. Lett.*, 85 : 4866-4869 (2004).
- [6.19] J. Zimmermann et al., "Large dispersion in photonic crystal waveguide resonator", *Electronics Letters*, 41(7), 2005.
- [6.20] S. Kubo et al., "Low group-velocity and low-dispersion slow light in photonic crystal waveguides", *Optics letters*, 32(20) : 2981-2983, 2007.
- [6.21] S. Combrié et al., "Single-mode photonic crystal waveguides for RF delay generation", *Conference on Lasers and Electro-Optics*, Long beach, California, 2006.
- [6.22] S.G. Johnson et al., "Introduction to photonic crystals Bloch's theorem, band diagrams and gaps (but no defects) ", *MIT*, 2003.
- [6.23] S. Hugues et al., "Extrinsic optical scattering loss in photonic crystal waveguides", *Physical Review Letters*, 94 : 1-3, 2005.

- [6.24] A. Gomez-Iglesias et al., "Direct measurement of the group index of photonic crystal waveguides via Fourier transform spectral interferometry", *Applied Physics Letters*, 90(21) : 261107-1-261107-3, 2007.
- [6.25] Y. Sugimoto et al., "Low propagation loss of 0.76dB/mm in gas based single-line defect two-dimensional photonic crystal slab waveguides up to 1cm in length", *Optics Express*, 12(6) : 1090-1096, 2004.
- [6.26] S. Combrié et al., "Photonic crystal microcavity coupled to a waveguide: an integrated system full of physics", *Conference on Lasers and Electro-Optics*, Long Beach, California, 2006.
- [6.27] M. Notomi et al. "Waveguides resonators and their coupled elements in photonics crystal slabs", *Optics express*, 12(8), 1551-1561, 2004.
- [6.28] L. M. Baskin et al., "Accurate characterization of fiber bragg grating index modulation by side-diffraction technique", *IEEE Photon. Tech. Lett.*, 15(3) : 449-451, march 2003.
- [6.29] J. P. Dakin et al., "Distributed antistokes ratio thermometry", *Optical Fiber Sensors*, page PDS3, Optical Society of America, 1985.
- [6.30] M. A. Farahani et al., "Spontaneous Raman scattering in optical fibers with modulated probe light for distributed temperature Raman remote sensing", *Journal of lightwave Technology*, 17(8) : 1379, 1999.
- [6.31] www.sensornet.co.uk.
- [6.32] T. Kurashima et al., "Strain and temperature characteristics of Brillouin spectra in optical fibers for distributed sensing techniques", *Optical Communication 1998, 24th European Conference on*, vol.1, pages 149-150, 1998.
- [6.33] P.C. Wait et al., "Landau plazcek ratio applied to distributed fibre sensing", *Optics Communication*, 122 (4-6) : 141-146, 1996.
- [6.34] M. K. Barnoski et al., "Fiber waveguides : a novel technique for investigating attenuation characteristics", *Applied Optics*, 15(9) : 2112-2115, 1976.
- [6.35] I. Sankawa et al., "Fault locating technique for in-service 1:98 branched optical networks using an amplified optical time-domain reflectometer", *Optical Fiber Communications*, page WN8, Optical Society of America, 1991.
- [6.36] A.H. McCurdy, "Modeling of stimulated Brillouin Sacttering in optical fibers with arbitrary radial index profile", *Journal of Lightwave Technology*, 23(11) : 3509-3516, Nov 2005.
- [6.37] A. Safaai-Jazi et al., "Acoustic modes in optical fiberlike waveguides", *IEEE Trans. Ultrason. Ferr.*, 35(5) : 619-627, Sep. 1988.
- [6.38] C.-K. Jen et al., "Acoustic characterization of silica glasses", *J. Am. Ceram. Soc.*, 76(3) : 712-716, mars 1993.
- [6.39] N. Shibata et al., "Longitudinal acoustic modes and Brillouin-gain spectra for geo2-doped-core single-mode fibers", *J. Opt. Soc. Am. B*, 6(6) : 1167-1174, 1989.
- [6.40] A. Loayssa et al., "Characterization of stimulated Brillouin scattering spectra by use of optical single-sideband modulation", *Opt. Lett.*, 29(6) : 638-640, 2004.
- [6.41] A. B. Ruffin et al., "Brillouin gain analysis for fibers with different refractive index", *Opt. Lett.*, 30(23) : 3123-3125, 2005.
- [6.42] A. Kobayakov, "Design concept for optical fibers with enhanced SBS threshold", *Opt. Exp.* 13(14) : 5338-5346, (2005)
- [6.43] C. J. Misas et al., "Slowing of pulses to c/10 with subwatt power levels an low latency using Brillouin amplification in a bismuth-oxide optical fiber", *Journal of Lightwave Technology*, 25(1) : 216-221, 2007.
- [6.44] G.W. Scherer, "Stress-induced index profile distortion in optical waveguides", *Applied Optics*, 19(16) : 2000-2006, June 1980.
- [6.45] T.D. Murnaghan, "Finite deformation of an elastic solid", *John Wiley and Sons, Inc*, New York, 1951.

[6.46] J.L. Kelly, "Second order elastic deformation of solids", *Phys. Rev*, 269 : 1145-1149, 1953.

7. PUBLICATIONS ET COMMUNICATIONS

Articles :

- [1] M. Bondiou, R. Gabet, G.M. Stéphan, P. Besnard., "Linewidth of an optically injected semiconductor laser", **J. Opt. B : Quantum Semiclass. Opt.** 2, pp. 41-46, 2000.
- [2] S. Blin, G.M. Stéphan, R. Gabet, P. Besnard and D. Kilper, "Amplification process in a laser injected by a narrow band, weak signal", **Europhys. Lett.**, 52(1), pp. 60-65, Oct 2000.
- [3] R.Gabet, G.M. Stéphan, M. Bondiou, P. Besnard, D. Kilper, "Ultrahigh sensitivity detector for coherent light: the laser", **Optics Communication**, n° 185, pp. 109-114, Nov 2000.
- [4] G. Aubin, J. Sapiel, V. Ya. Molchanov, R. Gabet, P. Grosso, S. Gosselin, Y. Jaouen, "Multichannel acousto-optics cells for fast optical crossconnect", **Electronics Letters**, n° 7, 40, pp. 448, April 2004.
- [5] F. Kefelian, R. Gabet, P. Gallion, "Characteristics of the phase noise correlation of injection locked lasers for RF signal generation and transmission", **Optical and Quantum Electronics**, vol 38, n°4/6, pp. 467-470, March/May 2006.
- [6] H. Teimoori, J. D. Topomondzo, C. W, R Gabet, D Erasme, "All-Optical 3x8 SOA-based Packet-Switching Decoder Design and Demonstration at 10 Gbit/s", **Photonics Technology Letters**, vol. 19, n° 10, pp. 738-40, May 2007.
- [7] P. Hamel, R. Gabet, A-F. Obaton, E. Burov, G. Melin, Y. Jaouën, "Mesure de la dispersion chromatique de fibres micro-structurées par réflectométrie à faible cohérence ", **Revue Française de Métrologie**, vol. 2006-4, n° 8, pp. 3-11, Jan. 2007.
- [8] P. Hamel, Y. Jaouën, R. Gabet and S. Ramachandran , "Optical Low Coherence Reflectometry for complete chromatic dispersion characterization of few-mode fibers", **Optics Letters**, vol. 32, n°9, pp. 1029-1031, May 2007.
- [9] S. Combrie, N.V.Q. Tran, E. Weidner, A. De Rossi, S. Cassette, P. Hamel, Y. Jaouën, R. Gabet and A. Talneau, "Investigation of group delay, loss and disorder in a Photonic Crystal Waveguide by Low-Coherence Reflectometry", **Applied Physics Letters**, vol. 90, pp. 231104, June 2007.
- [10] Y. Li, Y. Jaouën, R. Gabet, W. Hu, Y. Su et S. Bigo, "Improved 10-Gb/s Slow-Light Performances Based on Broadband Stimulated Brillouin Scattering in Optical Fiber", **Optics Express**, Vol. 15, pp. 16972-16979, Déc 2007.
- [11] I. Fsaifes, C. Lepers, R. Gabet, M. Douay and P. Gallion, "Performance analysis of quadratic congruence codes using superstructured fiber Bragg gratings for a flexible data rate coherent DS-OCDMA system", **Journal of Optical Networking**, Vol. 7, n° 7, pp. 692-703, July 2008.
- [12] Y. Jaouen, R. Gabet and P. Hamel, "Optical low-coherence reflectometry for characterization of specialty fibers and photonics crystal waveguides", **SPIE** paper 7099-19, 2008.
- [13] A. Parini, P. Hamel, A. De Rossi, S. Combré, N-V-Q Tran, Y. Gottesman, R. Gabet, A. Talneau, Y. Jaouen and G. Vadalà, "Time-wavelength reflectance maps of photonic crystal waveguides : A new view on disorder-induced scattering", **Journal of Lightwave Technology**, Vol. 26, n°23, pp. 3794-3802, Déc. 2008.
- [14] R. Gabet, P. Hamel, Y. Jaouen, A-F. Obaton, G. Debarge, V. Lanticq, "Versatile specialty fiber characterization using phase-sensitive OLCR technique", **Journal of Lightwave Technology**, Vol. 27, n°15, Aug 1, 2009.
- [15] V. Lanticq, S. Jiang, R. Gabet, Y. Jaouen, F. Taillade, G. Moreau and G. P. Agrawal, "Self-referenced and single-ended methode to measure brillouin gain in monomode optical fibers", **Optics Letters**, Vol. 34, Issue 7, pp. 1018-1020, 2009.
- [16] S. Blin, O. Vaudel, P. Besnard et R. Gabet, "Power- or frequency-driven large bistabilities for continuous wave optically injected distributed feedback semiconductor laser", **Optics Express**, Vol. 17, Issue 11, pp. 9288-9299, 2009.

- [17] M. Patterson, S. Hughes, S. Combré, N.-V.-Quynh Tran, A. De Rossi, Y. Jaouën et R. Gabet, "Disorder-Induced Coherent Scattering in Slow-Light Photonic Crystal Waveguides", *Physical Review Letters*, vol. 102, n° 25, pp. 253903, Juin 2009.
- [18] C. Baskiotis, Y. Jaouën, R. Gabet, G. Bouwmans, Y. Quiquempois, M. Douay et P. Sillard, "Micro-bending behavior of large mode area Bragg fibers", *Optics Letters*, vol. 34, pp. 3490-3492, Novembre 2009.
- [19] Y. Gottesman, S. Combré, A. De Rossi, A. Talneau, P. Hamel, A. Parini, R. Gabet, Y. Jaouën, B. Benkelfat et E. Rao "Time-frequency analysis for an efficient detection and localization of side-coupled cavities in real photonics crystals", *Lightwave Technology*: Vol. 28, Issue 5, pp. 816-821 (2010) Février 2010.
- [20] M. Y. Sikali, E. Burov, L-A. de Montmorillon, Y. Jaouën, G. Moreau, R. Gabet, F. Taillade, "Importance of residual stresses in the Brillouin gain spectrum of single mode optical fibers", *Optics Express*, Vol. 20, Issue 2, pp. 1790-1797, 2012.

Chapitre de livre

- [21] V. Lanticq, R. Gabet et F. Taillade, "Distributed optical fiber sensors for structural health monitoring: upcoming challenges", *Intech*, édition spéciale : "Optical Fibre, new developments".

Conférences avec actes

- [22] M. Bondiou, R. Gabet, P. Besnard and G. Stéphane, "Optical bistabilities in injected semiconductor lasers", *Laser'97*, New Orleans, 1998.
- [23] R. Gabet, M. Bondiou, G.M. Stéphane, P. Besnard, "Semiconductor laser with weak optical injection: a laser as a low-signal detector", *CLEO/QELS 99*, Baltimore, Maryland, USA, May 1999.
- [24] R. Gabet, M. Bondiou, S. Clément, G.M. Stéphane, P. Besnard, "Fonction de transfert généralisée au laser : description des propriétés spectrales d'un laser seul et d'un laser injecté", *COLOQ'6*, J. Phys. IV France 10, Bordeaux, 1999.
- [25] R. Gabet, G.M. Stéphane, P. Besnard, M. Têtu, "Linewidth anomaly of a distributed feedback laser", *Laser'99*, Québec (Québec), Déc. 1999.
- [26] R. Gabet, F. Lissillour, D. Messager, P. Féron and G.M. Stéphane, D.C. Kilper, "Spectral narrowing of a semiconductor laser by injection of a microspherical laser", *Laser'99*, Québec (Québec), Déc 1999.
- [27] R. Gabet, G.M. Stéphane, P. Besnard, "Detecting femtowatt with lasers", *ICAPT'2000*, Québec (Québec), June 2000.
- [28] R. Gabet, G.M. Stéphane, P. Besnard, "Regime of amplification of a laser detector", *CLEO Europe*, communication CFC4, Sept. 2000.
- [29] R. Gabet, G.M. Stéphane, S. Clément, P. Besnard, "Polarization effects in the laser response to a small injected field", *PELS 2000*, Sept. 2000.
- [30] G. Stéphane, S. Blin, R. Gabet, P. Féron, F. Lissillour and P. Besnard, "The injected semiconductor laser", *ICONO'01*, Minsk, June 2001.
- [31] S. Blin, R. Gabet, G.M. Stéphane and P. Besnard, "Cartographies intra et intermodales d'un laser à semi-conducteurs soumis à injection optique", *COLOQ'7*, Rennes, France, Sept 2001.
- [32] C. Gosset, E. Le Rouzic, E. Pincemin et R. Gabet, "Conversion en longueur d'onde et démultiplexage temporel optique par mélange à quatre ondes dans un SOA à 40 Gb/s", *OPTIX2001*, Marseille, France, Nov 2001.

- [33] S. Blin, R. Gabet, G.M. Stéphan and P. Besnard, "Mesure du gain d'un laser utilisé comme amplificateur", **OPTIX2001**, Marseille, France, Nov 2001.
- [34] N. El Dahdah, G. Aubin, D. Meichenin, A. Ramdane, F. Devaux, A. Shen, R. Gabet, Y. Jaouën, B. Benkelfat, "Ultra-fast multiple quantum well polarisation insensitive electroabsorption modulator for 40Gb/s wavelength conversion", oral presentation **CLEO EUROPE 2003**, Munich, Germany, June 2003.
- [35] S. Blin, C. Guignard, P. Besnard, R. Gabet, G.M. Stephan, M. Bondiou, "Phase and spectral properties of optically injected lasers", *Invited paper CRAS de l'académie des sciences*, Paris, 2003.
- [36] S. Blin, C. Palavicini, I. Castonguay, Y. Jaoën, P. Besnard, S. Laroche and R. Gabet, "Pi/2 phase-shifted Er³⁺-Yb³⁺-doped distributed feedback fibre laser characterisation using a phase-sensitive optical low-coherence reflectometer", poster presentation **CLEO EUROPE 2003**, Munich, Germany, June 2003.
- [37] C. Ware, R. Gabet, D. Erasme, "Opto-electronic phase-locked loop using four-wave mixing in semiconductor optical amplifier", poster presentation **CLEO EUROPE 2003**, Munich, Germany, June 2003.
- [38] S. Blin, P. Besnard, R. Gabet, G.M. Stephan, "Huge bistabilities at high optical injection level", post-deadline **CLEO EUROPE 2003**, Munich, Germany, June 2003.
- [39] F. Kéfélian, R. Gabet et P. Gallion, "Bruit de phase résiduel dans les systèmes de génération de radiofréquences par mélange de signaux optiques synchronisés", **JNOG'03**, papier n° FK:JNOG-03, Valence, France, nov. 2003.
- [40] S. Blin, O. Vaudel, T. Tam, P. Besnard, S. La Rochelle, R. Gabet and G. Stéphan, "Spectral and time phenomena in optical injection using distributed feedback semiconductor or fibre lasers", in *International Workshop on Photonics and Applications*, Hanoi, Vietnam, 2004.
- [41] I. Fsaifes, M. Lourdiane, C.Lepers, R.Gabet V. Beugin, & P.Gallion, "Performances of an 1Gbps optical Direct Sequence CDMA system based on Sampled Fiber Bragg Gratings", **Phothonics North'05**, Ottawa Canada, PGC81, 2005.
- [42] F. Kéfélian, R. Gabet, P. Gallion, "Phase noise analyze and characterization of a RF source based on correlated DFB lasers", **5th International Conference on Photonics**, Devices and Systems, Olympik Hotel, Prague, Czech Republic, June 2005.
- [43] F. Kéfélian, R. Gabet and P. Gallion, "Phase Noise Characterization of a RF Signal Generation and Transmission Optical System based on Injection Locked DFB Laser sc Tunability", **PHASE'05** (International Workshop on PHysics and Applications of SEMiconductor LASERs), FK:PHASE-05, Metz, France, March 2005.
- [44] F. Kéfélian, R. Gabet and P. Gallion, "Phase Noise Characterization of a RF Signal generation and transmission optical system based on injection locked DFB lasers", **CLEO EUROPE 2005**, CB-12-MON, pp. 142, Munich, June 2005.
- [45] R. Gabet, K. Clement, G. Mélin, Anne-Françoise Obaton, Ekaterina Burov, Yves Jaouen, "Caractérisation modale de fibres microstructurées par reflectométrie à faible cohérence", **JNOG'05**, papier 2_5, Chambéry, déc. 2005.
- [46] S. Khemiri, C. Ware, R. Gabet, et D. Erasme, "40GHz short pulse clocked optical source based on four wave mixing in an optical fibre", **ICES**, Gammarth (Tunisie) N° Optical Network and system III, 2005.
- [47] Ihsan Fsaifes, Catherine Lepers, Mounia Lourdiane, Renaud Gabet, Philippe Gallion, "Pulsed Laser Source Coherence Time Impairments in a Direct Detection DS-OCDMA System", **CLEO/QELS 06**, Long Beach, California, oral presentation CWH6, May 2006.
- [48] P. Hamel, Y. Jaouën, R. Gabet and S. Ramachandran, "Chromatic dispersion measurements of few-mode fibres using OLCR technique", **ECOC06**, Cannes, France, paper Th 1.5.3, 2006.
- [49] H. Teimoori, J.D. Topomondzo, C. Ware, R. Gabet et D. Erasme, "All-Optical 3*8 SOA-based Decoder Design and Demonstration at 10 Gbit/s for Packet-Switching Applications", **Broadband Europe'06**, Geneva. Déc. 2006.

- [50] R. Gabet, P. Hamel, A-F. Obaton, E. Burov, G. Melin, Y. Jaouen, "Modal Analysis and Spatial Dispersion Evolution in PCF Fibres", **ECOC06**, Cannes, N° paper Th 1.5.7., 2006.
- [51] A-F Obaton, P. Hamel, R. Gabet, Y. Jaouën, E. Burov, G. Mélin, M Lièvre and J Dubard, "Comparative measurement of group velocity dispersion on micro-structured fibre using Optical Low Coherence Reflectometry", **OFMC 2007**, Teddington, UK, Oct. 2007.
- [52] L. Yi, Y. Jaouën, R. Gabet, W. Hu, Y. Su and S. Bigo , "10-Gb/s slow-light performance based on SBS effect in optical fiber using NRZ and PSBT modulations formats", **ECOC 07**, Berlin, Germany, paper We6.6.2, Sept. 2007.
- [53] V. Lanticq, R. Gabet, J.-L. Auguste, S. Lesoille, S. Fortier and Y. Jaouën, "Spontaneous Brillouin Scattering Modelling and Measurement in Various Axisymmetric Optical Fibres", **ECOC 2007**, Berlin, Germany, paper P004. Sept. 2007.
- [54] L. Yi, Y. Jaouën, W. Hu, Y. Su and R. Gabet , "Ralentissement de signaux à 10Gb/s par effet Brillouin dans une fibre optique", **JNOG 2007**, Grenoble, paper JE3, July 2007.
- [55] A. Maalouf, P. Hamel, D. Bosc, Y. Jaouën, S. Haesaert, F. Henrio, P. Grosso, M. Gadonna, Y. Gottesman and R. Gabet, "Caractérisation de micro-résonateurs polymère par réflectométrie à faible cohérence", **JNOG 2007**, vol. papier ME, July 2007.
- [56] A. De Rossi, S. Combrie, N.V.Q. Tran, S. Casette, P. Hamel, Y. Jaouën, R. Gabet and A. Talneau, "Structural disorder induced polarization and mode scrambling in photonic crystals", **CLEO Europe 2007**, Nice, paper CK10-1-Thu, June 2007.
- [57] P. Hamel, Y. Jaouën, R. Gabet, S. Combrié, N.V.Q. Tran, E. Weidner, A. De Rossi and A. Talneau, "Investigation of group delay and disorder in a Photonic Crystal Waveguide using Low-Coherence Reflectometry", **CLEO 2007**, Baltimore, USA, paper CTuG4, May 2007.
- [58] A. De Rossi, S. Combrié, Q-V Tran, C. Huscko, G. Vadala, P. Hamel, R. Gabet, Y. Jaouën, A. Parini, Y. Gottesman and F. Raineri, "Impact on nonlinearity and disorder on slow modes in membrane photonic crystal", **Slow and Fast light 2008**, Boston , USA, Vol. paper SWC2, July 2008.
- [59] Y. Jaouën , R. Gabet and P. Hamel, "Optical low-coherence reflectometry for characterization of specialty fibers and photonics crystal waveguides", **Photonics North 08**, Montreal, Canada, paper FLD-3-4-1., June 2008.
- [60] V. Lanticq, S. Jiang, R. Gabet, Y. Jaouen, S. Delepine-Lesoille, JM. Henault, "Self-referenced method to measure Brillouin gain coefficient in optical fibers", **ECOC 08**, Brussels, Belgium, poster Tu.3.B.2, Sept. 2008.
- [61] V. Lanticq, S. Jiang, R. Gabet, Y. Jaouen, S. Delepine-Lesoille, G. Moreau, "Mesure Auto-référencée du coefficient de gain Brillouin dans les fibres optiques monomodes", **JNOG 08**, Lannion, France, poster, Oct. 2008.
- [62] J. Petit, D. Erasme, R. Gabet, C. Kasmierski, C. Jany, J. Decobert, F. Alexandre, N. Dupuis, "Enhanced 10-Gb/s NRZ transmission distance using dual modulation of an integrated elctro-absorption modulated laser transmitter", **OFC 09**, San diego, US, accepted, March 2009
- [63] C. Baskiotis, Y. Jaouën, R. Gabet, D. Molin, P. Sillard, G. Bouwmans, Y. Quiquempois et M. Douay, "Investigating micro-bend sensitivity of a large-mode-area Bragg fiber", **ECOC 2009**, Vienne, Autriche, pp. paper 2.2.1, Sept. 2009.
- [64] S. Combrié, P. Colman, M. Patterson, R. Gabet, B. Benkelfat, B. Bennai, G. Demand, Y. Jaouën, S. Hughes et A. De Rossi, "Disorder-induced coherent scattering in dispersion-engineered photonic crystal waveguides", **CLEO 2010**, San Jose (USA), Fév. 2010.
- [65] S. Combrié, P. Colman, A. De Rossi, M. Patterson, S. Hughes, R. Gabet et Y. Jaouën, "The role of the coherent scattering in photonic crystals", **Photonic Europe**, n° 7713-20, Avril 2010.
- [66] S. Combrié, P. Colman, N. V. Q. Tran, J Bourderionnet, A. De Rossi, G. Demand, M. Patterson, S. Hughes, R. Gabet et Y. Jaouën, "Toward a miniature optical true-time delay line", **SPIE newsroom**, DOI: 10.1117/2.1201005.002946, Juin 2010.

- [67] G. Demand, M. Patterson, S. Combré, P. Colman, R. Gabet, Y. Jaou  n, A. De Rossi et S. Hughes, "Probing disorder-induced scattering in photonic crystal waveguides through time-frequency transmission maps", *Photonic North*, vol. Photonic nanostructures, Juin 2010.
- [68] Y. Sikali-Mamdem, X. Pheron, F. Taillade, Y. Jaouën, R. Gabet, V. Lanticq, G. Moreau, A. Boukenter et Y. Ouerdane "Prise en compte du profil de dopage pour l'analyse modale des spectres Brillouin de fibres optiques monomodes", *JNOG'10*, Oct. 2010.
- [69] A. Talneau, I. Sagnes, Renaud Gabet, Yves Jaouën et H benisty, "Ultra-sharp edge filtering in nanotethered photonic wire evidenced by delay measurement", *EOS annual meeting* n   3535 Octobre 2010
- [70] S. Tsyier, P. Yvernault, A. Millaud, I. Fsaifes, Y. Jaouën, R. Gabet, M. Douay, B. Poumellec, "Caractérisation de réseaux de Bragg par luminescence bleue : détermination du profil d'indice de modulation en amplitude et phase", *JNOG'11*, Poster session, juillet 2010, Marseille.
- [71] S. Tsyier, P. Yvernault, A. Millaud, I. Fsaifes, Y. Jaou  n, R. Gabet and M. Douay, "Index Phase Profile and Pitch Measurement Technique of Fiber Bragg Gratings using UV-induced Blue Luminescence", *CLEO'11*, Poster session, May 1-6, 2011, Baltimore (USA).
- [72] Y. Sikali, Y. Jaouen, R. Gabet, X. Pheron. G. Moreau, F. Taillade, "Two-dimensional FEM Analysis of Brillouin Gain Spectra in Acoustic Guiding and Antiguiding Single Mode Optical Fibers", *COMSOL* 2011
- [73] Y. Sikali Mamdem, E. Burov, L.-A. De Montmorillon, F. Taillade, Y. Jaouen, G. Moreau, R. Gabet, "Importance of residual stresses in the Brillouin Gain Spectrum of single mode optical fibers", *CLEO'11 Europe*, Poster Session We.10.P1.16, 20 sept. 2011, Geneva, Switzerland.
- [74] Y. Jaou  n , G. Canat, Y. Sikali-Mamdem, R. Gabet, L. Lombard and E. Burov, "Stimulated Brillouin scattering in specialty optical fibers: importance of material, structure and manufacturing parameters", *CLEO'12*, San Jose, USA.
- [75] S. Tsyier, A. Millaud, T. Lopez, I. Fsaifes, Y. Jaou  n, R. Gabet, M. Douay, B. Poumellec, D. Sauvage, "Profile Amplitude Measurement and Phase Shifts Localization in Fiber Bragg Gratings Using UV-Induced Blue Luminescence", *CLEO'12*, Oral presentation CTh1G.4, San Jose, USA.
- [76] Y. Sikali Mamdem, F. Taillade, Y. Jaou  n, R. Gabet, G. Moreau, X. Ph  ron, S. Delepine-Lesoille, "Optical fiber properties influence on strain coefficient C_ϵ of Brillouin frequency shift", *OFS'12*, 15-19 Oct 2012, Oral presentation, China.
- [77] V. Henry, R. Gabet et A. Poudoulec, "Limites des techniques de mesure actuelles pour la caractérisation des filtres optiques ultrafins", *JNOG'12*, Poster, 10-12 juillet 2012, Lyon.

Conférences pédagogiques

- [78] R. Gabet, C. Ware et D. Erasme, "Transmission sur fibre optique plastique d'un DVD consacré à l'holographie", JNOG 2008, Rencontres pédagogiques, Oct. 2008
- [79] Membre du comité d'organisation des rencontres pédagogiques des JNOG 2009
- [80] Organisation d'expériences de vulgarisation pour la fête de la science

8. EXEMPLES D'ARTICLES