



HAL
open science

Autour de l'équation de Schrödinger non-linéaire dans les fibres optiques : similaritons, régénération, sources fibrées et évènements extrêmes

Christophe Finot

► **To cite this version:**

Christophe Finot. Autour de l'équation de Schrödinger non-linéaire dans les fibres optiques : similaritons, régénération, sources fibrées et évènements extrêmes. Optique [physics.optics]. Université de Bourgogne, 2009. tel-02056863

HAL Id: tel-02056863

<https://hal.science/tel-02056863>

Submitted on 8 Mar 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Habilitation à Diriger les Recherches

présentée par **Christophe FINOT**

Maître de Conférences à l'Université de Bourgogne
Faculté des Sciences et Techniques, Dijon

Autour de l'équation de Schrödinger non-linéaire dans les fibres optiques : similaritons, régénération, sources fibrées et évènements extrêmes

Habilitation soutenue le 9 Novembre 2009, devant la commission d'examen composée de :

Philippe BALCOU	Directeur de Recherche, CELIA, Université de Bordeaux 1	<i>Rapporteur</i>
Marc DOUAY	Professeur, Université de Lille 1	<i>Rapporteur</i>
Hervé RIGNEAULT	Directeur de Recherche, Institut Fresnel, Marseille	<i>Rapporteur</i>
Alain DEREUX	Professeur, Université de Bourgogne	<i>Président</i>
John DUDLEY	Professeur, Université de Franche-Comté	<i>Examineur</i>
Yves JAOUEN	Professeur, Telecom ParisTech	<i>Examineur</i>
Guy MILLOT	Professeur, Université de Bourgogne	<i>Examineur</i>

Institut CARNOT de Bourgogne, UMR 5209 CNRS-Université de Bourgogne
Équipe Solitons, Lasers et Communications Optiques

<http://icb.u-bourgogne.fr/OMR/SLCO/>

Faculté des Sciences Mirande, 9 avenue Alain Savary, BP 47870, 21078 Dijon, France

à Céline,

à Élise,

à mes parents,

à tous ceux qui ont contribué à la réussite des recherches présentées dans ce mémoire,

SOMMAIRE

Introduction	9
Curriculum vitae et expérience de recherche	13
1. État civil et coordonnées professionnelles actuelles	13
1.1. État civil	13
1.2. Fonctions actuelles	13
2. Expériences scientifiques	14
3. Formation	14
4. Domaines de compétences	15
4.1. Thèmes abordés pendant le doctorat	15
4.2. Thèmes abordés pendant le post-doctorat	15
4.3. Thèmes abordés depuis la nomination sur un poste MCF	15
5. Implication dans les projets de recherche	16
5.1. Responsabilité de Projets Scientifiques	16
5.2. Implication dans d'autres projets de recherche ANR	17
6. Encadrement d'étudiants / personnel	19
6.1. Encadrement de jeunes chercheurs	19
6.2. Encadrement de doctorants	19
6.3. Encadrement de stages au niveau Master / École d'ingénieur	19
7. Activités d'expertise	20
8. Collaborations scientifiques	20
8.1. Collaborations internationales	20
8.2. Collaborations nationales	21
8.3. Collaborations industrielles	21
8.4. Implication dans les réseaux de recherche	21
9. Rayonnement des travaux de recherche	22
9.1. Publications scientifiques	22
9.2. Conférences	22
9.3. Bourses et récompenses	22
10. Dissémination scientifique et actions de vulgarisation	23
10.1. Vulgarisation à destination du grand public	23
10.2. Promotion des activités de recherche sur internet	23
10.3. Autres expériences	24
11. Activités d'Enseignement	24

<i>Les Similaritons Optiques</i>	27
1. Introduction	27
2. Génération de similaritons dans les amplificateurs a fibre	27
2.1. Contexte	27
2.2. Résultats obtenus	28
3. Génération passive d'impulsions paraboliques	32
3.1. Dans des fibres à dispersion décroissante	32
3.2. Dans un arrangement de deux fibres à dispersion fixe	33
3.3. Par une méthode de mise en forme linéaire	34
4. Dynamique impulsionnelle de plusieurs similaritons	35
4.1. Interaction et collision d'impulsions paraboliques	35
4.2. Dynamique de similaritons sombres sur un similariton parabolique	36
5. Conclusion et synthèse du theme abordé	37
<i>La régénération optique par dispositifs non-linéaires à fibre</i>	39
1. Contexte	39
2. Régénération de Mamyshev	39
2.1. Schéma expérimental et modélisation numérique	39
2.2. Paramètres caractérisant l'impact du régénérateur	40
2.3. Règles de conception et validation expérimentale	42
2.4. Dispositifs multi-segments	43
2.5. Impulsions propres et génération asymptotique d'impulsions	44
3. Régénération de Mamyshev active	46
4. Régénération multi-longueur d'onde	46
5. Régénération Soliton	47
6. Conclusion et synthèse du theme abordé	49
<i>Les sources optiques fibrées de nouvelle génération</i>	51
1. Introduction	51
2. Source multi-longueur d'onde pour les telecommunications optiques	51
2.1. Introduction	51
2.2. Source pour les applications OCDMA	52
2.3. Source à base d'impulsions paraboliques	53
3. Sources pour les applications haut-debit	54
4. Source pour la microscopie Cars	56
4.1. Contexte	56
4.2. Sources supercontinuum à base de fibres microstructurées : impact du second zéro de dispersion	57
4.3. Sources contrôlables en fréquence basée sur le décalage Raman soliton	58
5. Supercontinuum dans une fibre à bande photonique interdite	59
6. Conclusion et synthèse du theme abordé	60

<i>Les Structures Optiques Extrêmes</i>	63
1. Introduction	63
2. Statistiques extrêmes dans les supercontinua	64
2.1. Dans une fibre à deux zéros de dispersion	64
2.2. Dans une fibre à trois zéros de dispersion	65
2.3. Dans les systèmes à instabilité modulationnelle d'ordre 4	66
3. Statistiques extrêmes dans les amplificateurs optiques à fibre	68
3.1. Dans les amplificateurs paramétriques	68
3.2. Dans les amplificateurs Raman	71
4. Conclusion et synthèse du thème abordé	73
<i>Conclusion</i>	75
<i>Liste Exhaustive de la Production Scientifique</i>	77
1. Publications	77
1.1. Publications dans des revues internationales à comité de lecture	77
1.2. Actes de congrès à comité de lecture	81
1.3. Vulgarisation scientifique	86
1.4. Rapports de contrat	86
2. Communications	87
2.1. Communications orales dans une conférence internationale	87
2.2. Communications orales dans une conférence nationale	89
2.3. Séminaires et interventions dans des groupes de recherche	90
2.4. Conférences de vulgarisation scientifique	91
2.5. Posters	92
<i>Publications Annexées</i>	95

INTRODUCTION

En 1845, l'ingénieur écossais John Scott Russell rapporte que le mouvement brusque d'une barge génère une vague de grande amplitude capable de se propager sur une distance inhabituelle tout en conservant sa forme ¹. Une telle observation est reprise par H. Bazin et H. Darcy ², une vingtaine d'années plus tard, dans le canal de Bourgogne, à proximité de Dijon : les ondes hydrodynamiques étudiées montrent une étonnante aptitude à résister aux effets de la dispersion qui induit traditionnellement un étalement de la vague. Pour expliquer de telles propriétés, il est indispensable de tenir compte des effets non-linéaires qui interviennent durant la propagation de la vague. La modélisation mathématique de ces effets a alors mis en évidence un nouveau type d'onde, le soliton. Ce concept ne se restreint pas uniquement à l'étude des ondes hydrodynamiques et peut être étendu à de nombreux autres champs de la physique ³, comme la mécanique, l'électronique ou encore l'optique.

C'est sans nul doute dans ce dernier domaine que le soliton a connu ses plus grands succès ⁴. Les effets non-linéaires ont en effet tenu un rôle grandissant dans l'optique de la seconde moitié du vingtième siècle, en particulier grâce à l'apparition du laser qui a rendu possible l'utilisation d'une onde cohérente de forte intensité. Des manifestations, tel l'effet Kerr ou bien l'effet Pockels, de la non-linéarité de certains matériaux excités par de fortes puissances ont alors été observées. De manière similaire au soliton hydrodynamique, plusieurs exemples de solitons optiques ont été démontrés. Divers types de solitons optiques spatiaux ont ainsi été reportés, pour lesquels la non-linéarité contrebalance la diffraction naturelle d'un faisceau laser. Un support privilégié a permis, quant à lui, de mettre en évidence des solitons temporels : il s'agit de la fibre optique, mise au point dans les années 1970 et sans laquelle les réseaux de télécommunications optiques actuels n'existeraient pas. La non-linéarité de la silice constituant la fibre s'oppose alors à la dispersion temporelle des impulsions ⁵. Les impulsions se propagent alors inchangées sur des dizaines de kilomètres, la seule limite résidant dans l'atténuation des fibres qui diminue progressivement la puissance crête de l'impulsion.

Pour mieux comprendre l'évolution d'une impulsion, l'équation de Schrödinger non-linéaire (ESNL) est un outil précieux. Cette équation prenant en compte les effets dispersifs et la non-linéarité Kerr a montré à maintes occasions sa capacité à prédire avec grande précision le comportement d'une onde optique dans une fibre monomode. Les solitons usuels constituent ainsi, dans le domaine de dispersion anormale, une solution fondamentale de cette équation. Mais, moyennant quelques termes additionnels, cette équation peut également être adaptée pour prendre en compte une gamme de

¹ J. S. Russell, "Report on waves, Technical Report," in 14th meeting of the British association for the Advancement of Science, London, 1845.

² H. Bazin and H. Darcy, "Recherches hydrauliques, deuxième partie," Imprimerie Impériale, vol. P. III-XV, p. 153, 1865.

³ M. Remoissenet, *Waves called solitons : concepts and experiments*, Third Edition ed.: Springer, 2003.

⁴ Y. S. Kivshar and G. P. Agrawal, *Optical solitons : from fibers to photonic crystals*: Academic Press, 2003.

⁵ A. Hasegawa and F. Tappert, "Transmission of stationary nonlinear optical pulses in dispersive dielectric fibers. I. Anomalous dispersion," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 23, pp. 142-144, 1973.

situations beaucoup plus large et de très nombreux phénomènes non-linéaires ont alors été révélés, allant de différents processus d'instabilité modulationnelle à la génération de supercontinua optiques⁶.

Ce mémoire rapporte les travaux scientifiques que j'ai effectués depuis mon arrivée comme doctorant en 2002 dans le Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne (LPUB) dans le groupe Solitons, Lasers et Communications Optiques (SLCO) dirigé par le professeur Guy MILLOT. Le sujet qui m'avait alors été confié concernait l'émergence d'un nouveau type d'impulsions, le similariton, dont les propriétés exotiques venaient très récemment d'être découvertes⁷. Prévues par une analyse asymptotique de l'équation de Schrödinger non-linéaire en présence de gain et de dispersion normale, cette forme se distingue profondément du soliton fondamental : loin de garder sa largeur temporelle et son amplitude inchangées, le similariton évolue dans la fibre optique en subissant une augmentation exponentielle de sa puissance crête et de sa largeur temporelle. Grâce à différents travaux expérimentaux et numériques, nous avons proposé différentes applications dans le domaine des télécommunications optiques bénéficiant des propriétés originales des similaritons. Ce thème fructueux a été poursuivi pendant mon séjour post-doctoral à l'Optoelectronics Research Centre (ORC) de l'université de Southampton au Royaume-Uni. Depuis mon affectation en tant que Maître de Conférences à l'Université de Bourgogne, à l'Institut CARNOT de Bourgogne (ICB)⁸, je maintiens quelques activités autour de ce thème très riche.

Le sujet de mes études s'est donc progressivement diversifié, tout en gardant comme point central la fibre optique et sa description par l'ESNL. Je me suis ainsi intéressé au contexte des télécommunications optiques et de la transmission longue-distance de signaux à haut débit. Excepté le cas particulier des solitons optiques, la non-linéarité est alors généralement perçue par les industriels comme un effet extrêmement pénalisant qu'il est préférable de contourner. Or il est possible de profiter, dans certaines situations, du temps de réponse quasi-instantané de la non-linéarité Kerr pour traiter localement le signal, notamment pour effectuer des opérations de régénération optique. Un autre sujet où l'élargissement spectral induit par l'auto-modulation de phase ou par un mélange à quatre ondes multiple est bénéfique est la mise en œuvre de sources optiques fibrées, que ce soit pour le haut débit ou bien pour les communications multiplexées en longueurs d'onde. Si un spectre de plusieurs centaines de nanomètres est l'objectif, il faudra alors inclure dans l'ENSL les effets d'ordres supérieurs comme la réponse Raman de la silice ou encore les termes de dispersion plus élevés. L'appellation de supercontinua⁹ s'est alors imposé pour désigner ces nouvelles sources lumineuses pour lesquelles la mise au point des fibres microstructurées¹⁰ a été un apport décisif. Ainsi, depuis maintenant une dizaine d'années, de nombreux groupes de recherche ont essayé de mieux comprendre la dynamique non-linéaire complexe à l'origine d'un tel élargissement spectral. Un des points les plus délicats est l'instabilité des spectres obtenus, les résultats variant d'une réalisation à l'autre de manière significative, avec notamment de rares impulsions se révélant beaucoup plus intenses que la moyenne¹¹. Un parallèle intéressant avec le domaine de l'hydrodynamique et les vagues scélérates a été alors

⁶ Agrawal, G. P., *Nonlinear Fiber Optics*, Third Edition. Academic Press: San Francisco, CA, 2001.

⁷ M. E. Fermann, V. I. Kruglov, B. C. Thomsen, J. M. Dudley, and J. D. Harvey, "Self-similar propagation and amplification of parabolic pulses in optical fibers," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 84, pp. 6010-6013, 2000.

⁸ L'ICB a été créé le 1^{er} Janvier 2007 par la fusion de trois UMRs dont le LPUB.

⁹ Dudley, J. M.; Genty, G.; Coen, S., Supercontinuum generation in photonic crystal fiber. *Rev. Modern Physics* **2006**, 78, 1135-1184.

¹⁰ P. S. Russell, "Photonic crystal fibers," *Science*, vol. 299, pp. 358-362, 2003.

¹¹ D. R. Solli, C. Ropers, P. Koonath, and B. Jalali, "Optical rogue waves," *Nature*, vol. 450, p. 1054, 2007.

suggéré et c'est dans ce contexte d'étude des événements dits « extrêmes » que s'inscrivent mes recherches les plus récentes.

Ce mémoire se divisera en cinq chapitres. Le premier chapitre sera la synthèse de mon parcours, des différentes expériences et projets de recherches dans lesquels j'ai été impliqué. Je m'attacherai ensuite dans le second chapitre à décrire le concept de similariton optique, comment nous avons été en mesure de les générer et de les caractériser précisément dans différents milieux amplificateurs. Les techniques alternatives de génération passive seront également discutées, de même que la dynamique subie par plusieurs impulsions similaritons. La troisième section de ce mémoire se concentrera sur les potentialités des fibres optiques pour un traitement non-linéaire de l'information, plus précisément pour effectuer une opération de régénération optique. Différentes configurations expérimentales basées sur des fibres à dispersion normale ou anormale seront détaillées et leurs performances comparées. Basées sur des simulations numériques systématiques, des règles de conception simples seront présentées pour trouver efficacement les paramètres optimaux à mettre en œuvre. Le chapitre quatre regroupera quant à lui les différents travaux exploitant la non-linéarité des fibres de silice dans le contexte de nouvelles sources optiques. Ainsi, des sources continua pour des applications multiplexées en longueurs d'onde seront analysées, ainsi que des sources haut-débit délivrant des impulsions avec un profil temporel de grande qualité et un rapport de cycle faible. Des études sur la génération de supercontinua optiques dans des fibres microstructurées présentant plusieurs zéros de dispersion seront également présentées avec comme objectif final la réalisation d'une source adaptée aux besoins de la microscopie CARS. Ce mémoire se terminera par un sujet émergent, la description statistique d'événements extrêmes apparaissant dans différentes configurations supercontinua ou bien dans des amplificateurs à fibre optique.

La liste complète de la production scientifique est annexée (Annexe I) ainsi qu'une sélection des publications les plus représentatives des thèmes abordés (Annexe II). Dans l'ensemble de ce mémoire, les références notées sous la forme [Px] ou [Ax] se rapportent respectivement aux publications ou aux actes de conférences numérotés dans l'annexe I.

CURRICULUM VITAE ET EXPÉRIENCE DE RECHERCHE

Dans ce chapitre, je résume mon parcours, les compétences et l'expérience de recherche que j'ai pu acquérir, ainsi que les différents projets scientifiques auxquels j'ai eu l'occasion de participer.

1. ÉTAT CIVIL ET COORDONNÉES PROFESSIONNELLES ACTUELLES

1.1. État civil

Nom, Prénoms : FINOT, Christophe Fabien
Né le : 31 mai 1978 (31 ans), à Châtillon-sur-Seine (Côte d'Or, 21)
Nationalité : Française
Situation familiale : Marié, un enfant (Élise, 6 mois).

Adresse : 11ter boulevard Voltaire
21 000 DIJON – FRANCE

Téléphone : +33 (0)9.54.80.90.78 (fixe)
+33 (0)6.62.72.79.17 (mobile)

E-mail : christ_finot@hotmail.com

1.2. Fonctions actuelles

Fonction : Maître de Conférences, 2nde classe
Section CNU : 30
Section CNRS : 04

Unité d'affectation : Institut CARNOT de Bourgogne, UMR 5209
Faculté des Sciences et Techniques, Université de Bourgogne

Équipe : Équipe Solitons, Lasers et Communications Optiques
Département Optique Matière et Rayonnement

Adresse : Institut CARNOT de Bourgogne, Faculté des Sciences Mirande,
9 avenue Alain Savary, BP 47870
21 078 DIJON Cedex - FRANCE

Téléphone : +33 (0)3.80.39.59.26
Fax : +33 (0)3.80.39.59.71
E-mail : christophe.finot@u-bourgogne.fr
Page web : <http://www.icb.u-bourgogne.fr/OMR/SLCO/Membres/Finot.htm>

2. EXPÉRIENCES SCIENTIFIQUES

Septembre 2008 - 2009 : **Accueil en demi-délégation au Centre National de la Recherche Scientifique.**

Depuis Septembre 2006 : **Maître de conférences à l'Université de Bourgogne.**

Octobre 2005-Septembre 2006 : **Post-doctorat, Optoelectronics Research Centre, Université de Southampton - Royaume-Uni.**

Octobre 2002-Octobre 2005 : **Similaritons dans les amplificateurs optiques fibrés Raman.** Doctorat effectué au *Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne (LPUB – UMR 5027).*

Avril-Septembre 2002 : **Élaboration d'un outil de modélisation vectorielle du champ électromagnétique dans une fibre à cristaux photoniques.** Stage de fin d'étude réalisé à *Alcatel – Marcoussis.*

Février 2002 : **Étude et réalisation d'un réflectomètre optique pour l'analyse longitudinale de l'évolution de la polarisation dans une fibre.** Stage d'option réalisé au *LPUB.*

Juin-Aout 2001 : **Mesure de l'atténuation de fibres optiques dans l'UV – Caractérisation d'amplificateurs de luminance.** Stage de deuxième année réalisé au *CEA – Bruyères le Châtel.*

Septembre-Octobre 1999 : **Modélisation du comportement d'un micro-levier soumis à une excitation de forte amplitude.** Travail d'Étude et de Recherche au *LPUB, équipe d'optique submicronique.*

Juin-Juillet 1999 : **Comportement de micro-leviers dans un environnement gazeux : détection de gaz, phénomènes non linéaires.** *Oak Ridge National Laboratory - Tennessee, USA.*

Septembre 1998 : **Modélisation du comportement optique de semi-conducteurs, simulations informatiques.** *Laboratoire de Sciences Appliquées du Queen's University – Belfast - Irlande du Nord.*

Septembre-Octobre 1997, Juillet 1998 : **Découverte de la Microscopie à Force Atomique,** simulations informatiques réalisées au sein de l'équipe d'optique submicronique du *LPUB - Dijon.*

Séjours de courte durée :

14-18 mars 2005 : **Tests d'un régénérateur à similaritons sur un système à 40 Gbps.** *France Telecom R&D (maintenant Orange Labs). Lannion.*

3. FORMATION

2002-2005 **Doctorat de Physique** au sein du **Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne, Dijon,**
Thèse cofinancée par le CNRS et la région Bourgogne (BDI), sous la direction de Guy MILLOT, Pr.
Similaritons dans les amplificateurs Raman à fibre optique
Thèse soutenue le 4 Octobre 2005.

2000-2002 **Ingénieur SupOptique** Orsay
Option de spécialisation "télécommunications optiques", *major de promotion 2002.*

2001-2002 **DEA Optique et Photonique** - Université Paris-Sud – *mention très bien.*

1998-2000 **Licence et Maîtrise de Physique** – Université de Bourgogne – *mentions très bien, major.*

1996-1998 **DEUG Sciences de la Matière** – Université de Bourgogne – *félicitations du jury, major.*

1996 **Bac S** – Lycée Carnot, Dijon - *mention très bien, félicitations du jury.*

4. DOMAINES DE COMPÉTENCES

J'ai eu l'occasion durant ces dernières années d'acquérir différentes compétences concernant l'optique non-linéaire dans les fibres. Ces compétences seront détaillées dans les chapitres suivants de ce mémoire.

4.1. Thèmes abordés pendant le doctorat

- Optique non-linéaire dans les fibres, équation de Schrödinger non-linéaire [Chapitre II]
- Amplification Raman [Chapitre II, III, IV, V]
- Simulations numériques [Chapitre II]
- Caractérisation optique d'impulsions ultra-brèves [Chapitre III]
- Mise en forme d'impulsions [Chapitre II]
- Similaritons optiques [Chapitre III]
- Télécommunications haut débit [Chapitre III]

4.2. Thèmes abordés pendant le post-doctorat

- Amplification par fibres dopées terres-rares [Chapitre II]
- Régénération optique haut débit et multi-longueurs d'onde [Chapitre III]
- Génération passive de similaritons optiques [Chapitre II]

4.3. Thèmes abordés depuis la nomination sur un poste MCF

- Fibres de nouvelle génération microstructurées, caractérisation [Chapitre IV]
- Sources multi-longueurs d'onde adaptées aux communications OCDMA [Chapitre IV]
- Sources bi-longueurs d'onde pour des applications biophotoniques. [Chapitre IV]
- Sources haut-débit [Chapitre IV]
- Analyse d'évènements extrêmes dans les systèmes fibrés [Chapitre V]
- Génération de supercontinua optiques [Chapitre IV]

5. IMPLICATION DANS LES PROJETS DE RECHERCHE

Depuis ma nomination à l'Institut CARNOT de Bourgogne, je me suis impliqué dans plusieurs projets de recherche financés notamment par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). J'ai initié certaines de ces projets pour ensuite en assurer la coordination locale. Je effectue dans cette partie la synthèse des contrats auxquels j'ai participé.

5.1. Responsabilité de Projets Scientifiques

Nom du projet :	SUPERCODE Supercontinuum généré par fibre optique à cristal photonique pour l'accès multiple à répartition par code
Financement :	Agence Nationale de la Recherche ANR-06-BLAN-0401-01
Période :	2007-2009
Montant du projet ICB :	118 k€
Coordination locale :	Christophe FINOT (2008-2009)
Coordination nationale :	Institut Carnot Bourgogne Pr. Stefan WABNITZ (2007) Pr. Guy MILLOT (2008-2009)
Partenaires	École Nationale Supérieure des Télécommunications, Paris Institut XLIM, Limoges Laboratoire PhLamn, Lille
Contribution au projet :	Suite à la disponibilité de Stefan WABNITZ, j'ai assuré la coordination locale du projet. L'objectif fixé à l'ICB pour ce projet était de développer une source continuum compatible avec les contraintes des communications OCDMA. Le but a été atteint et un prototype a été construit et testé avec succès. Le projet a permis d'aborder des thèmes connexes comme l'influence initiale de l'incohérence d'une pompe.
Implication dans le projet :	25 %
Résultats publiés :	P21, P24, P25, P27, P31, P33, P39 A31, A38, A43, A46, A47, A48, A50, A54, A59, A70, A79

Nom du projet :	SOFICARS Sources Optiques Fibrées pour microscopie CARS
Financement :	Agence Nationale de la Recherche ANR-07-RIB-013-03
Période :	2008-2010
Montant du projet ICB :	161 k€
Coordination locale :	Christophe FINOT
Coordination nationale :	Amplitude Systèmes Dr. Eric MOTTAY
Partenaires	Institut Fresnel, Marseille Amplitude Systèmes, Bordeaux Institut FEMTO-ST, Besançon
Contribution au projet :	Le projet SOFICARS vise à développer de nouvelles sources optiques adaptées aux contraintes de la microscopie CARS, c'est-à-dire émettant deux impulsions ultrabrèves synchronisées à deux longueurs d'onde différentes séparées de plusieurs dizaines de THz. La solution que je suis en charge de développer à l'ICB repose sur l'utilisation du décalage fréquentiel ajustable d'un soliton ultrabref sous l'effet de la réponse Raman intrapulse d'une fibre microstructurée de silice.
Implication dans le projet :	50 %
Résultats publiés :	P31, P33, P38, P39 A47, A50, A69, A70, A72, A79

Nom du projet :	Conception de nouvelles sources fibrées pour la microscopie CARS
Financement :	Bonus Qualité Recherche de l'Université de Bourgogne
Période :	2007
Montant du projet :	2.5 k€
Coordination:	Christophe FINOT
Contribution au projet :	Ce Bonus Qualité-Recherche de l'université m'a permis à mon arrivée d'acheter du matériel pour la mise en sécurité de l'installation laser femtoseconde. Il a également contribué au financement de la participation à une conférence internationale.

Nom du projet :	Dispositif d'analyse spectrale de signaux ultra-brefs
Financement :	Projet Hors Contrat de Plan – Région Bourgogne
Période :	2009
Montant du projet :	9.5 k€
Coordination:	Christophe FINOT Pr. Guy MILLOT
Contribution au projet :	La technique FROG largement utilisée dans notre équipe n'est pas systématiquement en mesure de retrouver fidèlement les profils d'intensité et de phase d'impulsions larges. Nous cherchons à développer une alternative basée sur une technique linéaire d'analyse d'un signal spectralement découpé. La mise en place du projet reposera sur l'utilisation d'un dispositif permettant de manipuler les profils d'intensité et de phase des impulsions à caractériser.

5.2. Implication dans d'autres projets de recherche ANR

Nom du projet :	FUTUR Fonctions optiques pour les Transmissions haut débit dans le Réseau cœur
Période :	2007-2009
Coordination locale :	Dr. Julien FATOME
Coordination nationale :	Laboratoire FOTON Dr. Thierry CHARTIER
Partenaires	Laboratoire FOTON, plateforme PERSYST, Lannion III-V Lab, Alcatel-Thales, Marcoussis Laboratoire de Photonique et de Nanostructures, Marcoussis PERFOS, Lannion, Université de Rennes, Equipe Verres et Céramiques, Rennes, IX FIBER, Lannion
Contribution au projet :	Le projet exploratoire FUTUR a pour objectifs de développer et d'étudier des techniques tout-optiques de traitement du signal pour les transmissions longues distances à très hauts débits (<i>160 Gbit/s et plus</i>). Dans ce contexte, je me suis essentiellement impliqué dans la problématique de la régénération tout-optique basée sur des fibres hautement non-linéaires. Des travaux numériques et expérimentaux ont été menés en collaboration avec FOTON et PERSYST.
Implication dans le projet :	10 %
Résultats publiés :	P23, P40, P44, P46, P48 A40, A68, A77, A81

Nom du projet :	ILIADE
Période :	2008-2010
Coordination locale :	Dr. Stéphane PITOIS
Coordination nationale :	Laboratoire ARTEMIS Dr. Michel LINTZ
Partenaires	Laboratoire ARTEMIS, Nice Laboratoire GEMINI, Nice
Contribution au projet :	Le projet ILIADE a pour objectif la mise en place d'un système optique compatible avec les applications de télémétrie spatiale et devant à terme offrir une précision de quelques mm sur des distances de plusieurs centaines de kilomètres. L'apport de l'ICB se situe initialement au niveau de la conception de la source initiale à un taux de répétition de 20 GHz. Pour cela, les techniques déjà éprouvées dans l'équipe de mélange à quatre ondes multiple ont été employées, avec désormais un verrouillage en phase des deux sources laser continues initialement utilisées.
Implication dans le projet :	25 %
Résultats publiés :	P20, P27, P30 A34, A35, A42, A55, A56, A61, A76

Nom du projet :	MANUREVA Modélisation mathématique et étude expérimentale des instabilités non linéaires, des vagues scélérates et des phénomènes extrêmes
Période :	2009-2011
Coordination locale :	Pr. Guy MILLOT
Coordination nationale :	Centre de Mathématiques et de Leurs Applications Pr. Frédéric DIAS
Partenaires	Centre de Mathématiques et de Leurs Applications, Cachan Institut FEMTO-ST, Besançon Laboratoire de Probabilités et Modèles Aléatoires, Paris
Contribution au projet :	Le projet pluridisciplinaire MANUREVA s'inscrit dans le contexte émergent de l'étude des événements extrêmes. Un lien particulièrement intéressant semblerait en effet pouvoir être établi entre les domaines hydrodynamique et optique. L'équipe SLCO a alors en charge de développer des techniques expérimentales permettant de mieux caractériser les événements optiques, dans les systèmes présentant de l'instabilité de modulation ou bien dans les autres systèmes.
Implication dans le projet :	10 %
Résultats publiés du projet :	P28, P36, P38, P42, P49, P50 A51, A53, A58, A65, A67, A69, A71, A73, A75, A78

Nom du projet :	FENOPTIC Fibres optiques silice dopées par des nanostructures métalliques exploitant la résonance de modes plasmons localisés pour exalter les amplifications (Raman et Terres rares) et les effets non-linéaires
Période :	En cours de financement 2010-2012
Coordination locale :	Dr. Lucien SAVIOT (coordination au sein de l'équipe SLCO : Christophe FINOT)
Coordination nationale :	Draka Comteq France Dr. Alain PASTOURET
Partenaires	Draka Comteq France Laboratoire de Physico-Chimie des Matériaux Luminescents, Lyon Laboratoire de chimie de la matière condensée de Paris, Paris
Contribution au projet :	Ce projet vise à cerner les potentialités des nouvelles fibres incluant des nanostructures métalliques dans le cœur. Dans l'équipe SLCO, nous serons notamment en charge de tester les propriétés non-linéaires de ces nouveaux supports.
Implication dans le projet :	10 %

6. ENCADREMENT D'ÉTUDIANTS / PERSONNEL

6.1. Encadrement de jeunes chercheurs

Septembre 2007-Septembre 2008 : **Supercontinuum généré par fibre optique à cristal photonique pour l'accès multiple à répartition par code**, encadrement de Bertrand KIBLER, Dr. sur un post-doctorat financé par l'ANR.

6.2. Encadrement de doctorants

Depuis Septembre 2008 : **Sources lasers continuum cohérentes à base de guides d'ondes micro et nanostructurés hautement non-linéaires de nouvelle génération**, thèse préparée à l'ICB par M. Kamel HAMMANI, bourse ministérielle, co-direction officielle avec Guy MILLOT, Pr.

6.3. Encadrement de stages au niveau Master / École d'ingénieur

Mai-Aout 2009 : **Mise en place et caractérisation d'une source multi-longueurs d'onde basée sur les effets non-linéaires dans les fibres optiques et étude des applications potentielles à la régénération optique**, stage CNRS-élève ingénieur effectué à l'ICB par M. Zhi-An JIANG, étudiant en 2^{ème} année de cycle ingénieur à l'IFIPS (Institut de Formation d'Ingénieur de Paris Sud, Orsay). Encadrement 100 %.

Avril-Juin 2009 : **Les solitons dans les systèmes optiques, hydrodynamiques, électriques ou mécaniques**, stage effectué à l'ICB par M. Beaud Conrad MABIKA NDJEMBIDOUA, étudiant en 1^{ère} année de Master Physique, Laser et Matériaux à l'Université de Bourgogne. Encadrement 100 %.

Février-Juin 2008 : **Étude des effets d'ordres supérieurs sur la génération et la propagation de similaritons dans les fibres optiques**, stage effectué à l'ICB M. Kamel HAMMANI, étudiant en 2^{ème} année de Master Physique Laser et Matériaux. Encadrement 100 %.

Mai-Juin 2007 : **Communications sur les problématiques liées au nucléaire**, stage effectué à la SEIVA par M^{lle} Gaëlle GOUET, étudiante en 1^{ère} année de Master Sciences Physiques à l'Université de Bourgogne. Encadrement 60 %.

Mai-Juin 2007 : **Étude des performances d'un régénérateur optique pour les télécommunications à haut débit**, stage effectué à l'ICB par M. Benjamin PATIN, étudiant en 1^{ère} année de Master Sciences Physiques à l'Université de Bourgogne. Encadrement 100 %.

Février-Juin 2007 : **Étude des régénérateurs de Mamyshev à 160 Gbit/s**, stage effectué à l'ICB par M^{lle} Fida BAZ, étudiante en 2^{ème} année de Master Physique des Nouvelles Technologies de l'Optique. Encadrement 60 %.

Mai-Juin 2007 : **Étude de l'élargissement spectral d'une impulsion lumineuse dans une fibre optique hautement non-linéaire**, stage effectué à l'ICB par M. Kamel HAMMANI, étudiant en 1^{ère} année de Master Physique des Nouvelles Technologies de l'Optique. Encadrement 20 %.

Février-Juin 2006 : **Exploitation du Soliton Self-Frequency Shift**, stage effectué au LPUB et à l'ORC par M^{lle} Amélie GUENOT, étudiante en 2^{ème} année de Master Nanotechnologies à l'Université de Bourgogne. Encadrement 50 %.

Juin-Juillet 2004 : **Interactions de similaritons optiques**, stage effectué au LPUB par M^{lle} Delphine LAUGIER, étudiante en 1^{ère} année de Magistère à l'École Normale Supérieure de Lyon. Encadrement 80 %.

7. ACTIVITÉS D'EXPERTISE

Expertise pour l'Agence Nationale pour la Recherche.

Examineur externe pour le programme de subventions de projets stratégiques (SPS) du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada

Rapporteur régulier pour différentes revues scientifiques internationales (**52 rapports entre 2005 et 2009**) :

- **Journaux OSA (27)** : Optics Express (*dix-huit revues*), Journal of Optical Society of America B (*cinq revues*), Optics Letters (*quatre revues*).
- **Journaux Elsevier (12)** : Optics Communications (*quatre revues*), Optics and Lasers in Engineering (*deux revues*), Optical Fiber Technology (*quatre revues*), Optics and Laser Technology (*deux revues*).
- **Journaux IEEE (10)** : Journal of Lightwave Technologies (*trois revues*), IEEE Photonics Technology Letters (*deux revues*), IEEE Journal of Quantum Electronics (*deux revues*), Journal of Selected Topics in Quantum Electronics (*une revue*), IEEE Communications Letters (*une revue*), IEEE Photonics Journal (*une revue*).
- **Journaux autres éditeurs (3)** : Advances in Nonlinear Optics (*une revue*), Optical and Quantum Electronics (*une revue*), Journal of Electromagnetic Waves and Applications (*une revue*).

Chairman, session « Slow and Fast Light », CLEO Europe, Munich, Allemagne, juin 2007.

Membre du conseil scientifique de la Structure d'Échange et d'Information sur VALDUC (SEIVA).

Jury des journées de l'école doctorale, Dijon, mai 2007.

8. COLLABORATIONS SCIENTIFIQUES

8.1. Collaborations internationales

- Pr. Dave RICHARDSON**, Optoelectronics Research Center, Southampton, Royaume-Uni
Similaritons optiques, Régénération par fibres optiques [P12 P13 P14 P15 P16 P18 P26 P45]
- Pr. Wacław URBANCZYK**, Wrocław University of Technology, Pologne
Fibres microstructurées de nouvelle génération [P33 P39 A50 A70 A79]
- Pr. Kuppaswamy PORSEZIAN**, Université de Pondichéry, Inde
Similaritons optiques [P32]
- Dr. Lei WU**, Institute of Nonlinear Physics, Chine
Similaritons optiques [P32 P37 P47 A80]
- Dr. Alexej SYSOLIATIN**, Fiber Optics Research Center, Moscou, Russie
Similaritons optiques dans des fibres à dispersion variable [P21 A38 A43 A46]
- Dr. Kazunori MUKASA**, Furukawa LTD, Japon
Régénération optique dans des fibres hautement non-linéaires [P13 P16 P22]
- Dr. Sonia BOSCOLO**, Aston University, Royaume-Uni
Similaritons optiques [travaux en cours, demande Alliance déposée]
- Dr. Kadour SAOUCHI**, Université Badji Mokhtar, Annabar, Algérie
Similaritons optiques [travaux en cours, demande AUF déposée]

8.2. Collaborations nationales

- Pr. John M. DUDLEY**, Institut FEMTO-ST, Besançon
Similaritons optiques, Statistiques extrêmes [P1 P3 P5 P11 P18 P28 P34 P37 P43 P42]
- Pr. Catherine LEPEERS**, Telecom et Management SudParis, Evry
Projet SUPERCODE, source continuum pour applications OCDMA [A48 A54 A59]
- Dr. Hervé RIGNEAULT**, Institut Fresnel, Marseille
Source optique fibrée pour la microscopie CARS [ANR SOFICARS]
- Dr. Vincent COUDERC**, Institut XLIM, Limoges
Génération continuum longueur d'onde des télécommunications optiques [ANR SUPERCODE]
- Dr. Arnaud MUSSOT**, PhLam, Lille
Phénomènes partiellement incohérents, [P2 + travaux en cours]
- Dr. Thierry CHARTIER**, Laboratoire FOTON, Lannion
Régénération par fibres optiques [P23 P38 P44]
- Dr. Cédric Ware**, Telecom ParisTech, Paris
Projet SUPERCODE, source continuum pour applications OCDMA [A48 A54 A59]

8.3. Collaborations industrielles

- Draka Comteq**, Marcoussis, France (Dr. Lionel PROVOST, Dr. Ekaterina BUROV)
Fibres optiques avec nanoparticules métalliques [ANR FENOTIC]
- Amplitude Systemes**, Pessac, France (Dr. Eric MOTTAY)
Source optique fibrée pour la microscopie CARS [ANR SOFICARS]
- Fianium**, Southampton, Royaume-Uni (Dr. Pascal DUPRIEZ)
Similaritons optiques [A36]
- Orange Labs**, Lannion, France (Dr. Erwan PINCEMIN)
Régénération par fibres optiques

8.4. Implication dans les réseaux de recherche

Groupe de Recherche 3073 : Photonique Nonlinéaire et Milieux Microstructurés

COST action 299 : Optical Fibres for New Challenges Facing the Information Society

Boursier de la fondation CARNOT : www.carnot.org. Correspondant à l'Université de Bourgogne de la fondation CARNOT.

Membre de l'**Optical Society of America** (*OSA*, 2002-2008), de la **Société Française de Physique** (*SFP*, 2002-2009), de la **Société Française d'Optique** (*SFO*, 2002-2009) et **IEEE Laser & Electro-Optics Society** (2008-2010).

9. RAYONNEMENT DES TRAVAUX DE RECHERCHE

9.1. Publications scientifiques

41 articles + 3 sous presse + 6 soumis

Indicateurs bibliographiques : (Web of Science, 25/7/2009 - 40 articles référencés), dont :

1 article dans <i>Nature Physics</i>	(facteur d'impact 2008 : 14.6)
4 articles dans <i>Optics Letters</i>	(facteur d'impact 2008 : 3.7)
15 articles dans <i>Optics Express</i>	(facteur d'impact 2008 : 3.7)
1 article dans <i>Physical Review A</i>	(facteur d'impact 2008 : 3)
3 articles dans <i>Journal of Optical Society of America B</i>	(facteur d'impact 2008 : 2)

397 citations, 9.93 citations par article en moyenne - **Facteur H de 13**

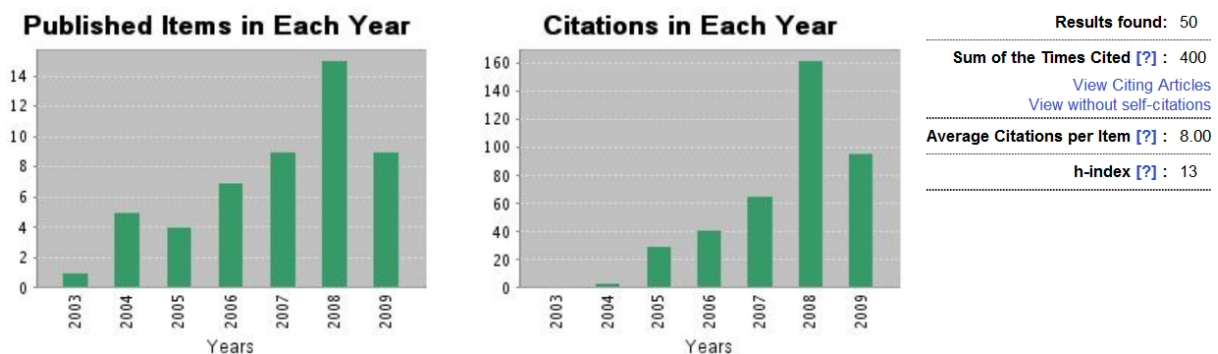


Figure 1 – Indicateurs bibliographiques issus de Web of Science, Juillet 2009 (articles et actes de conférences inclus)

9.2. Conférences

81 publications dans des actes de congrès avec comité de lecture.

39 conférences internationales **dont 8 invitées**.

18 conférences nationales **dont 4 invitées**

11 séminaires et interventions dans groupes de recherche **dont 2 invités**.

9.3. Bourses et récompenses

Prix **EDF** de la meilleure thèse scientifique Bourgogne/Franche-Comté, *mai 2006*.

Prix du meilleur jeune chercheur, congrès général 2005 de la SFP et de la Belgian Physical Society (BPS), Lille, *septembre 2005*.

Bourse post-doctorale **Marie Curie** (*Intra-European Fellowship*), *juillet 2005* - 400 dossiers retenus sur 2400 soumis.

Bourse post-doctorale **Lavoisier**, *juin 2005* (*refusée pour le bénéfice de la bourse Marie Curie*) - 175 dossiers retenus sur 923 soumis.

Bourse de la fondation **Carnot**, *juin 2004*.

Prix **SFP** section Bourgogne/Franche-Comté de la meilleure communication orale, *mai 2004*.

Prix **SFP** section Bourgogne/Franche-Comté de la meilleure affiche, *mai 2003*.

Bourse du **Rotary club** de Bourgogne pour un stage scientifique à l'université du Queen's à Belfast, *septembre 1998*.

10. DISSÉMINATION SCIENTIFIQUE ET ACTIONS DE VULGARISATION

Durant toutes mes activités de recherche, un effort particulier de communication a été effectué envers le grand public, que ce soit un public scolaire ou bien une population adulte plus âgée. Cette communication a pris notamment la forme de conférences ou de rencontres avec le grand public. Le support internet a également été largement utilisé pour promouvoir la recherche ou les formations de notre département.

10.1. Vulgarisation à destination du grand public

2009-2010 : **Université pour Tous de Bourgogne (UTB)** : Plusieurs cours-conférences ont été organisés autour du thème « La photonique, une discipline pleine de promesses. L'exemple des télécommunications optiques »

28 janvier 2010 : Université pour Tous de Bourgogne (UTB), section Dijon

8 octobre 2009 : Université pour Tous de Bourgogne (UTB), section Montceau

15 mai 2009 : Université pour Tous de Bourgogne (UTB), section Auxerre

13 mai 2009 : **Académie des Sciences de Dijon** : Conférence « Une application de la photonique : les télécommunications à très haut débit »

2002-2005 : **Participation à l'Expérimentarium** de l'Université de Bourgogne, structure visant à donner aux élèves du primaire au lycée ainsi qu'au grand public, une première approche de la recherche. J'ai animé l'atelier « Pour que la lumière passe : les fibres optiques » à une quinzaine de reprises à Dijon, Autun et au Creusot. L'Expérimentarium a reçu le *Prix Diderot 2003 de l'innovation pédagogique*.

2 Mai 2005 : Animation pour l'**Année Mondiale de la Physique** : conférence pour une classe de 3^{ème} du collège du Parc à Dijon et organisation d'une visite du Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne.

Février 2005 : **Article dans le Bien-Public** : « Christophe FINOT, la fibre de la recherche ».

Juin 2004 : Aide à la mise en place de l'exposition photographique du LPUB à l'occasion du **Premier Festival Art et Technique** s'étant tenu à Dijon. Création d'un site web pour diffuser les photographies.

2002-2009 : Participation régulière aux **Journées Portes Ouvertes** du Département de Physique de l'Université de Bourgogne, au salon **FORCING** (2002-2004) et à d'autres salons étudiants en Bourgogne pour promouvoir l'enseignement de la physique.

10.2. Promotion des activités de recherche sur internet

depuis 2003 : Création et gestion du **site internet de l'équipe Solitons, Lasers et Communications Optiques de l'ICB** : icb.u-bourgogne.fr/OMR/SLCO. 52 000 pages vues, 12 000 visiteurs depuis le 1^{er} Janvier 2007. Mise en place d'une galerie de photos, d'un site intranet de l'équipe. Mise en ligne de vidéos (1500 vues depuis janvier 2009).

depuis 2003 : Création et gestion du **site internet du Master PNTD** de Dijon, puis du **Master PLM** : icb.u-bourgogne.fr/MasterPLM.

Septembre 2005 : Membre du **comité local d'organisation de la rencontre COLOQ 9** à Dijon (9^{ème} Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique). Création et gestion du site internet.

2002-2005 : **Membre de l'Association du Troisième Cycle de Physique Bourguignon** (association fondée en 2002) : Trésorier (2003-2004), webmaster (2002-2004 : création du site internet icb.u-bourgogne.fr/ATCPB). Participation à plusieurs événements visant à promouvoir l'image de la physique : rencontres amicales avec les étudiants de licence, visite du Laboratoire, participation aux journées portes-ouvertes.

10.3. Autres expériences

depuis Octobre 2006 : **Membre du comité scientifique de la Structure d'Échange et d'Information sur VALDUC (SEIVA)**, association loi 1901 cherchant à stimuler les échanges et l'information autour de l'établissement du Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) de Valduc (Côte-d'Or). <http://www.seiva.fr>

18-20 Juillet 2005 : **Formation d'enseignants de Physique Vietnamiens** : dans le cadre des relations France-Vietnam, à l'Université de Bourgogne, j'ai participé, par le biais de Travaux Pratiques, à la formation de 7 professeurs enseignant la physique dans des lycées bilingues du Vietnam.

2001-2002 : **Membre du Forum de l'Optique**, association qui organise chaque année une rencontre réunissant entreprises en optique et plus d'un millier d'étudiants. *Responsable de la communication (affiche et plaquette de l'évènement)*

11. ACTIVITÉS D'ENSEIGNEMENT

Enseignements effectués (au 1/9/2009)

Faculté des Sciences, Technologie, Santé, parcours Sciences et Techniques

Filière	Année	Intitulé du module	Nature	Nb d'heures effectuées (TD)	Années scolaires
Master PNT0/NANO	1 ^{ère} année	Expériences de Physique	TP	27 h	2006-2007
Master SPC	1 ^{ère} année	Ondes, Lasers et Optique Intégrée	TP	64 h	2006-2009
Licence STS	2 ^{ème} année	Electromagnétisme	TP	53 h	2006-2008
Licence STS	2 ^{ème} année	Thermodynamique physique	TD	28 h	2006-2007
Licence STS	2 ^{ème} année	Électronique logique séquentielle	TD	10 h	2004-2005

Faculté des Sciences, Technologie, Santé, parcours Sciences de la Vie

Filière	Année	Intitulé du module	Nature	Nb d'heures effectuées (TD)	Années scolaires
Licence VTES	1 ^{ère} année	Initiation à l'optique	TP	36 h	2007-2008
Licence VTES	2 ^{ème} année	Biophysique	TD	56 h	2006-2009
Licence VTES	2 ^{ème} année	Biophysique	TP	48 h	2006-2009
Licence VTES	2 ^{ème} année	Thermodynamique et mesures physiques	TP	27 h	2006-2007
Licence STE	2 ^{ème} année	Géophysique 1	CM	12 h	2008-2009
Licence STE	2 ^{ème} année	Géophysique 2	CM	16 h	2008-2009
Licence STE	2 ^{ème} année	Géophysique 2	TD	48 h	2007-2009

Institut Universitaire de Technologie de Dijon

Filière	Année	Intitulé du module	Nature	Nb d'heures effectuées (TD)	Années scolaires
DUT GMP	2 ^{ème} année	Mécanique des fluides	TP	30 h	2006-2009

Institut Universitaire de Technologie de Dijon – IUT d'Auxerre

Filière	Année	Intitulé du module	Nature	Nb d'heures effectuées (TD)	Années scolaires
DUT Telecom Réseau	2 ^{ème} année	Télécommunications optiques	CM	3 h	2008-2009

École Supérieure d'Ingénieurs de Recherche en Matériaux (ESIREM)

Filière	Année	Intitulé du module	Nature	Nb d'heures effectuées (TD)	Années scolaires
Matériaux	1 ^{ère} année	Ondes et vibrations	TP	76 h	2002-2005
Matériaux	1 ^{ère} année	Électronique et traitement du signal	TP	96 h	2002-2005
Infotronique	1 ^{ère} année	Ondes et propagation	TD	10 h	2004-2005
Infotronique	1 ^{ère} année	Ondes et propagation	TP	16 h	2007-2008

Implication au sein du département de Physique

Depuis 2009 : Membre élu du conseil de département de Physique.

Depuis 2003 : Création et gestion du **site internet du Master PNTO** de Dijon, puis du **Master PLM**

Responsabilités de modules / implication au sein du département de Physique

2008-2009 : **Géophysique**, cours magistral, travaux dirigés et travaux pratiques. *Licence 2^{ème} année STE.*

2006-2009 : **Biophysique, mécanique des fluides**, module de Travaux Pratiques, *Licence 1^{ème} année VTES.*

2006-2009 : **Ondes, lasers et optique intégrée**, module de Travaux Pratiques, *Master 1^{ère} année, Sciences Physiques et Chimiques.*

2006-2008 : **Mécanique des fluides**, module de Travaux Pratiques, *DUT 2^{ème} année GMP, Dijon.*

2002-2004 : **Ondes et vibrations**, module de Travaux Pratiques, *École Supérieure d'Ingénieurs de Recherche en Matériaux (ESIREM).*

LES SIMILARITONS OPTIQUES

Je présente ici les différentes recherches menées dans le contexte de la génération et caractérisation d'impulsions auto-similaires paraboliques. Une large gamme de techniques actives ou passives a alors été expérimentalement mise en œuvre pour cerner la dynamique d'une impulsion isolée ou d'un groupe d'impulsions.

1. INTRODUCTION

L'étude des impulsions auto-similaires, ou similaritons optiques, a constitué la partie la plus importante de mes travaux de recherche. Ce sujet que j'ai commencé durant mon doctorat sous l'impulsion du professeur Guy MILLOT et en collaboration avec le professeur John M. DUDLEY a été poursuivi lors de mon séjour post-doctoral à Southampton. Même s'il ne constitue plus le cœur de mes recherches actuelles, plusieurs travaux ont encore été menés depuis ma nomination en tant que maître de conférences.

Les similaritons optiques ont été mis en évidence lors de l'amplification directe par fibre optique d'impulsions ultra-brèves. Il a notamment été montré que toute impulsion initiale convergeait, après une distance de propagation suffisante, vers un profil d'intensité parabolique avec une dérive de fréquence linéaire. Une fois ce profil acquis, les impulsions évoluaient de manière auto-similaire, subissant des augmentations simultanées de leur amplitude et de leurs largeurs temporelles et spectrales.

Je donne dans ce chapitre un aperçu des études que j'ai menées depuis 2003, que ce soit dans des amplificateurs Raman ou Ytterbium, ou bien dans des dispositifs de génération passive. Ces études numériques et/ou expérimentales ont notamment souligné plusieurs propriétés fondamentales de ces impulsions optiques atypiques.

2. GÉNÉRATION DE SIMILARITONS DANS LES AMPLIFICATEURS A FIBRE

2.1. Contexte

Lors de sa propagation dans un amplificateur optique, toute impulsion ultra-brève est soumise aux effets de la dispersion, de la non-linéarité et du gain. La combinaison de ces trois phénomènes modifie profondément la forme des impulsions et suivant le régime de dispersion étudié, la dynamique observée varie considérablement. Ainsi, pour une fibre utilisée en régime de dispersion anormale, l'impulsion amplifiée subit une compression vers des solitons d'ordre supérieur, conduisant finalement à sa fission en sous-impulsions multiples. Ce régime instable s'avère donc très peu favorable à l'amplification fibrée. Au contraire, pour une fibre à dispersion normale, l'impulsion s'élargit progressivement temporellement alors que sa forme évolue vers un profil d'intensité parabolique.

Plus précisément, l'évolution de l'impulsion peut être quantitativement décrite par l'équation de Schrödinger non-linéaire (ENSL) avec un terme de gain :

$$i \frac{\partial \psi}{\partial z} = i \frac{g}{2} \psi + \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial T^2} - \gamma |\psi|^2 \psi, \quad (1)$$

avec z la distance de propagation et T le temps dans un référentiel propre à l'impulsion. γ est le coefficient non-linéaire, β_2 la dispersion du second ordre et g le gain linéaire supposé ici constant.

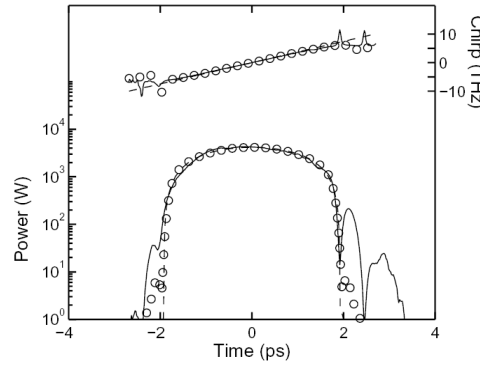


Figure 2 - Génération d'un similariton optique dans une fibre dopée Ytterbium. Première mise en évidence en 2000 par M. E. Fermann et ses collaborateurs de l'université d'Oakland ⁷

Cette équation de Schrödinger non-linéaire (ESNL) tient un rôle extrêmement important dans l'ensemble des travaux que j'ai menés. Comme nous le verrons dans ce mémoire, nous avons, à maintes reprises, vérifié sa capacité à modéliser avec une précision étonnante la propagation d'une impulsion optique dans une fibre monomode.

Fait remarquable, l'ESNL avec gain constant admet une solution asymptotique ¹² correspondant à un profil d'intensité parabolique avec une phase elle aussi parabolique ⁷ :

$$\begin{cases} \psi_p(z, T) = A_p(z) \sqrt{1 - \frac{T^2}{T_p^2(z)}} \exp\left(-i \frac{C_p}{2} T^2 + i \varphi_p\right) & \text{si } |T| \leq T_p \\ \psi_p(z, T) = 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (2)$$

avec $T_p(z)$, $A_p(z)$, C_p et φ_p étant respectivement la largeur temporelle, l'amplitude, le coefficient de chirp linéaire et la phase de l'impulsion (E_{ini} représente l'énergie de l'impulsion initiale) :

$$\begin{cases} A_p(z) = \frac{1}{2} E_{ini}^{1/3} \left(\frac{g}{\sqrt{\beta_2 \gamma / 2}} \right)^{1/3} \exp\left(\frac{g}{3} z\right) \\ T_p(z) = 3 E_{ini}^{1/3} \frac{\sqrt[3]{\beta_2 \gamma / 2}}{g^{2/3}} \exp\left(\frac{g}{3} z\right) \\ C_p = \frac{g}{3 \beta_2} \\ \varphi_p = \frac{3 \gamma A_0^2}{2 g} \exp\left(\frac{2 g z}{3}\right) \end{cases} \quad (3)$$

2.2. Résultats obtenus

2.2.1. Génération dans un amplificateur Raman

Publications liées : P1, P5, P6, P29, A1, A2, A3, A4, A5, A6, A60

La première démonstration expérimentale de similaritons optiques a été réalisée dans des amplificateurs à fibre optique dopée Ytterbium en 2000 ⁷ avec en ligne de mire la génération d'impulsions ultra-brèves de forte puissance crête (Figure 2).

Quand nous avons débuté nos recherches sur le sujet en 2003, nous nous sommes concentrés sur un autre processus d'amplification, la diffusion Raman. Un tel choix a été guidé par plusieurs raisons.

¹² La solution asymptotique est valable après une distance de propagation conséquente ($z \rightarrow \infty$).

Tout d’abord, l’amplification Raman disposant d’une bande passante d’amplification plus large que les dopants terres-rares usuels, les limitations dues à l’étendue spectrale finie du gain sont moins marquées. De plus, l’amplification n’étant alors pas restreinte par l’existence de transitions particulières, elle peut être mise en œuvre à n’importe quelle longueur d’onde. Cela nous a notamment permis de réaliser la première génération de similaritons aux longueurs d’onde des télécommunications optiques [P1]. Le montage typique (Figure 3) a l’avantage d’être entièrement fibré et de ne reposer que sur des composants d’ores et déjà disponibles commercialement, que ce soit pour les sources utilisées ou bien pour la fibre optique amplificatrice. La nature du pompage co- ou contra-propagatif n’influe pas sur la génération de similaritons, même si les largeurs et amplitude des impulsions résultantes peuvent être affectées [P6].

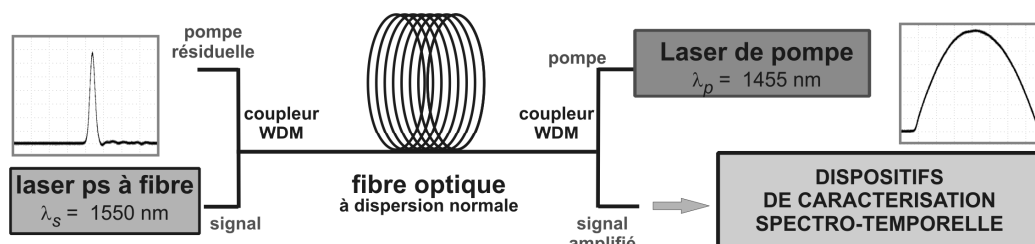


Figure 3 - Dispositif typique de génération de similaritons Raman utilisé à Dijon [P29]

Un point crucial de ces travaux résidait dans la caractérisation précise des impulsions générées. Pour cela, nous avons développé un dispositif FROG¹³ qui nous permet d’accéder à la fois au profil d’intensité et de phase d’une impulsion ultra-brève. Un résultat caractéristique est ainsi représenté Figure 4(a) et illustre la dérive de fréquence hautement linéaire de l’impulsion. Le profil temporel d’intensité est quant à lui bien ajusté par une fonction parabolique, les autres formes d’ajustement ne prenant pas convenablement en compte la décroissance rapide des flancs de l’impulsion. Un accord remarquable est obtenu entre les expériences et les résultats basés sur la résolution numérique de l’ESNL sous sa forme étendue.

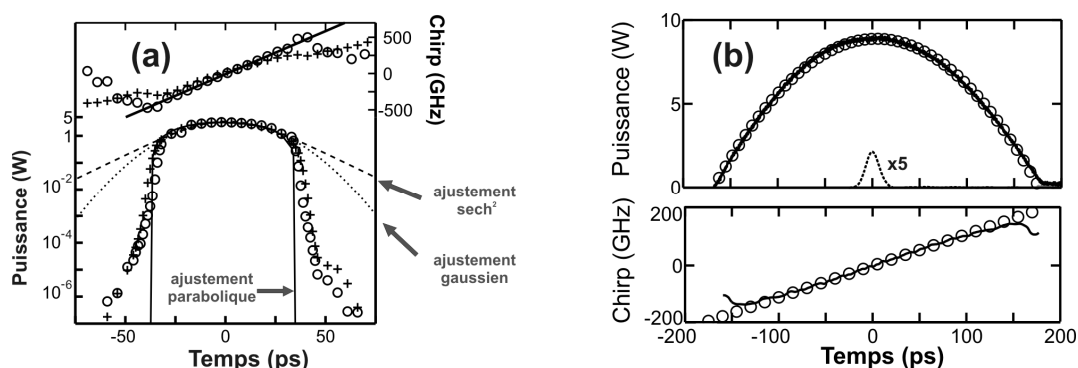


Figure 4 - Caractérisation de similaritons optiques Raman : (a) Profils d’intensité et de chirp retrouvés par la technique FROG [P1]. Les résultats expérimentaux (croix) sont comparés avec les résultats de simulations numériques (cercles) et avec des ajustements parabolique, gaussien et sécante hyperbolique du profil d’intensité. (b) Profil d’intensité enregistré sur un oscilloscope à échantillonnage rapide – Le chirp est retrouvé par la méthode de Gerbec-Saxton à partir du profil d’un spectre enregistré¹⁴. [P29]

¹³ FROG : Frequency Resolved Optical Gating ; R. Trebino, Frequency-Resolved Optical Gating : the measurement of ultrashort laser pulses: Norwell, MA : Kluwer Academic Publishers, 2000.

¹⁴ R. W. Gerchberg and W. O. Saxton, "A practical algorithm for the determination of the phase from image and diffraction plane pictures," Optik vol. 35, pp. 237–246, 1972.

Des travaux complémentaires, menés lors du stage de master 2 de Kamal HAMMANI, ont plus récemment montré qu'en jouant sur le gain de l'amplificateur et l'énergie initiale, il était possible de contrôler les largeurs temporelles et spectrales des impulsions en sortie. Des similaritons longs avec une durée excédant 200 ps ont alors pu être générés et caractérisés directement sur un oscilloscope à échantillonnage rapide. Ces résultats ont confirmé remarquablement, par une méthode autre que la technique FROG, le profil parabolique des impulsions générées [P29].

2.2.2. Génération dans des amplificateurs à fibre dopée Ytterbium

Publications liées : P12, P14, A16, A18, A22, A23

La génération par amplification Raman n'est pas la seule approche que j'ai eu l'occasion de mettre en œuvre. En effet, lors de mon post-doctorat à l'ORC, j'ai également abordé l'utilisation des fibres dopées par des ions terre-rare Ytterbium. Le travail expérimental a principalement été réalisé par Pascal DUPRIEZ¹⁵, l'enjeu étant alors de générer des trains d'impulsions sub-picosecondes avec une très forte puissance moyenne.

Notre choix pour atteindre cet objectif a alors été non pas d'augmenter l'énergie par impulsion amplifiée, mais plutôt d'accroître le taux de répétition des oscillateurs utilisés. Ainsi, en lieu et place des oscillateurs à fibre généralement employés dont le taux de répétition est de l'ordre de quelques dizaines de MHz, nous avons opté pour des sources VECSEL¹⁶ spécialement conçues pour délivrer des impulsions brèves avec un taux de répétition proche du GHz.

Deux sources ont été testées, l'une délivrant des impulsions initiales de 4 ps et l'autre de 500 fs. Les puissances moyennes atteintes après amplification ont constitué alors des records, 200 W et 53 W respectivement [P14]. D'un point de vue plus fondamental, ces expériences ont également confirmé la distinction que nous avons prévue entre deux régimes d'amplification, l'un dominé uniquement par l'auto-modulation de phase et l'autre où l'impulsion s'élargit temporellement de manière auto-similaire conduisant au régime parabolique (Figure 5 (a1-b1)) [P12]. La différence la plus notable réside dans la qualité des impulsions recomprimées. En effet, le régime dominé par l'auto-modulation de phase conduit à la présence de piédestaux notables, signe d'une compression moins performante alors qu'une grande qualité d'impulsion est obtenue après recompression dans le régime auto-similaire (Figure 5 (a2-b2)) [P14].

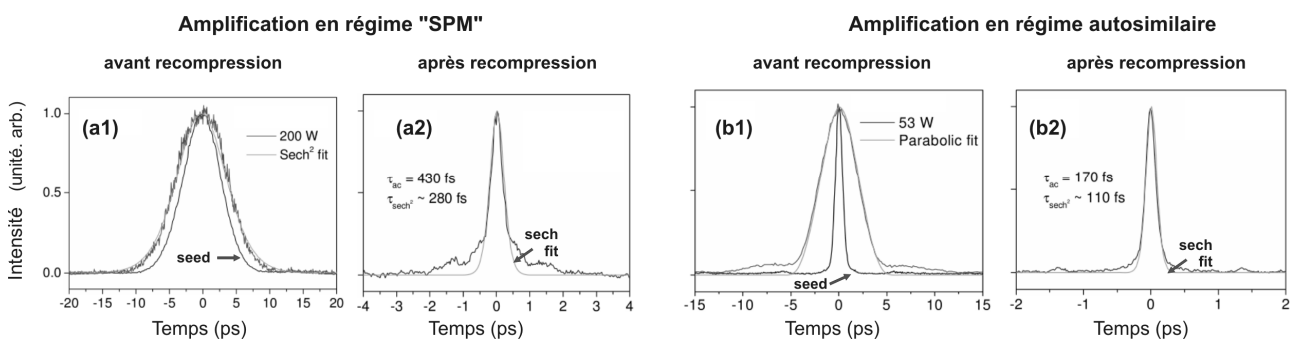


Figure 5 - Amplification d'impulsions ultra-brèves dans un amplificateur Ytterbium. Les résultats obtenus à partir d'impulsions initiales de 4.6 ps amplifiées en régime dominé par l'auto-modulation de phase (a) sont comparés avec les résultats obtenus à partir d'impulsions initiales de 500 fs amplifiées dans un régime autosimilaire (b). Les autocorrélations en intensité après amplification (sous-figures 1) et après recompression par un réseau de diffraction (sous-figures 2) sont comparées [P14].

¹⁵ Pascal DUPRIEZ était alors doctorant en troisième année à l'ORC. Il est depuis devenu responsable de la branche recherche de Fianium, une compagnie britannique experte dans les lasers à fibre picosecondes et femtosecondes.

¹⁶ VECSEL : Vertical-external-cavity surface-emitting-laser

2.2.3. Le similariton, un attracteur de l'ESNL avec gain

Publications liées : P3, P5, P18, P47, A80

Un des avantages de l'amplification Raman retenue est la mise en jeu d'une longueur de fibre conséquente et d'un gain adiabatique, deux ingrédients idéaux pour établir la dynamique asymptotique des impulsions et pour mener différentes études plus fondamentales sur les propriétés des similaritons optiques. Nous avons ainsi caractérisé finement l'influence du gain optique, de la puissance initiale ou bien encore la capacité des similaritons à se propager sans être affectés par le wave-breaking optique [P5]¹⁷.

Mais la propriété la plus intéressante est sans conteste le caractère attracteur des impulsions paraboliques. En d'autres termes, quelle que soit la forme ou la durée de l'impulsion initiale, après une distance suffisante de propagation, une impulsion parabolique ayant les propriétés décrites par les équations (2) et (3) est générée. Nous avons été en mesure de démontrer expérimentalement pour la première fois cette propriété originale (Figure 6) [P3] qui constitue un atout pour des applications de mise en forme d'impulsions [P5] et, comme nous le verrons aussi dans le chapitre suivant, pour la régénération optique [P7].

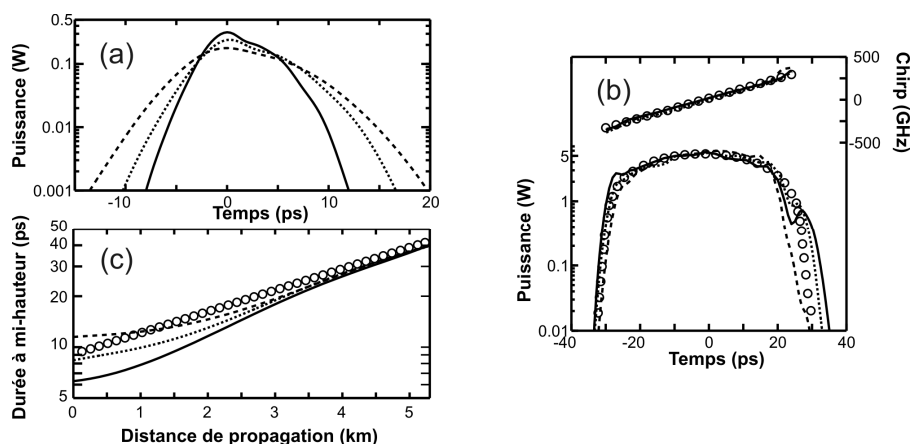


Figure 6 - Influence des propriétés de l'impulsion initiale. Différentes impulsions initiales (a) sont étudiées expérimentalement. Les impulsions amplifiées caractérisées en sortie de l'amplificateur (b) sont très proches. (c) Numériquement, l'évolution longitudinale de la largeur temporelle de l'impulsion converge vers la solution asymptotique (cercles). [P3]

Si l'impact du profil temporel initial d'intensité est désormais bien documenté dans la littérature, l'influence du profil de phase a fait l'objet de beaucoup moins de travaux. Au gré des simulations numériques, je me suis notamment aperçu que cet aspect n'était pas forcément si anodin et que, par exemple, le signe d'une dérive de fréquence initiale influait fortement sur la trajectoire empruntée par les impulsions pour atteindre l'état asymptotique (Figure 7(a)). Il a été beaucoup plus surprenant de constater que si l'impulsion initiale possédait un saut de phase, alors, le profil obtenu asymptotiquement présentait des trous de lumière inscrits sur l'enveloppe parabolique prédite par l'équation (2) (Figure 7(b1)). Ces structures sombres correspondent en fait à des solitons sombres (Figure 7(b2)) et évoluent de manière périodique sur le fond parabolique. Une collaboration initiée avec Lei WU¹⁸ a permis de proposer un formalisme mathématique pour décrire plus précisément la propagation de telles structures [P37]. Un des principaux enseignements inattendu de ce travail récent aura été que si la solution asymptotique décrit bien l'enveloppe de l'impulsion, des nuances sont à apporter quant à l'existence d'éventuels « défauts » de la structure parabolique.

¹⁷ D. Anderson, M. Desaix, M. Karlson, M. Lisak, and M. L. Quiroga-Teixeiro, "Wave-breaking-free pulses in nonlinear optical fibers," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 10, pp. 1185-1190, 1993.

¹⁸ **Dr. Lei WU**, Institute of Nonlinear Physics, Chine

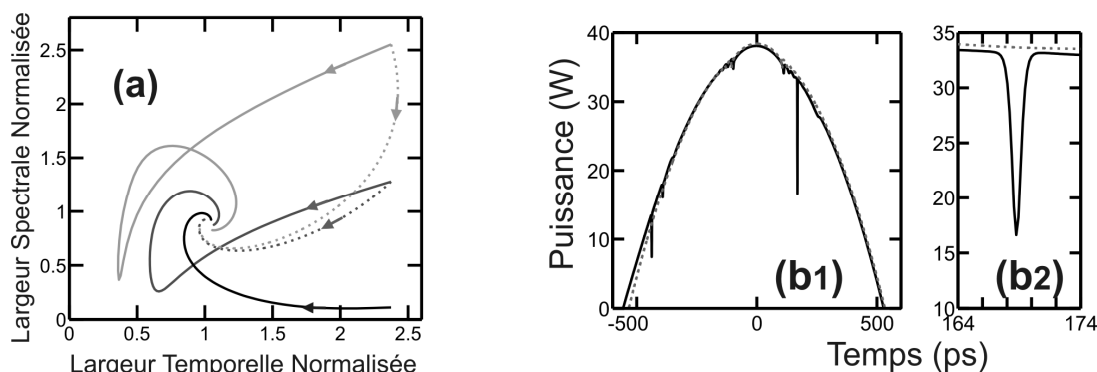


Figure 7 - Influence du profil de phase. (a) Diagramme de phase dans le plan largeur temporelle-largeur spectrale pour l'évolution de différentes impulsions avec différentes dérives de fréquences linéaires initiales. (b) Comparaison des profils asymptotiques obtenus pour une impulsion sans saut de phase (pointillé) et avec un saut de phase initial de π (trait plein) (b2) est un agrandissement de (b1) [P47]

3. GÉNÉRATION PASSIVE D'IMPULSIONS PARABOLIQUES

Si les amplificateurs à fibre sont le milieu de prédilection pour la génération de similaritons optiques, quelques limitations sont néanmoins à prendre en compte. Ainsi, fournir un gain physique implique forcément l'utilisation d'un laser de pompe, élément qui complexifie tout montage. De plus, le gain physique présente forcément une bande spectrale finie de gain, ce qui restreint l'expansion spectrale de l'impulsion auto-similaire, menant au final à un comportement plus proche d'un soliton dissipatif¹⁹. Dans un tel contexte, toute méthode pour générer passivement des impulsions paraboliques présente donc un intérêt certain, notamment pour l'utilisation à des taux de répétition importants (> 10 GHz ou plus).

3.1. Dans des fibres à dispersion décroissante

Publications liées : P21, P24, A31, A38, A43, A48

Pour reproduire virtuellement l'effet d'une amplification distribuée, une technique qui a déjà été largement exploitée en régime de dispersion anormale est d'employer une fibre présentant une variation longitudinale régulière de son diamètre de cœur. En effet, une telle variation maîtrisée conduit à une modification de la dispersion et permet donc un gain que nous qualifierons de virtuel.

Cette approche a été proposée théoriquement dès 2004 pour générer des similaritons optiques dans des fibres à dispersion normale dont la valeur absolue de la dispersion décroît de manière exponentielle jusqu'à une dispersion nulle²⁰. Néanmoins, aucune confirmation expérimentale claire n'avait encore en 2007 été apportée. Deux obstacles étaient en effet à surmonter. Le premier était la faible disponibilité des fibres à dispersion variable, celles-ci n'étant réalisées que par quelques groupes de recherche. Le second était l'influence de la dispersion du troisième ordre qui devient de plus en plus néfaste au fur et à mesure que la dispersion se rapproche de la valeur nulle²¹.

Le premier obstacle fut levé grâce à une collaboration initiée par le professeur Stefan WABNITZ entre l'ICB et le FORC²² (Dr. Alexej SYSOLIATIN). Une fibre a ainsi pu être réalisée

¹⁹ A. C. Peacock, R. J. Kruhlak, J. D. Harvey, and J. M. Dudley, "Solitary pulse propagation in high gain optical fiber amplifiers with normal group velocity dispersion," *Opt. Commun.*, vol. 206, pp. 171-177, 2002.

²⁰ Hirooka, T.; Nakazawa, M., Parabolic pulse generation by use of a dispersion-decreasing fiber with normal group-velocity dispersion. *Opt. Lett.* 2004, 29, (5), 498-500.

²¹ Latkin, A.; Turitsyn, S. K.; Sysoliatin, A., On the theory of parabolic pulse generation in tapered fibre. *Opt. Lett.* 2007, 32, (4), 331-333.

²² FORC : Fiber Optics Research Center, de l'Institut de Physique Générale à Moscou (Russie)

sur mesure suivant un profil de dispersion conçu pour optimiser la génération à partir d'impulsions picosecondes. Concernant l'impact de la dispersion d'ordre 3, nous avons fait le choix d'une dispersion qui ne décroît pas jusqu'à une valeur nulle (Figure 8(a)). En effet, au contraire des applications de recompression solitonique, la génération de similaritons s'accommode fort bien d'une dispersion finale non nulle (équivalente en première approche à un gain distribué non constant).

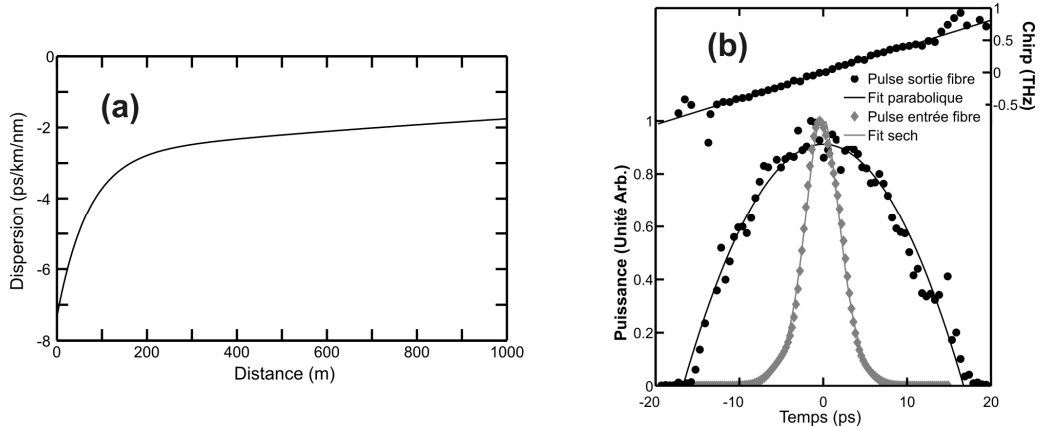


Figure 8 - Évolution parabolique dans une fibre à dispersion décroissante normale. (a) Profil de la fibre utilisée (b) Impulsion initiale (losanges gris) et impulsion parabolique après propagation (cercles noirs). [P21]

L'expérience menée à l'ICB confirme clairement la remise en forme subie par une impulsion sécante hyperbolique se propageant dans une telle fibre (Figure 8(a)). [P21]

Nous avons également proposé une approche hybride mêlant gains virtuel et réel, le gain virtuel étant apporté par la décroissance de la dispersion, le gain réel résultant d'un pompage Raman. Des règles analytiques de conception ont alors été proposées par S. WABNITZ [P24] et nous avons démontré expérimentalement que l'ajout d'un gain physique permettait de contrôler avec plus de flexibilité l'élargissement temporel et la densité de puissance spectrale finale [P21].

3.2. Dans un arrangement de deux fibres à dispersion fixe

Publications liées : P10, P15, P20, A29, A34, A35

Pour surmonter la rareté des fibres à dispersion continûment décroissante utilisées précédemment, il est possible de recourir à un arrangement de plusieurs segments de fibres à dispersion fixe dans des arrangements dits comb-like ou step-like²³ qui nécessitent parfois un grand nombre de segments. Or je me suis aperçu par simulations numériques qu'un arrangement plus simple basé sur seulement deux segments de fibre pouvait être utilisé pour effectuer une remise en forme parabolique. En effet, l'étude attentive de la propagation de différentes formes d'impulsions dans une fibre à dispersion normale fixe révèle qu'à une distance précise de propagation, le profil d'intensité temporel se rapproche du profil parabolique visé.

La difficulté est que ce profil parabolique n'est que transitoire et ne se maintient pas lors de la propagation. J'ai résolu ce problème en adjoignant un second segment de fibre ayant une dispersion plus faible et/ou une non-linéarité plus élevée. L'impulsion parabolique résultante est alors stabilisée, comme l'ont confirmé différentes expériences que nous avons menées à l'ORC (Figure 9) [P15] ou bien à l'ICB dans le cadre de la génération de trains d'impulsions à bas rapport de cycle [P10, P20].

²³ Kibler, B.; Billet, C.; Lacourt, P. A.; Ferrière, R.; Larger, L.; Dudley, J. M., Parabolic pulse generation in comb-like profiled dispersion decreasing fibre. Electron. Lett. 2006, 42, (17), 965-966

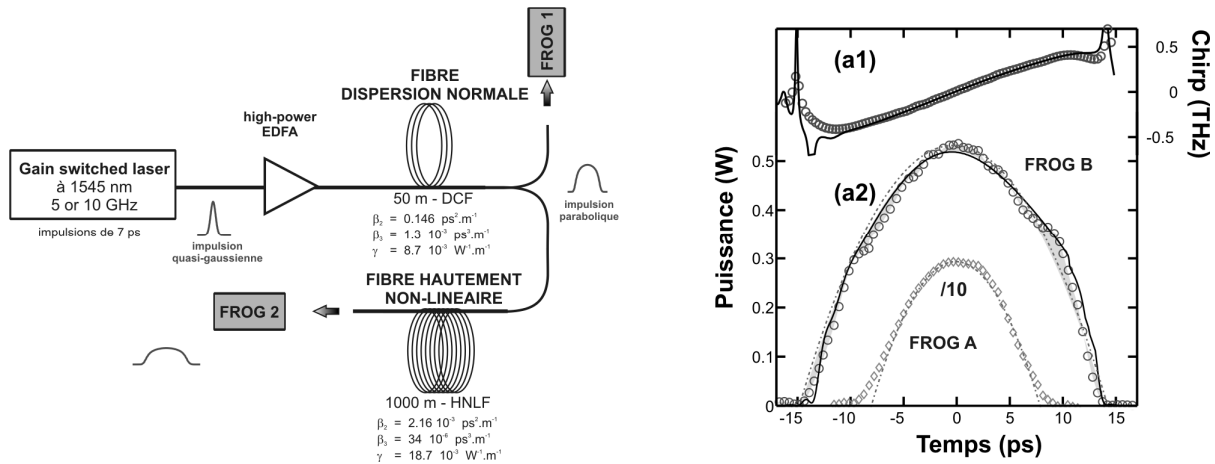


Figure 9 - Génération de profils paraboliques à partir de deux segments de fibres à dispersion normale. (a) Montage expérimental. (b) Résultats expérimentaux obtenus par FROG en sortie du premier et du second segment. [P15]

Cette méthode se révèle donc particulièrement efficace et simple à mettre en œuvre. Néanmoins, quelques nuances s'imposent quant à la nature des impulsions paraboliques obtenues. En effet, alors que l'utilisation d'une fibre à dispersion décroissante permettait de retrouver toutes les propriétés des similaritons optiques générés dans un amplificateur optique, nous avons dans cette configuration des propriétés très différentes. Ainsi, pour obtenir un fonctionnement adéquat, il est crucial que la longueur du premier segment de fibre ainsi que la puissance crête injectée soient précisément ajustées. Si des règles de conception ont été proposées, le choix dépend néanmoins fortement de la forme initiale [P15] et donc, nous avons ici perdu le caractère attracteur mis précédemment en avant.

3.3. Par une méthode de mise en forme linéaire

Publications liées : P13, A20

Les deux méthodes de génération passive précédemment exposées sont des approches intrinsèquement non-linéaires qui permettent d'avoir uniquement en sortie des profils paraboliques avec une dérive de fréquence importante (donc une occupation spectrale non négligeable). De plus, pour bénéficier de la non-linéarité de la fibre, une certaine puissance crête initiale est requise, ce qui est peu compatible avec les applications des télécommunications optiques à haut taux de répétition qui exploitent les propriétés des impulsions paraboliques ²⁴.

Dans ce contexte, il devient intéressant d'explorer des méthodes linéaires de génération passive comme la remise en forme basée sur des fibres à réseaux de Bragg superstructurés : à l'aide de ces composants ²⁵, le spectre de l'impulsion initiale est retravaillé de façon à obtenir en sortie un profil parabolique en limite de Fourier (Figure 10 (a)). Nous avons alors concrètement testé l'apport du profil parabolique dans une propagation hautement non-linéaire en régime normal : en sortie de fibre, ce profil permet de combiner un élargissement spectral significatif avec une densité spectrale de puissance importante et une ondulation très réduite du spectre (Figure 10 (b)) [P13]. Nous reviendrons sur l'intérêt pratique de ces spectres dans le chapitre 4.

²⁴ Exemples d'applications bénéficiant des profils d'impulsions paraboliques : Ng, T. T.; Parmigiani, F.; Ibsen, M.; Zhang, Z.; Petropoulos, P.; Richardson, D. J., Compensation of linear distortions by using XPM with parabolic pulses as a time lens. IEEE Photon. Technol. Lett. 2008, 20, (13), 1097-1099 ; Parmigiani, F.; Petropoulos, P.; Ibsen, M.; Richardson, D. J., Pulse retiming based on XPM using parabolic pulses formed in a fiber Bragg grating. IEEE Photon. Technol. Lett. 2006, 18, (7), 829-831.

²⁵ Les fibres à réseaux de Bragg utilisées ont été designées par Francesca PARMIGIANI (ORC) et ont été réalisées par l'équipe de Morten IBSEN (ORC).

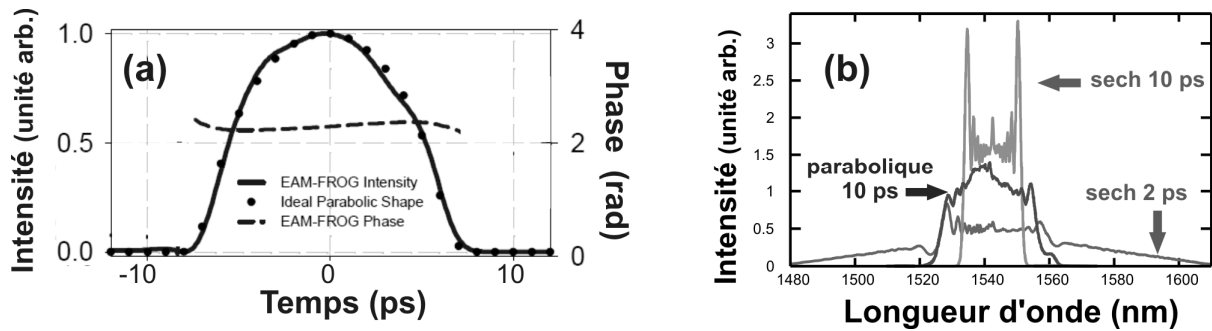


Figure 10 - Génération d'impulsions paraboliques par mise en forme passive. (a) Impulsion parabolique obtenue après mise en forme (caractérisation FROG) (b) Comparaison des spectres obtenus après propagation non-linéaire pour différentes formes et durées d'impulsions. [P13]

4. DYNAMIQUE IMPULSIONNELLE DE PLUSIEURS SIMILARITONS

Au cours de nos travaux, nous avons également eu l'occasion d'étudier théoriquement et expérimentalement la dynamique d'une paire d'impulsions paraboliques dans un amplificateur. En effet, si la dynamique d'une impulsion unique est désormais totalement cernée, il n'en était alors pas de même pour le comportement d'une paire d'impulsions. Or ce point revêt une importance cruciale dans le cadre des communications optiques à haut débit multiplexées en longueurs d'onde.

4.1. Interaction et collision d'impulsions paraboliques

Publications liées : P8, P9, P11, Vulg1, A9, A11, A12

Nous avons isolé deux situations, selon que les impulsions initiales ont la même longueur d'onde centrale ou non. Si les impulsions sont à la même longueur d'onde, elles se recouvrent progressivement en raison de leur élargissement temporel dans l'amplificateur (Figure 11(a)). Dans la zone de recouvrement, un battement sinusoïdal apparaît (Figure 11(b1)), battement qui évolue adiabatiquement, en raison de la non-linéarité et du gain, vers un train de solitons noirs ²⁶ (Figure 11(b2)) [P7]. Nous disposons donc là d'un moyen original de générer des solitons noirs avec un taux de répétition élevé et facilement ajustable à partir du délai initial entre les impulsions [P11].

Si maintenant les impulsions paraboliques ont des longueurs d'onde différentes, on pourra assister à une situation de collision (Figure 11(c)). Dans ce cas, nous avons montré que le profil temporel était marqué par l'apparition d'un battement sinusoïdal dont la fréquence variait durant la collision. Le profil spectral est lui affecté par la modulation de phase croisée. Néanmoins, après collision, chaque similariton regagne son profil d'intensité parabolique avec un chirp linéaire, ce qui permet d'envisager une utilisation dans un système multiplexé en longueurs d'onde. Les résultats expérimentaux obtenus confirment cette analyse théorique [P8].

²⁶ P. V. Mamyshev, S. V. Chernikov, and E. M. Dianov, "Generation of fundamental soliton trains for high-bit rate optical fiber communication lines," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 27, pp. 2347-2355, 1991.

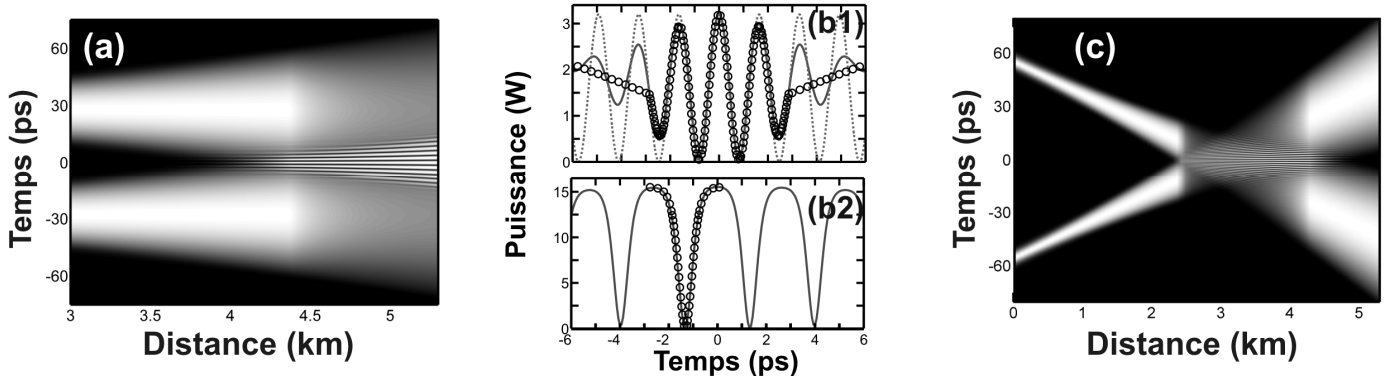


Figure 11 – (a) Évolution du profil temporel d'intensité durant l'interaction entre deux similaritons se propageant dans un amplificateur Raman. La première phase de l'interaction est marquée par la création d'un battement sinusoïdal (b1) qui évolue ensuite vers un train de similaritons noirs (b2) [P8]. (c) Évolution du profil d'intensité temporel lors de la collision de deux impulsions similaritons. Après une phase d'interaction, les deux impulsions poursuivent leur propagation auto-similaire indépendamment l'une de l'autre [P9].

4.2. Dynamique de similaritons sombres sur un similariton parabolique

Publications liées : P32, P37

Comme nous l'avons vu dans la partie précédente avec l'apparition de trains de solitons noirs ou bien dans la partie 2.2.3 avec la génération de solitons gris sur l'enveloppe parabolique, il est apparu intéressant d'étudier plus en détails la manière dont ces structures sombres évoluaient sur le fond parabolique. Ce travail essentiellement théorique a été récemment mené en collaboration avec K. PORSEZIAN²⁷ et L. WU¹⁸ dans le cadre de l'étude de systèmes fibrés [P37] ou bien de guides d'onde à gradient d'indice non-linéaire²⁸ [P32]. Bénéficiant des compétences mathématiques des groupes indiens et chinois, des formulations analytiques des trajectoires empruntées par les similaritons sombres ont été proposées et les résultats ont été appliqués à une impulsion sombre unique ou bien à plusieurs impulsions se propageant simultanément sur l'enveloppe parabolique.

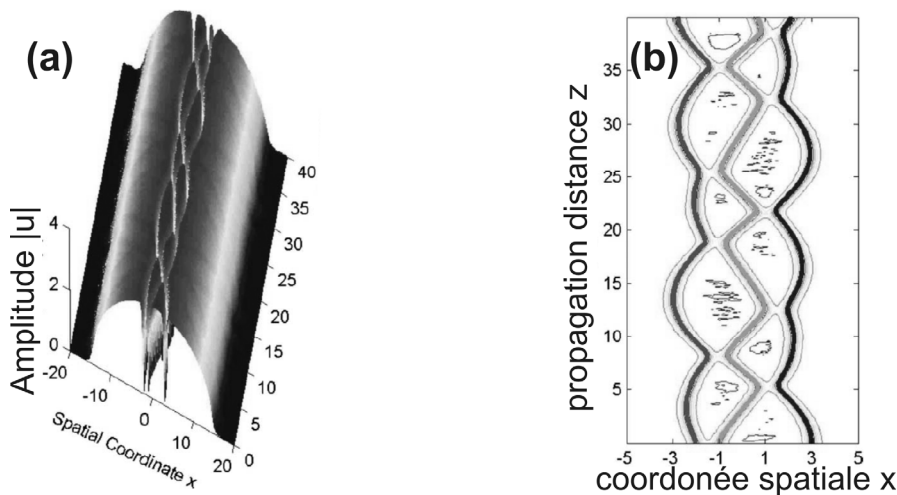


Figure 12 - Évolution longitudinale d'un groupe de trois similaritons noirs sur un fond parabolique dans un guide d'onde non-linéaire à gradient d'indice [P32].

²⁷ Pr. K. PROSEZIAN, Université de Pondicherry, Inde

²⁸ Les similaritons optiques peuvent en effet exister dans ces systèmes : Ponomarenko, S. A.; Agrawal, G. P., Optical similaritons in nonlinear waveguide amplifiers. Opt. Lett. 2007.

5. CONCLUSION ET SYNTHÈSE DU THEME ABORDÉ

Pour conclure, le thème de la génération d'impulsions paraboliques a été un sujet extrêmement riche que j'ai eu la chance d'aborder alors qu'il émergeait à peine. Il a permis de me former théoriquement et expérimentalement aux différents concepts de l'optique non-linéaire dans les fibres et c'est à travers ce sujet pédagogique que j'ai pu me familiariser avec l'équipement d'un laboratoire de recherches, que cela soit les sources optiques ou bien les techniques de caractérisation. J'ai également eu l'opportunité de nouer plusieurs collaborations qui m'ont beaucoup apporté tant sur le plan scientifique que sur le plan humain.

Si le sujet a constitué pendant plusieurs années le cœur de mes activités de recherche, le temps que je lui consacre désormais est devenu plus modeste. Les propriétés essentielles des impulsions paraboliques sont en effet maintenant bien cernées et les différents travaux menés ont fait l'objet de trois articles de revues sur le sujet [P18, P34, P43] et ont été reconnus par plusieurs conférences invitées internationales [C128, C132, C136]. Ces différents travaux que j'ai débutés durant mon doctorat ont également été récompensés par plusieurs prix scientifiques (Meilleure présentation SFP Bourgogne/Franche-Comté, Prix de Thèse EDF/École doctorale Pasteur, Prix du meilleur jeune chercheur congrès SFP/BPS) et ont été décisifs pour l'obtention de bourses postdoctorales.

Thème abordé	Similaritons Optiques
Période	2003 – 2009
Projets ou financements	Bourse BDI CNRS-Région Bourgogne (2002-2005) Bourse postdoctorale Marie Curie (2005-2006) Bourse postdoctorale Carnot (2005-2006) Projet ANR Supercode (2006-2009)
Étudiants	Kamal HAMMANI (Master 1, 2006-2007) ; (Master 2, 2007-2008) Delphine LAUGIER (Magistère de Physique à l'ENS Lyon, 2004-2005)
Collaborations locales	Pr. Guy MILLOT Pr. Stefan WABNITZ Dr. Stéphane PITOIS
Collaborations extérieures	Institut FEMTO-ST : Pr. John DUDLEY ORC : Pr. Dave RICHARDSON, Francesca PARMIGIANI, Dr. Periklis PETROPOULOS, Lionel PROVOST Fianium : Dr. Pascal DUPRIEZ Université Pondicherry : Pr. Kuppuswamy PORSEZIAN Université Aston : Dr. Sonia BOSCOLO Institut Physique Nonlinéaire : Dr. Lei WU FORC, Moscou : Dr. Alexej SYSOLIATIN
Publications liées	P1, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12, P13, P14, P15, P18, P20, P21, P24, P25, P29, P31, P32, P34, P37, P43, P47 Vulg1
Publications annexées en fin de mémoire	P7 C. Finot, S. Pitois and G. Millot : <i>Regenerative 40 Gbit/s wavelength converter based on similariton generation</i> , Optics Letters 30, 1776-1778 (2005). P9 C. Finot and G. Millot : <i>Collisions of optical similaritons</i> , Optics Express 13, 7653-7665 (2005). P13 F. Parmigiani, C. Finot, K. Mukasa, M. Ibsen, M.A.F Roelens, P. Petropoulos and D.J. Richardson : <i>Ultra-flat SPM-broadened spectra in a highly nonlinear fiber using parabolic pulses formed in a fiber Bragg grating</i> , Optics Express 14, 7617-7622 (2006). P18 J. Dudley, C. Finot, D.J. Richardson and G. Millot : <i>Self-similarity and scaling phenomena in nonlinear ultrafast optics</i> , Nature Physics 3, 597-603 (2007). P21 C. Finot, B. Barviau, G. Millot, A. Guryanov, A. Sysoliatin, S. Wabnitz : <i>Parabolic pulse generation with active or passive dispersion decreasing optical fibers</i> , Optics Express 15, 15824-15835 (2007). P28 K. Hammani, C. Finot, S. Pitois, J. Fatome and G. Millot : <i>Real time measurement of long parabolic optical similaritons</i> , Electronics Letters, 44, 1239-1240 (2008).
Communications liées	CI1, CI2, CI2, CI3, CI4, CI5, CI6, CI8, CI10, CI12, CI13, CI15, CI16, CI17, CI19, CI20, CI27, CI28, CI32, CI36 CN1, CN2, CN3, CN4, CN6, CN7, CN9, CN10, CN11, CN14, CN15 S1, S2, S3 Post1, Post2, Post3, Post4, Post6, Post7, Post8, Post13, Post14, Post20, Post33

LA RÉGÉNÉRATION OPTIQUE PAR DISPOSITIFS NON-LINÉAIRES À FIBRE

Je présente dans ce chapitre les différents travaux effectués autour des régénérateurs optiques à base de fibres optiques non-linéaires. Plusieurs configurations en régime de dispersion normale et anormale ont été testées et comparées. Les atouts et limites des différentes techniques sont discutés.

1. CONTEXTE

Lors de sa propagation dans un système de télécommunications optiques, la qualité d'un signal binaire se dégrade progressivement sous l'influence combinée de l'accumulation de bruit spontané d'amplification et des effets non-linéaires pouvant conduire notamment à l'apparition d'impulsions fantômes²⁹. Pour éliminer les erreurs de détection, il est donc nécessaire pour les transmissions à longues distances, de régénérer à intervalles réguliers le signal, cela d'autant plus que le débit est élevé. Si les solutions électroniques présentent un intérêt en termes de coûts pour les faibles débits, les limitations actuelles en bande passante des composants optoélectroniques les rendent inadaptées aux hauts débits. Les dispositifs tout optiques constituent alors une alternative prometteuse pour les débits supérieurs à 40 Gbps³⁰ et plusieurs technologies ont été développées³¹, notamment basées sur la non-linéarité Kerr des fibres optiques dont le temps de réponse est quasi-instantané.

Nous étudions et comparons dans ce chapitre deux techniques exploitant des fibres optiques non-linéaires. La première, dite technique de Mamyshev, s'appuie sur une fibre à dispersion normale. Nous présenterons son concept, les différents éléments permettant de la caractériser et les variations autour de la configuration initiale. La seconde méthode s'appuie quant à elle sur une fibre utilisée en régime de dispersion anormale et se montre particulièrement performante pour limiter les fluctuations d'amplitude des impulsions.

2. RÉGÉNÉRATION DE MAMYSHEV

2.1. Schéma expérimental et modélisation numérique

La technique de Mamyshev, a été, comme son nom l'indique, proposée par Pavel Mamyshev dès 1998³². Le schéma expérimental typique est résumé Figure 13. Le signal binaire dégradé par des fluctuations de la puissance crête des impulsions ainsi que des impulsions parasites dans les emplacements des 0 optiques est tout d'abord amplifié afin d'atteindre une puissance suffisante pour observer des effets non-linéaires. Les impulsions se propagent ensuite dans une fibre où elles subissent un élargissement spectral proportionnel en première approximation à leur puissance crête. Un filtre

²⁹ Essiambre, R. J.; Mikkelsen, B.; Raybon, G., Intra-channel cross-phase modulation and four-wave mixing in high-speed TDM systems. *Electron. Lett.* **1999**, 35, (18), 1576-1578.

³⁰ Gbps : Gigabit per second (Gbit/s)

³¹ O. Leclerc, B. Lavigne, E. Balmeffre, P. Brindel, L. Pierre, D. Rouvillain, and F. Seguinéau, "Optical regeneration at 40 Gb/s and beyond," *J. Lightw. Technol.* **21**, 2779-2790 (2003).

³² Mamyshev, P. V. In *All-optical data regeneration based on self-phase modulation effect*, European Conference on Optical Communication, ECOC'98, Institute of Electrical and Electronics Engineering, Madrid, Spain, 1998; Institute of Electrical and Electronics Engineering, Madrid, Spain, 1998; pp 475-476

bande décalé par rapport à la fréquence optique centrale du signal discrimine ensuite les impulsions représentant des ‘1’ des impulsions parasites. En effet, les ‘1’ ayant une puissance crête plus importante subissent un élargissement spectral conséquent et passent donc à travers le filtre décalé spectralement. Au contraire, les impulsions parasites avec une puissance crête plus faible subissent un élargissement spectral plus modéré et sont rejetées par le filtre.

L’utilisation d’une fibre à dispersion normale améliore les performances et assure notamment la diminution de la gigue d’amplitude des impulsions. La largeur spectrale du filtre δf est choisie afin de correspondre à la largeur spectrale des impulsions initiales.

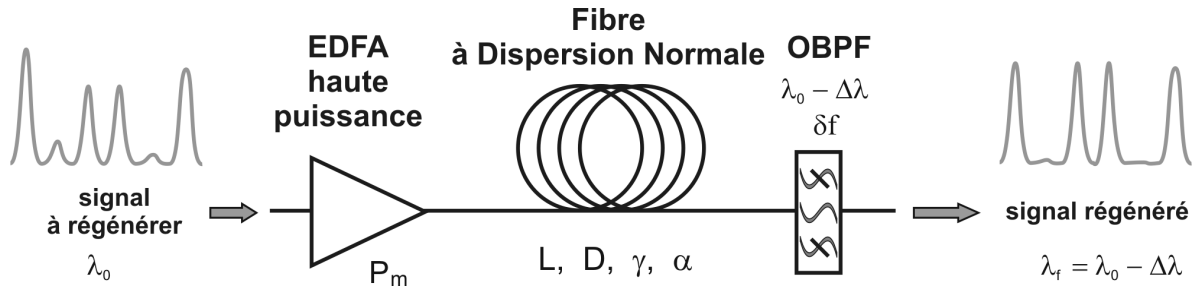


Figure 13 - Schéma expérimental traditionnel du régénérateur de Mamyshev

2.2. Paramètres caractérisant l’impact du régénérateur

Publications liées : P14, P16, P23, A21, A40

Plusieurs de nos travaux se sont tout d’abord attachés à caractériser l’impact du régénérateur sur le signal régénéré. Pour cela, des simulations numériques basées sur l’équation de Schrödinger non-linéaire standard nous ont permis d’isoler différents paramètres quantifiant de manière pertinente son influence.

Le premier élément particulièrement important est la fonction de transfert, c’est-à-dire la relation qui lie la puissance de sortie à la puissance initiale. Cette fonction est construite en injectant à l’entrée du régénérateur une impulsion Gaussienne de puissance crête variable et en considérant les caractéristiques de l’impulsion émergeant du dispositif.

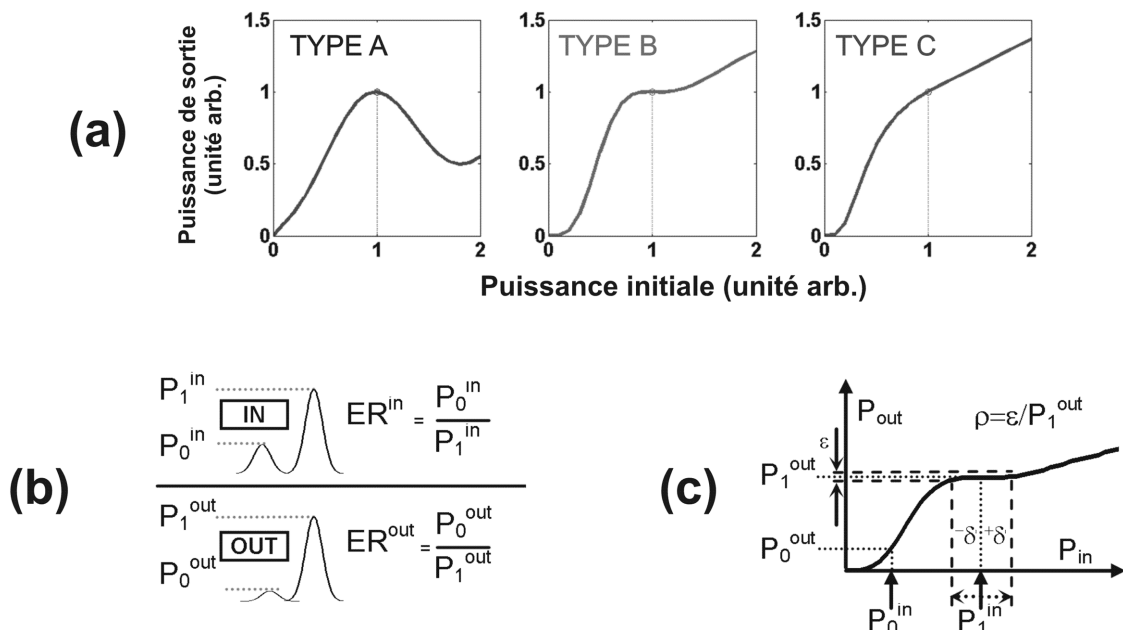


Figure 14 – (a) Différentes fonctions de transfert réalisables avec un régénérateur de Mamyshev (b) Définition du taux d’extinction (c) Définition de l’oscillation sur le régénérateur [P14]

Une fonction de régénération idéale serait une fonction Heaviside, permettant d'avoir en sortie deux niveaux parfaitement identifiables. Néanmoins, un tel échelon avec des bords abrupts n'est guère physiquement réalisable. Suivant les paramètres physiques du système, les formes de fonctions de transfert se classent suivant trois types (Figure 14(a)) : des fonctions de type 'A' avec un comportement non-monotone au niveau des '1', des fonctions 'B' avec au contraire un plateau (avec un point d'inflexion stationnaire³³) marqué et enfin certaines fonctions avec un comportement purement croissant (type 'C'). Pour assurer une régénération optimale, la fonction de type B est souhaitée.

A partir de la fonction de transfert, nous évaluons plus quantitativement les capacités du dispositif, d'une part à rejeter les impulsions parasites et d'autre part à égaliser le niveau des impulsions. Le premier point est analysé à travers l'évolution du taux d'extinction (Figure 14(b)). A partir d'un taux d'extinction fixé arbitrairement à 10 dB en entrée, le taux d'extinction obtenu en sortie est mesuré. Si ce taux est inférieur à 10 dB, nous avons amélioration, sinon notre dispositif dégrade le contraste du signal. Le second paramètre est le taux de variation du niveau de sortie, niveau directement relié à sa gigue d'amplitude. Ainsi, pour une gigue d'amplitude initiale arbitrairement fixée à $\pm 7.5\%$, nous mesurons la gigue en sortie (Figure 14(c)), ce qui nous permet de distinguer les zones optimales (les plateaux) assurant l'égalisation des niveaux de sorties (gigue de sortie nulle) [P14].

Si la fonction de transfert contient déjà beaucoup d'informations, elle n'est néanmoins pas suffisante pour une description complète de l'impact du régénérateur. En effet, un travail mené en collaboration avec le laboratoire FOTON de l'ENSSAT a montré que le régénérateur n'influence pas uniquement les puissances crêtes des impulsions, il modifie également la durée temporelle des impulsions, comme nous pouvons le voir Figure 15(b) : suivant la puissance à l'entrée du régénérateur, la durée temporelle des impulsions obtenues varie d'une dizaine de pour cent, les variations les plus importantes se situant malheureusement dans la zone du plateau [P23].

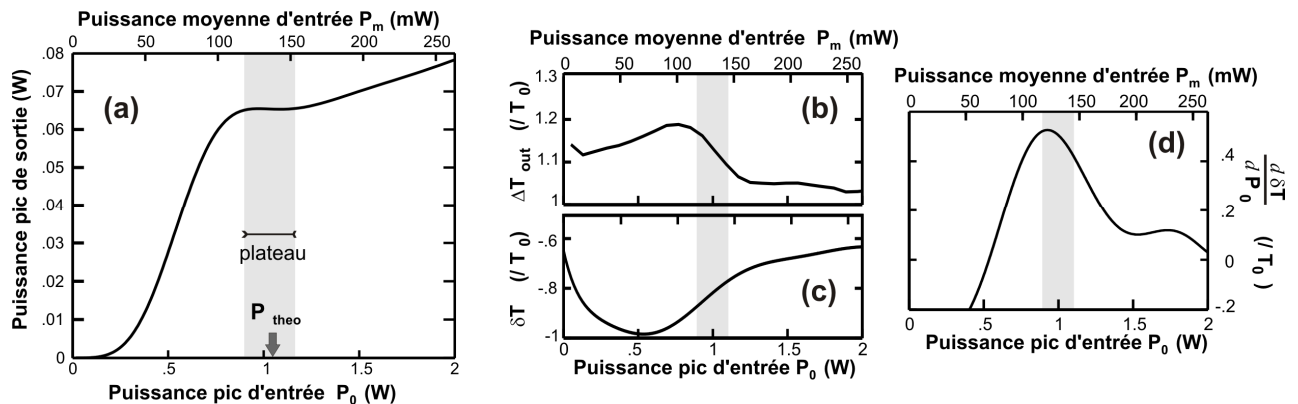


Figure 15 - (a) Exemple d'une fonction de transfert pour un régénérateur à 40 Gbps
 (b) Évolution de la largeur temporelle en fonction de la puissance à l'entrée du régénérateur
 (c) Évolution de la position centrale de l'impulsion régénérée
 (d) Dérivée du paramètre précédent par rapport à la puissance. [P23]

La position temporelle de l'impulsion est également affectée par le filtrage spectral décalé, le retard introduit par le dispositif variant avec la puissance (Figure 15(c)). Autrement dit, une gigue d'amplitude initiale se traduira par une gigue temporelle (Figure 15(d)) qui est nettement plus marquée au niveau du plateau. Un compromis délicat est donc à trouver entre réduction de la gigue d'amplitude et limitation de la gigue temporelle introduite par le régénérateur. Ce point confirme en outre clairement que la régénération effectuée est uniquement une régénération 2R (Réamplification et Remise en forme), sans aucune opération de resynchronisation effectuée (3R)³¹ [P23].

³³ Le plateau est défini par un point d'inflexion stationnaire, c'est-à-dire la puissance de travail pour laquelle la fonction de transfert présente simultanément des dérivées première et seconde nulles.

Un dernier point soulevé par l'analyse numérique est l'influence de la durée initiale des impulsions. Les résultats précédemment discutés ont été obtenus en simulant le comportement d'une impulsion Gaussienne de largeur temporelle donnée. Or les fonctions de transfert dépendent intrinsèquement de la largeur de l'impulsion initiale entrant dans le dispositif. Donc, pour un signal dégradé réel où les impulsions connaissent également des fluctuations de durée, des changements de la fonction de transfert sont à anticiper. Un tel phénomène rend ainsi indispensable pour une description réaliste du régénérateur de tester des séquences longues et d'effectuer ensuite une analyse statistique en entrée et sortie du régénérateur comme détaillé dans l'article [P23].

2.3. Règles de conception et validation expérimentale

Publications liées : P14, P23, P44, A21, A26, A28

La technique de Mamyshev dispose d'un grand nombre de paramètres pouvant varier : largeur et puissance des impulsions initiales, longueur, dispersion et non-linéarité de la fibre, décalage spectral du filtre utilisé. Concevoir un régénérateur optimisé nécessiterait donc, pour chaque situation, d'optimiser le choix de ces éléments. Pour faciliter cette démarche, nous avons travaillé avec Lionel PROVOST³⁴ afin de dégager certaines règles simples de conception.

Pour cela, nous avons tout d'abord considéré l'étape d'élargissement spectral qui se modélise facilement par l'équation de Schrödinger non-linéaire usuelle :

$$i \frac{\partial \psi}{\partial z} = \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial T^2} - \gamma |\psi|^2 \psi . \quad (4)$$

Pour prendre en compte la très grande variété des fibres disponibles³⁵ et de la durée d'impulsion du signal d'entrée³⁶, il est extrêmement intéressant de renormaliser l'ESNL. L'équation résultante prend alors la forme canonique suivante⁶ :

$$i \frac{\partial u}{\partial \xi} = \frac{1}{2} \frac{\partial^2 u}{\partial \tau^2} - |u|^2 u , \quad (5)$$

avec u , τ et ξ les paramètres normalisés définis par :

$$u(\xi, \tau) = N U , \quad U(\xi, \tau) = \frac{\psi}{\sqrt{P_C}} , \quad \tau = \frac{T}{T_0} , \quad \xi = \frac{z}{L_D} . \quad (6)$$

Ici T_0 et P_C représentent les largeurs temporelles et les puissances crêtes des impulsions initiales. L_D , L_{NL} et N sont les longueurs de dispersion, les longueurs non-linéaires et le nombre « soliton » définis de la manière suivante :

$$L_D = \frac{T_0^2}{\beta_2} , \quad L_{NL} = \frac{1}{\gamma P_C} , \quad N = \sqrt{\frac{L_D}{L_{NL}}} . \quad (7)$$

Une telle normalisation réduit considérablement le nombre de paramètres en jeu et nous pouvons désormais raisonner simplement sur deux paramètres, à savoir le nombre N et la distance normalisée ξ . Pour prendre en compte l'étape de filtrage, nous devons introduire un dernier paramètre, le décalage normalisé du filtre (décalage du filtre normalisé par la largeur spectrale initiale du filtre). A partir de ces trois paramètres, nous avons proposé une carte de conception qui prévoit les performances du régénérateur (Figure 16) [P14]. Nous pouvons ainsi prédire de cette carte à dimensions multiples le taux de réjection et d'oscillation en sortie du régénérateur. Vu autrement, pour atteindre

³⁴ Lionel PROVOST était alors doctorant à l'Optoelectronics Research Centre et travaillait sur les fonctions de régénération optique dans le cadre du projet européen TRIUMPH. Il travaille depuis à Draka ComTec (Marcoussis).

³⁵ Les paramètres de dispersion, de non-linéarité pouvant varier de plusieurs ordres de grandeurs suivant l'utilisation de fibres standard ou bien l'utilisation de fibres à verres spéciaux comme les fibres de chalcogénures ou bismuth.

³⁶ Nous cherchons des règles de conceptions qui soient aussi bien applicables à des signaux télécom à un débit de 10 Gbps (durée caractéristique de 33 ps) qu'à des signaux à 160 Gbps (durée 1.5 ps).

une certaine gamme de performances définies en termes de taux de réjection et d'oscillation, nous pouvons trouver les paramètres de longueur, de décalage spectral et de puissance les plus adaptés.

Cette étude systématique du comportement de l'impulsion dans le régénérateur a également mis en évidence des interactions éventuelles intracanal entre impulsions voisines : dans le segment normal, les impulsions s'élargissent temporellement et viennent alors recouvrir partiellement les impulsions voisines, conduisant à des effets de séquence néfastes [P14, P44].

Ces résultats ont été démontrés dans le cadre de l'ESNL sans perte. Néanmoins, nous avons montré qu'il était possible d'étendre le raisonnement en incluant les pertes linéiques et les prédictions ont été confirmées expérimentalement [A28].

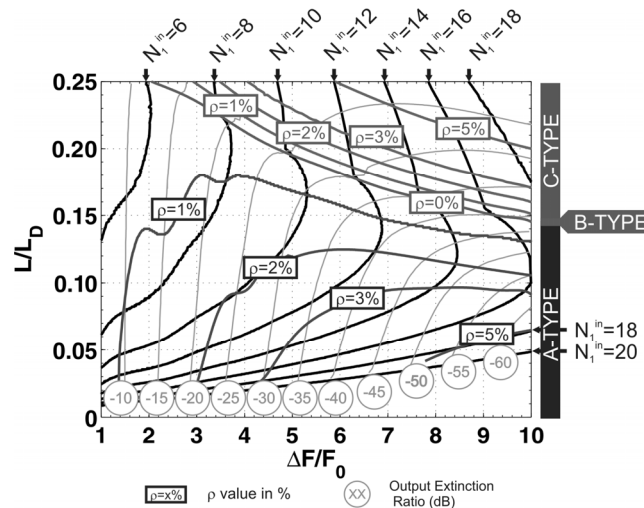


Figure 16 - Carte de conception d'un régénérateur de Mamyshev [P14]

Notons également que ces règles de conception ne s'appliquent que pour un seul étage de régénération. Or pour une utilisation dans une ligne de transmission, il est indispensable de revenir à la longueur d'onde initiale. Cela impose en pratique l'utilisation d'un second étage de régénération, avec un décalage spectral opposé au décalage spectral initial. La conception d'un tel régénérateur à double étage offre de nombreuses possibilités. Nous avons eu l'occasion d'en explorer quelques unes, notamment dans le cadre d'une collaboration avec l'ENSSAT [P23,P44].

2.4. Dispositifs multi-segments

Publications liées : P45 , A52

Les règles de conception précédemment discutées montrent notamment que pour obtenir une égalisation satisfaisante des puissances en sortie du régénérateur (c'est-à-dire bénéficier du plateau), il est nécessaire de faire appel à une longueur de fibre précise avec une puissance crête initiale donnée. Or cela n'est pas forcément facilement réalisable, soit parce que la longueur de fibre est prohibitive, soit parce que la puissance requise est trop importante. Toute solution qui permet de gagner en flexibilité sans compromettre les performances est donc la bienvenue.

Pour atteindre cet objectif, nous nous sommes intéressés, toujours en collaboration avec l'ORC, à un arrangement basé sur l'utilisation de trois fibres (Figure 17(a)), plus précisément deux fibres hautement non-linéaires entre lesquelles est intercalée une fibre à forte dispersion normale (DCF). Un tel arrangement découple physiquement les étapes linéaires et non-linéaires : alors que dans un dispositif traditionnel l'interaction entre dispersion et non-linéarité opère de manière continue, nous avons choisi d'avoir un segment purement non-linéaire, suivi d'un segment purement dispersif et un dernier segment purement non-linéaire. La platitude de la fonction de transfert étant liée à la dispersion du dispositif, il est aisé de l'optimiser en modifiant uniquement la longueur de fibre intermédiaire, comme illustré sur la Figure 17(b) [P45].

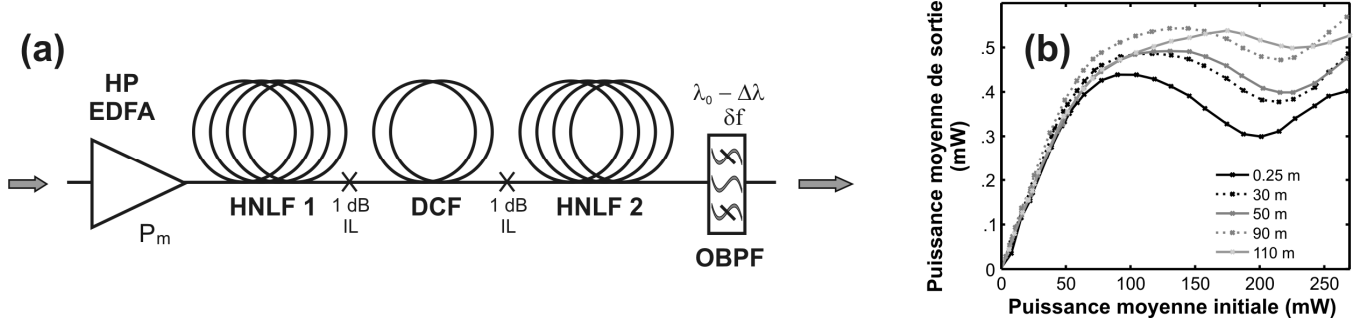


Figure 17 - Dispositif Mamyshev multi-segments (a) Schéma expérimental (b) Résultats expérimentaux montrant l'influence de la longueur de DCF intermédiaire sur la fonction de transfert. Résultats à 10 GHz [P45].

2.5. Impulsions propres et génération asymptotique d'impulsions

Publications liées : P19, P26, A41, A44, A49

Dans un système de télécommunications longue distance (plusieurs milliers de kilomètres), il est indispensable de prévoir la régénération à intervalles réguliers du signal optique. Dans ce contexte, Stéphane PITOIS³⁷ et moi avons étudié numériquement la concaténation de plusieurs régénérateurs Mamyshev à double étage. Notre étude a mis en évidence ce que nous avons nommé des impulsions propres (Figure 18(a)), c'est-à-dire des impulsions capables de ressortir d'un régénérateur identiques à elles-mêmes (à un facteur multiplicatif près). Toute impulsion lumineuse envoyée dans une ligne infinie de régénérateurs Mamyshev soit évolue vers cette impulsion propre soit disparaît complètement du système. Nous avons donc là, après l'amplification parabolique, un autre système attracteur. À noter que la convergence ou l'élimination dépend des paramètres de l'impulsion initiale, à savoir sa forme, sa durée temporelle et sa puissance-crête comme le montre la carte de la Figure 18(b). Un tel comportement peut être rapproché des solitons dissipatifs ou bien des auto-solitons qui ont été mis en évidence dans des lignes de régénérateurs NOLMs³⁸.

Une situation illustrant de manière assez frappante ce processus de convergence est d'injecter à l'entrée de la ligne de régénérateurs une onde partiellement incohérente (la nature des ondes incohérentes que nous utilisons sera discutée plus en détails dans le chapitre V). Cette onde incohérente contient un grand nombre de fluctuations optiques rapides (Figure 18(d)). La constellation de points visible Figure 18(c1) donne une idée de la répartition initiale en amplitude et durée de ces structures. Ces structures évoluent progressivement vers le profil caractéristique des impulsions propres, avec notamment une largeur temporelle, une forme et une amplitude parfaitement définies comme nous le constatons sur la Figure 18(c4) avec un seul point désormais visible. Les fluctuations initiales incohérentes se sont donc transformées en un train d'impulsions identiques avec un espacement aléatoire (Figure 18(e)) [P26]. Ces travaux numériques ont eu l'occasion d'être repris par un groupe de recherches canadien qui a expérimentalement confirmé l'existence et les propriétés de ces impulsions propres³⁹.

³⁷ Stéphane PITOIS est chargé de Recherches à l'Institut CARNOT de Bourgogne

³⁸ Boscolo, S.; Nijhof, J. H. B.; Turitsyn, S. K., Autosoliton transmission in dispersion-managed systems guided by in-line nonlinear optical loop mirrors. *Opt. Lett.* **2000**, *25*, (17), 1240-1242.

Gray, A.; Huang, Z.; Lee, Y. W. A.; Khrushchev, I. Y.; Bennion, I., Experimental observation of autosoliton propagation in a dispersion-managed system guided by nonlinear optical loop mirrors. *Opt. Lett.* **2004**, *29*, (9), 926-928.

³⁹ Sun, K.; Rochette, M.; Chen, L. R., Output characterization of a self-pulsating and aperiodic optical fiber source based on cascaded regeneration. *Opt. Express* 2009, *17*, (12), 10419-10432.

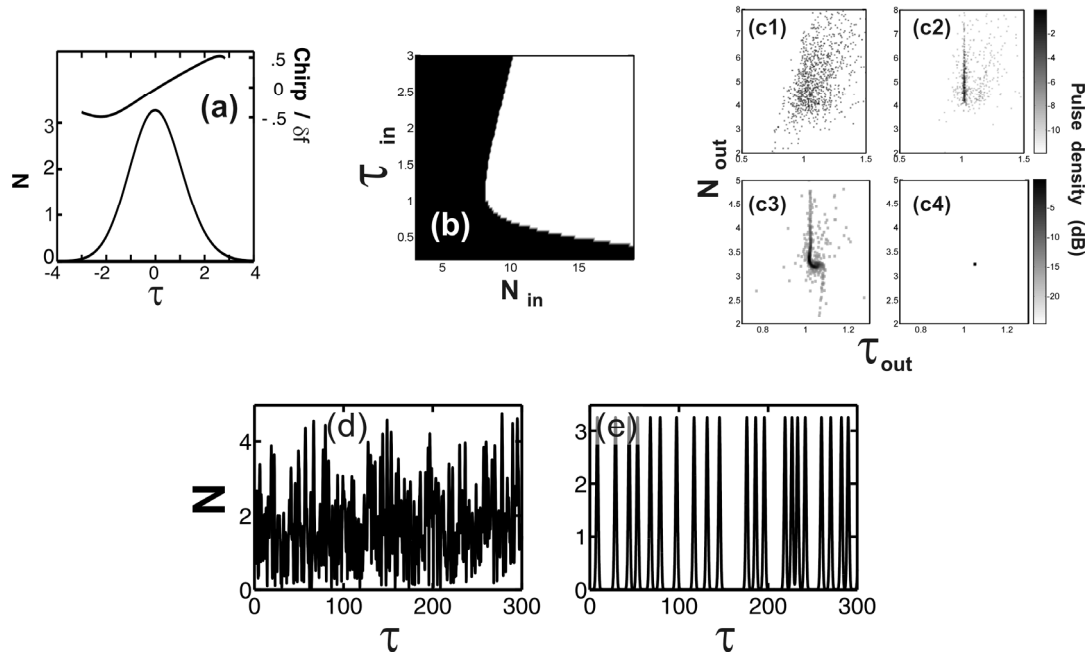


Figure 18 - (a) Pulse propre du système (b) Carte de convergence vers les pulses propres en fonction de la durée initiale et de la puissance de l'impulsion envoyée : en noir, élimination du pulse ; en blanc, convergence vers le pulse propre (c) Convergence progressive d'un signal incohérent vers les propriétés du pulse propre : distribution des puissances et largeurs temporelles à différents nombres de régénérateurs : 0, 1, 2, 40, (c1, c2, c3, c4 respectivement) (d) Bruit initial envoyé dans une ligne de régénérateurs (e) Train d'impulsions propres obtenu asymptotiquement [P26]

Suivant les paramètres du régénérateur, nous obtenons divers régimes avec éventuellement la coexistence de plusieurs impulsions propres. Par une analyse plus systématique, nous dressons le diagramme de bifurcation de la Figure 19(a). La présence de plusieurs branches correspond à des impulsions propres ou à des cycles avec un comportement périodique [P19]. La Figure 19(b) montre la répartition asymptotique des propriétés des impulsions en sortie. Certains points restent en dehors des états propres. En effet, dans la ligne de régénérateurs, chacune des impulsions propres a une vitesse de propagation légèrement différentes, aboutissant éventuellement à des situations de collisions entre pulses et créant continuellement de nouvelles impulsions qui évoluent ensuite à leur tour vers des pulses propres [P26].

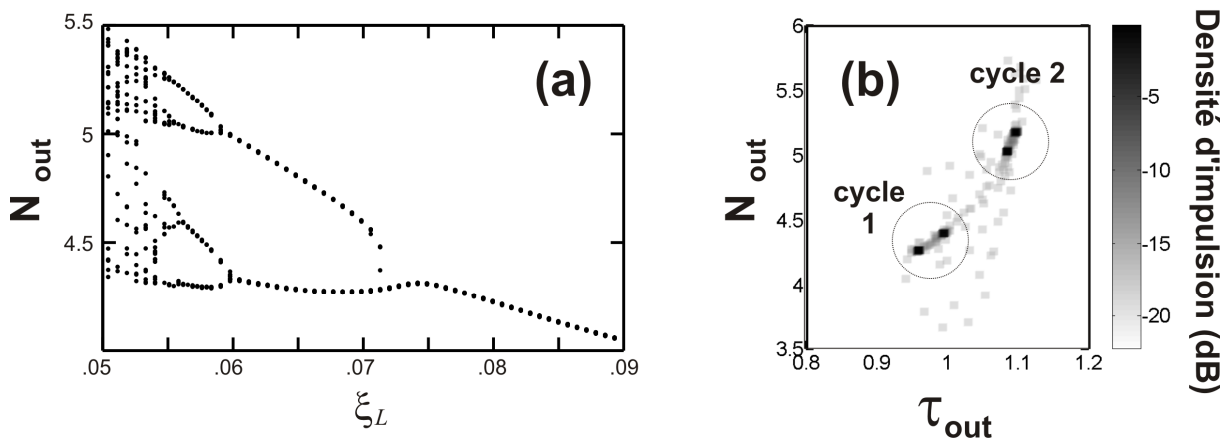


Figure 19 - (a) Diagramme de bifurcation du système (b) Exemple de répartition asymptotique vers deux cycles (après 40 régénérateurs). [P26]

3. RÉGÉNÉRATION DE MAMYSHEV ACTIVE

Publications liées : P4, P7, A7, A39

Tous les dispositifs précédemment discutés se basaient sur des fibres passives. Or comme cela a déjà été réalisé pour différentes configurations comme la boucle à miroir non-linéaire, il est possible de combiner la technique avec un système amplificateur. Pour cela, nous avons réalisé une variante du dispositif de Mamyshev bénéficiant d'un gain distribué Raman [P7] (Figure 20(b)). Le régénérateur fonctionnant en régime de dispersion normale, nous bénéficions alors des propriétés intrinsèques des similaritons optiques, à savoir une grande indépendance des impulsions de sortie vis-à-vis des fluctuations de la forme d'entrée. Nous avons déjà vérifié cet aspect dans le cadre d'un dispositif de mise en forme où l'impulsion obtenue montrait une très grande robustesse vis-à-vis des fluctuations initiales [P4].

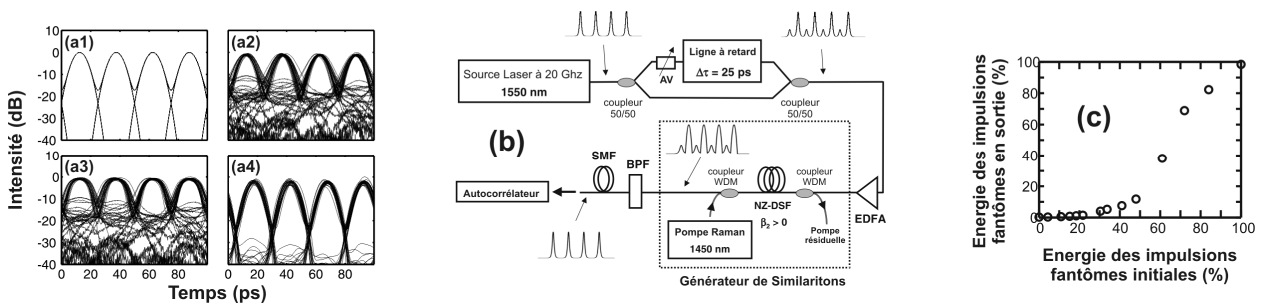


Figure 20 – Régénération optique par dispositif de Mamyshev avec gain (a) Simulations numériques : (a1) Signal non dégradé à 40 GHz (a2) Signal dégradé par la propagation dans une ligne de transmission (a3) Signal après propagation dans l'amplification similariton (a4) Signal régénéré (b) Montage expérimental mis en œuvre (c) Résultats expérimentaux démontrant la capacité à éliminer les impulsions parasites [P7].

Des expériences menées à Dijon sur un train périodique dégradé ont confirmé la très grande capacité du dispositif à éliminer les impulsions parasites (Figure 20(b)). D'autres complémentaires ont été réalisées à Lannion auprès de France Telecom R&D⁴⁰ en collaboration avec Erwan PINCEMIN sur un signal télécom réel à 40 Gbps.

Notons que l'utilisation d'une fibre active présente quelques avantages supplémentaires par rapport à une configuration passive. A élargissement spectral égal, elle limite en effet l'élargissement temporel des impulsions et donc les effets néfastes d'interaction intra-canaux [P31]. De plus, la puissance nécessaire en entrée de fibre est diminuée par rapport à une fibre passive, alors que la puissance récupérée après filtrage spectral augmente [A39].

Les concepts développés dans la partie 2.5 ont également été étendus aux régénérateurs Mamyshev actifs avec la mise en évidence d'impulsions qui se propagent dans une chaîne de régénérateurs actifs. Une application aux domaines des cavités lasers a alors été envisagée [P26].

4. RÉGÉNÉRATION MULTI-LONGUEUR D'ONDE

Publications liées : P22, A32

L'un des problèmes des régénérateurs optiques actuels est qu'ils ne sont capables de régénérer qu'un seul canal à la fois. Cela représente un obstacle de taille dans le contexte des télécommunications multiplexées en longueur d'onde (il faut ainsi prévoir un régénérateur par longueur d'onde) et limite l'intérêt de la technologie optique par rapport aux solutions optoélectroniques elles aussi limitées à un

⁴⁰ Maintenant Orange Labs

fonctionnement mono-canal. Rappelons en effet qu’historiquement, le succès de technologies comme l’amplification à base de fibres dopées erbium s’est basé fortement sur leur capacité à amplifier simultanément un grand nombre de canaux.

Le succès de la régénération optique dépend donc à terme de la possibilité de traiter plusieurs flux d’information simultanément. Or le régénérateur Mamyshev traditionnel n’est pas a priori capable d’assumer cette fonction : en régime fortement non-linéaire, deux canaux se propageant dans la même fibre sont lourdement pénalisés par la modulation de phase croisée. Des effets de séquence très prononcés apparaissent en effet, conduisant à une dégradation notable du signal obtenu en sortie. Tout cela peut s’éviter en assurant une différence de vitesse de groupe importante entre les différentes longueurs d’onde. Pour cela, rien de mieux que d’effectuer une propagation contra-propagative, la différence de vitesses de groupe étant alors proche de deux fois la vitesse de la lumière.

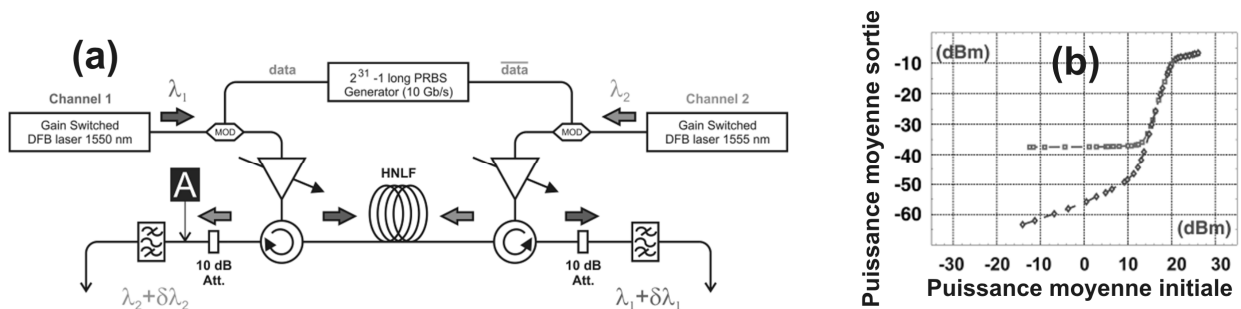


Figure 21 – Régénération bi-directionnelle à deux canaux (a) Montage expérimental (b) Fonction de transfert obtenue sans et avec la présence d’un deuxième canal (losange et carré respectivement) [P22]

Cette solution a été mise en œuvre à l’ORC avec le montage décrit Figure 21(a) [P22]. Les fonctions de transfert enregistrées avec et sans la présence d’un deuxième canal ne montrent pas de modification pour les puissances moyennes élevées. Par contre, pour les puissances faibles, nous remarquons l’existence d’un plateau qui s’explique par un fond continu dû à la rétrodiffusion Rayleigh du canal adjacent. Des expériences menées avec un train codé n’ont pas montré de pénalité marquante introduite par l’ajout d’un canal supplémentaire dans le système⁴¹. Ces travaux ont plus tard été poursuivis à l’ORC avec l’utilisation d’une fibre à maintien de polarisation qui a permis d’accroître par un facteur 2 le nombre de canaux régénérés et de le porter à 4 canaux à 40 Gbps^{42 43}.

5. RÉGÉNÉRATION SOLITON

Publications liées : P46, P48, A77, A81

La technique Mamyshev et ses variantes sont basées sur une propagation en régime de dispersion normale et sur un filtrage spectral décalé en longueur d’onde. Or une technique alternative existe basée sur l’utilisation d’une fibre à dispersion anormale cette fois avec un filtrage central (Figure 22(a)).

⁴¹ Provost, L.; Parmigiani, F.; Petropoulos, P.; Richardson, D. J.; Mukasa, K.; Takahashi, H.; Hiroishi, J.; Takakuma, M., Investigation of four-wavelength regenerator using polarization- and direction- multiplexing. *IEEE Photon. Technol. Lett.* **2008**, *20*, (20), 1676-1678.

⁴² Provost, L.; Parmigiani, F.; Petropoulos, P.; Richardson, D. J., Investigation of simultaneous 2R regeneration of two 40-Gb/s channels in a single optical fiber. *IEEE Photon. Technol. Lett.* **2008**, *20*, (4), 270-272.

⁴³ La régénération de 4 canaux à 40 Gbps constituait notamment l’un des objectifs du projet européen TRIUMPH, Transparent Ring Interconnection Using Multi-wavelength PHotonic switches, IST-027638 STP. Durant mon séjour à l’ORC, ma participation aux travaux relatifs à la régénération optique ont menés dans le cadre de ce projet supervisé localement par David RICHARDSON et Periklis PETROPOULOS.

Cette technique est souvent qualifiée de technique « soliton »⁴⁴, même si le comportement solitonique n'est pas forcément à l'origine de la régénération observée. Encore une fois, l'auto-modulation de phase tient un rôle prépondérant : suivant la puissance initiale, l'impulsion s'élargit plus ou moins spectralement. Pour une certaine puissance et une certaine longueur de fibre, nous constatons alors qu'une partie de l'énergie part principalement dans les ailes spectrales de l'impulsion, la partie centrale restant quasiment inchangée. En isolant uniquement la partie centrale par un filtrage adapté, il devient possible de limiter fortement les fluctuations de puissance en sortie du régénérateur avec l'existence d'un plateau (Figure 22(b)). Il faut néanmoins bien garder à l'esprit que comparé au dispositif Mamyshev, aucune régénération des zéros (élimination des impulsions fantômes) n'est ici assurée. Au contraire, le processus aurait plutôt tendance à dégrader le taux d'extinction.

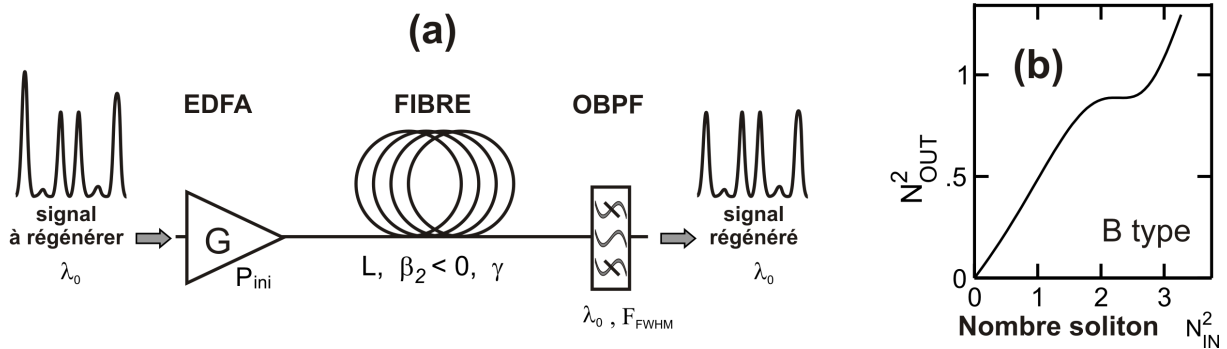


Figure 22 – Régénération soliton (a) Schéma de principe (b) Fonction de transfert [P48]

Dans le cadre du projet ANR Futur et en collaboration avec FOTON, un des objectifs initiaux était la régénération de signaux à 160 Gbps. Or à un tel débit, les puissances mises en jeu dans les régénérateurs Mamyshev deviennent considérables, avec des puissances moyennes proches de 33 dBm, peu compatibles avec une utilisation télécom. Julien FATOME⁴⁵ et moi, nous nous sommes donc penchés sur les potentialités de la régénération « soliton » et nous avons souligné plusieurs atouts de cette technique. Pour avoir une approche la plus générale possible, nous avons normalisé le problème de la même manière que celle détaillée dans la partie 2.3. Néanmoins la discussion est facilitée par le fait que le filtrage est ici central, éliminant donc un des paramètres et ne laissant plus que le nombre soliton et la longueur normalisée comme variables.

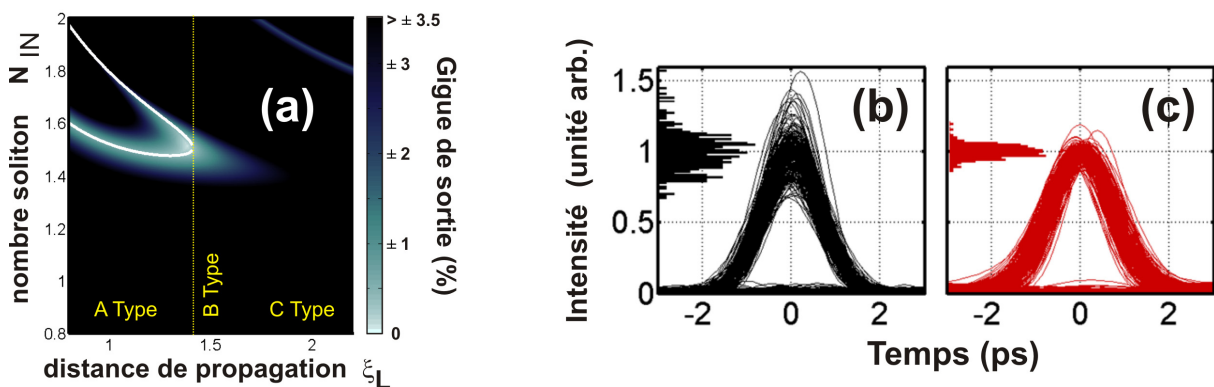


Figure 23 - (a) Carte de conception du régénérateur soliton : évolution de la gigue en fonction des paramètres du régénérateur : longueur et puissance injectée (b) Diagramme de l'œil du signal initial dégradé à 160 Gbps et distribution statistique des niveaux des 1 optiques (c) Signal après passage dans le régénérateur [P48]

⁴⁴ Asobe, M.; Hirano, A.; Miyamoto, Y.; Sato, K.; Hagimoto, K.; Yamabayashi, Y., Noise reduction of 20 Gbit/s pulse train using spectrally filtered optical solitons. *Electron. Lett.* **1988**, 34, (11), 1135-1136.

⁴⁵ Julien FATOME est ingénieur de recherche CNRS à l'Institut CARNOT de Bourgogne. Il coordonnait localement le projet ANR FUTUR.

Une cartographie précise de la gigue obtenue en sortie (Figure 23(a)) permet de proposer quelques règles simples de conception pour choisir rapidement, suivant la non-linéarité et la dispersion des fibres disponibles, la longueur et la puissance à utiliser. Une des conclusions les plus importantes de cette étude est que, par rapport à la technique Mamyshev, les puissances à injecter sont considérablement réduites alors que la distance de fibre nécessaire augmente. D'autres points positifs sont à considérer, comme l'absence de gigue temporelle additionnelle introduite par le système et un élargissement temporel des impulsions restreint, éliminant dès lors les interactions intra-canal. Enfin, un second étage régénérateur n'est pas nécessaire pour retrouver la longueur d'onde initiale [P48].

Des simulations numériques systèmes complémentaires réalisées à l'aide du logiciel VPI Transmission Maker ⁴⁶ sur un signal à 160 Gbps réaliste (Figure 23(b)) ont confirmé ces conclusions : la gigue d'amplitude du signal régénéré (Figure 23(c)) a été considérablement réduite, comme l'atteste la compression de la distribution des puissances crêtes. Les puissances moyennes utilisées sont de quelques dizaines de mW, à comparer au W nécessaire pour Mamyshev. Aucune gigue temporelle supplémentaire significative n'est à déplorer. Par contre, il faut souligner que le niveau de bruit des zéros optiques n'est absolument pas amélioré. Cela conduit à prévoir un dispositif additionnel pour éliminer ces fluctuations, comme un absorbant saturable rapide ⁴⁷. Des essais expérimentaux réalisés par l'équipe de PERSYST à Lannion ont confirmé l'intérêt de cette approche, avec entre autres des mesures de taux d'erreur binaire [P46].

6. CONCLUSION ET SYNTHÈSE DU THEME ABORDÉ

Nous avons eu l'occasion d'étudier en détails, numériquement et expérimentalement, deux régénérateurs optiques exploitant la non-linéarité Kerr de la silice. Suivant le régime de dispersion intervenant, des atouts et inconvénients ont été mis en évidence. La plupart de ces travaux ont été menés en collaboration étroite avec d'autres institutions, notamment en ce qui concerne les réalisations expérimentales, notre équipe ne disposant pas encore à cette époque de moyens de coder une information binaire sur un train périodique d'impulsions.

Alors que le sujet semble très proche de l'ingénierie télécom, une meilleure compréhension physique des mécanismes nous a permis de proposer des règles simples de conception et de discuter les limitations intrinsèques de chaque technique. Des solutions pour surmonter certaines d'entre elles ont été démontrées (montage bi-directionnel, régénérateur multi-segments). Des études plus fondamentales ont également été menées pour démontrer par exemple l'existence d'impulsions propres ou bien de cycles optiques dans une concaténation de régénérateurs.

⁴⁶ VPI Transmission Maker est un logiciel commercial de la société VPI Photonics, division de VPI Systems.

⁴⁷ Massoudre, D.; Oudar, J. L.; Fatome, J.; Pitois, S.; Millot, G.; Decobert, J.; Landreau, J., All-optical extinction-ratio enhancement of a 160 GHz pulse train by a saturable-absorber vertical microcavity. *Opt. Lett.* **2006**, 31, (4), 537-539.

Thème abordé	Régénération optique par dispositifs non-linéaires à fibre
Période	2005 – 2009
Projets ou financements	Bourse BDI CNRS-Région Bourgogne (2002-2005) Bourse postdoctorale Marie Curie (2005-2006) Bourse postdoctorale Carnot (2005-2006) Projet ANR Futur (2006-2009) coord. local : J. FATOME Projet Européen TRIUMPH (2005-2008) coord. local : D.J. RICHARDSON
Étudiants	Benjamin PATIN (Master 1, 2006-2007) Fida BAZ (Master 2, 2006-2007)
Collaborations locales	Dr. Julien FATOME Dr. Stéphane PITOIS
Collaborations extérieures	ORC : Pr. Dave RICHARDSON, Francesca PARMIGIANI, Dr. Periklis PETROPOULOS, Lionel PROVOST ENSSAT, Lannion : Dr. Thierry CHARTIER, Dr. T.N. NGUYEN, Dr. Mathilde GAY, Dr. Laurent BRAMERIE
Publications liées	P7, P16, P19, P22, P23, P26, P45, P44, P46, P48
Publications annexées en fin de mémoire	P7 C. Finot, S. Pitois and G. Millot : <i>Regenerative 40 Gbit/s wavelength converter based on similariton generation</i> , Optics Letters 30, 1776-1778 (2005). P16 L. Provost, C. Finot, K. Mukasa, P. Petropoulos and D.J. Richardson : <i>Design scaling rules for 2R-Optical Self-Phase Modulation-based regenerators 2R regeneration</i> , Optics Express 15, 5100-5113 (2007). P19 S. Pitois, C. Finot, L. Provost : <i>Asymptotic properties of incoherent waves propagating in an all-optical regenerator lines</i> , Optics Letters 32, 3262-3265 (2007). P23 C. Finot, T.N. Nguyen, J. Fatome, T. Chartier, S. Pitois, L. Bramerie, M. Gay, J.-C. Simon : <i>Numerical study of an optical regenerator exploiting self-phase modulation and spectral offset filtering at 40 Gbit/s</i> , Optics Communications 281, 2252-2264 (2008).
Communications liées	CI9, CI11, CI14, CI18, CI22, CI25, CI29, CI39 CN4, CN2, CN3, CN4, CN6, CN7, CN9, CN10, CN11, CN14, CN15 S4, S2, S3 Post9, Post16, Post17, Post18, Post30

LES SOURCES OPTIQUES FIBRÉES DE NOUVELLE GÉNÉRATION

Dans ce chapitre, je décris comment la non-linéarité des fibres est exploitée pour répondre à des contraintes spécifiques. Des sources destinées aux télécommunications optiques multi-longueur d'onde ou OCDMA ou bien adaptées à la microscopie CARS ont ainsi été conçues et testées. Ces travaux s'inscrivent dans le contexte plus large de la génération de continuum.

1. INTRODUCTION

Les fibres optiques ne servent pas uniquement à transmettre une information sur des milliers de kilomètres. Nous avons ainsi déjà montré dans les chapitres II et III qu'elles pouvaient être mises en œuvre pour amplifier la lumière ou bien pour traiter de manière tout optique une information à haut-débit. Nous nous intéressons plus précisément ici à leur utilisation dans le cadre de sources optiques où leur non-linéarité est mise à profit pour remodeler le spectre et la forme temporelle d'impulsions afin de les adapter aux applications visées. La génération de similaritons optiques dans les amplificateurs, de solitons noirs ou bien encore de trains d'impulsions aléatoires sont trois exemples que nous avons déjà évoqués. Nous présenterons successivement dans ce chapitre trois nouvelles applications, à savoir les sources multi-longueurs d'onde pour les télécommunications optiques, les sources à haut débit et les sources pour la microscopie CARS. Ces différents thèmes ont notamment fait chacun l'objet de financement ANR dont les projets SUPERCODE et SOFICARS que j'ai eu l'occasion de coordonner au niveau local.

2. SOURCE MULTI-LONGUEUR D'ONDE POUR LES TELECOMMUNICATIONS OPTIQUES

2.1. Introduction

Avec le développement des télécommunications multiplexées en longueur d'onde, le nombre d'émetteurs utilisés a considérablement augmenté : si une seule source était par le passé nécessaire, il est désormais courant d'observer des communications employant plus d'une quarantaine de canaux, et donc autant de sources optiques. Pour réduire le coût important que représentent ces émetteurs, il a été proposé de profiter de l'élargissement spectral d'un train d'impulsions ultra-brèves pour générer des continua optiques dans lesquels un filtrage spectral permet ensuite de découper les canaux aux longueurs d'onde souhaitées ⁴⁸. Plusieurs solutions sont alors disponibles. En régime de dispersion anormale, l'élargissement spectral est conséquent, mais la présence de comportements solitoniques et d'instabilité modulationnelle dégrade la cohérence des trains d'impulsions obtenus après découpage spectral, conduisant à des giges temporelle et d'amplitude ⁴⁹. Ces dégradations pénalisantes peuvent être limitées en utilisant une fibre non-linéaire à dispersion normale, le prix à payer étant toutefois une puissance à injecter plus importante.

⁴⁸ Une revue des différents travaux réalisés dans ce contexte a été réalisée par L. Boivin : L. Boivin and B. C. Collings, "Spectrum slicing of coherent sources in optical communications," *Opt. Fiber. Technol.* **7**, 1-20 (2001).

⁴⁹ M. Nakazawa, K. Tamura, H. Kubota, and E. Yoshida, "Coherence degradation in the process of supercontinuum generation in an optical fiber," *Opt. Fiber. Technol.* **4**, 215-223 (1998).

2.2. Source pour les applications OCDMA

Publications liées : P31, A48, A59, A54

Dans le cadre du projet ANR Supercode, nous avons donc mis en œuvre le découpage spectral d'un continuum généré dans une fibre hautement non-linéaire à dispersion normale. L'objectif était alors de générer 8 canaux sur lesquels serait ensuite inscrite une information codée de type DS-OCDMA⁵⁰. Une première étape a été de définir des règles de conception de la source en régime de dispersion normale. Pour cela, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'élargissement spectral obtenu, au niveau d'oscillation dans le spectre et à l'énergie contenue dans la partie centrale de l'impulsion. En effet, nous cherchions une source avec la plus grande largeur spectrale, un taux d'oscillation faible (pour éviter d'avoir à corriger la puissance dans les différents canaux découpés) et dont la partie centrale du spectre contient une grande partie de l'énergie. En exploitant la normalisation de l'ESNL présentée dans le chapitre précédent (Eqs. (4) et (5)), nous avons établi les cartes présentées Figure 24. Nous constatons alors le rôle particulier tenu par la condition dite de « wave-breaking »⁵¹ qui modifie significativement la dynamique de l'impulsion. En effet, avant ce wave-breaking, l'énergie est concentrée dans la partie centrale du spectre qui est marquée par des oscillations fortes. Par contre, passée la zone wave-breaking, le spectre cesse de s'élargir, une partie de l'énergie est transférée dans les ailes, alors que le spectre s'adoucit avec des fluctuations plus réduites.

Le wave-breaking étant relié à la dispersion de la fibre, il nous est donc apparu qu'une valeur faible de dispersion n'était pas forcément le choix optimal et qu'un certain équilibre entre dispersion et non-linéarité devait être trouvé (autrement dit, choisir judicieusement la longueur de fibre et la puissance injectée en fonction de la durée des impulsions initiales et des paramètres de dispersion/non-linéarité de la fibre).

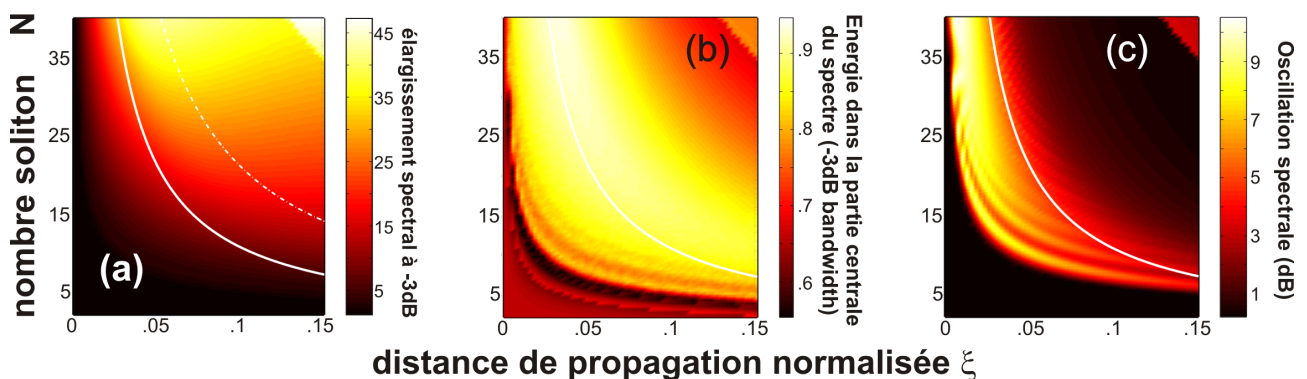


Figure 24 - Cartes normalisées de conception des sources en fonction de la distance et du nombre soliton. (a) Évolution de l'élargissement spectral à mi-hauteur (b) Part de l'énergie dans la partie centrale du spectre de l'impulsion (c) Oscillation dans la partie centrale du spectre de l'impulsion. La ligne continue blanche représente la condition de wave-breaking [P31.]

Ces règles de conception nous ont permis de choisir parmi les fibres disponibles commercialement une fibre adaptée à nos besoins⁵². La validation expérimentale a été menée en collaboration avec le LTCI Telecom ParisTech (montage expérimental représenté Figure 25(a)). Les spectres enregistrés en sortie de la fibre hautement non-linéaire (Figure 25(b)) confirment l'élargissement spectral significatif (Figure 25(c)). Les impulsions obtenues après filtrage spectral (Figure 25(d1)) ne présentent pas de sous-structures notables et sont quasiment en limite de Fourier (Figure 25(d2)). Des caractérisations complémentaires menées à Dijon dans le cadre du stage ingénieur de M. JIANG ont confirmé la qualité du train d'impulsions obtenu par cette technique et notamment ont assuré que le processus d'élargissement spectral non-linéaire n'introduisait pas de gigues additionnelles.

⁵⁰ DS – OCDMA : Direct Sequence Optical Code Division Multiple Access

⁵¹ D. Anderson, M. Desaix, M. Lisak, and M. L. Quiroga-Teixeiro, "Wave-breaking in nonlinear optical fibers," J. Opt. Soc. Am. B **9**, 1358-1361 (1992).

⁵² Nous avons employé une fibre optique hautement non-linéaire commercialisée par OFS Speciality Photonics, d'une longueur de 500 m ayant une dispersion de -1ps/km/nm avec un coefficient non-linéaire de 10 /W/km.

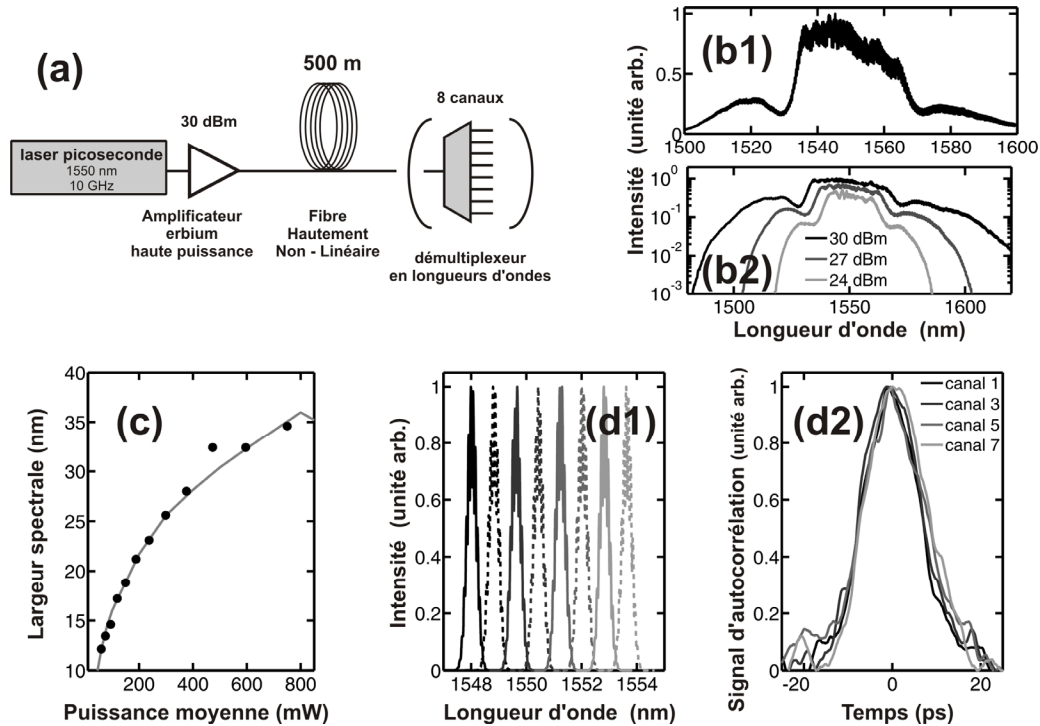


Figure 25 - (a) Montage expérimental utilisé. (b) Spectres obtenus en sortie de la HNLF pour différentes puissances de pompe initiales. (c) Évolution expérimentale (cercles) de la largeur spectrale en fonction de la puissance moyenne initiale comparée aux résultats numériques (ligne continue). (d1) Spectres obtenus après découpage spectral, et (d2) signaux d'autocorrélation des impulsions correspondantes [A48].

2.3. Source à base d'impulsions paraboliques

Publications liées : P13, A20

Les travaux précédents montrent tout l'intérêt d'un élargissement spectral dans les fibres hautement non-linéaires à dispersion normale. Mais comme nous le constatons sur la Figure 25(b), une part non-négligeable de l'énergie se retrouve dans les ailes spectrales de l'impulsion et devient donc difficilement exploitable. Or une forme particulière évite le développement de ces ailes, il s'agit de l'impulsion parabolique que nous avons eu l'occasion de détailler dans le chapitre II.

Plus précisément, en collaboration avec Francesca PARMIGIANI⁵³, j'ai utilisé lors de mon séjour à l'ORC des impulsions paraboliques générées passivement par un réseau à fibre de Bragg superstructuré (cf. chapitre II, partie 3.3). Le spectre obtenu en sortie est significativement élargi, ne présente pas les ailes caractéristiques du wave-breaking et est particulièrement plat (Figure 10(b)). Il couvre l'ensemble de la bande C des télécommunications optiques⁵⁴ si bien que nous avons pu y découper une quarantaine de canaux qui ont ensuite été finement analysés, notamment grâce à des enregistrements FROG (Figure 26(c)). Les résultats indiquent des impulsions qui sont proches d'être en limite de Fourier, sans piédestaux. Les impulsions conservent néanmoins une dérive de fréquence temporelle résiduelle quasi-linéaire qui serait, si nécessaire, facilement compensée par un segment de fibre à dispersion anormale. Nous avons également vérifié la qualité des trains d'impulsions générés qui ne présentent pas de dégradation pour l'ensemble des quarante canaux testés (Figure 26(d-f)).

⁵³ Francesca PARMIGIANI était alors étudiante en thèse à l'ORC. Elle est depuis devenue research fellow à l'ORC.

⁵⁴ Bande C des télécommunications optiques (bande « Conventionnelle »): bande spectrale correspondant à l'amplification erbium : 1530 à 1565 nm.

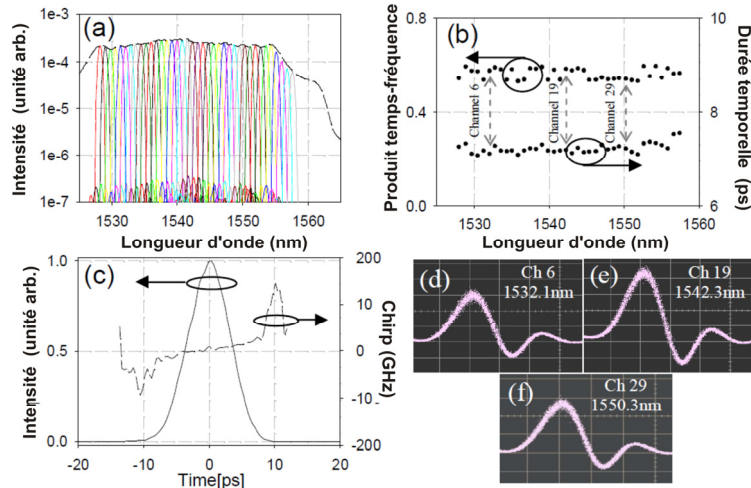


Figure 26 – Canaux générés après découpage spectral d’une source parabolique. (a) Spectre des canaux découpés. (b) Produit temps-fréquence de chacun des canaux et durée temporelle des différents canaux (c) Caractérisation FROG de l’un des canaux (d-f) Traces temporelles enregistrées sur un oscilloscope pour trois différents canaux. [13]

3. SOURCES POUR LES APPLICATIONS HAUT-DEBIT

Publications liées : P10, P15, P20, P27, P30, A19, A34, A35, A42, A55, A56, A61, A76

Avec la montée en débit des réseaux actuels de communications (40 Gbps et 100 Gbps, voire 160 Gbps), le besoin en sources délivrant des impulsions de qualité à un haut taux de répétition s’est accru. En raison des limitations en bande passante de l’optoélectronique, la méthode la plus simple qui consiste à moduler une onde continue n’est plus réalisable. Les lasers à fibre à blocage de mode actifs constituent une alternative intéressante, mais ils sont encore limités à un taux de répétition de 40 GHz ce qui nécessite ensuite une étape de multiplexage optique. Nous avons donc cherché à explorer d’autres solutions exploitant la non-linéarité des fibres.

Une des techniques les plus prometteuses est alors basée sur la remise en forme passive progressive d’un battement sinusoïdal généré par la superposition de deux signaux continus séparés spectralement par le taux de répétition désiré. Par mélange à quatre ondes multiple, pour une distance de propagation et une puissance initiale soigneusement choisies, un train d’impulsions gaussiennes en limite de Fourier est alors obtenu⁵⁵. Cette solution a été particulièrement étudiée à Dijon par Julien FATOME et Stéphane PITOIS pour différents taux de répétition⁵⁶.

Le train d’impulsions obtenu a néanmoins un rapport de cycle fixé à 1/5, ce qui peut être gênant pour certaines applications. Pour obtenir un rapport de cycle plus faible, il est possible d’utiliser la combinaison d’une fibre normale puis anormale [P10], mais ceci est au détriment de la qualité des impulsions obtenues qui présentent alors des piédestaux notables. Ce dispositif présente néanmoins l’avantage d’être plus robuste aux fluctuations potentielles de la valeur de la dispersion chromatique [P27].

Pour atteindre des rapports de cycle plus faibles que 1/5 tout en bénéficiant d’une grande qualité d’impulsion, nous nous sommes tournés vers un arrangement de quatre segments de fibre (Figure 27), chaque segment correspondant à une étape physique bien déterminée. Ainsi, le premier segment de fibre anormale effectue la remise en forme du battement initial en un train d’impulsions gaussiennes (Figure 28(1)). Ces impulsions gaussiennes se transforment ensuite passivement en impulsions paraboliques (technique basée sur l’effet détaillé dans la section 3.2 du chapitre II). La forme parabolique est stabilisée et le chirp linéaire de l’impulsion est accru lors de la propagation dans le troisième segment de fibre qui est fortement non-linéaire (Figure 28(3)). Enfin, le dernier segment de fibre est destiné à compenser l’intégralité

⁵⁵ S. Pitois, J. Fatome, and G. Millot, "Generation of 160-GHz transform-limited pedestal-free pulse train through multiwave mixing compression of a dual frequency beat signal," *Opt. Lett.* **27**, 1729-1731 (2002).

⁵⁶ J. Fatome, S. Pitois, and G. Millot, "20-GHz-to-1-THz repetition rate pulse sources based on multiple four-wave mixing in optical fibers," *IEEE J. Quantum Electron.* **42**, 1038-1046 (2006).

du chirp linéaire normal de l'impulsion pour obtenir une impulsion en limite de Fourier de grande qualité avec des sous-structures très réduites (Figure 28(3)) [P20].

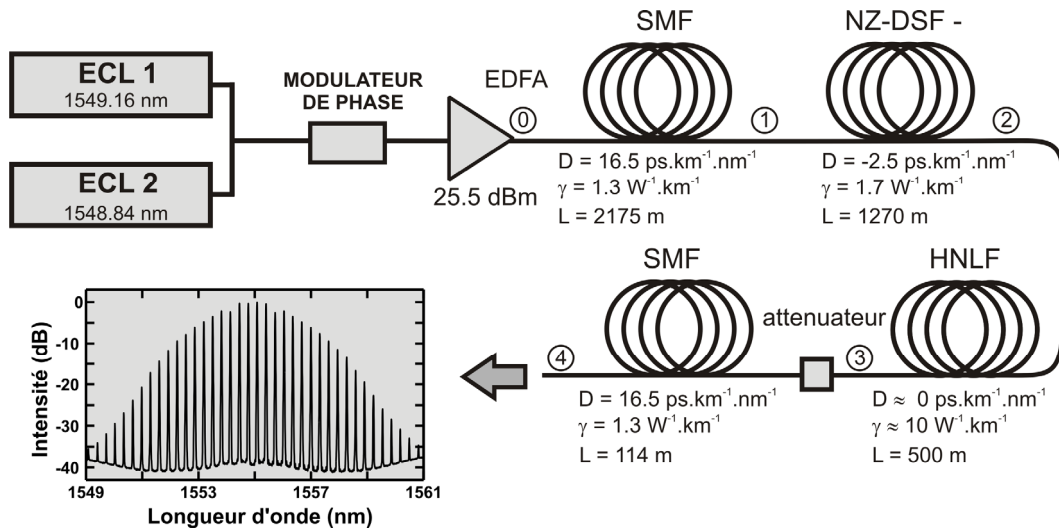


Figure 27 – Montage expérimental pour la génération d'un train d'impulsions à 40 GHz avec un rapport de cycle réduit [P20].

Les expériences menées à un taux de répétition de 40 GHz ont alors confirmé tout le potentiel de cet arrangement de quatre fibres ⁵⁷ avec un rapport de cycle de seulement 1/15. Une modulation en phase du battement initial est néanmoins indispensable afin d'éviter les conséquences néfastes de la rétrodiffusion Brillouin [A56]. Le contraste mesuré expérimentalement entre la puissance crête de l'impulsion et les piédestaux, est excellent, proche de 20 dB et l'impulsion retrouvée par FROG correspond parfaitement aux simulations numériques basées sur l'ESNL.

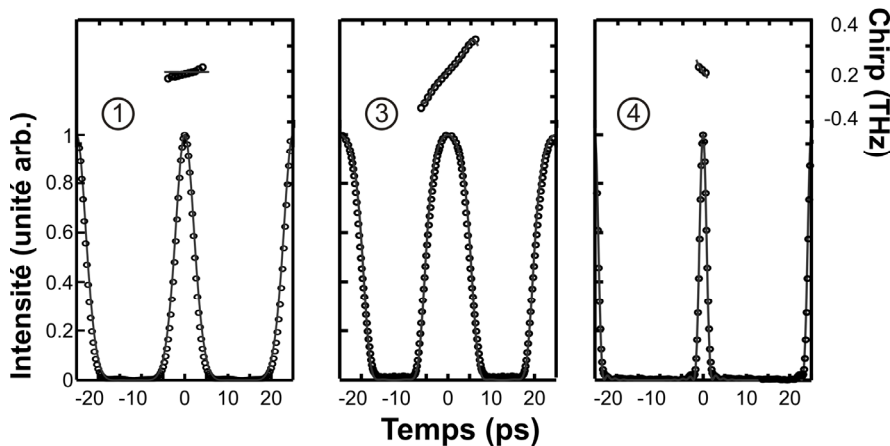


Figure 28 – Résultats expérimentaux obtenus par caractérisation FROG aux différents points du montage. Les résultats expérimentaux (cercles) sont comparés à des simulations numériques basées sur l'ESNL (trait gris continu) [P20].

A noter que le nombre de segments entrant en jeu peut être réduit à trois seulement (les deux segments centraux étant fusionnés), mais la forme obtenue avant l'étape de compression finale n'est plus parfaitement parabolique, ce qui se traduit par des piédestaux légèrement plus importants ⁵⁸ [P30].

⁵⁷ Des montages basés sur un nombre beaucoup plus important de segments allant jusqu'à plusieurs dizaines avaient déjà été présentés : T. Inoue and S. Namiki, "Pulse compression techniques using highly nonlinear fibers," *Laser & Photonics Rev.* 2, 83-99 (2008).

⁵⁸ On se rapproche alors plus d'une compression temporelle comme celle démontrée par Tomlinson et al : W. J. Tomlinson, R. H. Stolen, and C. V. Shank, "Compression of optical pulses chirped by self-phase modulation in fibers," *J. Opt. Soc. Amer. B* 1, 139-149 (1984).

4. SOURCE POUR LA MICROSCOPIE CARS

4.1. Contexte

La microscopie CARS⁵⁹ est un nouveau concept de microscopie non-linéaire qui se développe surtout depuis une dizaine d'années dans le domaine de la biologie⁶⁰. Dans le milieu à tester, un faisceau interagit avec un faisceau sonde décalé vers les longueurs d'onde plus élevées et génère éventuellement, suivant le décalage spectral, un signal anti-Stokes. L'efficacité de la génération de l'onde anti-Stokes dépend des liaisons chimiques présentes. Tenir compte de la sélectivité intrinsèque du processus CARS implique d'utiliser un écart fréquentiel judicieux entre la pompe et la sonde, cet écart devant correspondre à la réponse Raman des espèces chimiques étudiées. A cette contrainte s'ajoute la nécessité d'utiliser des signaux impulsionnels (quelques picosecondes) pour atteindre des puissances crête suffisantes, nécessitant donc une synchronisation temporelle fine entre la pompe et la sonde.

Tous ces exigences ont quelque peu freiné la diffusion de cette technique prometteuse. Les sources disponibles sont en effet complexes et onéreuses à mettre en œuvre. Toute solution permettant à terme de lever ce verrou sera décisive pour le développement à plus large échelle de la microscopie CARS. Ceci a donc constitué l'objet d'un projet accepté par l'Agence Nationale de la Recherche, le projet SOFICARS, en collaboration avec FEMTO-ST (J.M. DUDLEY), l'équipe MOSAIC (H. RIGNEAULT) et deux industriels, Amplitude SYSTEM (H. MOTTAY) et l'Oréal.

Nous nous sommes ainsi intéressés à une technique exploitant le décalage Raman progressif d'une impulsion soliton dans une fibre microstructurée de silice. Ceci a constitué pour moi un domaine de recherche totalement nouveau pour plusieurs raisons. Tout d'abord, atteindre l'objectif fixé nécessite d'opérer en régime de dispersion anormale alors que la quasi-totalité de mes travaux précédemment présentés avaient été menés en régime de dispersion normale. Les dynamiques impulsionnelles observées sont donc fondamentalement différentes. De plus, ce projet s'effectue autour des longueurs d'onde du proche infrarouge (800 nm à 1060 nm pour la pompe), si bien que la réalisation expérimentale ne bénéficie plus de la facilité d'utilisation des dispositifs des télécommunications optiques. Enfin, notons qu'en raison des élargissements spectraux visés (plusieurs dizaines de THz), l'équation de Schrödinger non-linéaire dans sa version standard (Eq. (4)) n'est plus valide et il s'avère indispensable de prendre en compte des termes correctifs pour modéliser les effets linéaires et non-linéaires d'ordres supérieurs. On parle alors d'équation de Schrödinger non-linéaire généralisée dont la capacité à reproduire les expériences de supercontinua dans les fibres a été à maintes reprises testée⁹ :

$$i \frac{\partial \psi}{\partial z} = -i \frac{\alpha}{2} \psi - \sum_{k \geq 2} \frac{i^k \beta_k}{k!} \frac{\partial^k \psi}{\partial T^k} - \gamma \left(1 + \frac{i}{\omega_0} \frac{\partial}{\partial T} \right) \times \psi \int_{-\infty}^T R(T') |\psi(T-T')|^2 dT', \quad (8)$$

avec β_i les termes de dispersion d'ordre i , $R(T)$ la réponse non-linéaire qui prend en compte la réponse instantanée de la silice et la contribution Raman retardée de la silice. $1/\omega_0 \partial/\partial T$ représente le terme d'auto-raïdissement.

Les travaux présentés dans les sections 4 et 5 de ce chapitre doivent beaucoup à Bertrand KIBLER⁶¹ qui s'est particulièrement impliqué tant au niveau expérimental que numérique.

⁵⁹ CARS : Coherent Anti-Stokes Raman Scattering (Diffusion Raman cohérente anti-Stokes)

⁶⁰ Volkmer, A.; Cheng, J.-X.; Xie, X. S., Vibrational imaging with high sensitivity via epidetected coherent anti-stokes Raman scattering microscopy. *Phys. Rev. Lett.* **2001**, 87, (2), 02391.

⁶¹ Bertrand KIBLER a été postdoctorant financé par les projets ANR SUPERCODE (2007-2008) puis PERSYST 2 (2008-2009). En octobre 2009, il est nommé chargé de recherches à l'ICB.

4.2. Sources supercontinuum à base de fibres microstructurées : impact du second zéro de dispersion

Publications liées : P33, P38, A25, A47, A50

La technique utilisée se base sur le décalage spectral d'un soliton ultrabref sous l'influence de la réponse intrapulse Raman de la silice⁶² : l'impulsion soliton évoluant dans une fibre à dispersion anormale voit ainsi sa fréquence optique progressivement diminuer (sa longueur d'onde augmenter). Cette propriété présente un intérêt évident pour l'application visée : à partir d'un unique laser initial délivrant l'impulsion pompe, il sera possible de générer l'impulsion Stokes en décalant dans une fibre optique le spectre de l'impulsion initiale.

Disposer d'une fibre à dispersion anormale dans le proche infrarouge impose d'utiliser une fibre microstructurée où l'agencement périodique de trous d'air permet de moduler les propriétés dispersives de la fibre. Pour nos premiers essais, nous avons opté pour une fibre commercialisée par la société Crystal Fiber⁶³, les impulsions initiales étant délivrées par un laser femtoseconde titane-saphir.

Le spectre obtenu en sortie de fibre est représenté en fonction de la puissance initiale injectée Figure 29(a) : l'augmentation de la puissance initiale conduit clairement au décalage d'un premier soliton vers les hautes longueurs d'onde. Mais la dynamique non-linéaire en jeu est assez complexe. En effet, pour les puissances plus importantes, nous constatons l'apparition de solitons d'ordre supérieur qui fissionnent pour donner naissance à des solitons fondamentaux indépendants (S2). Des paires de solitons liés⁶⁴ peuvent également apparaître et se propager [A47].

Le point marquant de ces expériences reste néanmoins l'observation d'une stabilisation du décalage spectral autour d'une certaine valeur. Ce comportement est à relier au profil spectral de dispersion de la fibre utilisée qui présente deux zéros de dispersion, le second zéro de dispersion étant situé aux alentours de 1250 nm : à son approche, une onde dispersive est générée en régime de dispersion normale et limite le décalage spectral⁶⁵. Des simulations numériques ont permis de vérifier ce comportement expérimental.

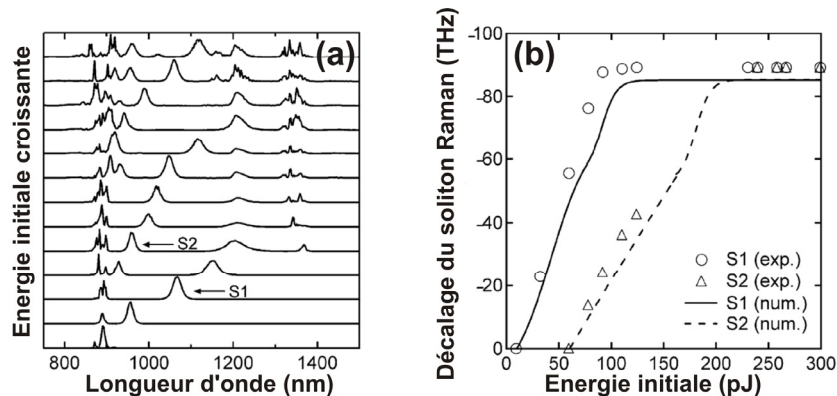


Figure 29 - (a) Évolution du spectre d'une impulsion femtoseconde évoluant dans une fibre microstructurée en fonction de l'énergie initiale (b) Évolution des décalages fréquentiels du premier et second soliton en fonction de l'énergie initiale. Les résultats expérimentaux (cercles et triangles) sont comparés aux prédictions numériques de l'ESNL généralisée (lignes continues et pointillées) [P33]

Cette stabilisation par le second zéro de dispersion des différents solitons autour de la même longueur d'onde permet de disposer éventuellement d'une source de deux impulsions à la même longueur d'onde mais avec un écart temporel variable [A25]. Nous avons également constaté un impact bénéfique sur la gigue temporelle des impulsions décalées spectralement.

⁶² Mitschke, F. M.; Mollenauer, L. F., Discovery of the soliton self-frequency shift. *Opt. Lett.* **1986**, 11, (10), 659-661.

⁶³ Fibre PM-HNLF 1060. Crystal Fiber est désormais devenu NKT Photonics.

⁶⁴ N. Akhmediev, W. Krolikowski, and A. J. Lowery, "Influence of the Raman-effect on solitons in optical fibers," *Opt. Commun.* **131**, 260-266 (1996).

⁶⁵ Skryabin, D. V.; Luan, F.; Knight, J. C.; Russell, J. S., Soliton self-frequency shift cancellation in photonic crystal fibers. *Science* **2003**, 201, 1705-1708.

Dans un autre contexte, nous avons également profité de cette propriété pour déterminer expérimentalement la longueur d'onde du second zéro de dispersion de fibres microstructurées atypiques. Ainsi, dans le cadre d'un échange Polonium entre l'institut de technologie de Wroclaw et l'ICB, nous avons disposé de plusieurs fibres à cœur suspendu où trois trous d'air encerclent un cœur de diamètre submicronique (Figure 30(a)). Un décalage spectral qui s'arrête pour générer une onde dispersive est clairement observé (Figure 30(b)). La valeur expérimentale alors trouvée pour le second zéro de dispersion a été confrontée à la valeur prédite par un ensemble de modélisations numériques réalisé dans le cadre d'une action COST ⁶⁶ (Figure 30(c)).

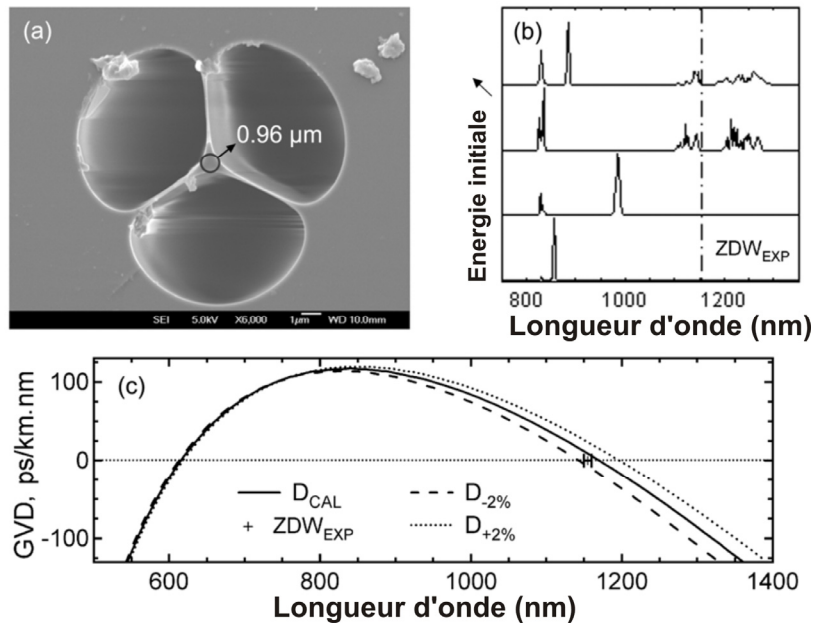


Figure 30 - (a) Photographie à microscopie électronique à balayage du profil transverse de la fibre (b) Spectres de sortie enregistrés pour différentes puissances initiales (c) Simulations numériques prédisant le profil de dispersion de la fibre à cœur suspendu pour des variations de 2% du diamètre de cœur. [P33]

4.3. Sources contrôlables en fréquence basée sur le décalage Raman soliton

Les résultats précédents ont montré que le profil de dispersion de la fibre était un élément clef à optimiser. Ainsi, pour obtenir un décalage spectral conséquent, il est préférable de disposer d'une fibre avec un zéro de dispersion unique, ou bien un second zéro de dispersion situé à des longueurs d'onde élevées. La valeur de la dispersion locale joue également un rôle important. En effet, pour les applications traditionnelles de génération de supercontinua, la fibre idéale dispose d'un zéro de dispersion le plus proche possible de la longueur d'onde du pompage, cela afin de diminuer les puissances nécessaires à l'élargissement spectral. Or, dans le cadre du projet SOFICARS, notre objectif est quelque peu différent et plutôt que l'étendue spectrale, nous privilégions avant tout l'énergie contenue dans les impulsions décalées fréquemment. En effet, compte tenu de la nature solitonique de ces impulsions, un équilibre strict entre puissance crête, durée temporelle, non-linéarité et dispersion existe ⁶. Ainsi une fibre ayant une dispersion anormale élevée permet d'obtenir des solitons avec une énergie plus importante et limite les solitons additionnels. Un autre point positif est que la durée des impulsions décalées spectralement sera augmentée, autrement dit elles seront plus fines spectralement. Ce point est particulièrement important car il déterminera in-fine la résolution du dispositif CARS recherché.

Ces différents éléments vérifiés expérimentalement (Figure 31) confirment aujourd'hui l'intérêt de la source pour les applications CARS à venir.

⁶⁶ Action COST 299 FIDES. Les groupes de recherche de l'université polonaise de Wroclaw et de l'université italienne de Brescia ont notamment participé à ces modélisations.

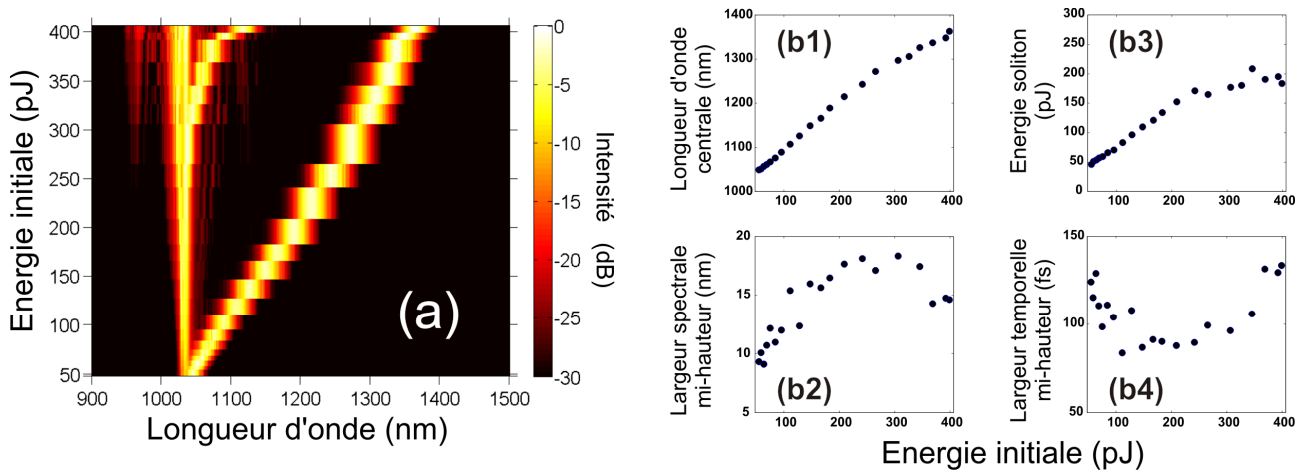


Figure 31 - (a) Évolution du spectre en fonction de l'énergie initiale injectée dans la fibre à cristaux photoniques (b) Évolution des propriétés de l'impulsion décalée spectralement. (b1) Évolution de la longueur d'onde centrale (b2) Évolution de la largeur spectrale (b3) Évolution de l'énergie soliton (b4) Évolution de la largeur temporelle

5. SUPERCONTINUUM DANS UNE FIBRE À BANDE PHOTONIQUE INTERDITE

Publications liées : P39, A70, A79

Dans le cadre de la génération maîtrisée de supercontinua et toujours en collaboration avec les groupes de recherche polonais, nous nous sommes intéressés à un autre type de fibre optique, les fibres à bande interdite photonique solides. Ces fibres sont constituées d'un agencement d'inclusions fortement dopées Germanium dont l'indice optique est supérieur à l'indice du cœur (voir encadré de la Figure 32(a)). Le processus habituel de guidage dans les fibres optiques, la réflexion interne, n'est donc plus possible et des bandes photoniques interdites apparaissent comme il peut être vu Figure 32(a). Les propriétés linéaires et non-linéaires de ces fibres ont été modélisées par les chercheurs polonais et montrent notamment qu'un zéro de dispersion est présent au centre de la seconde bande (Figure 32(b1)), ce qui est potentiellement intéressant pour la génération de supercontinuum. Ces résultats peuvent être comparés avec les propriétés des inclusions hautement dopées Germanium (Figure 32(b2)) qui présentent une dispersion normale beaucoup plus élevée. Notons néanmoins que le coefficient non-linéaire des inclusions est lui aussi plus élevé que celui du cœur.

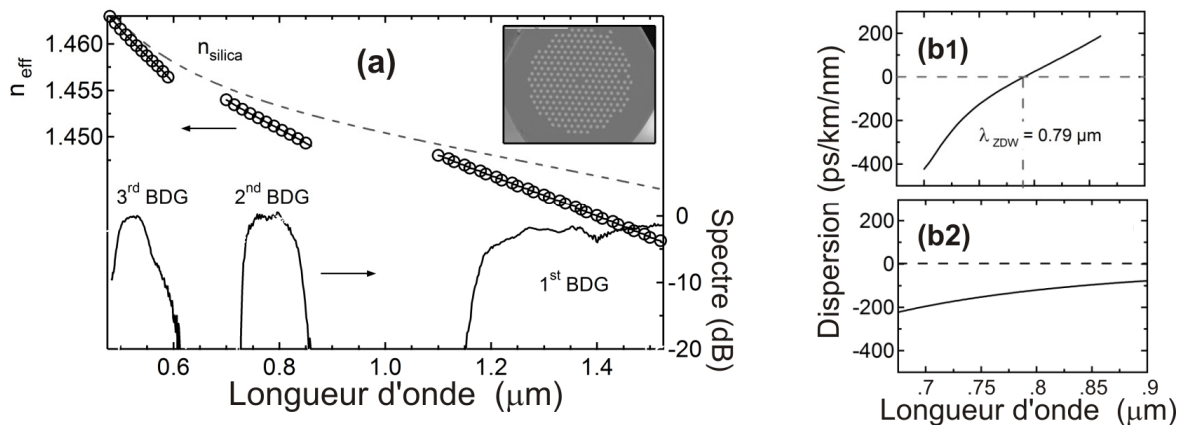


Figure 32 - (a) Indice effectif de propagation et position des bandes de transmission dans la fibre à bande photonique interdite à cœur solide. Les résultats des simulations numériques (haut) sont comparés avec les résultats expérimentaux (bas). En encadré, la photographie au microscope électronique à balayage de la structure de la fibre. (b) Évolution spectrale des propriétés dispersives pour un guidage dans le cœur de la fibre (b1) et dans les inclusions (b2).

A partir d'un pompage femtoseconde par laser titane-saphir, nous avons étudié la dynamique non-linéaire dans le cœur des fibres (Figure 33(a)) ainsi que dans les inclusions (Figure 33(b)). Nous constatons alors deux dynamiques totalement différentes [P39]. La propagation dans le cœur de la fibre est marquée par une évolution traditionnelle avec fission de l'impulsion initiale, génération d'onde dispersive et décalage solitonique⁶⁷ (Figure 33(c)). Néanmoins l'élargissement spectral est limité par la largeur finie de la bande de transmission : sur les bords de cette bande, une augmentation très forte de la dispersion conduit à stopper le décalage solitonique. Au contraire, dans les inclusions germanium, le spectre montre le comportement typique d'une impulsion se propageant dans une fibre normale, tel que nous l'avons évoqué dans la section 2 de ce chapitre. L'impulsion reste entière (pas de fission) et les bandes de transmission n'ont pas d'effet apparent sur la dynamique enregistrée (Figure 33(c)). Les résultats expérimentaux sont en excellent accord avec les prédictions numériques (Figure 33(d) et Figure 33(e)).

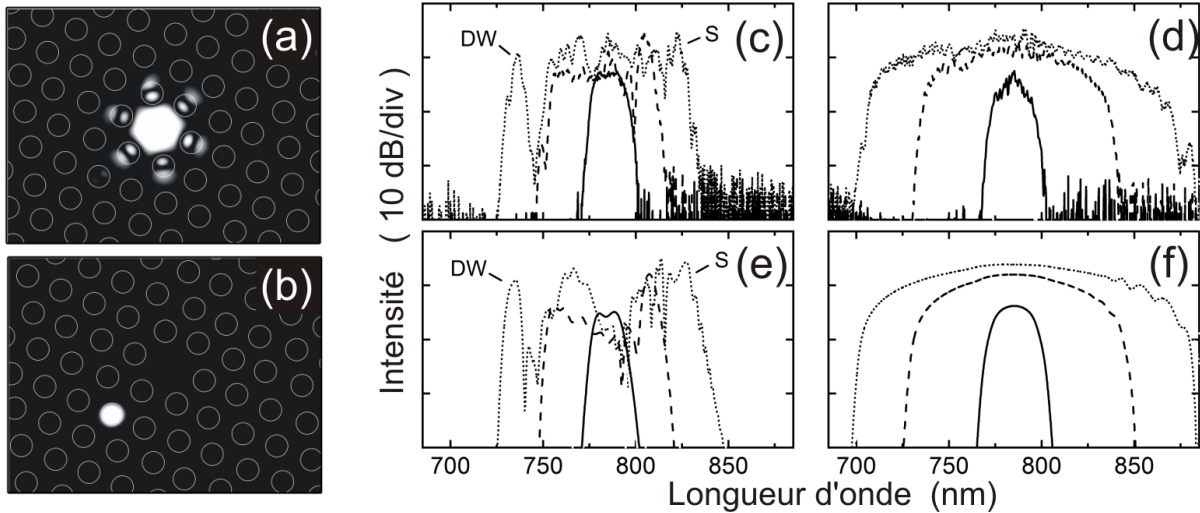


Figure 33 - Profil de mode quand la lumière est couplée dans le cœur de silice de la fibre (a) ou bien dans une inclusion germanium (b). La structure géométrique de la fibre est superposée. (c) Spectres optiques expérimentaux enregistrés pour des puissances crêtes croissantes (0.35, 2 et 6.6 kW) pour les impulsions injectées dans le cœur central (d) Résultats numériques correspondants. (e) Spectres expérimentaux obtenus pour différentes puissances crêtes (2, 13 et 28 kW) injectées dans les inclusions germanium. (f) Simulations numériques correspondantes [P39].

6. CONCLUSION ET SYNTHÈSE DU THÈME ABORDÉ

Grâce aux différents travaux que nous avons menés autour de nouvelles sources optiques basées sur des fibres non-linéaires, nous avons abordé aussi bien les domaines des télécommunications optiques que les contraintes des applications biologiques. Suivant les objectifs visés, des techniques totalement différentes ont été exploitées, que ce soit en régime de propagation solitonique ou bien en régime normal de dispersion. Pour plusieurs de ces réalisations, le travail de Bertrand KIBLER a été plus qu'essentiel.

Ce thème de recherche m'a permis de nouer de nombreuses interactions fructueuses dans le cadre de collaborations nationales et internationales. Le dialogue continu avec les différents partenaires a ainsi permis de cerner précisément leurs attentes et a guidé ces recherches orientées vers les applications concrètes. Une notion de cahier des charges s'est ainsi progressivement dessinée. Une certaine liberté restait néanmoins possible, ce qui nous a permis de tester les potentialités de fibres optiques innovantes telles que les fibres optiques à cœur suspendu ou bien des fibres à bande photonique interdite.

⁶⁷ A. Fuerbach, P. Steinvurzel, J. A. Bolger, and B. J. Eggleton, "Nonlinear pulse propagation at zero dispersion wavelength in anti-resonant photonic crystal fibers," *Opt. Express*, vol. 13, pp. 2977-2987, 2005.

Thème abordé	Sources optiques fibrées de nouvelle génération
Période	2006 – 2009
Projets ou financements	Bourse postdoctorale Marie Curie (2005-2006) Bourse postdoctorale Carnot (2005-2006) Projet ANR Supercode (2006-2009) Projet ANR Soficars (2007-2010) Projet ANR Iliade (2007-2010) coord. local : S. PITOIS Projet Hubert Curien - Polonium (2007-2008) coord. local : S. WABNITZ Bonus Qualité Recherche de l'Université de Bourgogne Projet Hors Contrat de Plan (2009) Action COST 299
Étudiants	Zhi An JIANG (Elève Ingénieur, 2008-2009)
Collaborations locales	Dr. Bertrand KIBLER Dr. Julien FATOME Dr. Stéphane PITOIS Pr. Stefan WABNITZ Pr. Guy MILLOT
Collaborations extérieures	ORC : Pr. Dave RICHARDSON, Francesca PARMIGIANI Telecom PARIS : Dr. Cédric WARE PhLam, Lille : Pr. Catherine LEPERS Artemis, Nice : Dr. Michel LINTZ Université de Wroclaw : Pr. Waclaw URBANCZYK, Dr. Taddeus MARTYNKIEN
Publications liées	P10, P15, P20, P27, P30, P31, P33, P38
Publications annexées en fin de mémoire	<p>P15 F. Parmigiani, C. Finot, K. Mukasa, M. Ibsen, M.A.F Roelens, P. Petropoulos and D.J. Richardson : <i>Ultra-flat SPM-broadened spectra in a highly nonlinear fiber using parabolic pulses formed in a fiber Bragg grating</i>, Optics Express 14, 7617-7622 (2006).</p> <p>P20 C. Finot, J. Fatome, S. Pitois and G. Millot : <i>All-fibered high-quality low duty-cycle 20-GHz and 40-GHz picosecond pulse sources</i>, Photonics Technology Letters 19, 1711-1713 (2007).</p> <p>P31 C. Finot, B. Kibler, L. Provost and S. Wabnitz : <i>Beneficial impact of wave-breaking or coherent continuum formation in normally dispersive nonlinear fibers</i>, Journal of Optical Society of America B 25, 1938-1948 (2008).</p> <p>P33 B. Kibler, C. Finot, G. Gadret, G. Millot, J. Wojcik, M. Szpulak and W. Urbanczyk : <i>Soliton self-frequency shift compensation and zero dispersion wavelength measurement in suspended core fibers</i>, Electronics Letters 44, 1370-1371 (2008).</p>
Communications liées	CI7, CI15, CI16, CI21, CI23, CI26, CI27, CI34 CN13, CN17 S3, S5, S6, S8, S9, S10 Post26, Post24, Post32

CHAPITRE V

LES STRUCTURES OPTIQUES EXTRÊMES

Dans ce dernier chapitre, je présente mes travaux les plus récents menés dans le domaine émergent des structures optiques extrêmes. Après avoir précisé ce qu'on peut entendre par ce terme, je donnerai des exemples d'études d'ondes scélérates optiques menées dans des configurations supercontinuum où les instabilités de modulation jouent un rôle important. J'aborderai ensuite le cas des amplificateurs optiques dans lesquels le transfert instantané et exponentiel de l'incohérence de la pompe entraîne également la génération de structures extrêmes.

1. INTRODUCTION

Dans les chapitres précédents, nous nous sommes intéressés au comportement d'impulsions uniques dont l'évolution était parfaitement déterminée par la résolution de l'ESNL. Par exemple, dans le second chapitre, nous avons souligné que les impulsions paraboliques étaient remarquablement stables par rapport aux fluctuations de l'impulsion initiale et que le résultat obtenu en sortie de l'amplificateur dépendait principalement de l'énergie initiale des impulsions.

Nous nous intéressons maintenant à un comportement tout à fait différent où une analyse statistique révèle des fluctuations significatives des impulsions obtenues en sortie du système optique fibré. Des centaines d'enregistrements sont alors nécessaires pour cerner notamment les impulsions les plus rares et les plus intenses qui peuvent émerger. Ce sujet d'étude a été initié à la fin de l'année 2007 par les recherches menées dans le domaine des supercontinua optiques par Solli et al.¹⁰ rapidement suivies par d'autres travaux^{68,69}. L'analogie entre les domaines hydrodynamique et optique (Figure 34) a alors été avancée pour suggérer un lien entre ces structures optiques aussi rares qu'intenses et les vagues scélérates dont le potentiel destructeur est désormais scientifiquement attesté. Ainsi, dans les deux domaines, des statistiques dites « extrêmes », c'est-à-dire déviant fortement des distributions usuelles de forme Gaussienne et présentant une queue marquée vers des événements de haute intensité, peuvent être enregistrées.

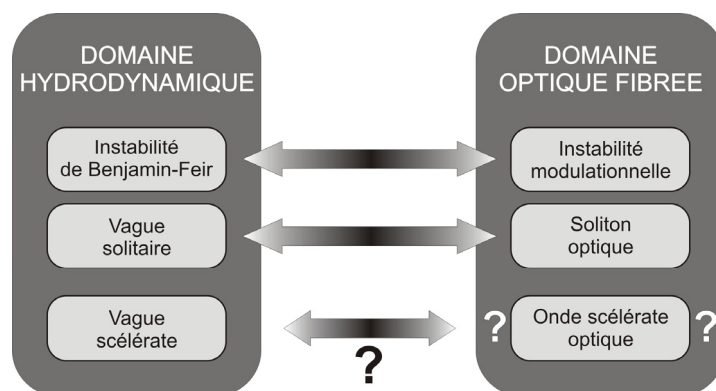


Figure 34 - Analogie simplifiée entre les domaines hydrodynamique et optique

⁶⁸ J. M. Dudley, G. Genty, and B. J. Eggleton, "Harnessing and control of optical rogue waves in supercontinuum generation" *Opt. Express*, vol. 16, pp. 3644-3651, 2008.

⁶⁹ A. Mussot, A. Kudlinski, M. I. Kolobov, E. Louvergneaux, and M. Taki, "Convective instabilities and optical rogue waves in fibers with CW pumping," in *LEOS Winter Topical Meeting*, Innsbruck, 2009, p. TUC2.5.

Dans ce chapitre, je décrirai tout d'abord les travaux que nous avons conduits dans diverses configurations supercontinua où des instabilités de modulation convertissent le bruit initial en fluctuations de grande amplitude. Ensuite, nous étudierons un autre type de système où les fluctuations observées sont à relier à une pompe partiellement incohérente. Les variations de la pompe sont alors exponentiellement transférées au signal amplifié.

2. STATISTIQUES EXTRÊMES DANS LES SUPERCONTINUA

L'étude des structures extrêmes a été initiée dans le domaine des supercontinua générés dans des fibres à cristaux photoniques. L'évolution spectrale suivait alors la dynamique usuelle des supercontinua dans une fibre à un zéro de dispersion pompée en régime de dispersion anormale : dans une première phase, la compression vers des solitons d'ordre supérieur et/ou l'instabilité modulationnelle scalaire d'ordre 2 se développent et brisent l'impulsion initiale picoseconde en un train de solitons qui évoluent ensuite spectralement sous l'influence de la réponse Raman intrapulse⁹. Cette configuration typique ayant déjà fait l'objet de plusieurs travaux par d'autres groupes, avec Bertrand KIBLER et Kamal HAMMANI, nous nous sommes à Dijon concentrés sur l'étude numérique de dynamiques non-linéaires différentes observées dans les fibres microstructurées avec certains profils de dispersion.

2.1. Dans une fibre à deux zéros de dispersion

Publications liées : P38, A72, A79

La première configuration que nous avons étudiée est basée sur une fibre microstructurée avec deux zéros de dispersion dont les paramètres expérimentaux sont identiques à la fibre utilisée dans le cadre du projet SOFICARS (le profil de dispersion est représenté Figure 35(a)). Pour avoir une bonne image du comportement statistique, nous avons systématiquement réalisé un minimum de 1000 simulations numériques. Les fluctuations temporelles et spectrales d'une simulation à l'autre sont tout à fait visibles sur la Figure 35(b-c) et il est clair que dans de telles conditions, raisonner sur un comportement temporel moyen a peu de sens.

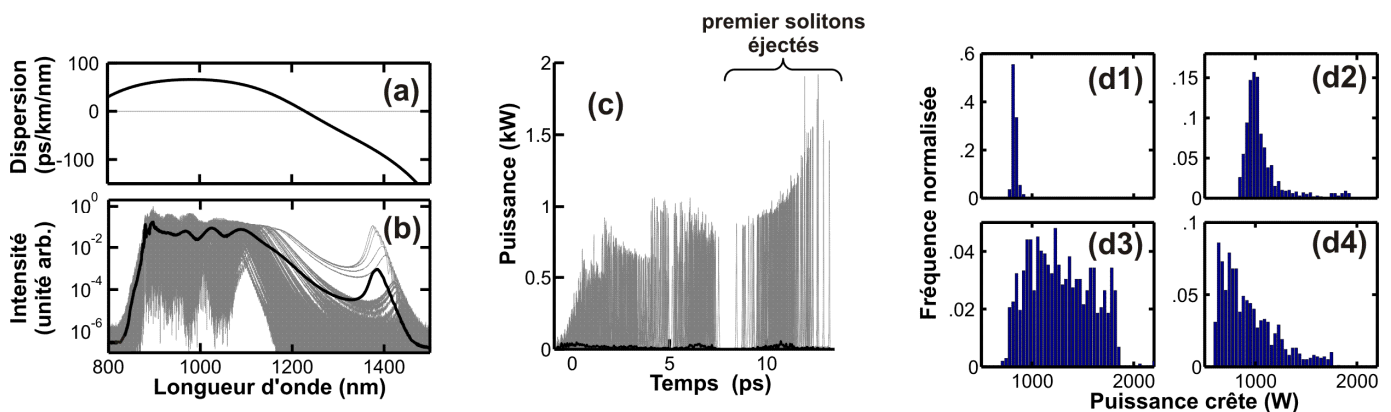


Figure 35 - (a) Profil de dispersion de la fibre étudiée. (b-c) Résultats de simulations numériques pour une énergie initiale de 200 pJ. Les profils moyens d'intensité spectraux (b) et temporels (c) (lignes noires) sont comparés avec la superposition de 200 simulations (lignes grises). Les distributions statistiques de la puissance crête du premier soliton décalé en fréquence sont représentées figures (d1-d4) pour des énergies initiales de 150, 200, 275 et 330 pJ [P38].

Dans ces études, nous nous sommes principalement focalisés sur la puissance crête des solitons en sortie de fibre. Plutôt que d'employer une procédure de filtrage spectral^{11 68 69}, nous avons pris le parti d'isoler numériquement le premier soliton éjecté pour en mesurer la puissance crête (Figure

35(c)). Les distributions statistiques obtenues pour différentes énergies initiales représentées Figure 35(d) mettent clairement en évidence un changement radical de forme de cette distribution, qui passe d'une distribution quasi-Gaussienne à une distribution triangulaire, en passant par une distribution extrême ou une distribution quasi-uniforme.

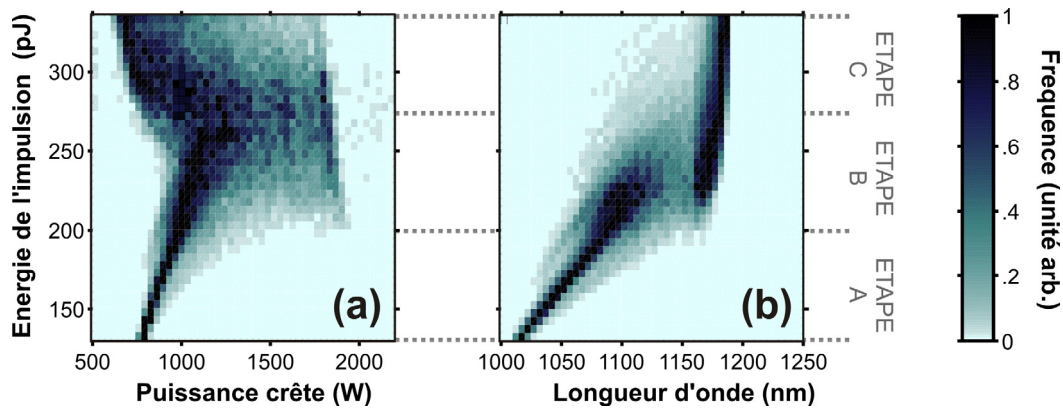


Figure 36 - Évolution avec l'énergie de pompe de la distribution statistique des puissances crêtes (a) et de la longueur d'onde centrale (b) du premier soliton décalé. Les distributions sont normalisées à 1 pour la probabilité la plus élevée. Les distributions sont calculées à partir d'un ensemble de 1000 simulations [P38].

Pour mieux comprendre ce changement de forme qui n'avait jusque là jamais été observé, nous avons systématiquement étudié la distribution de différents paramètres en fonction de l'énergie de l'impulsion initiale (Figure 36). Trois étapes caractéristiques ont été dégagées. Dans la première étape (étape A), les impulsions subissent une évolution similaire à l'évolution subie dans une fibre avec un zéro de dispersion unique. Une distribution en forme de L caractéristique des événements extrêmes se développe alors et s'accroît progressivement. En effet, au fur et à mesure que les longueurs d'onde des solitons créés se rapprochent du second zéro de dispersion, la dynamique s'accroît⁷⁰ en raison d'une dispersion plus faible. La génération d'une onde dispersive en régime de dispersion normale (comme nous l'avons détaillée dans le chapitre IV, section 4.2) stabilise progressivement le décalage spectral des impulsions les plus puissantes⁶⁵ (étape B) [P33]. Une partie de l'énergie est alors cédée à l'onde dispersive, diminuant d'autant la puissance crête. Pour des énergies initiales plus élevées, l'ensemble des impulsions atteint le second zéro de dispersion (étape C) [P38].

Des études complémentaires ont confirmé que pendant tout le processus, l'impulsion restait très proche d'un soliton fondamental. La principale conclusion de ce travail est que le profil de dispersion de la fibre utilisée tient un rôle significatif dans l'évolution statistique des impulsions et qu'il est possible de contrôler la forme de la distribution alors générée [P38].

2.2. Dans une fibre à trois zéros de dispersion

Publications liées : P50

Nous avons étendu le précédent travail à une configuration présentant trois zéros de dispersion. En effet, les progrès dans la conception des fibres microstructurées permettent désormais d'obtenir ce genre de profils atypiques (Figure 37(a)). Un phénomène physique assez exotique peut alors se produire⁷¹ : l'effet tunnel spectral par lequel une impulsion passe d'une zone de dispersion anormale

⁷⁰ P. V. Mamyshev, P. G. J. Wigley, J. Wilson, G. I. Stegeman, V. A. Semenov, E. M. Dianov, and S. I. Miroshnichenko, "Adiabatic compression of Schrödinger solitons due to the combined perturbations of higher-order dispersion and delayed nonlinear response," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 71, pp. 73-76, 1993.

⁷¹ B. Kibler, P. A. Lacourt, F. Courvoisier, and J. M. Dudley, "Soliton spectral tunneling in photonic crystal fibre with subwavelength core defect," *Electron. Lett.*, vol. 43, 2007.

à l'autre. Cet effet non-linéaire nécessite a priori des impulsions ayant un spectre étendu et son étude s'était pour l'instant exclusivement concentrée sur l'utilisation d'impulsions ultra-brèves (d'une durée inférieure à 100 fs).

Or il nous est apparu que des impulsions initiales plus longues (typiquement la picoseconde) permettaient également l'observation de ce phénomène. En effet, dans la première zone de dispersion anormale, l'impulsion picoseconde fissionne en plusieurs sous-impulsions ultra-brèves qui évoluent ensuite par effet Raman intra-pulse vers les hautes longueurs d'onde où elles subissent le passage spectral recherché. Nous avons alors étudié statistiquement les propriétés de l'onde récupérée dans la seconde zone à dispersion normale (Figure 37(b-c)). La distribution de l'énergie révèle différents paliers qui correspondent au passage systématique d'un premier soliton, suivi par le passage progressif d'un second. Les statistiques portant sur les propriétés du premier soliton dans la zone anormale soulignent l'existence de quelques événements avec une puissance beaucoup plus élevée que la moyenne. Cela ne constitue pas forcément une surprise, les impulsions ultrabrèves résultant de la fission initiale d'une impulsion picoseconde, phénomène extrêmement sensible au bruit ⁴⁹. Notons néanmoins que la statistique des solitons est plutôt étroite comparé à des études précédentes. La remontée forte de la dispersion anormale après le troisième zéro de dispersion contribue en effet fortement à limiter la dynamique non-linéaire.

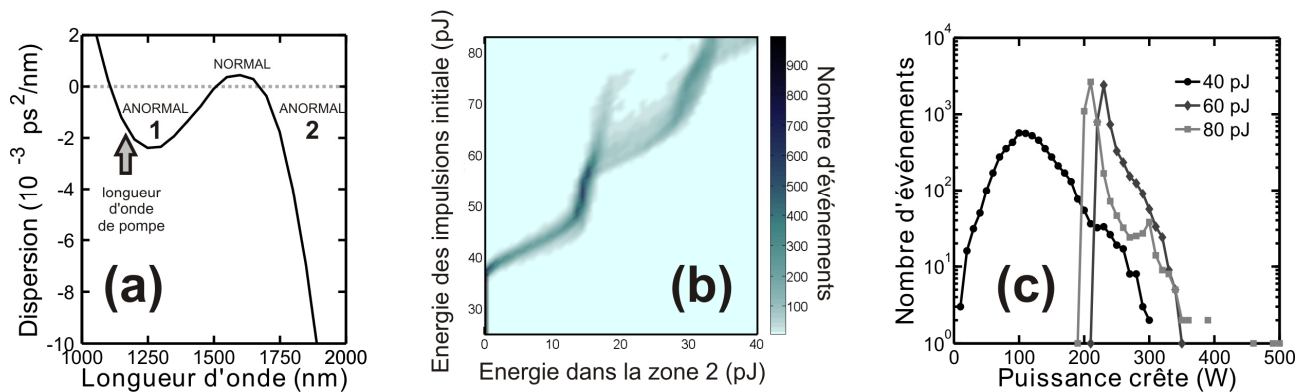


Figure 37 – (a) Profil de dispersion utilisé (b) Énergie récupérée dans la seconde zone anormale pour différentes énergies de l'impulsion initiale. L'échelle de couleur indique la probabilité d'un résultat (1000 simulations par énergie initiale considérée). (c) Distribution statistique de la puissance crête des premiers solitons obtenus dans la zone 2 pour trois énergies de pompe initiales (5000 simulations ont été effectuées par énergie initiale) [P50]

2.3. Dans les systèmes à instabilité modulationnelle d'ordre 4

Publications liées : P49, A78

L'intégralité des travaux menés précédemment dans le domaine des événements extrêmes dans les fibres optiques résultait d'un pompage dans le régime de dispersion anormale où l'instabilité modulationnelle scalaire peut se développer et amplifier les fluctuations résultant du bruit. Or, d'autres processus d'instabilité existent également en régime de dispersion normale, ils mettent alors en jeu la dispersion d'ordre 4 ⁷². Ils ont été mis en évidence en 2003 par l'équipe dijonnaise ⁷³ dans le domaine des télécommunications. Le groupe néo-zélandais de J. D. HARVEY menait simultanément des recherches sur l'utilisation de fibres microstructurées ⁷⁴ et montrait l'émergence de bandes spectrales

⁷² La constante de propagation β de la fibre est alors approximée par un développement de Taylor jusqu'à l'ordre 4.

⁷³ S. Pitois and G. Millot, "Experimental observation of a new modulational instability spectral window induced by fourth-order dispersion in a normally dispersive single-mode optical fiber," *Opt. Commun.*, vol. 226, pp. 415-422, 2003.

⁷⁴ J. D. Harvey, R. Leonhardt, S. Coen, G. K. L. Wong, J. C. Knight, W. J. Wadsworth, and J. S. Russell, "Scalar modulation instability in the normal dispersion regime by use of a photonic crystal fiber," *Opt. Lett.*, vol. 28, pp. 2225-2227, 2003.

étroites avec des décalages spectraux significatifs (> 100 THz). Leurs résultats expérimentaux rappelés Figure 38(a1) illustrent parfaitement l'intérêt de cette technique pour les applications de conversion de fréquence, une pompe dans le rouge permettant de générer une onde anti-Stokes dans le bleu.

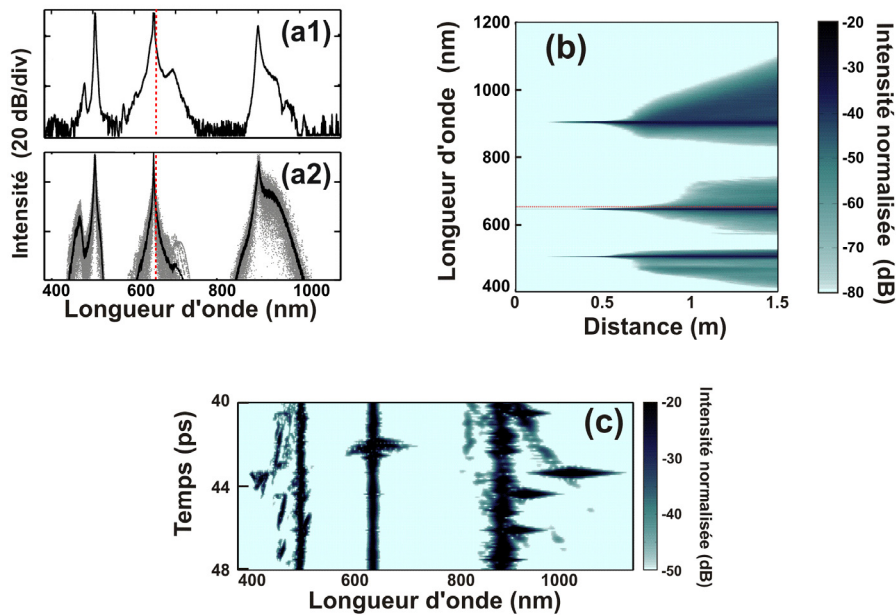


Figure 38 – (a) Spectres après 1 m de propagation. Les résultats expérimentaux (a1) issus de ⁷⁴ sont comparés aux résultats de simulations numériques (a2) (en trait noir, le spectre moyenné sur 50 simulations, en gris, la superposition des 50 simulations) (b) Évolution longitudinale moyenne du spectre. (c) Spectrogramme obtenu après 1.5 m de propagation. [P49]

Nous constatons néanmoins que la largeur des bandes obtenues dépasse expérimentalement largement celle prédite par la relation stricte d'accord de phase ⁷³, avec la présence notable de sous-structures spectrales qui élargissent l'onde Stokes vers les hautes longueurs d'onde et l'onde anti-Stokes vers les basses longueurs d'onde. Ce point n'a jamais été clairement jusque là expliqué. Pour connaître l'origine de ce comportement, nous avons donc modélisé numériquement cette situation expérimentale par l'ESNL généralisée (Eq. (8)). Un accord convenable entre prédictions numériques et expériences est obtenu (Figure 38(a2)). Compte tenu des variations du résultat d'une simulation à l'autre, il est néanmoins indispensable de moyennner les résultats sur un nombre important de réalisations ⁷⁵.

Forts de cette modélisation réaliste, nous avons simulé l'évolution longitudinale du spectre (Figure 38(b)). Le développement des bandes fines d'instabilité d'ordre 4 entre 25 et 50 cm est alors évident. Ces bandes s'élargissent ensuite spectralement de manière significative. Une représentation temps-fréquence (Figure 38(c), réalisée sur une simulation uniquement) explique mieux la nature du signal observé et notamment l'émergence dans la bande Stokes (qui évolue en régime de dispersion anormale) de solitons ultra-brefs qui glissent ensuite progressivement vers les hautes longueurs d'onde. Ces solitons sont liés dans la bande anti-Stokes à des ondes dispersives piégées ⁷⁶ qui se décalent progressivement vers les hautes fréquences [P49]. Dans ces processus, la modulation de phase croisée tient également un rôle particulièrement important ⁷⁷.

⁷⁵ Les résultats expérimentaux sont eux intrinsèquement moyennés, les enregistrements réalisés n'étant pas monocoup.

⁷⁶ A. V. Gorbach and D. V. Skryabin, "Light trapping in gravity-like potentials and expansion of supercontinuum spectra in photonic-crystal fibres," *Nature Photonics*, vol. 1, pp. 653-657, 2007. et N. Nishizawa and T. Goto, "Pulse trapping by ultrashort soliton pulses in optical fibers across zero-dispersion wavelength," *Opt. Lett.*, vol. 27, pp. 152-154, 2002.

⁷⁷ E. Rääkkönen, G. Genty, O. Kimmelma, M. Kaivola, K. P. Hansen, and S. C. Buchter, "Supercontinuum generation by nanosecond dual-wavelength pumping in microstructured optical fibers," *Opt. Express* **14**, 7914-7923 (2006).

Nous avons alors mené une analyse statistique des puissances crêtes de ces solitons et des impulsions piégées. Les résultats (Figure 39) confirment l'existence dans la bande Stokes après une certaine distance de propagation d'une distribution présentant une queue marquée vers les puissances élevées. Des événements rares et puissants peuvent notamment être distingués. Un comportement similaire a été enregistré dans la bande anti-Stokes, mettant en lumière le lien fort entre les comportements statistiques du soliton et les ondes dispersives piégées ⁷⁸ [P49].

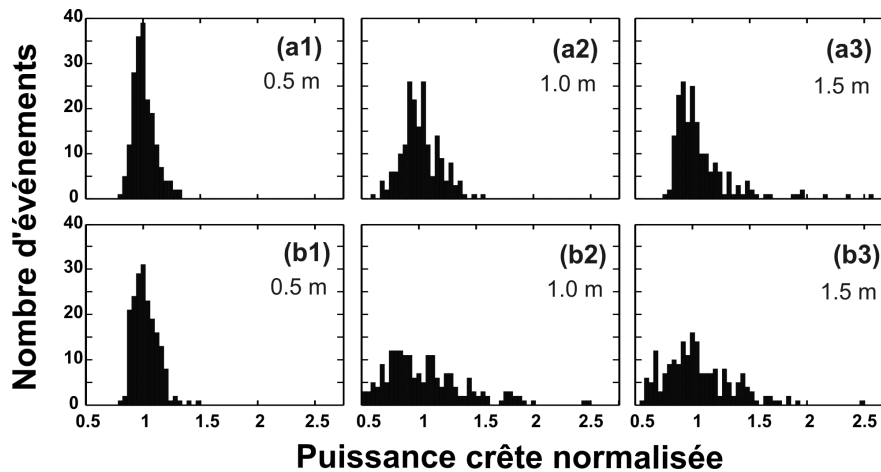


Figure 39 – Distribution statistique des puissances crêtes de solitons contenus dans l'onde Stokes (a) et des ondes dispersives piégées contenues dans l'onde anti-Stokes (b) pour différentes distances de propagation (0.5 m, 1 m et 1.5 m). Les résultats statistiques sont basés sur l'analyse de 200 structures. [P49]

3. STATISTIQUES EXTRÊMES DANS LES AMPLIFICATEURS OPTIQUES À FIBRE

A ce jour, l'observation d'événements scélérats s'est essentiellement concentrée sur des configurations où des processus d'instabilité amplifiaient le bruit quantique ou les variations minimales de puissance initiale. Les fluctuations émergent donc spontanément à partir d'une pompe parfaitement cohérente. Une situation intéressante à traiter est celle où les fluctuations sont initialement présentes dans une pompe utilisée pour amplifier un signal ou germe cohérent. Nous traiterons ainsi successivement deux types d'amplificateurs, l'amplificateur paramétrique et l'amplificateur Raman, les deux processus reposant sur un pompage partiellement incohérent. Ce travail initié dans le cadre du stage de Master 2 de M. Kamal HAMMANI se poursuit depuis dans le cadre de son doctorat débuté en Octobre 2008.

3.1. Dans les amplificateurs paramétriques

Publications liées : P36, A71, A75

Notre démarche nous a amené à considérer le cas d'un amplificateur paramétrique. En effet, physiquement, le processus à l'origine de l'amplification paramétrique est directement relié à l'instabilité de modulation scalaire qui, comme nous avons vu précédemment, est un ingrédient clef de l'émergence de phénomènes extrêmes. La configuration expérimentale typique que nous étudions est représentée Figure 40(a). Un signal continu est amplifié dans une fibre hautement non-linéaire à dispersion anormale par une pompe incohérente. En sortie, différents moyens de caractérisation temporelle et spectrale sont mis en œuvre.

⁷⁸ Pendant nos recherches, des conclusions similaires ont été publiées par M. Erkintalo, G. Genty, and J. M. Dudley, "Rogue wave like characteristics in femtosecond supercontinuum generation," *Opt. Lett.*, vol. in press, 2009.

Un point important était le contrôle des propriétés de la pompe partiellement incohérente utilisée. A cet effet, nous avons bâti notre propre pompe incohérente à partir d'ASE spectralement filtrée et amplifiée. Le spectre obtenu a une forme Gaussienne et une largeur contrôlable par le filtre utilisé (Figure 40(b)). Le signal d'autocorrélation en intensité nous offre de précieuses informations sur la nature des fluctuations de cette pompe. Ainsi, la forme enregistrée est en excellent accord avec l'hypothèse d'un spectre de profil d'intensité gaussien avec une phase variant en chaque point de manière stochastique (Figure 40(c)).

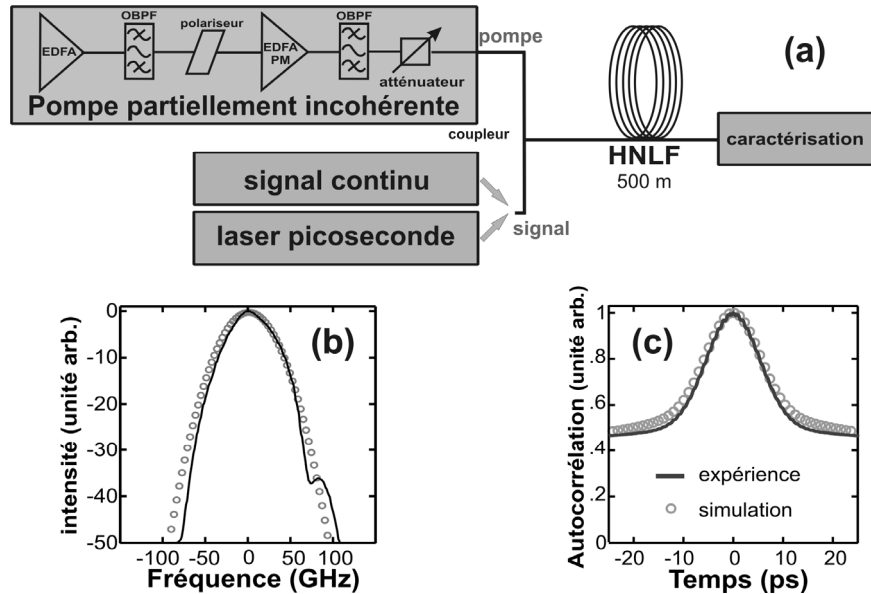


Figure 40 – (a) Schéma expérimental utilisé pour la mise en évidence d'évènements extrêmes dans les amplificateurs paramétriques à fibre. Les mesures expérimentales (traits continus noirs) du spectre (b) et du signal d'autocorrélation (c) de la pompe sont comparées à l'hypothèse d'un spectre Gaussien avec une phase aléatoire (cercles gris).[P36]

Les spectres enregistrés en sortie [P36] ont montré que les bandes d'amplification dans un tel système variaient par rapport à l'amplification usuelle à la fois en position, mais aussi en intensité. En effet, pour bien interpréter nos résultats, notre configuration expérimentale doit être rapprochée des recherches précédemment menées dans l'équipe sur l'instabilité modulationnelle incohérente ⁷⁹. Ces travaux prédisaient un gain plus élevé avec une bande d'amplification plus large.

Mais le plus marquant est l'observation après amplification des propriétés temporelles du signal initialement continu. Les enregistrements sur photodiode et oscilloscope indiquent en effet clairement que le signal obtenu est bien loin d'être continu (Figure 41(a)) et présente notamment des pics de lumière dont l'intensité peut dépasser de plusieurs centaines de fois la valeur moyenne du signal. L'écart spectral Ω entre le signal et la pompe influence à la fois le nombre de pics et leur intensité, des pics plus élevés mais plus rares étant générés avec des écarts croissants. La photodiode n'ayant pas un temps de réponse suffisamment rapide pour cerner la durée des pics émergents, nous avons enregistré le signal d'autocorrélation du signal amplifié (Figure 41(c)). Ce signal indique une structure dont la durée est directement liée à la durée des fluctuations de la pompe visible sur la Figure 40(c). Néanmoins, le contraste enregistré sur l'autocorrélation est radicalement différent (contraste 1 :2 pour la pompe, contraste 1 :50 pour le signal amplifié), ce qui laisse présager d'une nature statistique très différente. Ces résultats temporels sont en accord qualitatif avec une modélisation numérique basée sur l'ESNL sous sa forme la plus simple (Eq. (4)) avec une pompe incohérente.

⁷⁹ A. Sauter, S. Pitois, G. Millot, and A. Picozzi, "Incoherent modulation instability in instantaneous nonlinear Kerr media," *Opt. Lett.*, vol. 30, pp. 2143-2145, 2005.

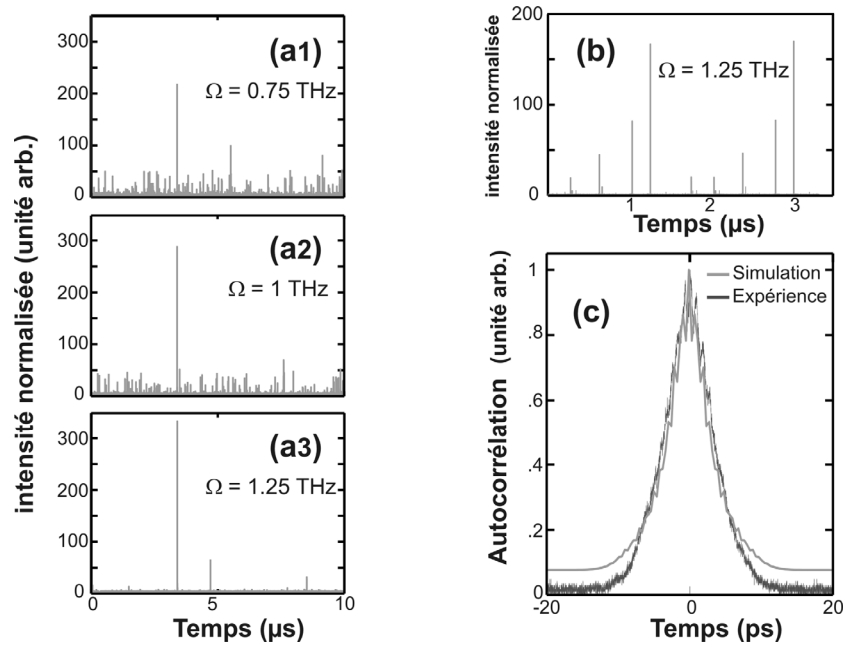


Figure 41 – (a) Signal temporel en sortie de l’amplificateur paramétrique pour différents écarts pompe-signal (0.75, 1 et 1.25 THz respectivement pour les sous-figures 1, 2, 3) (b) Signal de sortie simulé. (c) Signal d’autocorrélation en intensité enregistré expérimentalement (ligne noire) comparé au signal simulé (ligne grise) [P36]

Pour obtenir une information plus quantitative sur la distribution de probabilité en sortie de l’amplificateur, nous avons remplacé la source continue par une source impulsionnelle brève, un laser à fibre à modes bloqués. En sortie, le train amplifié présente certaines impulsions qui sont significativement plus amplifiées que leurs voisines (Figure 42(a)). Un oscilloscope à échantillonnage combiné à une photodiode à grande bande passante nous a permis d’enregistrer la distribution des puissances crêtes des impulsions amplifiées pour différentes puissances de pompe (Figure 42(b)). Une queue s’étalant vers les hautes puissances crêtes apparaît lorsque la puissance de pompe augmente. Ce résultat est retrouvé numériquement à partir de l’analyse de 20 000 simulations numériques (Figure 42(c)).

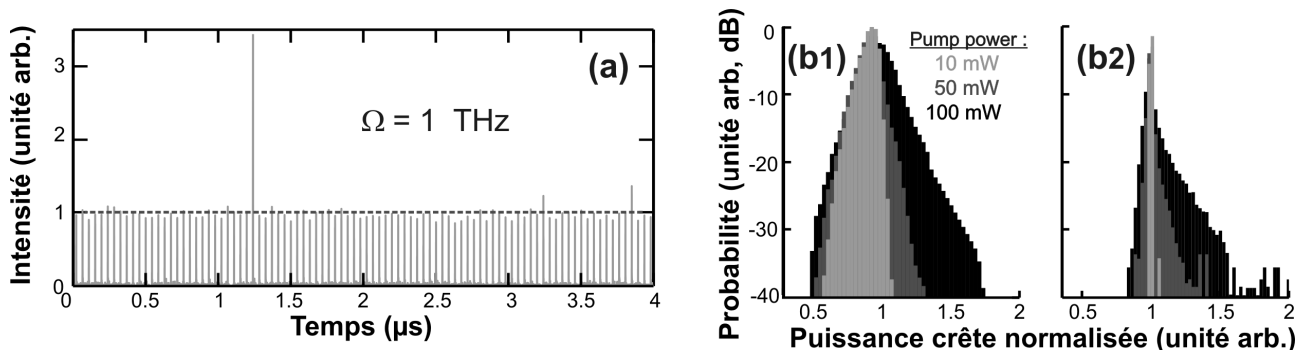


Figure 42 – (a) Train d’impulsions picosecondes émergent de l’amplificateur paramétrique à fibre. (b) Distribution statistique des puissances crêtes des impulsions après amplification pour différentes puissances de pompe. Les résultats expérimentaux (b1) sont comparés aux résultats numériques (b2) obtenus à partir de 20 000 simulations. [P36]

3.2. Dans les amplificateurs Raman

Publications liées : P28, P42, A51, A53, A58, A65, A67, A73, A75

L'amplificateur paramétrique ayant une physique proche des processus d'instabilité modulationnelle, la question qui se posait était de savoir si le comportement observé avec le pompage incohérent pouvait ou non être transposé à d'autres types d'amplificateurs optiques dont la pompe présenterait des fluctuations rapides. Nos simulations numériques ont révélé que l'ingrédient essentiel guidant l'émergence des structures d'amplitude extrême était le transfert instantané et exponentiel des fluctuations de la pompe sur le signal. Il est donc indispensable d'avoir un gain quasi-instantané. Si les amplificateurs à base de fibres dopées terres-rares ne respectent pas cette condition, il n'en est pas de même pour l'amplification Raman. Nous avons donc testé si des structures extrêmes pouvaient émerger de l'amplification Raman et pour marquer fortement la différence par rapport aux travaux précédents menés en régime de dispersion anormale, nous avons utilisé ici uniquement des fibres à dispersion normale, donc sans instabilité de modulation ni recompression solitonique possibles.

Le montage expérimental mis en œuvre est similaire au montage de la Figure 40(a), si ce n'est que la pompe est désormais décalée de 100 nm par rapport au signal à amplifier et que celle-ci est délivrée par un laser fibré continu Raman⁸⁰ qui présente des caractéristiques similaires d'incohérence (notamment au niveau du signal d'autocorrélation enregistré, voir la Figure 43(b)). Nous retrouvons alors qualitativement les tendances observées pour l'amplification paramétrique : la trace temporelle mesurée à l'oscilloscope (Figure 43(a)) démontre l'émergence de structures de grande amplitude, alors que l'autocorrélation optique montre que le signal initialement continu présente maintenant des sous-structures de quelques picosecondes de durée avec un contraste beaucoup plus fort que celui de la pompe (Figure 43(b)). Concernant le spectre mesuré en sortie de l'amplificateur, l'onde continue s'est significativement élargie, ceci étant attribué à la modulation de phase croisée de la pompe sur le signal⁶ [P28].

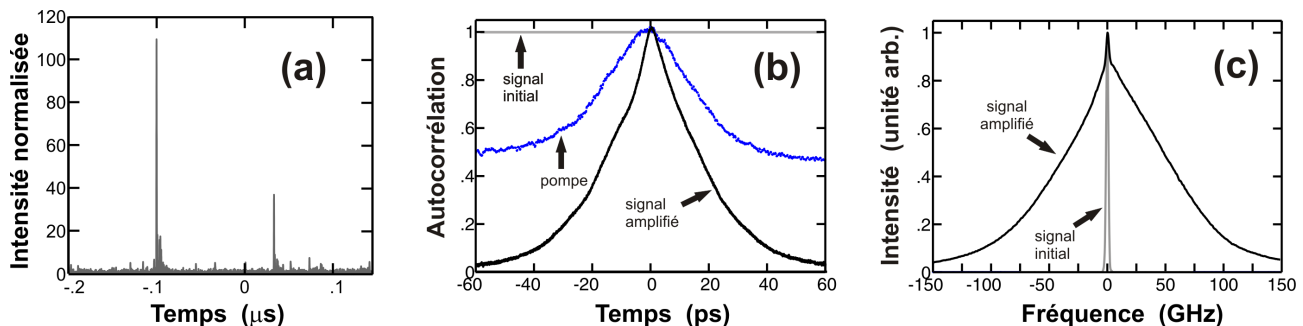


Figure 43 – (a) Évolution temporelle du signal initialement continu après amplification (enregistrements réalisés sur une photodiode et un oscilloscope ayant une bande passante du GHz) (b) Comparaison des autocorrélations en intensité de la pompe, du signal avant et après amplification. (c) Comparaison des spectres optiques avant et après amplification [P28]

En utilisant un train d'impulsions picosecondes, nous avons enregistré, comme dans le cas de l'amplification paramétrique, sur un oscilloscope rapide les fluctuations du signal résultant. Les diagrammes de l'œil correspondant aux signaux avant et après amplification (Figure 44(a1) et Figure 44(a2) respectivement) soulignent la dégradation importante du signal amplifié due à une gigue d'amplitude particulièrement élevée. La distribution statistique des puissances crêtes associées confirme une distribution ayant une décroissance en accord avec une forme exponentielle (en échelle

⁸⁰ F. Vanholsbeeck, S. Martin-Lopez, M. Gonzalez-Herraez, and S. Coen, "The role of pump incoherence in continuous-wave supercontinuum generation," *Opt. Express*, vol. 13, pp. 6615-6625, 2005.

semi-logarithmique), caractéristique des phénomènes extrêmes (Figure 44(b)). Les simulations numériques nous confirment ce comportement (Figure 44(c)).

Notons que pour obtenir de tels résultats expérimentaux, un point important à respecter est l'utilisation d'une fibre présentant une différence de vitesses de groupe aussi faible que possible. Si la pompe et le signal à amplifier se propagent à des vitesses différentes, un effet de moyennage temporel se produit, limitant fortement l'amplitude des fluctuations. Donc, l'idéal pour supprimer les fluctuations rapides d'intensité serait un pompage contra-propagatif où la différence de vitesses de groupe atteint deux fois la vitesse de la lumière. Une telle conclusion avait déjà pu être établie dans des travaux antérieurs basés sur une analyse du RIN^{81,82}.

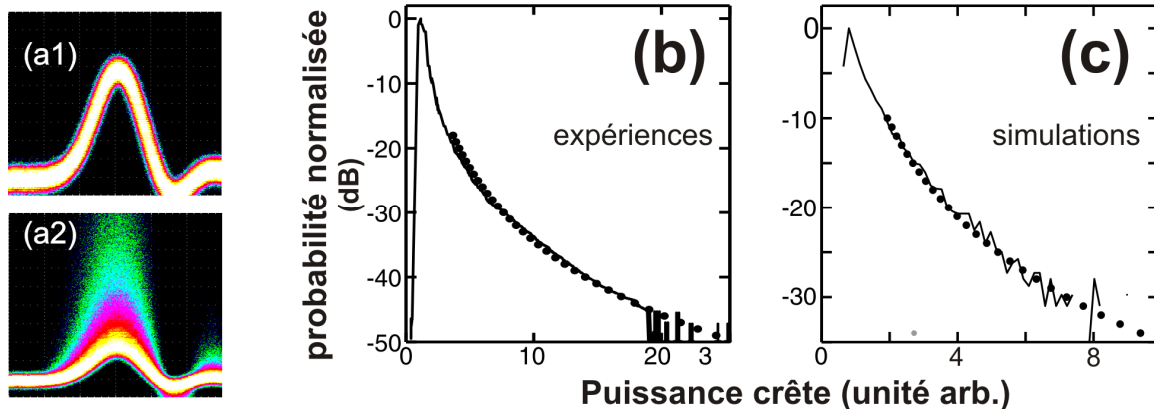


Figure 44 - (a) Comparaison des signaux impulsionnels avant (a1) et après (a2) amplification (enregistrements réalisés sur un dispositif avec bande passante de 50 GHz) (b-c) Comparaison des distributions statistiques des puissances crêtes des impulsions après amplification : résultats expérimentaux (b) et numériques (c). Les résultats sont comparés avec un ajustement par une exponentielle décroissante (sur une échelle semi-logarithmique, cercles noirs) [P28]

Si le domaine temporel met en évidence les événements extrêmes, le domaine spectral fournit également des informations précieuses pour repérer les structures les plus intenses. Ainsi, une représentation spectro-temporelle du train d'impulsions obtenu après amplification (Figure 45(a)) souligne que les événements extrêmes sont également ceux qui possèdent le spectre le plus large. Cela suggère d'utiliser une technique de filtrage spectral décalé pour discriminer les impulsions les plus puissantes des impulsions les plus faibles (de manière similaire à la technique Mamyshev active détaillée dans le chapitre III, section 3 de ce mémoire). Expérimentalement, avec un filtrage au centre, nous retrouvons un train d'impulsions au même taux de répétition que le train initial (Figure 45(b1)). Par contre, un filtrage décalé en longueur d'onde isole uniquement les impulsions les plus intenses, conduisant à un train aperiodique (Figure 45(b2)). Plus le filtre est décalé par rapport à la longueur d'onde du signal initial, plus le seuil de décision est élevé et moins d'impulsions passeront à travers le filtre, comme le confirment les résultats expérimentaux de la Figure 45(c).

⁸¹ RIN : Relative Intensity Noise, bruit d'intensité relatif.

⁸² C. Fludger, V. Handerek, and R. J. Mears, "Pump to signal RIN transfer in Raman fiber amplifiers," *J. Lightw. Technol.*, vol. 19, pp. 1140-1148, 2001.

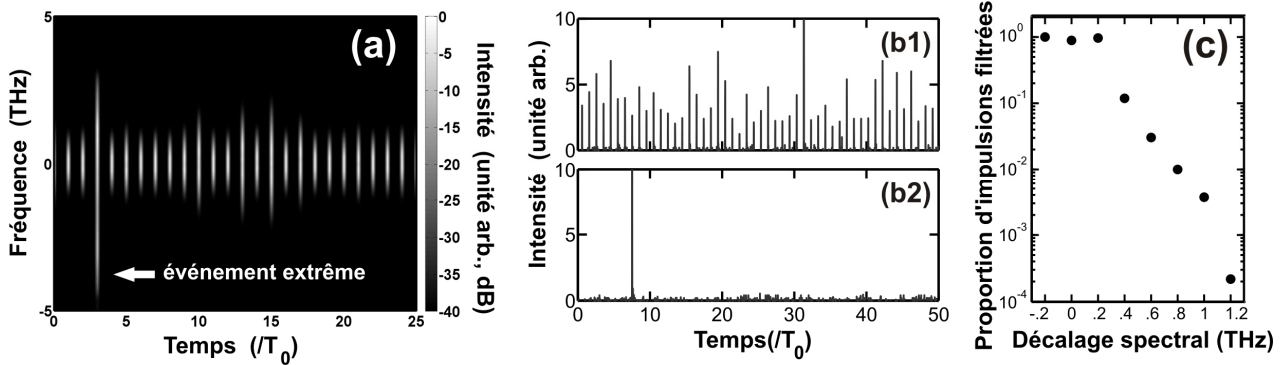


Figure 45 - (a) Représentation spectro-temporelle du train d'impulsions amplifiées. T_0 est la période du train. (b) Train temporel obtenu après découpage par un filtre passe bande optique d'une largeur de 100 GHz, décalé de 0 THz et de 1 THz (respectivement Figures (b1) et (b2)). (c) Proportion entre le nombre d'impulsions initiales et le nombre d'impulsions détectées après filtrage spectral pour différentes valeurs de décalage spectral. [P42]

4. CONCLUSION ET SYNTHÈSE DU THÈME ABORDÉ

Ces études sur l'émergence de structures optiques rares mais d'intensité élevée dans les fibres optiques constituent un thème de recherche très récent et particulièrement intéressant. En effet, les résultats expérimentaux soulignent la nécessité d'accompagner la résolution de l'équation de Schrödinger non-linéaire par une approche statistique, une simulation seule pouvant s'éloigner très fortement du comportement moyen observé. Pour les divers travaux présentés, j'ai profité de l'expérience acquise grâce aux autres thèmes sur lesquels j'avais travaillé : amplification, régénération et sources optiques. L'étude des phénomènes extrêmes optiques initialement focalisée sur les configurations supercontinua a ainsi été étendue à des systèmes très différents et parfois plus simples d'analyse et de compréhension, comme les amplificateurs optiques paramétriques ou Raman.

Bien évidemment, l'étude des fluctuations d'intensité d'un signal n'a pas attendu les travaux de Solli en 2007 pour être menée, notamment dans le cadre des télécommunications optiques où cet aspect relève d'un enjeu crucial. Néanmoins, les travaux existant reposent pour la plupart sur un moyen détourné, le RIN, habituellement mesuré sur un analyseur de spectre optique, c'est-à-dire après photodiode. Certes, spectre électrique et signaux d'autocorrélation peuvent être mathématiquement reliés⁸³, mais nos études menées dans le domaine temporel nous offrent un nouvel angle de réflexion pour aborder ces problématiques essentielles pour un grand nombre d'applications, que ce soient les applications supercontinuum ou télécom. Notamment, les résultats obtenus nous montrent que l'hypothèse implicite de variations gaussiennes réalisée dans le cadre de l'évaluation des performances d'un système à partir de son facteur de qualité (facteur Q) n'est pas toujours réaliste.

D'un point de vue plus général, ce sujet m'a également permis de voir les similarités et les différences entre plusieurs domaines physiques où l'équation de Schrödinger non-linéaire ou ses variantes s'appliquent éventuellement.

⁸³ Notamment par le théorème de Wiener-Khinchin.

Thème abordé	Structures optiques extrêmes
Période	2008 – 2010
Projets ou financements	Projet ANR MANUREVA (2008-2011) coord. locale : G. MILLOT Projet ANR Soficars (2007-2010) Projet Hors Contrat de Plan (2009)
Étudiants	Kamal HAMMANI (Doctorant, 2008-2011) Kamal HAMMANI (Master 2, 2007-2008)
Collaborations locales	Dr. Bertrand KIBLER Pr. Guy MILLOT
Collaborations extérieures	FEMTO-ST : Pr. John M. DUDLEY
Publications liées	P28, P36, P38, P42, P49, P50
Publications annexées en fin de mémoire	<p>P28 K. Hammani, C. Finot, J.M. Dudley and G. Millot : Optical rogue-wave fluctuations in fiber Raman amplifiers, Optics Express 16, 16467-16474 (2008)</p> <p>P36 K. Hammani, C. Finot and G. Millot : Emergence of extreme events in fiber-based parametric processes driven by a partially incoherent wave, Optics Letters 34, 1138-1140 (2009).</p> <p>P38 B. Kibler, C. Finot and J.M. Dudley : Soliton and rogue wave statistics in supercontinuum generation in photonic crystal fibre with two zero dispersion wavelengths, European Physical Journal Special Topics 173, 273-279 (2009).</p>
Communications liées	Vulg2, Vulg3, Vulg4 CI24, CI30, CI33, CI35, CI37 CN16, CN18 S3, S5, S6, S8, S9, S10 Post22, Post28, Post29, Post31

CONCLUSION

Ce mémoire résume mes travaux de recherche menés depuis 2002. Ceux-ci se sont focalisés sur le comportement non-linéaire d'impulsions optiques évoluant dans des fibres de silice monomode. Différents régimes de dispersion ayant été explorés, des comportements très variés ont alors été caractérisés. L'évolution auto-similaire d'une impulsion dans un amplificateur à fibre à dispersion normale aux longueurs d'onde des télécommunications optiques n'a ainsi a priori que peu de points communs avec le supercontinuum généré par fission de solitons se propageant dans une fibre microstructurée. Or, dans les deux cas, les dynamiques peuvent être décrites quantitativement avec une remarquable précision par une seule et même équation, l'équation de Schrödinger non-linéaire, incluant éventuellement des termes correctifs pour prendre en compte des effets linéaires et non-linéaires d'ordres supérieurs.

Fort de cet outil prédictif, j'ai abordé expérimentalement différents thèmes à commencer par la génération de similaritons optiques, sujet qui a constitué le cœur de mon doctorat puis de mon post-doctorat. Des impulsions au profil d'intensité parabolique avec une dérive de fréquence linéaire ont ainsi été obtenues à partir de dispositifs amplificateurs Raman ou Ytterbium. Mais il a été également possible de s'affranchir d'un gain physique en utilisant une fibre à dispersion décroissante ou bien un arrangement judicieusement choisi de fibres optiques. Des applications aux télécommunications optiques de ces impulsions originales ont été proposées : mise en forme d'impulsions, source multi-longueurs d'onde ou bien encore régénération optique. Cette dernière application a fait l'objet de beaucoup d'attention et d'autres configurations, sans gain, ont également été étudiées et comparées, notamment les techniques dites de « Mamyshev » et la technique « soliton ». Dans les deux cas, le processus se base sur le découpage spectral du spectre élargi par auto-modulation de phase, la première technique étant en dispersion normale, la seconde en dispersion anormale. Profitant de la forme canonique de l'ESNL, des règles de conception ont été élaborées pour déterminer simplement le jeu de paramètres optimal à mettre en œuvre. Un fonctionnement multi-longueurs d'onde a également été pour la première fois démontré expérimentalement.

Autre thème sur lequel l'apport prédictif de l'ESNL a été décisif pour comprendre et optimiser l'évolution spectrale non-linéaire d'une impulsion est la mise en place de différentes sources pour des besoins très variés, allant des communications multiplexées en longueurs d'onde aux sources supercontinua. Cette dernière source est principalement destinée à la microscopie non-linéaire CARS et devait répondre à des contraintes assez spécifiques qui nous ont conduit à tester différents types de fibres microstructurées de nouvelle génération, comme des fibres à cœur suspendu ou bien des fibres solides à bande photonique interdite. Nous avons également eu l'occasion de constater dans ces processus de génération de supercontinua la grande dépendance du résultat vis-à-vis des fluctuations du bruit initial. Notamment, une analyse statistique menée sur un grand nombre de réalisations révèle la génération d'évènements rares dont l'intensité crête est significativement plus élevée que le comportement moyen observé. Notons que nous avons également observé un tel comportement dans d'autres types de systèmes fibrés comme les amplificateurs paramétriques ou Raman où les fluctuations initiales de la pompe sont transmises au signal par un gain instantané et exponentiel.

Mes travaux de recherche combinent donc à la fois des sujets de nature plutôt théorique, comme la dynamique asymptotique des similaritons ou bien l'interaction d'impulsions voisines, et des sujets visant une application concrète devant répondre à des besoins contraignants comme la source destinée à la microscopie CARS. Dans la quasi-totalité des résultats expérimentaux obtenus, il a été possible de comparer quantitativement les performances atteintes avec les prédictions obtenues par la modélisation du système optique. Une telle approche a permis à plusieurs reprises de déceler d'éventuels problèmes expérimentaux ou bien d'optimiser l'architecture retenue.

L'ensemble des résultats décrits dans ce mémoire doit beaucoup aux différentes collaborations qui ont été établies, soit au niveau local avec mes collègues ou étudiants, soit au niveau international. Plusieurs projets financés par l'Agence Nationale de la Recherche ont permis également de bénéficier des compétences importantes des autres acteurs de la recherche française dans l'optique, notamment, les projets SUPERCODE et SOFICARS dont j'assure la coordination au niveau local et qui se sont révélés très formateurs et utiles pour nouer des contacts plus précis avec les acteurs industriels.

Si les fibres optiques monomodes sont désormais vieilles de plus de 35 ans, elles restent néanmoins un support dont toutes les potentialités n'ont pas encore été explorées. Dans le contexte des télécommunications optiques, l'augmentation continue des besoins en bande passante requiert toujours davantage d'innovations et la fibre optique est l'un des candidats pour les fonctions de traitement optique de l'information, d'autant plus que les progrès récents dans le domaine des fibres présentant une très forte non-linéarité laissent espérer une réduction importante de la puissance requise. A côté de ces travaux plutôt techniques, des sujets plus novateurs émergent actuellement et mobiliseront je le pense pendant quelques années encore les efforts d'une partie de la communauté. Il s'agit de proposer une meilleure compréhension des instabilités régissant l'évolution des impulsions dans ces systèmes non-linéaires. L'attrait des fibres optiques est alors de bénéficier d'une propagation à une seule dimension avec des possibilités de caractérisation très variées. Les conditions expérimentales sont également contrôlables dans une large mesure. Enfin, dans les années à venir, les potentialités non-linéaires d'autres guides d'onde micro- ou bien nano-structurés seront à explorer plus systématiquement, dans le cadre des applications aux télécommunications optiques notamment.

ANNEXE I

LISTE EXHAUSTIVE DE LA PRODUCTION SCIENTIFIQUE

1. PUBLICATIONS

1.1. Publications dans des revues internationales à comité de lecture

41 articles + 3 sous presse + 6 soumis

Les publications figurant dans l'annexe 2 sont précédées du symbole ➡.

1.1.1. Publications pendant le doctorat :

- P1. C. Finot, G. Millot, C. Billet, and J.-M. Dudley : *Experimental generation of parabolic pulses via Raman amplification in optical fibre*, Optics Express 11, 1547-1552 (2003).
- P2. A. Mussot, E. Lantz, H. Maillotte, T. Sylvestre, C. Finot and S. Pitois : *Spectral broadening of a partially coherent CW laser beam in single-mode optical fibres*, Optics Express 12, 2838-2843 (2004).
- P3. C. Finot, G. Millot and J.-M. Dudley : *Asymptotic characteristics of parabolic similariton pulses in optical fibre amplifiers*, Optics Letters 29, 2533-2535 (2004).
- P4. C. Finot and G. Millot : *Synthesis of optical pulses by use of similaritons*, Optics Express 12, 5104-5109 (2004).
- P5. C. Finot, G. Millot, S. Pitois, C. Billet, and J.-M. Dudley : *Numerical and experimental study of parabolic pulses generated via Raman amplification in standard optical fibres*, IEEE J. Select. Topics in Quantum Electron., special issue on Nonlinear Optics, 10, 1211-1218 (2004).
- P6. C. Finot : *Influence of the pumping configuration on the generation of optical similaritons in optical fibres*, Optics Communications 249, 553-561 (2005).
- ➡ P7. C. Finot, S. Pitois and G. Millot : *Regenerative 40 Gbit/s wavelength converter based on similariton generation*, Optics Letters 30, 1776-1778 (2005), article sélectionné par le Virtual Journal of Ultrafast Science 4 (Juillet 2005).
- P8. C. Finot and G. Millot : *Interactions of optical similaritons*, Optics Express 13, 5825-5830 (2005), article sélectionné par le Virtual Journal of Ultrafast Science 4 (November 2005).
- ➡ P9. C. Finot and G. Millot : *Collisions of optical similaritons*, Optics Express 13, 7653-7665 (2005).
- P10. S. Pitois, C. Finot, S. Fatome, B. Sinardet and G. Millot : *Generation of 20-GHz picosecond pulse trains in the normal and anomalous dispersion regimes of optical fibers*, Optics Communications 260, 301-306 (2006).
- P11. C. Finot, J. Dudley and G. Millot : *Generation of a train of dark solitons by interactions of optical similaritons in a Raman fibre amplifier*, article invité, Optical Fiber Technology 12, 217-226 (2006).

1.1.2. Publications pendant le post-doctorat :

- P12. **C. Finot, F. Parmigiani, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Parabolic pulse evolution in normally dispersive fiber amplifiers preceding the similariton formation regime*, Optics Express 14, 3161-3170 (2006), article sélectionné par le Virtual Journal of Ultrafast Science 5 (Juin 2006).
- ☞ P13. **F. Parmigiani, C. Finot, K. Mukasa, M. Ibsen, M.A.F Roelens, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Ultra-flat SPM-broadened spectra in a highly nonlinear fiber using parabolic pulses formed in a fiber Bragg grating*, Optics Express 14, 7617-7622 (2006), article sélectionné par le Virtual Journal of Ultrafast Science 5 (Octobre 2006).
- P14. **P. Dupriez, C. Finot, A. Malinowski, D.J. Richardson, K.G. Wilcox, H.D. Foreman and A.C. Tropper** : *High-power picosecond and femtosecond source based on Yb-doped fiber amplification of VECSELS*, Optics Express 14, 9611-9616 (2006) *résultats rapportés dans Laser Focus World (Décembre 2006)* article sélectionné par le Virtual Journal for Biomedical Optics 1 (Octobre 2006) et par le Virtual Journal of Ultrafast Science 5 (Décembre 2006)
- P15. **C. Finot, L. Provost, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Parabolic pulse generation through passive nonlinear pulse reshaping in a normally dispersive two segment fiber device*. Optics Express 15, 852-864 (2007), article sélectionné par le Virtual Journal for Ultrafast Science 6 (Mars 2007).
- ☞ P16. **L. Provost, C. Finot, K. Mukasa, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Design scaling rules for 2R-Optical Self-Phase Modulation-based regenerators 2R regeneration*, Optics Express 15, 5100-5113 (2007), article sélectionné par le Virtual Journal for Ultrafast Science 6 (Mai 2007).

1.1.3. Publications depuis ma nomination en tant que MCF :

- P17. **B. Barviau, C. Finot, J. Fatome and G. Millot** : *Generation from continuous waves of frequency combs with large overall bandwidth and tunable central wavelength*, Electronics Letters 43, 886-887 (2007).
- ☞ P18. **J. Dudley, C. Finot, D.J. Richardson and G. Millot** : *Self-similarity and scaling phenomena in nonlinear ultrafast optics*, Nature Physics 3, 597-603 (2007), article sélectionné par le Virtual Journal for Ultrafast Science 6 (Octobre 2007).
- ☞ P19. **S. Pitois, C. Finot, L. Provost** : *Asymptotic properties of incoherent waves propagating in an all-optical regenerator lines*, Optics Letters 32, 3262-3265 (2007), article sélectionné par le Virtual Journal for Ultrafast Science 7 (January 2008).
- ☞ P20. **C. Finot, J. Fatome, S. Pitois and G. Millot** : *All-fibered high-quality low duty-cycle 20-GHz and 40-GHz picosecond pulse sources*, Photonics Technology Letters 19, 1711-1713 (2007).
- ☞ P21. **C. Finot, B. Barviau, G. Millot, A. Guryanov, A. Sysoliatin, S. Wabnitz** : *Parabolic pulse generation with active or passive dispersion decreasing optical fibers*, Optics Express 15, 15824-15835 (2007). article sélectionné par le Virtual Journal for Ultrafast Science 7 (Mars 2008).
- ☞ P22. **L. Provost, F. Parmigiani, C. Finot, K. Mukasa, P. Petropoulos, D.J. Richardson** : *Two channel 2R all-optical regenerator based on a bi-directional configuration*, Optics Express 16, 2264-2275 (2008).
- ☞ P23. **C. Finot, T.N. Nguyen, J. Fatome, T. Chartier, S. Pitois, L. Bramerie, M. Gay, J.-C. Simon** : *Numerical study of an optical regenerator exploiting self-phase modulation and spectral offset filtering at 40 Gbit/s*, Optics Communications 281, 2252-2264 (2008).
- P24. **S. Wabnitz and C. Finot** : *Theory of parabolic pulse propagation in nonlinear dispersion decreasing optical fiber amplifiers*, Journal of Optical Society of America B 25, 614-621 (2008). article sélectionné par le Virtual Journal for Ultrafast Science 7 (May 2008)
- P25. **C. Finot** : *Dispersion managed self-similar parabolic pulses*, Journal of Optics A 10, 085101 (2008).
- P26. **S. Pitois, C. Finot, L. Provost and D. J. Richardson** : *Generation of localized pulses from incoherent wave in optical fiber lines made of concatenated Mamyshev regenerators*, Journal of Optical Society of America B 25, 1537-1547 (2008). article sélectionné par le Virtual Journal for Ultrafast Science 7 (Novembre 2008).

- P27. **B. Kibler and C. Finot** : *Impact of structural irregularities on high-bit-rate pulse compression techniques in photonic crystal fibre*, Electronics Letters 44, 1011-1013 (2008). article sélectionné par le Virtual Journal for Ultrafast Science 7 (Novembre 2008).
- ☞P28. **K. Hammani, C. Finot, J.M. Dudley and G. Millot** : *Optical rogue-wave fluctuations in fiber Raman amplifiers*, Optics Express 16, 16467-16474 (2008)
- ☞P29. **K. Hammani, C. Finot, S. Pitois, J. Fatome and G. Millot** : *Real time measurement of long parabolic optical similaritons*, Electronics Letters, 44, 1239-1240 (2008).
- P30. **C. Fortier, B. Kibler, J. Fatome, C. Finot, S. Pitois and G. Millot** : *All-fibered high-quality low duty cycle 160 GHz*, Laser Physics Letters 5, 817-820 (2008)
- ☞P31. **C. Finot, B. Kibler, L. Provost and S. Wabnitz** : *Beneficial impact of wave-breaking or coherent continuum formation in normally dispersive nonlinear fibers*, Journal of Optical Society of America B 25, 1938-1948 (2008).
- P32. **L. Wu, J.-F. Zhang, L. Li, C. Finot and K. Porsezian** : *Similaritons interaction in nonlinear graded-index waveguide amplifiers*, Physical Review A 78, 053807 (2008). Une illustration choisie pour le Kaleidoscope de Novembre 2008 de PRA.
- ☞P33. **B. Kibler, C. Finot, G. Gadret, G. Millot, J. Wojcik, M. Szpulak and W. Urbanczyk** : *Soliton self-frequency shift compensation and zero dispersion wavelength measurement in suspended core fibers*, Electronics Letters 44, 1370-1371 (2008).
- P34. **C. Finot, J.M. Dudley and G. Millot** : *Parabolic pulse amplifier*, Fiber and Integrated Optics 27, 505-515 (2008).
- P35. **S. Pitois, C. Finot, J. Fatome and G. Millot** : *Design of a large tunable slow-light delay line via vectorial modulational instability and dispersion in optical fibers*, Optics Communications 282, 1016-1019 (2009).
- ☞P36. **K. Hammani, C. Finot and G. Millot** : *Emergence of extreme events in fiber-based parametric processes driven by a partially incoherent wave*, Optics Letters 34, 1138-1140 (2009).
- P37. **L. Wu, J.-F. Zhang, C. Finot and L. Li** : *Propagation of dark similaritons on the compact parabolic background in dispersion-managed optical fibers*, Optics Express 17, 8278-8286 (2009).
- ☞P38. **B. Kibler, C. Finot and J.M. Dudley** : *Soliton and rogue wave statistics in supercontinuum generation in photonic crystal fibre with two zero dispersion wavelengths*, European Physical Journal Special Topics 173, 273-279 (2009). *article invité*.
- P39. **B. Kibler, T. Martynkien, M. Szpulak, C. Finot, J. Fatome, J. Wojcik, W. Urbanczyk, S. Wabnitz** : *Nonlinear femtosecond pulse propagation in an all-solid photonic bandgap fiber*, Optics Express 17, 10393-10398 (2009).
- P40. **J. Fatome, C. Fortier, T. Nguyen, T. Chartier, F. Smektala, K. Messadd, B. Kibler, S. Pitois, G. Gadret, C. Finot, J. Troles, F. Desevedavy, P. Houizot, L. Brilland and N. Traynor** : *Linear and nonlinear characterisation of chalcogenide photonic crystal fibers*, Journal of Lightwave Technology 27, 1707-1715 (2009).
- P41. **J. Grandidier, S. Massenet, G. Colas des Francs, A. Bouhelier, L. Markey, J.C. Weeber, C. Finot and A. Dereux** : *Gain assisted propagation in a plasmonic waveguide at telecom wavelength*, NanoLetters 9, 2935-2939 (2009).

1.1.4. Publications sous presse :

- P42. **C. Finot, K. Hammani, J. Fatome, J.M. Dudley and G. Millot** : *Selection of extreme events generated in Raman fiber amplifiers through spectral offset filtering*, sous presse, Journal of Quantum Electronics (2009).
- P43. **C. Finot, J.M. Dudley, D.J. Richardson and G. Millot** : *Parabolic pulse generation and applications*, sous presse, Journal of Quantum Electronics, (2009). *article invité*.
- P44. **T. N. Nguyen, T. Chartier, L. Bramerie, M. Gay, Q. T. Le, S. Lobo, M. Joindot, J.C. Simon, J. Fatome, C. Finot** : *Self-phase modulation-based regenerator including pulse compression and offset filtering for 42.6 Gbit/s RZ-33% transmission systems*, soumis à Optics Express (2009).

1.1.5. Publications soumises :

- P45. **L. Provost, C. Finot, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *2R Regeneration Architectures based on multi-segmented fibres*, soumis à Journal of Lightwave Technology (2009).
- P46. **M. Gay, M. Costa e Silva, T.N. Nguyen, L. Bramerie, T. Chartier, M. Joindot, J.C. Simon, J. Fatome, C. Finot and J.L. Oudar** : *Bit error rate assessment at 170 Gbit/s of an all-optical regenerator based on a saturable absorber and a highly nonlinear fiber*, soumis à Photonic Technology Letters (2009).
- P47. **C. Finot and L. Wu** : *Influence of the initial phase profile on the convergence towards asymptotic self-similar parabolic state*, soumis à Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials (2009).
- P48. **J. Fatome and C. Finot** : *Scaling guidelines of a soliton-based power limiter for 2R-optical regeneration applications*, soumis à Journal of Lightwave Technology (2009).
- P49. **K. Hammani, C. Finot, B. Kibler and G. Millot** : *Soliton generation in a microstructured fiber by fourth order scalar modulation instability*, soumis à Photonics Journal (2009).
- P50. **C. Finot and B. Kibler** : *Soliton spectral tunnelling of initial picosecond pulses and associated statistics*, soumis à Journal of Optics A (2009).

1.2. Actes de congrès à comité de lecture

1.2.1. Publications pendant le doctorat :

- A1. **C. Billet, J.-M. Dudley, C. Finot, and G. Millot** : *Parabolic pulse generation at 1550 nm via Raman amplification in standard telecommunications grade dispersion shifted fibre*, CLEO 2003 (Conference on Laser and ElectroOptic) Munich, 22-27 Juin 2003.
- A2. **C. Finot, G. Millot, C. Billet and J.-M. Dudley** : *Génération de similaritons optiques à 1550 nm par amplification Raman dans une fibre à dispersion décalée*, COLOQ 8 (Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Journal de Physique IV, 119, 181-182 (2004).
- A3. **C. Finot, G. Millot C. Billet, and J.-M. Dudley** : *Experimental generation of parabolic pulses at 1550 nm via Raman amplification in non zero dispersion shifted fibre*, ECOC (European Conference on Optical Communication), Rimini, 20-24 Septembre 2003.
- A4. **C. Finot, G. Millot C. Billet, and J.-M. Dudley** : *Observation et caractérisation de similaritons optiques générés par amplification Raman dans une fibre optique standard*, 22^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Valence, 12-14 Novembre 2003.
- A5. **C. Finot, G. Millot and J.-M. Dudley** : *Similaritons Raman*, 7^{ème} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 10-12 Mars 2004.
- A6. **C. Finot, S. Pitois, G. Millot, C. Billet and J.-M. Dudley** : *Experimental properties of parabolic pulses generated via Raman amplification in standard optical fibres*, in Nonlinear Guided Waves and Their Applications, Technical Digest on CD (Optical Society of America, 2004), paper MD5.
- A7. **C. Finot, S. Pitois and G. Millot** : *Synthèse temporelle d'impulsions et régénération optique de signaux télécom par Similaritons Raman*, 23^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Paris, 25-27 Octobre 2004.
- A8. **A. Mussot, E. Lantz, H. Maillotte, T. Sylvestre, C. Finot and S. Pitois** : *Elargissement spectral d'un faisceau laser partiellement cohérent et continu dans les fibres optiques*, 23^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Valence, 25-27 Octobre 2004.
- A9. **C. Finot and G. Millot** : *Interactions de similaritons optiques : du similariton au soliton noir*, 8^{ème} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 9-11 Mars 2005.
- A10. **J. Dudley, C. Billet, C. Finot and G. Millot** : *Intermediate Asymptotic Evolution and Photonic Bandgap Fiber Compression of Optical Similaritons*, Bragg Gratings, Poling & Photosensitivity / 30th Australian Conference on Optical Fibre Technology (BGPP/ACOFT) 2005, Sydney, Australie, 4-8 juillet 2005.
- A11. **C. Finot, G. Millot** : *Interaction et collision de similaritons optiques*, Congrès général 2005 de la Société Française de Physique et de la Belgian Physical Society, Lille, 29 Août-2 Septembre 2005.
- A12. **C. Finot and G. Millot** : *Collision de similaritons optiques dans un amplificateur optique fibré Raman*, COLOQ 9 (Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Journal de Physique IV, 135, 135-137 (2006).
- A13. **C. Finot and G. Millot** : *Comparaison expérimentale de différentes techniques de caractérisation en intensité et en phase d'impulsions optiques ultracourtes*, COLOQ 9 (Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Journal de Physique IV, 135, 131-133 (2006).

1.2.2. Publications pendant le post-doctorat :

- A14. **B. Barviau, C. Finot, J. Fatome, S. Pitois and G. Millot** : *Conversion de fréquence large bande par instabilité modulationnelle et effet Raman intrapulse dans une fibre optique*, 7^{èmes} Journées des phénomènes ultra-rapides, Villeneuve d'Asq, 5-7 Décembre 2005.
- A15. **J.-M. Dudley, C. Billet, P.-A. Lacourt, R. Ferrière, C. Finot and G. Millot** : *Propagation autosimilaire et similariton optique*, 9^{ème} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 8-10 Mars 2006.

- A16. **C. Finot, F. Parmigiani, P. Petropoulos and D.-J. Richardson** : *Évolution d'impulsions paraboliques dans un amplificateur à fibre optique hors régime asymptotique*, 9^{ième} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 8-10 Mars 2006.
- A17. **C. Finot and G. Millot** : *Modulation de phase croisée lors de la collision de similaritons optiques*, 9^{ième} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 8-10 Mars 2006.
- A18. **C. Finot, F. Parmigiani, P. Petropoulos and D.-J. Richardson** : *Parabolic pulse evolution in normally dispersive fiber amplifiers preceding the similariton formation regime*, in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2006), paper CThR5.
- A19. **J. Fatome, S. Pitois, C. Finot and G. Millot** : *320 GHz, 640 GHz and 1 THz femtosecond pulse sources based on multiple four wave mixing in highly non linear optical fibers*, in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2006), paper CMEE1.
- A20. **F. Parmigiani, C. Finot, K. Mukasa, M. Ibsen, M.A.F. Roelens, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Ultra-flat SPM-broadened spectra in a highly nonlinear fiber using a fiber Bragg grating based parabolic pulse shaper*, ECOC (European Conference on Optical Communication), Cannes, 24-28 Septembre 2006.
- A21. **L. Provost, C. Finot, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Design scaling laws for self-phase modulation-based 2R-regenerators*, ECOC (European Conference on Optical Communication), Cannes, 24-28 Septembre 2006.
- A22. **P. Dupriez, K. G. Wilcox, C. Finot, A. Malinowski, J. K. Sahu, D. J. Richardson, A. C. Tropper, and J. Nilsson** : *Gigahertz parabolic pulse generation in a high-power polarization-maintaining fiber amplifier seeded by a passively mode-locked VECSEL*, ECOC (European Conference on Optical Communication), Cannes, 24-28 Septembre 2006.
- A23. **P. Dupriez, C. Finot, A. Malinowski, J. Nilsson, D. Richardson, K. Wilcox, H. Foreman, A. Tropper** : *Génération d'impulsions ultrabrèves de haute puissance et à haut taux de répétition par amplification fibrée en régime auto-similaire ou d'auto-modulation de phase*, 25^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Metz, 7-9 Novembre 2006.
- A24. **C. Finot, F. Parmigiani, P. Petropoulos et David Richardson** : *Méthodes simples et sensibles pour optimiser le taux d'extinction d'un modulateur optique*, 25^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Metz, 7-9 Novembre 2006.
- A25. **A. Guenot, C. Finot, P. Petropoulos, D. Richardson et G. Millot** : *Exploitation de l'autoglissement fréquentiel soliton limité par des radiations de Cherenkov pour générer deux impulsions au décalage fréquentiel ou temporel continûment ajustable*, 25^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Metz, 7-9 Novembre 2006.
- A26. **L. Provost, C. Finot, P. Petropoulos et D. Richardson** : *Règles de conception pour les régénérateurs optiques 2-R exploitant l'auto-modulation de phase*, 25^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Metz, 7-9 Novembre 2006.
- A27. **B. Barviau, C. Finot, P. Grelu, P. Suret, S. Randoux et G. Millot** : *Laser Raman fibré délivrant des impulsions nanosecondes aux longueurs d'onde des télécommunications*, 25^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Metz, 7-9 Novembre 2006.
- A28. **L. Provost, C. Finot, K. Mukasa, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Generalisation and experimental validation of design rules for self-phase modulation-based 2R-regenerators*, OFC 2007 (Optical Fiber Conference), Anaheim, USA, 25-29 avril 2007.
- A29. **C. Finot, L. Provost, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Parabolic pulse generation through passive reshaping of Gaussian pulses in a normally dispersive dispersive fiber*, OFC 2007 (Optical Fiber Conference), Anaheim, USA, 25-29 avril 2007.

1.2.3. Publications depuis ma nomination en tant que MCF :

- A30. **B. Barviau, C. Finot, J. Fatome and G. Millot** : *Création d'un peigne de fréquences de longueur d'onde centrale accordable à partir d'ondes continues*, 10^{ème} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 14-16 Mars 2007.
- A31. **S. Wabnitz, C. Finot, A. Sysoliatin** : *Parabolic pulse generation in dispersion decreasing fiber amplifier*, in Conference on Lasers and Electro-Optics/Quantum Electronics and Laser Science Conference and Photonic Applications Systems Technologies, OSA Technical Digest Series (CD) (Optical Society of America, 2007), paper CThQ3.
- A32. **L. Provost, F. Parmigiani, C. Finot, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Self-Phase Modulation-based 2R optical regenerator for the simultaneous processing of two WDM channels*, CLEO 2007 (Conference on Laser and ElectroOptic) Munich, 17-22 Juin 2007.
- A33. **B. Barviau, J. Fatome, C. Finot and G. Millot** : *Broad-spectrum frequency comb generation from continuous waves*, CLEO 2007 (Conference on Laser and ElectroOptic) Munich, 17-22 Juin 2007.
- A34. **C. Finot, J. Fatome, S. Pitois and G. Millot** : *All-fibered high-quality low-duty cycle 20-GHz picosecond pulse source*, CLEO 2007 (Conference on Laser and ElectroOptic) Munich, 17-22 Juin 2007.
- A35. **J. Fatome, C. Finot, S. Pitois and G. Millot** : *All-fibered high-quality low duty-cycle picosecond high-repetition rate pulse sources*, Les Annales de Physique 32, 67-70 (2007).
- A36. **C. Finot, A. Guenot, P. Dupriez** : *Spectral compression of optical parabolic similaritons*, Les Annales de Physique 32, 71-74 (2007)
- A37. **B. Barviau, J. Fatome, C. Finot and G. Millot** : *Création d'un peigne de fréquences de longueur d'onde centrale accordable à partir d'ondes continues*, COLOQ 10 (Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Grenoble, 2-5 Juillet 2007.
- A38. **C. Finot, S. Wabnitz, A. Guryanov and A. Sysoliatin** : *Génération d'impulsions paraboliques par utilisation d'une fibre à dispersion normale décroissante*, 26^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Grenoble, 2-5 Juillet 2007.
- A39. **C. Finot and L. Provost** : *Étude numérique des performances d'un régénérateur 2R à fibre*, 26^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Grenoble, 2-5 Juillet 2007.
- A40. **T.N. Nguyen, T. Chartier, L. Bramerie, J.C. Simon, J. Fatome, S. Pitois, B. Baz, C. Finot** : *Caractérisation théorique du régénérateur 2R exploitant l'automodulation de phase dans une fibre optique*, 26^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Grenoble, 2-5 Juillet 2007.
- A41. **S. Pitois, C. Finot and L. Provost** : *Génération de séquences d'impulsions picosecondes aperiodiques à partir d'ondes optiques incohérentes*, 26^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Grenoble, 2-5 Juillet 2007.
- A42. **C. Finot, J. Fatome, S. Pitois and Guy Millot** : *High-Quality Low Duty-Cycle 20-GHz and 40-GHz Picosecond Pulse Sources*, Nonlinear Photonics, Quebec, Canada, 2-6 Septembre 2007.
- A43. **C. Finot, S. Wabnitz, A. Guryanov, A. A. Sysoliatin** : *Pulse Generation with Dispersion Decreasing Optical Fiber*, in Nonlinear Photonics, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2007), paper NThC3.
- A44. **S. Pitois, C. Finot, L. Provost** : *Generation of Aperiodic Picosecond Pulses Sequences from Incoherent Optical Waves*, in Nonlinear Photonics, OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2007), paper NTuA3.
- A45. **G. Millot, C. Finot, J.-M. Dudley** : *Sources d'impulsions paraboliques pico- et femtosecondes à fibres optiques*, Laserap'6, Saint-Léger-sous-Beuvray, 1-5 Octobre 2007.
- A46. **C. Finot, A. Guryanov, A. Sysoliatin, S. Wabnitz** : *Experimental parabolic pulse generation with an active dispersion decreasing fiber*, 2008 IEEE/LEOS Winter Topical Meetings, Sorrento, Italy, 14-16 January 2008.
- A47. **B. Kibler, A. Guenot, C. Finot, L. Provost** : *Diverses manifestations de l'effet Raman lors de la propagation d'impulsions femtosecondes dans une fibre microstructurée*, 11^{ème} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 26-27 Mars 2008.

- A48. **C. Ware, S. Cordette, C. Lepers, I. Fsaifes, B. Kibler, C. Finot, G. Millot** : *Spectral slicing of supercontinuum source for WDM/DS-OCDMA Applications*, 10 International Conference on Transparent Optical Networks, Athens, 22-26 June 2008.
- A49. **S. Pitois, C. Finot, L. Provost** : *Generation of localized pulses from incoherent wave in optical fiber lines made of concatenated Mamyshev regenerators*, Photonics Prague 2008, Prague, 27-29 Aout 2008.
- A50. **B. Kibler, C. Finot, G. Millot, J. Wijcik, M. Szpulak, W. Urbanczyk** : *Soliton self-frequency shift in suspended core fibers*, Photonics Prague 2008, Prague, 27-29 Aout 2008.
- A51. **K. Hammani, C. Finot, S. Pitois, J.M. Dudley, G. Milot** : *Experimental generation of extreme-value structures in fibre Raman amplifiers*, Cleo Focus Meeting, European Conference on Optical Communications, Bruxelles, 22-25 Septembre 2008.
- A52. **L. Provost, C. Finot, P. Petropoulos, D.J. Richardson** : *2R Regeneration architectures based on multi-segmented fibres*, European Conference on Optical Communications, Bruxelles, 22-25 Septembre 2008.
- A53. **K. Hammani, C. Finot, S. Pitois, J.M. Dudley and G. Millot** : *Observation de structures scélérates dans un amplificateur optique Raman à fibre*, 27^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lannion, 20-22 Octobre 2008.
- A54. **B. Kibler, S. Cordette, C. Finot, K. Hammani, C. Lepers, C. Ware, S. Wabnitz, G. Millot** : *Optimisation de la génération d'un continuum cohérent dans une fibre à dispersion normale et à haute nonlinéarité*, 27^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lannion, 20-22 Octobre 2008.
- A55. **B. Kibler, C. Finot** : *Impact des fluctuations longitudinales d'une fibre microstructurée sur des applications à haut-débit*, 27^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lannion, 20-22 Octobre 2008.
- A56. **S. Pitois, C. Finot, J. Fatome, M. Lintz** : *Impact d'une modulation de phase anti-Brillouin sur la génération d'un train d'impulsions picosecondes dans une fibre optique*, 27^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lannion, 20-22 Octobre 2008.
- A57. **B. Barviau, C. Finot, P. Grelu, G. Millot** : *Différents régimes impulsions dans un laser Raman à fibre optique*, 27^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lannion, 20-22 Octobre 2008.
- A58. **K. Hammani, C. Finot, S. Pitois, J.M. Dudley and G. Millot** : *Ondes scélérates optiques*, 27^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lannion, 20-22 Octobre 2008.
- A59. **S. Cordette, B. Kibler, I. Fsaifes, C. Lepers, C. Ware, C. Finot, G. Millot** : *Etude expérimentale d'un système hybride WDM/ DS-OCDMA pour réseau d'accès optique haut-débit*, 27^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lannion, 20-22 Octobre 2008.
- A60. **K. Hammani, C. Finot, S. Pitois, J. Fatome, G. Millot** : *Real time measurement of long parabolic optical similaritons*, EOS Annual Meeting 2008, Paris, 29 septembre-2 octobre 2008.
- A61. **C. Fortier, J. Fatome, B. Kibler, C. Finot, S. Pitois, et G. Millot** : *All-Fibered High-Quality Low Duty-Cycle 160-GHz femtosecond pulse source*, EOS Annual Meeting 2008, Paris, 29 septembre-2 octobre 2008.
- A62. **S. Pitois, C. Finot, J. Fatome, G. Millot** : *Optical delay line based on vectorial modulational instability and dispersion in optical fibres*, EOS Annual Meeting 2008, Paris, 29 septembre-2 octobre 2008.
- A63. **C. Finot, G. Millot, J.-M. Dudley and D.J. Richardson** : *Parabolic pulse generation and applications*, 2009 IEEE/LEOS Winter Topical Meetings, Innsbruck, Autriche, 12-15 Janvier 2009.
- A64. **P. Petropoulos, L. Provost, F. Parmigiani, C. Kouloumentas, C. Finot, K. Mukasa, P. Vorreau, I. Tomkos, S. Sygletos, W. Freude, J. Leuthold, A.D. Ellis, D.J. Richardson** : *Simultaneous 2R regeneration of WDM signals in a single optical fibre*, 2009 IEEE/LEOS Winter Topical Meetings, Innsbruck, Autriche, 12-15 Janvier 2009.
- A65. **K. Hammani, C. Finot, J.M. Dudley and G. Millot** : *Generation and detection of optical rogue-wave-like fluctuations in fiber Raman amplifiers*, 2009 IEEE/LEOS Winter Topical Meetings, Innsbruck, Autriche, 12-15 Janvier 2009.
- A66. **C. Finot, G. Millot, J.-M. Dudley and D.J. Richardson** : *Parabolic pulse formation and applications*, Optical Fiber Communication 2009, San Diego, 22-26 Mars 2009

- A67. **K. Hammani, C. Finot, J. M. Dudley and G. Millot** : *Emergence de structures optiques extremes par amplification fibre basée sur une pompe partiellement cohérente*, 11^{ème} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 12-13 Mars 2009.
- A68. **L. Brilland; P. Houizot, J. Troles, F. Désévéday, Q. Coulombier, J. Fatome, C. Fortier, F. Smektala, K. Messadd, B. Kibler, S. Pitois, G. Gadret, C. Finot, T. Nguyen, T. Chartier, M. Thual, G. Renversez, N. Traynor, J.L. Adam** : *Recent progress on the realization of chalcogenides photonic crystal fibers*, Optical Components and Materials VI, Proceedings of the SPIE, Volume 7212, 72120F (2009).
- A69. **B. Kibler, C. Finot and J.-M. Dudley** : *Tailored soliton statistics in Supercontinuum Generation*, CLEO 2009 (Conference on Laser and ElectroOptic), Baltimore, USA, 31 mai-5 juin 2009
- A70. **T. Martynkien, B. Kibler, C. Finot, J. Fatome, M. Szpulak, K. Wojcik, S. Wabnitz and W. Urbanczyk** : *Nonlinear femtosecond pulse propagation in all-solid photonic bandgap fiber*, CLEO 2009 (Conference on Laser and ElectroOptic), Baltimore, USA, 31 mai-5 juin 2009
- A71. **K. Hammani, C. Finot and G. Millot** : *Emergence of extreme events in fiber based parametric processes driven by a partially incoherent pump wave*, CLEO Europe 2009 (Conference on Laser and ElectroOptic), Munich, Allemagne, 14-19 juin 2009
- A72. **B. Kibler, C. Finot and J.-M. Dudley** : *Tailored soliton statistics in supercontinuum generation*, CLEO Europe 2009 (Conference on Laser and ElectroOptic), Munich, Allemagne, 14-19 juin 2009
- A73. **K. Hammani, C. Finot, B. Kibler, J.-M. Dudley and G. Millot** : *Ondes scélérates dans les fibres optiques* COLOQ 11 (Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Mouans-Sartoux, 7-9 Septembre 2009
- A74. **C. Finot, J.-M. Dudley, D.J. Richardson and G. Millot** : *Generation of parabolic pulses and applications for optical telecommunications*, 11th International Conference on Transparent Optical Network (ICTON), Azores, Portugal, 28 juin-2 Juillet 2009.
- A75. **K. Hammani, C. Finot, Bertrand Kibler, J.-M. Dudley and G. Millot** : *Extreme events in fiber baser amplifiers*, 11th International Conference on Transparent Optical Network (ICTON), Azores, Portugal, 28 juin-2 Juillet 2009.
- A76. **J. Fatome, S. Pitois, C. Fortier, B. Kibler, C. Finot, G. Millot, C. Courde, M. Lintz and E. Samain** : *On recent progress in all-fibered pulsed optical sources from 20 GHz to 2 THz based on multiple four wave mixing approach*, 11th International Conference on Transparent Optical Network (ICTON), Azores, Portugal, 28 juin-2 Juillet 2009.
- A77. **J. Fatome and C. Finot** : *Scaling guidelines of a soliton-based power limiter for 2R-optical regeneration applications*, 11th International Conference on Transparent Optical Network (ICTON), Azores, Portugal, 28 juin-2 Juillet 2009.
- A78. **K. Hammani, C. Finot, B. Kibler and G. Millot** : *Emergence de structures de type soliton par instabilité modulationnelle d'ordre 4*, 28^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lille, 6-9 Juillet 2009
- A79. **T. Martynkien, B. Kibler, C. Finot, J. Fatome, M. Szpulak, K. Wojcik, S. Wabnitz and W. Urbanczyk** : *Propagation non-linéaire d'impulsions femtosecondes dans une fibre optique à bande interdite à cœur solide*, COLOQ 11 (Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Mouans-Sartoux, 7-9 Septembre 2009
- A80. **C. Finot, L. Wu** : *Impact du profil de phase initial sur l'évolution asymptotique d'impulsions dans un amplificateur à fibre*, COLOQ 11 (Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Mouans-Sartoux, 7-9 Septembre 2009
- A81. **T. N. Nguyen, M. C. e Silva, M. Gay, T. Chartier, L. Bramerie, J.C. Simon, J. Fatome and C. Finot** : *A fiber based limiter at 170 Gbit/s for all-optical regeneration*, 2009 International Conference on Advanced Technologies for Communications, Hai Phong, Vietnam, 12-14 octobre 2009.

1.3. Vulgarisation scientifique

- Vulg1. **C. Finot and G. Millot** : *Interactions et collision de similaritons optiques*, Physicalia Magazine 27, 355-364 (2005), **article invité**.
- Vulg2. **K. Hammani, C. Finot and G. Millot** : *Ondes scélérates optiques*, Photoniques 39, janvier-février, 36-37 (2009)
- Vulg3. **C. Finot, K. Hammani, B. Kibler, J.M. Dudley and G. Millot** : *Du soliton hydrodynamique à la vague scélérate : reproduire optiquement les ondes non-linéaires pour mieux les comprendre et les maîtriser*, UB Sciences 4, 16-22 (2009)
- Vulg4. **C. Finot, K. Hammani, B. Kibler, J.M. Dudley and G. Millot** : *Ondes scélérates et autres manifestations extrêmes dans les fibres optiques*, Images de la Physique, CNRS edition (2009) , **article invité**.
- Vulg5. **C. Finot** : *La photonique, une discipline pleine de promesses, l'exemple des télécommunications optiques*, Bulletin annuel de l'Université pour Tous de Bourgogne, section d'Auxerre (2009).

1.4. Rapports de contrat

- Cont1. **S. Pitois, P. Tchofo Dinda, G. Millot, J. Fatome, A. Tonello et C. Finot** : *Étude des limites des systèmes de transmission terrestre WDM à très haut débit (Nx160 Gbit/s ou plus, rapport final du contrat de recherche France Télécom n° 42 56 26 63 (2004)*

2. COMMUNICATIONS

2.1. Communications orales dans une conférence internationale

- CI1. **C. Billet, J.-M. Dudley, C. Finot, and G. Millot** : *Parabolic pulse generation at 1550 nm via Raman amplification in standard telecommunications grade dispersion shifted fibre*, CLEO 2003 (Conference on Laser and ElectroOptic) Munich, 22-27 Juin 2003.
- CI2. **C. Finot, G. Millot C. Billet, and J.-M. Dudley** : *Experimental generation of parabolic pulses at 1550 nm via Raman amplification in non zero dispersion shifted fibre*, ECOC 2003 (European Conference on Optical Communication), Rimini, 20-24 Septembre 2003.
- CI3. **C. Finot, S. Pitois, G. Millot, C. Billet and J.-M. Dudley** : *Experimental properties of parabolic pulses generated via Raman amplification in standard optical fibres*, NLGW (Nonlinear Guided Waves and Their Applications), Toronto, 28-31 Mars 2004
- CI4. **C. Finot** : *Raman Similaritons*, Summer school New Concept in Photonics and Optical Communications, Dijon - France, 21-25 juin 2004, présentation invitée
- CI5. **J. Dudley, C. Billet, C. Finot et G. Millot** : *Intermediate Asymptotic Evolution and Photonic Bandgap Fiber Compression of Optical Similaritons* , Bragg Gratings, Poling & Photosensitivity / 30th Australian Conference on Optical Fibre Technology (BGPP/ACOFT) 2005, Sydney, Australie, 4-8 juillet 2005, présentation invitée
- CI6. **C. Finot, F. Parmigiani, P. Petropoulos et D.-J. Richardson** : *Parabolic pulse evolution in normally dispersive fiber amplifiers preceding the similariton formation regime*, CLEO 2006 (Conference on Laser and ElectroOptic), Long Beach, USA, 21-26 mai 2006
- CI7. **J. Fatome, S. Pitois, C. Finot et G. Millot** : *320 GHz, 640 GHz and 1 THz femtosecond pulse sources based on multiple four wave mixing in highly non linear optical fibers*, CLEO 2006 (Conference on Laser and ElectroOptic), Long Beach, USA, 21-26 mai 2006.
- CI8. **F. Parmigiani, C. Finot, K. Mukasa, M. Ibsen, M.A.F. Roelens, P. Petropoulos, D.J. Richardson** : *Ultra-flat SPM-broadened spectra in a highly nonlinear fiber using a fiber Bragg grating based parabolic pulse shaper*, ECOC 2006 (European Conference on Optical Communication), Cannes, 24-28 Septembre 2006.
- CI9. **L. Provost, C. Finot, P. Petropoulos, D.J. Richardson** : *Design scaling laws for self-phase modulation-based 2R-regenerators*, ECOC 2006 (European Conference on Optical Communication), Cannes, 24-28 Septembre 2006.
- CI10. **P. Dupriez, K. G. Wilcox, C. Finot, A. Malinowski, J. K. Sahu, D. J. Richardson, A. C. Tropper, and J. Nilsson** : *Gigahertz parabolic pulse generation in a high-power polarization-maintaining fiber amplifier seeded by a passively mode-locked VECSEL*, ECOC 2006 (European Conference on Optical Communication), Cannes, 24-28 Septembre 2006.
- CI11. **L. Provost, C. Finot, K. Mukasa, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Generalisation and experimental validation of design rules for self-phase modulation-based 2R-regenerators*, OFC 2007 (Optical Fiber Conference), Anaheim, USA, 25-29 avril 2007.
- CI12. **C. Finot, L. Provost, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Parabolic pulse generation through passive reshaping of Gaussian pulses in a normally dispersive dispersive fiber*, OFC 2007 (Optical Fiber Conference), Anaheim, USA, 25-29 avril 2007.
- CI13. **S. Wabnitz, C. Finot, A. Sysoliatin** : *Parabolic pulse generation in dispersion decreasing fiber amplifier*, CLEO 2007 (Conference on Laser and ElectroOptic), Baltimore, USA, 6-11 mai 2007.
- CI14. **L. Provost, F. Parmigiani, C. Finot, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Self-Phase Modulation-based 2R optical regenerator for the simultaneous processing of two WDM channels*, , CLEO 2007 (Conference on Laser and ElectroOptic) Munich, 17-22 Juin 2007.
- CI15. **C. Finot, J. Fatome, S. Pitois and G. Millot** : *All-fibered high-quality low-duty cycle 20-GHz picosecond pulse source*, CLEO 2007 (Conference on Laser and ElectroOptic) Munich, 17-22 Juin 2007.

- CI16. **C. Finot, J. Fatome, S. Pitois and Guy Millot** : *High-Quality Low Duty-Cycle 20-GHz and 40-GHz Picosecond Pulse Sources*, Nonlinear Photonics, Quebec, Canada, 2-6 Septembre 2007.
- CI17. **C. Finot, Stefan Wabnitz, A. Guryanov, A. A. Sysoliatin** : *Pulse Generation with Dispersion Decreasing Optical Fiber*, Nonlinear Photonics, Quebec, Canada, 2-6 Septembre 2007.
- CI18. **S. Pitois, C. Finot, L. Provost** : *Generation of Aperiodic Picosecond Pulses Sequences from Incoherent Optical Waves*, Nonlinear Photonics, Quebec, Canada, 2-6 Septembre 2007.
- CI19. **C. Finot, A. Guryanov, A. Sysoliatin, S. Wabnitz** : *Experimental parabolic pulse generation with an active dispersion decreasing fiber*, 2008 IEEE/LEOS Winter Topical Meetings, Sorrento, Italy, 14-16 January 2008.
- CI20. **S. Wabnitz and C. Finot**: *Nonlinear dynamics of parabolic pulse solutions to the dissipative Whitham equations and applications to supercontinuum guided wave light sources*, SIAM Conference on Nonlinear Waves and Coherent Structures, Rome, Italy, 21-24 Juillet 2008.
- CI21. **C. Ware, S. Cordette, C. Lepers, I. Fsaifes, B. Kibler, C. Finot, G. Millot** : *Spectral slicing of supercontinuum source for WDM/DS-OCDMA Applications*, 10 International Conference on Transparent Optical Networks, Athens, 22-26 June 2008, présentation invitée.
- CI22. **S. Pitois, C. Finot, L. Provost** : *Generation of localized pulses from incoherent wave in optical fiber lines made of concatenated Mamyshev regenerators*, Photonics Prague 2008, Prague, 27-29 Aout 2008.
- CI23. **B. Kibler, C. Finot, G. Millot, J. Wijcik, M. Szpulak, W. Urbanczyk** : *Soliton self-frequency shift in suspended core fibers*, Photonics Prague 2008, Prague, 27-29 Aout 2008.
- CI24. **K. Hammani, C. Finot, S. Pitois, J.M. Dudley, G. Milot** : *Experimental generation of extreme-value structures in fibre Raman amplifiers*, Cleo Focus Meeting, European Conference on Optical Communications, Bruxelles, 22-25 Septembre 2008.
- CI25. **L. Provost, C. Finot, P. Petropoulos, D.J. Richardson** : *2R Regeneration architectures based on multi-segmented fibres*, European Conference on Optical Communications, Bruxelles, 22-25 Septembre 2008.
- CI26. **C. Fortier, J. Fatome, B. Kibler, C. Finot, S.Pitois, et G. Millot** : *All-Fibered High-Quality Low Duty-Cycle 160-GHz femtosecond pulse source*, EOS Annual Meeting 2008, Paris, 29 septembre-2 octobre 2008.
- CI27. **C. Finot, B. Kibler and G. Millot** : *Optical solitons and similaritons in fiber based systems*, O CPNLW-09 Solitons in their Roaring Forties : Coherence and Persistence in Nonlinear Waves, Nice, 6-9 Janvier 2009. présentation invitée
- CI28. **C. Finot, G. Millot, J.-M. Dudley and D.J. Richardson** : *Parabolic pulse generation and applications* , 2009 IEEE/LEOS Winter Topical Meetings, Innsbruck, Autriche, 12-15 Janvier 2009. présentation invitée
- CI29. **P. Petropoulos, L. Provost, F. Parmigiani, C. Kouloumentas, C. Finot, K. Mukasa, P. Vorreau, I. Tomkos, S. Sygletos, W. Freude, J. Leuthold, A.D. Ellis, D.J. Richardson** : *Simultaneous 2R regeneration of WDM signals in a single optical fibre*, 2009 IEEE/LEOS Winter Topical Meetings, Innsbruck, Autriche, 12-15 Janvier 2009. présentation invitée
- CI30. **K. Hammani, C. Finot, J.M. Dudley and G. Millot** : *Generation and detection of optical rpgue-wave-like fluctuations in fiber Raman amplifiers*, 2009 IEEE/LEOS Winter Topical Meetings, Innsbruck, Autriche, 12-15 Janvier 2009.
- CI31. **L. Brilland; P. Houizot, J. Troles, F. Désévéday, Q. Coulombier, J. Fatome, C. Fortier, F. Smektala, K. Messadd, B. Kibler, S. Pitois, G. Gadret, C. Finot, T. Nguyen, T. Chartier, M. Thual, G. Renversez, N. Traynor, J.L. Adam** : *Recent progress on the realization of chalcogenides photonic crystal fibers*, Optical Components and Materials VI, San Jose, USA, 26 janvier 2009. présentation invitée
- CI32. **C. Finot, G. Millot, J.-M. Dudley and D.J. Richardson** : *Parabolic pulse formation and applications* , Optical Fiber Communication 2009, San Diego, 22-26 Mars 2009. présentation invitée
- CI33. **B. Kibler, C. Finot and J.-M. Dudley** : *Tailored soliton statistics in Supercontinuum Generation*, CLEO 2009 (Conference on Laser and ElectroOptic), Baltimore, USA, 31 mai-5 juin 2009

- CI34. **T. Martynkien, B. Kibler, C. Finot, J. Fatome, M. Szpulak, K. Wojcik, S. Wabnitz and W. Urbanczyk** : *Nonlinear femtosecond pulse propagation in all-solid photonic bandgap fiber*, CLEO 2009 (Conference on Laser and ElectroOptic), Baltimore, USA, 31 mai-5 juin 2009
- CI35. **K. Hammani, C. Finot and G. Millot** : *Emergence of extreme events in fiber based parametric processes driven by a partially incoherent pump wave*, CLEO Europe 2009 (Conference on Laser and ElectroOptic), Munich, Allemagne, 14-19 juin 2009
- CI36. **C. Finot, J.-M. Dudley, D.J. Richardson and G. Millot** : *Generation of parabolic pulses and applications for optical telecommunications*, 11th International Conference on Transparent Optical Network (ICTON), Azores, Portugal, 28 juin-2 Juillet 2009. présentation invitée
- CI37. **K. Hammani, C. Finot, Bertrand Kibler, J.-M. Dudley and G. Millot** : *Extreme events in fiber based amplifiers*, 11th International Conference on Transparent Optical Network (ICTON), Azores, Portugal, 28 juin-2 Juillet 2009.
- CI38. **J. Fatome, S. Pitois, C. Fortier, B. Kibler, C. Finot, G. Millot, C. Courde, M. Lintz and E. Samain** : *On recent progress in all-fibered pulsed optical sources from 20 GHz to 2 THz based on multiple four wave mixing approach*, 11th International Conference on Transparent Optical Network (ICTON), Azores, Portugal, 28 juin-2 Juillet 2009.
- CI39. **T. N. Nguyen, M. C. e Silva, M. Gay, T. Chartier, L. Bramerie, J.C. Simon, J. Fatome and C. Finot** : *A fiber based limiter at 170 Gbit/s for all-optical regeneration*, 2009 International Conference on Advanced Technologies for Communications, Hai Phong, Vietnam, 12-14 octobre 2009.

2.2. Communications orales dans une conférence nationale

- CN1. **C. Finot, G. Millot C. Billet, and J.-M. Dudley** : *Observation et caractérisation de similaritons optiques générés par amplification Raman dans une fibre optique standard*, 22^{ièmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Valence, 12-14 Novembre 2003.
- CN2. **C. Finot, G. Millot and J.-M. Dudley** : *Similaritons Raman*, 7^{ième} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 10-12 Mars 2004.
- CN3. **C. Finot** : *Similaritons Raman*, 5^{ièmes} Journées de l'École Doctorale Carnot, prix SFP section Bourgogne/Franche-Comté, Besançon, 6-7 Mai 2004.
- CN4. **C. Finot, S. Pitois and G. Millot** : *Synthèse temporelle d'impulsions et régénération optique de signaux télécom par Similaritons Raman*, 23^{ièmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Paris, 25-27 Octobre 2004.
- CN5. **A. Mussot, E. Lantz, H. Maillotte, T. Sylvestre, C. Finot and S. Pitois** : *Élargissement spectral d'un faisceau laser partiellement cohérent et continu dans les fibres optiques*, 23^{ièmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Valence, 25-27 Octobre 2004.
- CN6. **C. Finot** : *Applications des similaritons optiques*, 6^{ièmes} Journées de l'École Doctorale Carnot, Dijon, 18-19 Mai 2005.
- CN7. **C. Finot, G. Millot** : *Interaction et collision de similaritons optiques*, Congrès général 2005 de la Société Française de Physique et de la Belgian Physical Society, Lille, 29 Août-2 Septembre 2005, premier prix de la meilleure communication jeune chercheur.
- CN8. **B. Barviau, C. Finot, J. Fatome, S. Pitois and G. Millot** : *Conversion de fréquence large bande par instabilité modulationnelle et effet Raman intrapulse dans une fibre optique*, 7^{ièmes} Journées des phénomènes ultra-rapides, Villeneuve d'Asq, 5-7 Décembre 2005.
- CN9. **J.-M. Dudley, C. Billet, P.-A. Lacourt, R. Ferrière, C. Finot and G. Millot** : *Propagation autosimilaire et similariton optique*, 9^{ième} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 8-10 Mars 2006.
- CN10. **C. Finot, J. Dudley and G. Millot** : *Amplification parabolique : aspects fondamentaux*, Journée Fibre Optique Femtoseconde, Palaiseau, 3 Octobre 2006, présentation invitée.

- CN11. **P. Dupriez, C. Finot, A. Malinowski, J. Nilsson, D. Richardson, K. Wilcox, H. Foreman, A. Tropper** : *Génération d'impulsions ultrabrèves de haute puissance et à haut taux de répétition par amplification fibrée en régime auto-similaire ou d'auto-modulation de phase*, 25^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Metz, 7-9 Novembre 2006.
- CN12. **C. Finot, F. Parmigiani, P. Petropoulos et David Richardson** : *Méthodes simples et sensibles pour optimiser le taux d'extinction d'un modulateur optique*, 25^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Metz, 7-9 Novembre 2006.
- CN13. **A. Guenot, C. Finot, P. Petropoulos, D. Richardson et G. Millot** : *Exploitation de l'autoglissement fréquentiel soliton limité par des radiations de Cherenkov pour générer deux impulsions au décalage fréquentiel ou temporel continûment ajustable*, 25^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Metz, 7-9 Novembre 2006.
- CN14. **C. Finot, S. Wabnitz, A. Guryanov et A. Sysoliatin** : *Génération d'impulsions paraboliques par utilisation d'une fibre à dispersion normale décroissante*, 26^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Grenoble, 2-5 Juillet 2007.
- CN15. **G. Millot, C. Finot et J. Dudley** : *Applications de l'auto-similarité en optique non linéaire ultrarapide*, 11^{ème} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 25-27 Mars 2008. présentation invitée.
- CN16. **K. Hammani, C. Finot, S. Pitois, J.M. Dudley and G. Millot** : *Ondes scélérates optiques*, 27^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lannion, 20-22 Octobre 2008. présentation invitée
- CN17. **B. Kibler, S. Cordette, C. Finot, K. Hammani, C. Lepers, C. Ware, S. Wabnitz, G. Millot** : *Optimisation de la génération d'un continuum cohérent dans une fibre à dispersion normale et à haute nonlinéarité*, 27^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lannion, 20-22 Octobre 2008.
- CN18. **K. Hammani, C. Finot, B. Kibler, J.-M. Dudley and G. Millot** : *Ondes scélérates dans les fibres optiques*, COLOQ 11 (COnférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Mouans-Sartoux, 7-9 Septembre 2009. présentation invitée

2.3. Séminaires et interventions dans des groupes de recherche

- S1. **C. Finot** : *Les similaritons optiques : concept, démonstration expérimentale et applications*, séminaire donné au Laboratoire de Physique de l'Université de Bourgogne, Dijon, 10 Décembre 2004
- S2. **C. Finot** : *Similaritons dans les amplificateurs optiques fibrés*, séminaire invité à l'Institut Fresnel, Marseille, 3 mars 2006
- S3. **G. Millot, J. Fatome, C. Finot and S. Pitois**: *Ultrashort pulse sources for all-optical reshaping of high speed telecommunication signals*, séminaire donné au Department de Physics, University of Auckland, New-Zealand, Auckland, 30 Janvier 2007
- S4. **S. Pitois, C. Finot et L. Provost** : *Génération de séquences d'impulsions picosecondes aperiodiques à partir d'ondes optiques incohérentes*, atelier du GDR 3073, PhoNoMi2, Photonique Nonlinéaire et Milieux Microstructurés, Montpellier, 25-27 Octobre 2007.
- S5. **C. Finot** : *Utilisation des effets non-linéaires pour de nouvelles sources laser fibrées*, Journées scientifiques de l'Institut CARNOT Bourgogne, Dijon, 5 Février 2008.
- S6. **B. Kibler, C. Finot, C. de Angelis** : *Supercontinuum generation experiments in P2 and P4 fibers*, COST 299 Optical Fibers for New Challenges Facing the Information Society, technical meeting, Berlin, 5-7 Février 2008.
- S7. **E. Finot, A. Krause, V. Rouger, C. Finot, A. Passian, M.H. Nadal, T. Thundat** : *The surface stress as a link between the bending and the frequency response of microcantilevers*, Nanomechanical Cantilever Sensors, Mainz, 19-21 Mai 2008.
- S8. **B. Kibler, C. Finot and G. Millot** : *Fibre microstructurée à deux zéros de dispersion : étude des fluctuations de microstructure sur des applications à haut-débit et détermination expérimentale du second zéro de dispersion*, atelier du GDR 3073, PhoNoMi2, Photonique Nonlinéaire et Milieux Microstructurés, Lille, 29-31 Mai 2008.

- S9. **B. Kibler, C. Finot, B. Barviau, A. Picozzi, G. Millot** : *Nonlinear pulse propagation in microstructured fibers : characterization, physics and applications*, COST 299 Optical Fibers for New Challenges Facing the Information Society, technical meeting, Madère, 3-5 Septembre 2008, **séminaire invité**
- S10. **B. Kibler, C. Finot, G. Millot, J. Wojcik, M. Szpulak, W. Urbanczyk** : *Second zero-dispersion measurement in suspended core fibers*, COST 299 Optical Fibers for New Challenges Facing the Information Society, technical meeting, Madère, 3-5 Septembre 2008.
- S11. **J. M. Dudley, G. Genty, F. Dias, C. Finot et al., B. Eggleton et al.** : *Recent progress in Supercontinuum instabilities and control*, atelier du GDR 3073, PhoNoMi2, Photonique Nonlinéaire et Milieux Microstructurés, Montpellier, 13-15 Mai 2009.

2.4. Conférences de vulgarisation scientifique

- V1. **C. Finot** : *Une application de la photonique : les télécommunications à très haut débit*, conférence à l'Académie des Sciences de Dijon, 13 mai 2009.
- V2. **C. Finot** : *L'optique une discipline pleine de promesses : l'exemple des télécommunications optiques*, conférence à l'Université pour Tous, section d'Auxerre, Auxerre, 15 mai 2009.
- V2. **C. Finot** : *La photonique, et ses applications*, conférence à l'Université pour Tous, section de Montceau, Montceau, 18 octobre 2009.
- V4. **C. Finot** : *L'optique une discipline pleine de promesse : l'exemple des télécommunications optiques*, conférence à l'Université pour Tous, section de Dijon, Dijon, 28 janvier 2010.

2.5. Posters

- Post1. **C. Finot** : Génération et propagation d'impulsions paraboliques par amplification Raman dans une fibre à dispersion décalée, 4^{èmes} Journées de l'Ecole Doctorale Carnot, **prix SFP section Bourgogne/Franche-Comté de la meilleure communication par affiche**, Dijon-France, 16 Mai 2003.
- Post2. **C. Finot, G. Millot, C. Billet and J.-M. Dudley** : Génération de similaritons optiques à 1550 nm par amplification Raman dans une fibre à dispersion décalée, COLOQ 8 (Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Toulouse, 3-5 Septembre 2003.
- Post3. **C. Finot and G. Millot** : Interactions de similaritons optiques : du similariton au soliton noir, 8^{ième} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 9-11 Mars 2005.
- Post4. **C. Finot and G. Millot** : Collision de similaritons optiques dans un amplificateur optique fibré Raman, COLOQ 9 (Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Dijon, 7-9 Septembre 2005.
- Post5. **C. Finot and G. Millot** : Comparaison expérimentale de différentes techniques de caractérisation en intensité et en phase d'impulsions optiques ultracourtes, COLOQ 9 (Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Dijon, 7-9 Septembre 2005.
- Post6. **C. Finot, F. Parmigiani, P. Petropoulos and D.-J. Richardson** : Évolution d'impulsions paraboliques dans un amplificateur à fibre optique hors régime asymptotique, 9^{ième} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 8-10 Mars 2006.
- Post7. **C. Finot and G. Millot** : Modulation de phase croisée lors de la collision de similaritons optiques, 9^{ième} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 8-10 Mars 2006.
- Post8. **C. Finot, P. Dupriez, L. Provost, F. Parmigiani, P. Petropoulos, D.J. Richardson, C. Billet, J. Dudley, S. Pitois and G. Millot** : Impulsions paraboliques et similaritons dans les fibres optiques, 4^{ième} colloque de la Physique Atomique, Moléculaire et Optique de la Société Française de Physique, Dijon, 5-7 Juillet 2006.
- Post9. **L. Provost, C. Finot, P. Petropoulos et D. Richardson** : Règles de conception pour les régénérateurs optiques 2-R exploitant l'auto-modulation de phase, 25^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Metz, 7-9 Novembre 2006.
- Post10. **B. Barviau, C. Finot, P. Grelu, P. Suret, S. Randoux et G. Millot** : Laser Raman fibré délivrant des impulsions nanosecondes aux longueurs d'onde des télécommunications, 25^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Metz, 7-9 Novembre 2006.
- Post11. **B. Barviau, C. Finot, J. Fatome and G. Millot** : Création d'un peigne de fréquences de longueur d'onde centrale accordable à partir d'ondes continues, 10^{ième} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 14-16 Mars 2007.
- Post12. **B. Barviau, J. Fatome, C. Finot and G. Millot** : Broad-spectrum frequency comb generation from continuous waves, CLEO 2007 (Conference on Laser and ElectroOptic) Munich, 17-22 Juin 2007.
- Post13. **J. Fatome, C. Finot, S. Pitois and G. Millot** : Sources optiques fibrées picosecondes à très faible duty-cycle cadencées à 20 GHz et 40 GHz., COLOQ 10 (Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Grenoble, 2-5 Juillet 2007.
- Post14. **C. Finot, A. Guenot, P. Dupriez** : Apport des similaritons optiques à la recompression spectrale dans une fibre optique, COLOQ 10 (Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Grenoble, 2-5 Juillet 2007.
- Post15. **B. Barviau, J. Fatome, C. Finot and G. Millot** : Création d'un peigne de fréquences de longueur d'onde centrale accordable à partir d'ondes continues, COLOQ 10 (Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Grenoble, 2-5 Juillet 2007.
- Post16. **C. Finot and L. Provost** : Étude numérique des performances d'un régénérateur 2R à fibre, 26^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Grenoble, 2-5 Juillet 2007.
- Post17. **T.N. Nguyen, T. Chartier, L. Bramerie, J.C. Simon, J. Fatome, S. Pitois, B. Baz, C. Finot** : Caractérisation théorique du régénérateur 2R exploitant l'automodulation de phase dans une fibre optique, 26^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Grenoble, 2-5 Juillet 2007.

- Post18. **S. Pitois, C. Finot and L. Provost** : *Génération de séquences d'impulsions picosecondes aperiodiques à partir d'ondes optiques incohérentes*, 26^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Grenoble, 2-5 Juillet 2007.
- Post19. **B. Kibler, A. Guenot, C. Finot, L. Provost** : *Diverses manifestations de l'effet Raman lors de la propagation d'impulsions femtosecondes dans une fibre microstructurée*, 11^{ème} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 26-27 Mars 2008.
- Post20. **K. Hammani, C. Finot, S. Pitois, J. Fatome, G. Millot** : *Real time measurement of long parabolic optical similaritons*, EOS Annual Meeting 2008, Paris, 29 septembre-2 octobre 2008.
- Post21. **S. Pitois, C. Finot, J. Fatome, G. Millot** : *Optical delay line based on vectorial modulational instability and dispersion in optical fibres*, EOS Annual Meeting 2008, Paris, 29 septembre-2 octobre 2008.
- Post22. **K. Hammani, C. Finot, S. Pitois, J.M. Dudley and G. Millot** : *Observation de structures scélérates dans un amplificateur optique Raman à fibre*, 27^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lannion, 20-22 Octobre 2008.
- Post23. **B. Kibler, C. Finot** : *Impact des fluctuations longitudinales d'une fibre microstructurée sur des applications à haut-débit*, 27^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lannion, 20-22 Octobre 2008.
- Post24. **S. Pitois, C. Finot, J. Fatome, M. Lintz** : *Impact d'une modulation de phase anti-Brillouin sur la génération d'un train d'impulsions picosecondes dans une fibre optique*, 27^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lannion, 20-22 Octobre 2008.
- Post25. **B. Barviau, C. Finot, P. Grelu, G. Millot** : *Différents régimes impulsionnels dans un laser Raman à fibre optique*, 27^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lannion, 20-22 Octobre 2008.
- Post26. **S. Cordette, B. Kibler, I. Fsaïfes, C. Lepers, C. Ware, C. Finot, G. Millot** : *Etude expérimentale d'un système hybride WDM/ DS-OCDMA pour réseau d'accès optique haut-débit*, 27^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lannion, 20-22 Octobre 2008.
- Post27. **K. Hammani, C. Finot, S. Pitois, J.M. Dudley and G. Millot** : *Observation de structures scélérates dans un amplificateur optique Raman à fibre*, 27^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lannion, 20-22 Octobre 2008.
- Post28. **K. Hammani, C. Finot, J. M. Dudley and G. Millot** : *Emergence de structures optiques extrêmes par amplification fibre basée sur une pompe partiellement cohérente*, 11^{ème} rencontre du Non-Linéaire, Paris, 12-13 Mars 2009.
- Post29. **B. Kibler, C. Finot and J.-M. Dudley** : *Tailored soliton statistics in supercontinuum generation*, CLEO Europe 2009 (Conference on Laser and ElectroOptic), Munich, Allemagne, 14-19 juin 2009
- Post30. **J. Fatome and C. Finot** : *Scaling guidelines of a soliton-based power limiter for 2R-optical regeneration applications*, 11th International Conference on Transparent Optical Network (ICTON), Azores, Portugal, 28 juin-2 Juillet 2009.
- Post31. **K. Hammani, C. Finot, B. Kibler and G. Millot** : *Emergence de structures de type soliton par instabilité modulationnelle d'ordre 4*, 28^{èmes} Journées Nationales de l'Optique Guidée, Lille, 6-9 Juillet 2009
- Post32. **T. Martynkien, B. Kibler, C. Finot, J. Fatome, M. Szpulak, K. Wojcik, S. Wabnitz and W. Urbanczyk** : *Propagation non-linéaire d'impulsions femtosecondes dans une fibre optique à bande interdite à cœur solide*, COLOQ 11 (Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Mouans-Sartoux, 7-9 Septembre 2009
- Post33. **C. Finot, L. Wu** : *Impact du profil de phase initial sur l'évolution asymptotique d'impulsions dans un amplificateur à fibre*, COLOQ 11 (Conférence sur les Lasers et l'Optique Quantique), Mouans-Sartoux, 7-9 Septembre 2009

PUBLICATIONS ANNEXÉES

THÈME 1 : LES SIMILARITONS OPTIQUES

- ➔ **C. Finot and G. Millot** : *Collisions of optical similaritons*, Optics Express 13, 7653-7665 (2005).
- ➔ **J. Dudley, C. Finot, D.J. Richardson and G. Millot** : *Self-similarity and scaling phenomena in nonlinear ultrafast optics*, Nature Physics 3, 597-603 (2007).
- ➔ **C. Finot, B. Barviau, G. Millot, A. Guryanov, A. Sysoliatin, S. Wabnitz** : *Parabolic pulse generation with active or passive dispersion decreasing optical fibers*, Optics Express 15, 15824-15835 (2007).
- ➔ **K. Hammani, C. Finot, S. Pitois, J. Fatome and G. Millot** : *Real time measurement of long parabolic optical similaritons*, Electronics Letters, 44, 1239-1240 (2008).

THÈME 2 : LA RÉGÉNÉRATION OPTIQUE PAR DISPOSITIFS NON-LINÉAIRES À FIBRE

- ➔ **C. Finot, S. Pitois and G. Millot** : *Regenerative 40 Gbit/s wavelength converter based on similariton generation*, Optics Letters 30, 1776-1778 (2005).
- ➔ **L. Provost, C. Finot, K. Mukasa, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Design scaling rules for 2R-Optical Self-Phase Modulation-based regenerators 2R regeneration*, Optics Express 15, 5100-5113 (2007).
- ➔ **S. Pitois, C. Finot, L. Provost** : *Asymptotic properties of incoherent waves propagating in an all-optical regenerator lines*, Optics Letters 32, 3262-3265 (2007).
- ➔ **C. Finot, T.N. Nguyen, J. Fatome, T. Chartier, S. Pitois, L. Bramerie, M. Gay, J.-C. Simon** : *Numerical study of an optical regenerator exploiting self-phase modulation and spectral offset filtering at 40 Gbit/s*, Optics Communications 281, 2252-2264 (2008).

THÈME 3 : LES SOURCES OPTIQUES FIBRÉES DE NOUVELLE GÉNÉRATION

- ➔ **F. Parmigiani, C. Finot, K. Mukasa, M. Ibsen, M.A.F Roelens, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Ultra-flat SPM-broadened spectra in a highly nonlinear fiber using parabolic pulses formed in a fiber Bragg grating*, Optics Express 14, 7617-7622 (2006).
- ➔ **C. Finot, J. Fatome, S. Pitois and G. Millot** : *All-fibered high-quality low duty-cycle 20-GHz and 40-GHz picosecond pulse sources*, Photonics Technology Letters 19, 1711-1713 (2007).
- ➔ **C. Finot, B. Kibler, L. Provost and S. Wabnitz** : *Beneficial impact of wave-breaking or coherent continuum formation in normally dispersive nonlinear fibers*, Journal of Optical Society of America B 25, 1938-1948 (2008).
- ➔ **B. Kibler, C. Finot, G. Gadret, G. Millot, J. Wojcik, M. Szpulak and W. Urbanczyk** : *Soliton self-frequency shift compensation and zero dispersion wavelength measurement in suspended core fibers*, Electronics Letters 44, 1370-1371 (2008).

THÈME 4 : LES STRUCTURES OPTIQUES EXTRÊMES

- ➔ **K. Hammani, C. Finot, J.M. Dudley and G. Millot** : *Optical rogue-wave fluctuations in fiber Raman amplifiers*, Optics Express 16, 16467-16474 (2008)
- ➔ **K. Hammani, C. Finot and G. Millot** : *Emergence of extreme events in fiber-based parametric processes driven by a partially incoherent wave*, Optics Letters 34, 1138-1140 (2009).
- ➔ **B. Kibler, C. Finot and J.M. Dudley** : *Soliton and rogue wave statistics in supercontinuum generation in photonic crystal fibre with two zero dispersion wavelengths*, European Physical Journal Special Topics 173, 273-279 (2009).

THÈME 1 :

LES SIMILARITONS OPTIQUES

- ➔ **C. Finot and G. Millot :** *Collisions of optical similaritons*, Optics Express 13, 7653-7665 (2005).
- ➔ **J. Dudley, C. Finot, D.J. Richardson and G. Millot :** *Self-similarity and scaling phenomena in nonlinear ultrafast optics*, Nature Physics 3, 597-603 (2007).
- ➔ **C. Finot, B. Barviau, G. Millot, A. Guryanov, A. Sysoliatin, S. Wabnitz :** *Parabolic pulse generation with active or passive dispersion decreasing optical fibers*, Optics Express 15, 15824-15835 (2007).
- ➔ **K. Hammani, C. Finot, S. Pitois, J. Fatome and G. Millot :** *Real time measurement of long parabolic optical similaritons*, Electronics Letters, 44, 1239-1240 (2008).

THÈME 2 :

LA RÉGÉNÉRATION OPTIQUE PAR DISPOSITIFS NON-LINÉAIRES À FIBRE

- ➔ **C. Finot, S. Pitois and G. Millot** : *Regenerative 40 Gbit/s wavelength converter based on similariton generation*, Optics Letters 30, 1776-1778 (2005).
- ➔ **L. Provost, C. Finot, K. Mukasa, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Design scaling rules for 2R-Optical Self-Phase Modulation-based regenerators 2R regeneration*, Optics Express 15, 5100-5113 (2007).
- ➔ **S. Pitois, C. Finot, L. Provost** : *Asymptotic properties of incoherent waves propagating in an all-optical regenerator lines*, Optics Letters 32, 3262-3265 (2007).
- ➔ **C. Finot, T.N. Nguyen, J. Fatome, T. Chartier, S. Pitois, L. Bramerie, M. Gay, J.-C. Simon** : *Numerical study of an optical regenerator exploiting self-phase modulation and spectral offset filtering at 40 Gbit/s*, Optics Communications 281, 2252-2264 (2008).

THÈME 3 :

LES SOURCES OPTIQUES FIBRÉES DE NOUVELLE GÉNÉRATION

- ➔ **F. Parmigiani, C. Finot, K. Mukasa, M. Ibsen, M.A.F Roelens, P. Petropoulos and D.J. Richardson** : *Ultra-flat SPM-broadened spectra in a highly nonlinear fiber using parabolic pulses formed in a fiber Bragg grating*, Optics Express 14, 7617-7622 (2006).
- ➔ **C. Finot, J. Fatome, S. Pitois and G. Millot** : *All-fibered high-quality low duty-cycle 20-GHz and 40-GHz picosecond pulse sources*, Photonics Technology Letters 19, 1711-1713 (2007).
- ➔ **C. Finot, B. Kibler, L. Provost and S. Wabnitz** : *Beneficial impact of wave-breaking or coherent continuum formation in normally dispersive nonlinear fibers*, Journal of Optical Society of America B 25, 1938-1948 (2008).
- ➔ **B. Kibler, C. Finot, G. Gadret, G. Millot, J. Wojcik, M. Szpulak and W. Urbanczyk** : *Soliton self-frequency shift compensation and zero dispersion wavelength measurement in suspended core fibers*, Electronics Letters 44, 1370-1371 (2008).

THÈME 4 :

LES STRUCTURES OPTIQUES EXTRÊMES

- ➔ **K. Hammani, C. Finot, J.M. Dudley and G. Millot :** *Optical rogue-wave fluctuations in fiber Raman amplifiers*, Optics Express 16, 16467-16474 (2008)
- ➔ **K. Hammani, C. Finot and G. Millot :** *Emergence of extreme events in fiber-based parametric processes driven by a partially incoherent wave*, Optics Letters 34, 1138-1140 (2009).
- ➔ **B. Kibler, C. Finot and J.M. Dudley :** *Soliton and rogue wave statistics in supercontinuum generation in photonic crystal fibre with two zero dispersion wavelengths*, European Physical Journal Special Topics 173, 273-279 (2009).

