



Université de Franche-Comté

École Doctorale SPIM  
Sciences Pour l'Ingénieur et les Microtechniques

# Habilitation à Diriger les Recherches

Mémoire de Synthèse des Activités  
de Recherche et d'Encadrement  
Présenté par

**Yanne CHEMBO KOUOMOU**  
Chargé de Recherche au CNRS

**Systèmes Photoniques Micro-Ondes et  
Applications en Ingénierie Aérospatiale  
et en Télécommunications**

Soutenu le 26 septembre 2011

**Jury :**

Président : H. Maillotte, Directeur de Recherche CNRS, Institut FEMTO-ST  
Rapporteurs : T. Erneux, Professeur, Université Libre de Bruxelles  
M. Le Berre, Directrice de Recherche CNRS, ISMO  
R. Quéré, Professeur, Université de Limoges  
Examineurs : P. Féron, Maître de Conférences HDR, Université de Rennes I  
P. Glorieux, Professeur, Université de Lille I  
L. Larger, Professeur, Université de Franche-Comté  
Y. Pomeau, Professeur Emérite, Université de l'Arizona



*A la lumière des nouvelles connaissances acquises, les résultats obtenus semblent presque aller de soi, et n'importe quel étudiant suffisamment intelligent peut les comprendre sans trop de difficulté.*

*Mais les années de recherches anxieuses dans l'obscurité, avec leurs intenses frustrations, les alternances entre confiance et épuisement, aboutissant, au final, à la rupture de front vers la clarté – cela, seuls ceux qui l'ont vécu peuvent le comprendre.*

**Albert Einstein.**

---



# Remerciements

La personne qui a eu l'impact le plus décisif et le plus fructueux sur ma trajectoire de chercheur au cours de ces cinq dernières années est sans conteste M. Laurent Larger. Je voudrais ici lui exprimer mes plus sincères remerciements, et je voudrais surtout lui dire ma reconnaissance pour toutes ces années de collaboration qui m'ont tant enrichi des points de vue scientifique, académique, et humain.

J'aimerais remercier MM. John Dudley et Hervé Maillotte pour leur soutien constant et multiforme.

Qu'il me soit permis d'exprimer ma gratitude à Mme Martine Le Berre, à M. Thomas Erneux et à M. Raymond Quéré, pour avoir accepté d'être les rapporteurs de ce Mémoire d'Habilitation à Diriger les Recherches. Je souhaiterais remercier MM. Patrice Féron, Pierre Glorieux, et Yves Pomeau, ainsi que les rapporteurs sus-cités, pour avoir m'avoir fait l'honneur de participer à ce jury de soutenance.

Une partie significative du travail de recherche présenté dans ce Mémoire a été effectuée au *NASA Jet Propulsion Laboratory* à Pasadena, USA, en collaboration avec M. Nan Yu, que je voudrais remercier très chaleureusement.

J'ai une pensée particulièrement reconnaissante pour M. Paul Wofo qui a guidé mes tous premiers pas dans la recherche et dirigé ma thèse camerounaise. Je souhaite aussi exprimer ma gratitude à M. Pere Colet qui a supervisé ma thèse espagnole.

Il serait trop long ici de remercier nommément les nombreux collègues et camarades qui ont été à mes côtés durant ces dernières années. Qu'ils ne doutent point de ma gratitude, et pour certains, de mon amitié à leur égard.

A ma Mère, qui a toujours pu. Mon Père, qui a toujours su. A ma fratrie. And to Bee, for the past and forthcoming moments of awe.

Yanne K. Chembo  
Besançon,  
Le 21 septembre 2011.

---



## Résumé

Les performances des systèmes de photonique micro-onde ont récemment permis d'envisager leur intégration effective en ingénierie aérospatiale et en télécommunications. Nous nous sommes particulièrement intéressés ces dernières années à leurs applications dans le cadre de la génération de micro-ondes ultra-pures, en utilisant des oscillateurs optoélectroniques ou des peignes de fréquences issus de résonateurs à modes de galerie. Dans les deux cas, nous avons développé une approche originale basée sur les dynamiques non-linéaires et stochastiques. Les résultats obtenus à partir de ce formalisme pluridisciplinaire se sont révélés en excellente concordance avec les mesures expérimentales. Ces résultats nous permettent ainsi d'entrevoir pour les années futures de grandes opportunités pour l'approfondissement des connaissances, autant du point de vue fondamental (physique de la matière condensée, interaction lumière-matière, électrodynamique quantique en cavité, dynamiques non-linéaires et stochastiques, etc.) et qu'applicatif (génération de micro-ondes ultra-pures, lasers Raman/Brillouin, sources cohérentes multi-longueurs d'onde, etc.).

**Mots-clés :** photonique micro-onde, optoélectronique, résonateurs à modes de galerie, micro-ondes ultra-stables, ingénierie aérospatiale, télécommunications optiques, théorie de l'information, systèmes dynamiques non-linéaires et stochastiques.

---





# Abstract

The performances of microwave photonics systems have recently enabled to anticipate their effective integration in aerospace and communication engineering. In that perspective, we have particularly investigated various applications in the framework of ultra-pure microwave generation in the last years, using either optoelectronic oscillators or optical frequency combs originating from whispering-gallery mode resonators. In both cases, we have developed an original approach based on nonlinear and stochastic dynamics. Results obtained from this cross-disciplinary formalism were found to be in excellent agreement with experimental measurements. These results foreshadow great opportunities of further fruitful research, at both the fundamental (condensed matter physics, light-matter interaction, cavity quantum electrodynamics, nonlinear and stochastic dynamics, etc.) and applied (ultra-pure microwave generation, Raman/Brillouin lasers, multi-wavelength coherent sources, etc.) points of view.

**Keywords** : microwave photonics, optoelectronics, whispering-gallery mode resonators, ultra-stable microwaves, aerospace engineering, optical communications, information theory, nonlinear and stochastic dynamical systems.

---



# Table des matières

<b>Remerciements</b>	<b>i</b>
<b>Résumé</b>	<b>iii</b>
<b>Abstract</b>	<b>v</b>
<b>Table des matières</b>	<b>vii</b>
<b>I. Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>II. Curriculum vitae</b>	<b>3</b>
<b>III. Résumé des thèses doctorales</b>	<b>5</b>
<b>IV. Activités de recherche après les thèses</b>	<b>9</b>
<b>V. Perspectives de recherche</b>	<b>27</b>
<b>VI. Activités d'animation de la recherche</b>	<b>55</b>
<b>VII. Activités d'encadrement</b>	<b>57</b>
<b>VIII. Activités d'intérêt collectif</b>	<b>59</b>
<b>IX. Liste des publications</b>	<b>61</b>
<b>X. Liste des communications</b>	<b>65</b>
<b>XI. Conclusion générale</b>	<b>69</b>
<b>Annexe : Articles publiés après les thèses</b>	<b>71</b>

**Nota** : Les références dans le texte sont listées à la fin de chaque section.

---



# I. Introduction générale

La photonique micro-onde est une discipline scientifique et technologique relativement récente. Son but est l'étude et l'exploitation des phénomènes d'interaction entre les signaux optiques et micro-ondes. Les systèmes issus de ce nouveau paradigme trouvent aujourd'hui leur place dans plusieurs champs d'applications, et héritent des progrès industriels et scientifiques accomplis depuis cinq décennies dans les domaines de l'électronique hyperfréquence, de l'optoélectronique, et de la photonique.

Dans le cadre de ce Mémoire de synthèse, nous présentons les travaux scientifiques effectués sur cette thématique depuis la fin de nos études doctorales. L'axe central de ces travaux a été l'étude des générateurs de micro-ondes ultra-pures, en utilisant des oscillateurs opto-électroniques ou des peignes de fréquences issus de résonateurs à mode de galerie. Nous avons aussi exploré les voies et moyens de leur intégration effective en ingénierie aérospatiale et des télécommunications. Ces travaux de recherche ont été essentiellement effectués dans l'équipe OPTO (Optoélectronique, Photonique et Télécommunications Optiques) du Département d'Optique P.-M. Duffieux (DOPMD) de l'Institut FEMTO-ST à Besançon, ainsi qu'au NASA *Jet Propulsion Laboratory* à Pasadena, USA.

Concrètement, les applications visées par la génération de micro-ondes ultra pures sont multiples. En ingénierie aérospatiale, ces micro-ondes sont indispensables pour les radars de haute précision. Ils peuvent aussi, dans des conditions optimales, servir d'horloges pour les systèmes embarqués. L'intérêt des oscillateurs photoniques micro-ondes est aussi grandissant en métrologie temps-fréquence, ainsi que pour la spectroscopie en astrophysique. En ingénierie des télécommunications, les applications sont aussi multiples : (de)modulation ultra-rapide des signaux, horloges ultra-stables pour la synchronisation des réseaux et les oscillateurs locaux, liaisons optiques avec multiplexage ultra-dense en longueur d'onde, impulsions sub-picosecondes pour l'échantillonnage des signaux, applications LIDAR, etc.

Les générateurs de photonique micro-onde ne pourront devenir des composants standards en ingénierie aérospatiale et en télécommunications que si leurs propriétés dynamiques sont bien comprises, et par conséquent, à la fois prédictibles et optimisables. Nos travaux de recherche durant ces dernières années ont eu pour principal objectif d'étudier ces générateurs sous un angle non-conventionnel, qui s'est au final révélé particulièrement fructueux.

Nous avons ainsi développé une approche originale pour décrire le comportement temporel et évaluer les performances de ces systèmes. Effectivement, leur compréhension théorique

---

et expérimentale doit s'appuyer sur une connaissance approfondie de plusieurs champs de connaissances relativement différents, tels que l'optoélectronique, la physique de la matière condensée, la métrologie temps-fréquence, la mécanique quantique, la complexité computationnelle, et enfin la théorie des systèmes dynamiques non-linéaires et stochastiques. Les résultats théoriques obtenus à partir de ce formalisme pluridisciplinaire se sont révélés en excellente concordance avec les mesures expérimentales, validant ainsi leur pertinence.

Au-delà de la thématique centrale de la génération de micro-ondes ultra-pures, nous avons aussi participé à des recherches dans le domaine des télécommunications optiques, de la théorie de l'information et de la complexité des systèmes dynamiques.

Le plan de ce Mémoire de Synthèse est le suivant. Après quelques éléments de biographie académique et un résumé des travaux réalisés dans le cadre doctoral, nous présenterons en détail nos activités de recherche postdoctorale. Nous expliquerons ensuite, dans le détail, nos perspectives de recherche à moyen terme. Nous présenterons après nos activités scientifiques d'intérêt collectif, ainsi que celles de gestion de projets, d'encadrement et d'animation de la recherche. Enfin, après la liste exhaustive de nos travaux scientifiques, nous terminerons par une conclusion générale.

---

## II. Curriculum vitae

### Données personnelles

Yanne CHEMBO KOUOMOU  
Né le 02 juillet 1976  
au Blanc-Mesnil (France)  
Nationalité Camerounaise

### Affiliation

Chargé de Recherche CNRS (CR1)  
Institut FEMTO-ST [UMR CNRS 6174]  
Département d'Optique  
+33 (0)381 666 401  
yanne.chembo@femto-st.fr

### Formation

#### 2006 : Doctorat de Physique [Début en 2002]

**Mention :** *Sobresaliente cum Laude* [Mention maximale].  
**Lieu :** Université des Iles Baléares, Institut Méditerranéen d'Etudes Avancées (anciennement IMEDEA, maintenant IFISC), Palma de Majorque, ESPAGNE.  
**Titre :** *Nonlinear Dynamics of Semiconductor Laser Systems with Feedback : Applications to Optical Chaos Cryptography, Radar Frequency Generation and Transverse Mode Control.*  
**Directeur :** Prof. Pere Colet.  
**Nota :** Cette thèse a obtenu le label de qualité de "Doctorat Européen" [*Doctor Europaeus*].

#### 2005 : Doctorat de Physique [Début en 2001]

**Mention :** Très honorable [Mention maximale].  
**Lieu :** Université de Yaoundé I, CAMEROUN  
**Titre :** *Contribution for the Exploitation of Coherent and Incoherent Nonlinear Phenomena in Telecommunication.*  
**Directeur :** Prof. Paul Wofo.  
**Nota :** Cette thèse est strictement indépendante de la thèse espagnole. Entre 2001 et 2005, elle a été effectuée à l'extérieur (résidence permanente en Espagne)

#### 2001 : Master en Physique, Université de Yaoundé I, CAMEROUN

---

**2001 : Diplôme d'Ingénieur des Travaux des Télécommunications**

Ecole Nationale Supérieure des Postes et Télécommunications (ENSPT),  
Yaoundé, CAMEROUN

**1997 : Licence de Physique**, Université de Yaoundé I, CAMEROUN

**1994 : Baccalauréat Série C**, Lycée Général Leclerc, Yaoundé, CAMEROUN

## Parcours professionnel

**Depuis Février 2010** : Chargé de Recherche de 1ère Classe, CNRS.

Affilié à l'Institut FEMTO-ST, Département d'Optique  
Titularisation en Février 2011.

**Juil. 2009 – Jan. 2010** : Post-doctorant au NASA *Jet Propulsion Lab.*

JPL/Caltech, Pasadena, USA.

Section de Recherche sur les Architectures de Communication (332J),  
Groupe de Sciences et Technologies Quantiques.

*“Développement de peignes de fréquences optiques avec des résonateurs  
à mode de galerie à facteur de qualité ultra-élevé”.*

Supervisé par le Dr. Nan Yu.

**Mars 2007 – Juin 2009** : Post-doctorant à l'Institut FEMTO-ST.

Département d'Optique, Besançon, France

Groupe “Optoélectronique, Photonique et Télécommunications Optiques” (OPTO)

*“Etude de la performance de bruit de phase et de la stabilité spectrale des  
oscillateurs micro-ondes ultra-stables”.*

Supervisé par le Prof. Laurent Larger.

## Bourses et prix internationaux

**2011 : “ERC Independent Researcher Starting Grant (StG)” (Union Européenne)**

Octroyé par le Conseil Européen pour la Recherche (ERC).

**2011 : Financement “ANR Jeune Chercheur” (FRANCE)**

Octroyé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) [decliné en faveur de l'ERC StG].

**2009 : “NASA Postdoctoral Program Fellowship” (USA)**

Octroyé par la NASA.

**2008 : Bourse Postdoctorale *Juan de la Cierva* (ESPAGNE)**

Octroyée par le Gouvernement Espagnol [decliné en faveur de la bourse de la NASA].

**2003 : Bourse de Doctorat pour le Développement Technologique (ESPAGNE)**

Octroyée par le Gouvernement Autonome des Iles Baléares.

---



### III. Résumé des thèses doctorales

La thèse de doctorat intitulée “*Nonlinear dynamics of semiconductor laser systems with feedback : applications to optical chaos cryptography, radar frequency generation, and transverse mode control*” a été défendue le 15 Décembre 2006 à l’Institut de Physique Pluridisciplinaire et Systèmes Complexes (IFISC) de l’Université des Iles Baléares (Palma de Majorque, Espagne), et dirigée par le Prof. Pere Colet.

Son objectif premier était l’exploration de certaines applications des systèmes de lasers avec rétro-action retardée, dans les technologies micro-onde et lumineuse. La thématique de cette thèse était donc à l’intersection de plusieurs disciplines, à savoir la physique des lasers, les télécommunications optiques, la photonique micro-onde, la métrologie temps-fréquence, l’analyse stochastique et la dynamique non-linéaire. Nous avons focalisé nos recherches sur trois applications particulières.

La première était la cryptographie par chaos optique, qui consiste en crypter des signaux dans les réseaux de fibre optique en utilisant de la lumière laser chaotique. Nos travaux ont permis d’étudier l’influence du rapport signal sur bruit sur le taux d’erreur sur les bits, pour des transmissions à 2.5 Gb/s. Nous avons aussi mis en évidence dans ce contexte un nouveau type de comportement dans les systèmes à retard, à savoir les “*breathers*” chaotiques.

La deuxième partie de la thèse était centrée sur les oscillateurs optoélectroniques ( $O^2E$ ). Ces oscillateurs sont capables de générer des fréquences micro-ondes ultra-stables pour les technologies radar, spatiales et de télécommunications. Nous avons mis en évidence pour la première fois la perte de stabilité spectrale de ces micro-ondes lorsque le gain devient très élevé, ainsi que leur possible comportement multimode.

Dans la dernière partie de la thèse, nous avons étudié une architecture de rétro-action optique retardée sur des lasers de type VCSEL (*Vertical-Cavity Surface-Emitting Lasers*). Cette rétro-action optique avait la particularité d’être sélective en polarisation et en fréquence. Généralement, lorsqu’ils sont fortement pompés au dessus de leur seuil, les VCSELS ont une dynamique multi-transverse et multi-polarisée du fait de leur grand nombre de Fresnel et de leur symétrie cylindrique. Ce comportement est incompatible avec plusieurs types d’applications comme les télécommunications optiques, qui nécessitent des porteuses monomodes et uni-polarisées. Dans le cadre de cette thèse, nous avons donc construit une approche d’expansion modale qui nous a permis d’optimiser cette boucle de rétro-action, et de contrôler l’émission de sortie du VCSEL vers le(s) mode(s) transverse(s) désiré(s).

---

Dans chaque cas, notre méthodologie a été une combinaison d'approches analytiques, de simulations numériques et de mesures expérimentales. Nos partenaires ont été le centre de recherche de GeorgiaTech Loraine à Metz (Collaboration avec le Prof. Larger), le département d'Optique à FEMTO-ST (idem), et enfin l'Université Technique de Darmstadt en Allemagne (collaboration avec le Prof. Ingo Fischer). Cette thèse a donné lieu à 6 publications dans des revues internationales à comité de lecture, ainsi qu'à 4 actes de colloques.

Dans le cadre de cette thèse, deux séjours de longue durée ont été effectués. Le premier séjour fut effectué en 2005 pendant 3 mois à l'Institut de Sciences Physiques et de Technologie (IPST) de l'Université du Maryland, College Park, USA, sous la supervision du Prof. Rajarshi Roy (Directeur de l'Institut). Le sujet de ce séjour académique était les applications des lasers à fibre dans les télécommunications optiques. Le second séjour fut effectué pendant 6 mois à l'Institut FEMTO-ST, Université de Franche-Comté, en 2006. Il avait pour thème principal la dynamique non-linéaire des oscillateurs optoélectroniques micro-ondes (Supervisé par le Prof. Laurent Larger). Ce second séjour a permis à cette thèse espagnole d'obtenir le label de "Doctorat Européen" (*Doctor Europaeus*).

Indépendamment de cette thèse, une première thèse de doctorat avait été entreprise et défendue le 2 novembre 2005 à l'Université de Yaoundé I, au Cameroun. Elle était intitulée "*Contribution for the exploitation of coherent and incoherent nonlinear phenomena in telecommunications*", et a été dirigée par le Prof. Paul Wofo. Son objet était d'analyser, sous l'angle de la théorie des systèmes dynamiques non-linéaires, l'apport pour l'ingénierie des télécommunications du contrôle et de la synchronisation du chaos dans les lasers à semiconducteur. Cette thèse a donné lieu à 9 publications dans des revues internationales à comité de lecture (dont deux publications en Master), et à un chapitre de livre. Les thèses camerounaise et espagnole sont strictement indépendantes, bien qu'ayant été entreprises quasi-simultanément.

---

**PUBLICATIONS ISSUES DE LA THESE EN ESPAGNE  
(REVUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE)**

1. **Controlling the emission properties of multimode vertical-cavity surface-emitting lasers via polarization- and frequency-selective feedback**, Y. Kouomou Chembo, S. K. Mandre, I. Fischer, W. Elsaesser and P. Colet, *Phys. Rev. A* **79**, 013817 (2009).
2. **Effect of gain and bandwidth on the multimode dynamics of optoelectronic microwave oscillators**, Y. K. Chembo, L. Larger, R. Bendoula and P. Colet, *Opt. Express* **16**, 9067 (2008).
3. **Dynamic instabilities of microwaves generated with optoelectronic oscillators**, Y. K. Chembo, L. Larger, H. Tavernier, R. Bendoula, E. Rubiola and P. Colet, *Opt. Lett.* **32**, 2571 (2007).
4. **Chaotic breathers in delayed electro-optical systems**, Y. Chembo Kouomou, P. Colet, L. Larger and N. Gastaud, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 203903 (2005).
5. **Mismatch-induced bit error-rate in optical chaos communications using semiconductor lasers with electro-optical feedback**, Y. Chembo Kouomou, P. Colet, L. Larger and N. Gastaud, *IEEE J. of Quantum Electron.* **41**, 156 (2005).
6. **Effect of parameter mismatch on the synchronization of semiconductor lasers with electro-optical feedback**, Y. Chembo Kouomou, P. Colet, N. Gastaud and L. Larger, *Phys. Rev. E* **69**, 056226 (2004).

**ACTES DE COLLOQUES ISSUS DE LA THESE EN ESPAGNE  
(AVEC SELECTION DE RESUMES)**

7. **Bifurcation d'enveloppe d'un oscillateur optoélectronique micro-onde à retard, à haute pureté, Spectrale**, L. Larger, Y. K. Chembo, H. Tavernier, R. Bendoula, P. Colet and E. Rubiola, *10èmes rencontres du non-linéaire, Institut Poincaré (Paris)*, 85 (2007).
  8. **Fast-scale hyperchaos on top of slow-scale periodicity in delayed dynamical systems**, Y. Chembo Kouomou, P. Colet, L. Larger and N. Gastaud, *1st IFAC conference on analysis and control of chaotic systems*, 375 (2006).
  9. **Effect of chaotic noise on the performance of optical chaos cryptosystems**, Y. Chembo Kouomou, P. Colet, L. Larger and N. Gastaud, *Proc. SPIE Vol. 5847 : Noise in communication systems*, 10 (2005).
  10. **Hyperchaotic Breathers in Semiconductor Lasers with Delayed Electro-Optical Feedback**, Y. Chembo Kouomou, P. Colet, L. Larger and N. Gastaud, *Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS)*, 1005 (2005).
-

**PUBLICATIONS ISSUES DE LA THESE AU CAMEROUN  
(REVUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE)**

1. **Triple resonant states and chaos control in an electrostatic transducer with two outputs**, Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *J. of Sound and Vib.* **270**, 75 (2004).
2. **Cluster synchronization in coupled chaotic semiconductor lasers and application to switching in chaos-secured communication networks**, Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Opt. Comm.* **223**, 283 (2003).
3. **Transitions from spatiotemporal chaos to cluster and complete synchronization states in a shift-invariant set of nonlinear coupled oscillators**, Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Phys. Rev. E* **67**, 046205 (2003).
4. **Stability analysis for the synchronization of semiconductor lasers with ultra-high frequency current modulation**, Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Phys. Lett. A* **308**, 381 (2003).
5. **Optimization and stability boundaries for the synchronization of semiconductor lasers with external optical feedback**, Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Phys. Rev. E* **67**, 026214 (2003).
6. **Generalized correlated states in a ring of coupled nonlinear oscillators with a local injection**, Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Phys. Rev. E* **66**, 066201 (2002).
7. **Stability and optimal parameters for continuous feedback chaos control**, Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Phys. Rev. E* **66**, 036205 (2002).
8. **Stability and optimization of chaos synchronization through feedback coupling with delay**, Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Phys. Lett. A* **298**, 18 (2002).
9. **Stability and chaos control in electrostatic transducers**, Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Phys. Scr.* **62**, 255 (2000).

**CHAPITRE DE LIVRE**

10. **Optimization of chaos synchronization and pattern formation in a lattice of nonlinear oscillators and semiconductor lasers**, Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, Edited by S. G. Pandalai, Transworld Research Network, INDIA.
-

## IV. Activités de recherche après les thèses

Les recherches effectuées depuis la fin de la thèse ont pour thématique centrale la photonique micro-onde. Dans ce registre, deux axes fondamentaux ont été explorés : les oscillateurs opto-électroniques (travaux effectués à FEMTO-ST, Besançon, France), et la génération de peignes de fréquences optiques (travaux effectués au NASA *Jet Propulsion Laboratory*/JPL, Pasadena, USA). Des recherches ont aussi été menées sur la dynamique non-linéaire des systèmes à retard, en relation notamment avec la théorie de l'information (télécommunications optiques et calcul neuromorphique).

### 1. Oscillateurs optoélectroniques

L'oscillateur optoélectronique (O<sup>2</sup>E) a été inventé en 1994 par Yao et Maleki, deux chercheurs du JPL. L'objectif premier de cet oscillateur était la génération de micro-ondes dont le bruit de phase pouvait être exceptionnellement faible (la valeur record à ce jour est de -163 dBc/Hz à 10 kHz d'une porteuse à 10 GHz). Ce système avait initialement pour principale ambition de remplacer les générateurs de micro-ondes dans les radars de prochaine génération. Progressivement, d'autres applications se sont précisées, notamment dans les technologies de navigation aérospatiale et des systèmes embarqués, en temps-fréquence et en télécommunications.

Dans sa configuration la plus basique, l'O<sup>2</sup>E consiste en un interféromètre intégré de Mach-Zehnder qui module non-linéairement un faisceau laser cohérent grâce à sa fonction de transfert sinusoïdale. Ce faisceau, modulé en amplitude dans la gamme des radio-fréquences, se propage à travers une longue ligne à retard optique dont la longueur typique est de quelques kilomètres. La modulation du signal optique est par la suite convertie *via* une détection par photodiode en un signal électrique qui est amplifié, étroitement filtré autour de la radio-fréquence à générer, puis rebouclée sur le modulateur de Mach-Zehnder (voir Fig. 1).

L'oscillateur optoélectronique est un système particulièrement intéressant, autant du point de vue de la physique fondamentale (systèmes complexes à retard) que de celui des applications. Nous avons pu explorer plusieurs aspects de ses performances et nos résultats nous ont permis de mieux comprendre ce système qui sera probablement amené à jouer un rôle

---

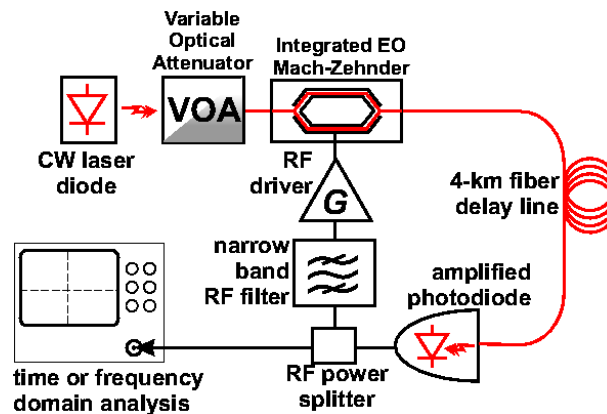


FIGURE 1 – Architecture de base d'un oscillateur optoélectronique micro-onde [1].

central pour la génération de micro-ondes ultra-pures dans les systèmes de navigation de prochaine génération. Nous avons ouvert plusieurs champs de recherche, notamment par rapport à la possibilité de nouvelles architectures, et aussi par rapport à l'optimisation des architectures déjà existantes. Notre objectif premier a été de contribuer à ces recherches en utilisant une approche inhabituelle qui a été particulièrement fructueuse jusqu'ici, celle des systèmes dynamiques non-linéaires et stochastiques.

### 1.1 Dynamique non-linéaire des oscillateurs optoélectroniques

Dans les O<sup>2</sup>Es classiques, la fréquence centrale du filtre micro-onde est située entre 1 et 40 GHz, tandis que la bande passante du filtre se situe dans la gamme de quelques dizaines de MHz. Cette architecture en boucle fermée joue ainsi le rôle d'une cavité optoélectronique ; toutefois, son facteur de qualité est faible, de l'ordre de 100 à 400. En fait la très longue ligne à retard (quelques kilomètres) génère des milliers de modes de cavité étroitement espacés. Même si ces milliers de modes de cavité se retrouvent simultanément dans la bande passante de l'oscillateur, seul un mode est amplifié dans des conditions optimales, et il oscille de manière stable et continue après un processus de sélection basé sur le processus de compétition multi-mode.

Malgré la très large quantité de recherches expérimentales développées autour du concept d'O<sup>2</sup>E, très peu a été entrepris pour comprendre théoriquement ses propriétés dynamiques. Ce manque de compréhension analytique est dû aux propriétés extrêmes de ce système : très large délai de rétro-action, échelles temporelles distantes, et forte non-linéarité induite par une fonction de transfert non-monotone (car périodique). Ces difficultés expliquent pourquoi la plupart des études sur les O<sup>2</sup>E font l'hypothèse implicite d'une amplitude constante pour les oscillations micro-ondes, et ainsi ne considèrent que les propriétés stationnaires de l'oscillateur.

Cependant, cette hypothèse de stationnarité peut ne pas être inconditionnellement satisfaite. A priori, on doit logiquement considérer que l'O<sup>2</sup>E peut, comme tout système à retard, avoir d'autres types de comportements (voir Fig. 2). En fait, l'O<sup>2</sup>E appartient à la large famille des systèmes électro-optiques avec rétro-action retardée, qui a été introduite pour la première

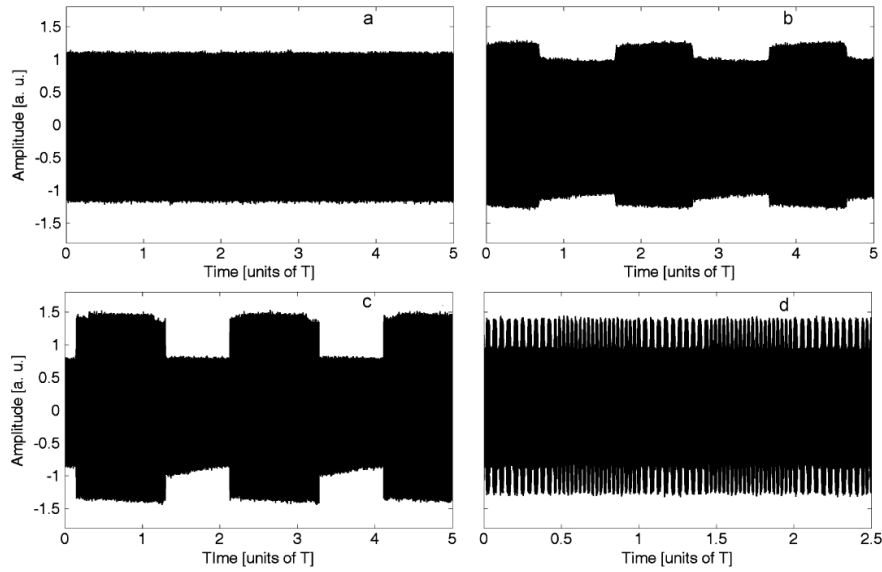


FIGURE 2 – Quelques traces temporelles expérimentales montrant la dynamique non-linéaire de l'O<sup>2</sup>E. La porteuse a une fréquence centrale de 3 GHz, et le filtre radio-fréquence possède une bande passante de 20 MHz. Le temps est exprimé en unité de retard, avec  $T = 20 \mu s$  (correspondant à 4 km de fibre optique). La séquence de figure montre comment évolue la dynamique temporelle du système lorsque le gain augmente. **(a)** Juste avant la bifurcation secondaire de Hopf, l'amplitude des oscillations est constante. **(b)** Juste au dessus de cette valeur, l'amplitude est légèrement modulée en amplitude. **(c)** Bien au-dessus de la valeur critique, l'amplitude est fortement modulée. **(d)** Lorsque le gain augmente encore, la modulation d'amplitude devient beaucoup plus complexe, et ici par exemple la modulation d'amplitude est combinée à une modulation en fréquence [1].

fois par Neyer et Voges au début des années 80. A leur suite, plusieurs études ont été dédiées à cette classe de systèmes, mettant ainsi en évidence plusieurs effets non-linéaires intéressants tels que la bistabilité, l'hyperchaos, et même des *breathers* chaotiques.

Il apparaît donc ainsi que par rapport à l'O<sup>2</sup>E, l'absence d'un cadre théorique basé sur la dynamique non-linéaire empêchait la compréhension profonde des performances des diverses architectures possibles, et bien évidemment ne permettait pas la prédiction d'éventuelles instabilités. L'objectif principal de notre travail à ce niveau a été la dérivation explicite d'équations différentielles à retard capables de décrire précisément le comportement dynamique des O<sup>2</sup>Es, ainsi que de permettre l'étude de la stabilité des solutions technologiquement intéressantes.

Pour étudier le comportement déterministe de ce système, nous avons donc développé une approche non-linéaire originale basée sur les équations d'enveloppe complexes à retard. En particulier, nous avons théoriquement mis en évidence l'existence de bifurcation de type Neimark-Sacker qui limite en puissance de sortie la performance de ce système (voir Fig. 2). Ces résultats ont établi pour la première fois les bases théoriques de la stabilité spectrale de l'O<sup>2</sup>E, et ils ont été confirmés expérimentalement avec une remarquable précision [1,2]. Ces résultats ont une importance essentielle, autant du point de vue technologique (stabilité spectrale de l'oscillateur) que du point de vue fondamental (contribution à une meilleure compréhension de la dynamique des systèmes à retard). Il faut aussi noter ici l'efficacité de cette approche basée sur la pluri-disciplinarité impliquant la dynamique non-linéaire et l'optoélectronique.

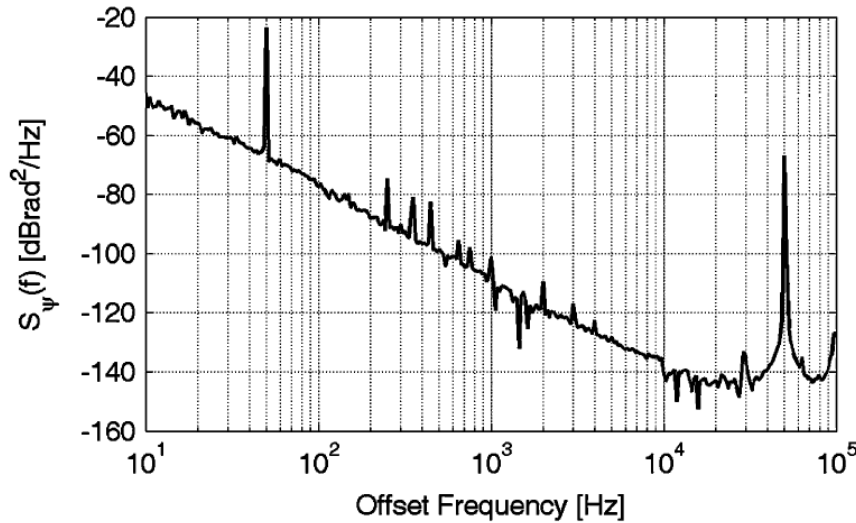


FIGURE 3 — Spectre expérimental typique de bruit de phase d'un O<sup>2</sup>E de FEMTO-ST, avec un plancher bruit à -145 dBBrad<sup>2</sup>/Hz à 10 kHz d'une porteuse à 10 GHz [3]. Nos travaux ont permis une compréhension précise de ce type de spectre, ainsi que l'évaluation de la performance en bruit de phase de ces oscillateurs.

## 1.2. Génération de micro-ondes ultra-pures (bruit de phase ultra-faible)

La pureté des micro-ondes générées avec l'O<sup>2</sup>E est due au fait qu'une ligne à retard fibrée est généralement intercalée dans la boucle d'oscillation. Elle permet un temps de stockage optique considérable ( $20 \mu\text{s}$  pour 4 km de fibre), qui est équivalent à un facteur de qualité  $Q = 2\pi FT$ , où  $F$  est la fréquence de la micro-onde et  $T$  est le délai induit par la ligne à retard. Ce long délai joue donc en fait le rôle d'élément fortement déphaseur, ce qui induit un haut facteur de qualité en termes de sélectivité phase/fréquence.

Malgré de nombreux travaux de recherches préliminaires, la détermination théorique du bruit de phase dans les O<sup>2</sup>Es est pendant longtemps restée un problème non-résolu. Les caractéristiques qualitatives de leur spectre de bruit de phase peuvent certes être retrouvées en utilisant des arguments heuristiques ou des approximations grossières, mais malgré cela, un cadre théorique rigoureux a toujours fait défaut.

La première raison est qu'avant nos travaux sur la dynamique déterministe de ces oscillateurs, il n'y avait aucun modèle temporel capable de décrire la dynamique de ces systèmes, ce qui fait que l'analyse basée sur les équations différentielles stochastiques ne pouvait être utilisée pour étudier le problème de bruit de phase. De plus, contrairement à la plupart des autres oscillateurs, l'O<sup>2</sup>E est un oscillateur à retard, et jusqu'à présent très peu a été fait pour étudier l'effet du bruit de phase sur les cycles-limites co-induits par le délai temporel. Enfin, l'O<sup>2</sup>E est soumis à de très nombreuses sources de bruit, qui sont souvent spectralement complexes, tel que le bruit dit de *flicker* (aussi connu sous le nom de bruit  $1/f$ ). Cette dernière contribution, par exemple, est particulièrement importante lorsqu'on se rapproche de la porteuse à moins du kHz. L'objectif de nos recherches à ce niveau a été de proposer un cadre théorique capable d'intégrer toutes ces contraintes de manière synthétique.



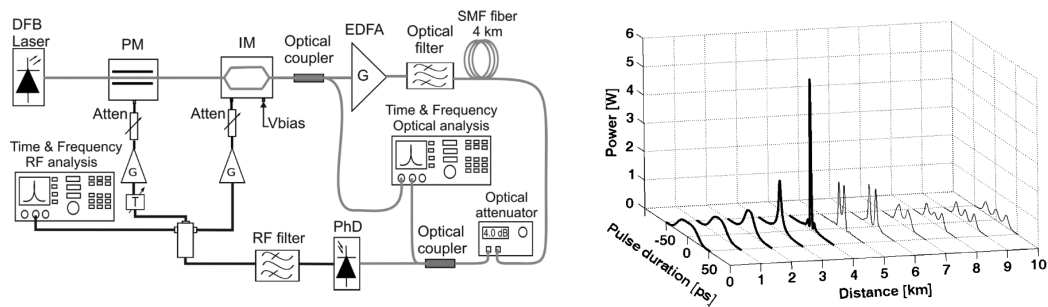


FIGURE 4 — **A gauche** : architecture typique d'un O<sup>2</sup>E générant des impulsions optiques à gigue ultra-faible. Noter le modulateur de phase en cascade avec le modulateur d'intensité. **A droite** : simulation numérique du processus de compression d'impulsion, avec une compression optimale à 4 km. Les impulsions ont été expérimentalement compressées à 4.1 ps, avec une gigue temporelle égale à 2.7 fs dans la bande 1–10 kHz [5].

Nous avons utilisé l'approche des équations différentielles stochastiques, qui consiste en l'intégration de termes de bruit dans nos équations déterministes afin de pouvoir évaluer analytiquement les performances de bruit de phase de l'O<sup>2</sup>E (voir Fig. 3). Ces équations, souvent appelées "équations de Langevin", sont dans notre cas très particulières car elles reposent sur la théorie des équations différentielles stochastiques à retard, qui est très neuve et encore très largement incomplète. Nous avons réussi à déterminer très précisément les principales caractéristiques du spectre de bruit de phase des O<sup>2</sup>Es, à savoir le plancher de bruit de phase, la hauteur des pics parasites de cavité, ainsi que leur largeur de raie, en pleine conformité avec les expériences [3].

Nous avons aussi étudié l'effet de la dispersion chromatique sur la performance en bruit de phase des O<sup>2</sup>Es. Nous avons ainsi montré que les fluctuations de fréquence engendraient du bruit de phase *via* cette dispersion chromatique, et que l'utilisation d'une fibre à zéro de dispersion pouvait améliorer la performance de bruit de phase de 10 dB. Ici aussi, la convergence entre résultats théoriques et expérimentaux a été très satisfaisante [4].

### 1.3. Génération d'impulsions optiques à gigue temporelle ultra-faible

Nous avons développé une architecture originale permettant de générer des impulsions optiques dont la gigue temporelle est exceptionnellement faible. Diverses architectures ont été explorées dans la littérature afin de générer de telles impulsions : les lasers à fibre et à modes bloqués, les O<sup>2</sup>Es à électro-absorption, à modulation de phase, ou encore les O<sup>2</sup>Es mutuellement couplés avec amplification paramétrique.

L'idée dans notre cas était d'utiliser le fait que le bruit de phase extrêmement réduit des micro-ondes obtenues avec l'O<sup>2</sup>E induirait automatiquement une gigue temporelle faible en boucle fermée. Les impulsions sont obtenues avec un effet de lentille temporelle assistée par compression soliton. La modulation sinusoïdale à l'entrée RF sert à générer des pré-impulsions optiques sinusoïdales et "chirpées", qui sont ensuite fortement amplifiées avant de parcourir la ligne à retard. Durant leur propagation, les effets combinés de la non-linéarité et de la dis-

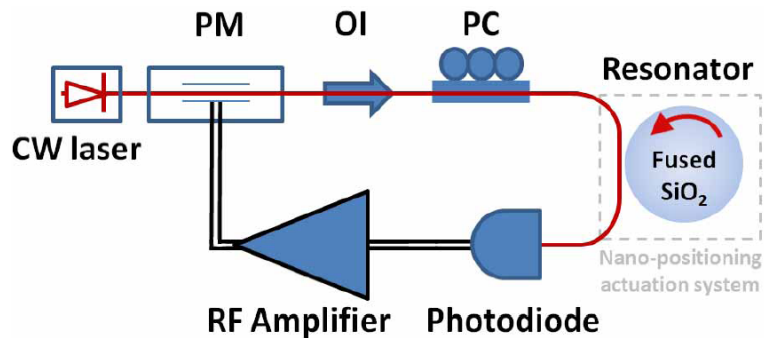


FIGURE 5 – Architecture de l'O<sup>2</sup>E où un résonateur optique remplace la ligne à retard. Noter l'absence de modulateur d'intensité. Ce système nous a permis d'obtenir un bruit de phase de  $-90$  dBrad<sup>2</sup>/Hz à  $10$  kHz d'une porteuse à  $10$  GHz [6].

persion peuvent (sous des conditions optimales) induire une forte compression tel que représenté à la Fig. 4. Le système génère donc, simultanément, une micro-onde ultra-pure dans sa branche micro-onde et des impulsions optiques courtes et à gigue ultra-faible dans sa branche optique, à une cadence de  $10$  GHz dans notre cas. Dans cette architecture hybride, la fibre optique joue alors deux rôles bien distincts et également importants : elle emmagasine de l'énergie optique comme dans les O<sup>2</sup>Es classiques, et d'un autre côté, elle compresse les pré-impulsions sinusoïdales en un train d'impulsions courtes.

Un avantage spécifique de cet oscillateur hybride est qu'il fournit donc en même temps deux signaux très purs dans des bandes spectrales très distinctes : en particulier, le signal radio-fréquence peut être utilisé comme *trigger* pour le train d'impulsions optiques car ils sont quasi-parfaitement corrélés. Grâce à cette méthode, nous avons donc obtenu des trains d'impulsions synchrones avec la micro-onde générée, et dotée d'une gigue temporelle particulièrement faible ( $2.7$  fs sur une plage de  $1$  à  $10$  kHz de la porteuse de  $10$  GHz), en même temps qu'une micro-onde dont la performance en bruit de phase égalait  $-140$  dBc/Hz à  $10$  kHz de la porteuse à  $10$  GHz). Les résultats expérimentaux ont été concordants avec la modélisation, basée sur l'équation de Schrödinger non-linéaire [5].

Nous anticipons qu'il pourrait être particulièrement intéressant d'étendre cette architecture de génération d'impulsions optiques à d'autres types d'O<sup>2</sup>Es, avec une emphase particulière sur les architectures qui ont la capacité d'éliminer les pics parasites de cavité (O<sup>2</sup>Es multi-boucles), ou ceux qui peuvent être miniaturisés (O<sup>2</sup>Es à modes de galeries, voir la sous-section suivante). De même, des filtres spéciaux peuvent être utilisés pour réaliser des profils non-linéaires et/ou de dispersion optimaux.

#### 1.4. Oscillateurs optoélectroniques basés sur les résonateurs à modes de galerie

Dans les versions les plus usuelles d'O<sup>2</sup>Es, l'élément de stockage de l'énergie optique est la ligne à retard fibrée, et la fréquence du signal micro-onde de sortie est définie par un filtre passe-bande étroit intercalé dans la branche électronique de la boucle de rétro-action. Cette

configuration de base fournit déjà d'excellentes performances telles que reporté dans les sous-sections précédentes.

Cependant, cette architecture possède aussi plusieurs inconvénients. Le premier est que la ligne à retard est encombrante, ce qui fait que ces oscillateurs ne peuvent pas être considérés comme des sources micro-ondes optimales pour les systèmes embarqués. Dans le même ordre d'idée, cette ligne à retard fibrée doit être stabilisée en température, ce qui nécessite un asservissement relativement gourmand en énergie au vu du volume à thermaliser. Enfin, la ligne à retard génère des pics parasites assez proches de la porteuse (quelques dizaines de kHz). Ces pics parasites sont particulièrement gênants pour une large gamme d'applications.

Il est donc particulièrement intéressant de pouvoir développer un O<sup>2</sup>E compact qui soit compatible avec les spécifications de volume restreintes des systèmes embarqués. Dans cette optique, une possibilité est de remplacer la ligne à retard fibrée par des résonateurs optiques à très haut facteur de qualité allant typiquement de  $10^7$  à  $10^{10}$  selon les techniques de fabrication et le matériau utilisé (silice fondue, quartz, MgF<sub>2</sub>, CaF<sub>2</sub>, etc.). Dans ce cas, l'oscillation micro-onde est définie par l'intervalle spectral libre du résonateur, tandis que le stockage de l'énergie lumineuse s'effectue en piégeant la lumière dans ces cavités optiques aux pertes ultra-faibles. Cette solution résout élégamment les problèmes soulevés précédemment, puisque le même élément (le résonateur) définit en même temps la fréquence d'oscillation et le facteur de qualité radio-fréquence à travers le temps de stockage de l'énergie lumineuse. Ce type d'O<sup>2</sup>E est donc compact, ne génère pas de pics parasites dans le spectre micro-onde, et il est compatible avec des systèmes compacts de contrôle de température puisqu'il est plus réduit en volume : il est par conséquent compatible avec les contraintes des systèmes embarqués, ce qui est une propriété essentielle pour les systèmes aérospatiaux.

Nous avons développé ce type d'architecture d'O<sup>2</sup>E en utilisant un résonateur de silice fondue dont le facteur de qualité est égal à  $10^8$  (Fig. 5). Pour générer des micro-ondes dans la bande X (8–12 GHz), il faut en général des résonateurs dont le diamètre est de l'ordre de 5 mm, avec une rugosité de surface extrêmement faible, de l'ordre du nanomètre. La performance en bruit de phase de cet O<sup>2</sup>E est certes plus faible que celle de l'oscillateur fibré, mais la marge d'amélioration est grande et nous anticipons qu'une réduction d'au moins 50 dB est possible si le couplage avec le résonateur pouvait être parfaitement optimisé, et l'environnement thermique/mécanique mieux contrôlé [6].

Nous avons enfin entrepris des recherches dans le cadre de la fabrication proprement dite de ces résonateurs à disques en utilisant du MgF<sub>2</sub>, et nos premiers résultats ont récemment été publiés dans la littérature [7].

### PUBLICATIONS ASSOCIEES (REVUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE)

1. **Nonlinear dynamics and spectral stability of optoelectronic oscillators**, Y. K. Chembo, L. Larger and P. Colet, *IEEE J. of Quantum Electron.* **44**, 858 (2008).
2. **Optoelectronic delay dynamics : from optical chaos communications to high purity microwave oscillators** [Invited article], M. Jacquot, Yanne Chembo and L. Larger, *Ann. Phys. – France* **32**, 39 (2007).
3. **Determination of phase noise spectra in optoelectronic microwave oscillators : a Langevin approach**, Y. Kouomou Chembo, K. Volyanskiy, L. Larger, E. Rubiola and P. Colet, *IEEE J. of Quantum Electron.* **45**, 178 (2009).
4. **Contribution of Laser Frequency and Power Fluctuations to the Microwave Phase Noise of Optoelectronic Oscillators**, K. Volyanskiy, Yanne K. Chembo, L. Larger and E. Rubiola, *IEEE J. of Lightwave Technol.* **28**, 2730 (2010).
5. **Generation of ultralow jitter optical pulses using optoelectronic oscillators with time-lens soliton-assisted compression**, Y. Kouomou Chembo, A. Hmima, P.-A. Lacourt, L. Larger, and J. M. Dudley, *IEEE J. of Lightwave Technol.* **27**, 5160 (2009).
6. **Compact Optoelectronic Microwave Oscillators using Ultra-High Q Whispering Gallery Mode Disk-Resonators and Phase Modulation**, K. Volyanskiy, P. Salzenstein, H. Tavernier, M. Pogurmirskiy, Yanne K. Chembo and L. Larger, *Opt. Express* **18**, 22358 (2010).
7. **Magnesium Fluoride Whispering Gallery Mode Disk-Resonators for Microwave Photonics Applications**, H. Tavernier, P. Salzenstein, K. Volyanskiy, Yanne K. Chembo and L. Larger, *IEEE Phot. Tech. Lett.* **22**, 1629 (2010).

### AUTRES PUBLICATIONS ASSOCIEES (ACTES DE COLLOQUES AVEC SELECTION DE RESUMES)

8. **Resonance measurements techniques of optical whispering gallery mode mini-disc resonators for microwave photonics applications**, P. Salzenstein, M. Jelínek, Y. K. Chembo, M. Pogurmiskiy, H. Tavernier, K. Volyanskiy, K.-P. Huy, M. Chauvet, L. Larger, and V. Kubecek, *Proc. SPIE* **8071**, 8071104 (2011).
9. **Optoelectronic phase noise system designed for microwaves photonics sources measurements in metrology application**, P. Salzenstein, N. Cholley, M. Zarubin, E. Pavlyuchenko, A. Hmima, Y. K. Chembo, and L. Larger, *Proc. SPIE* **8071**, 8071111 (2011).
10. **Compact optoelectronic oscillator using whispering gallery mode resonators for radio-frequency and millimeter wave generation**, K. Volyanskiy, P. Salzenstein, H. Tavernier, M. Pogurmiskiy, Yanne K. Chembo and L. Larger, *Proc. SPIE* **7936**, to appear (2011).
11. **Génération de Micro-ondes Ultra-pures et de Pulses Optiques à Gigue Ultra-faible en Utilisant les Oscillateurs Optoélectroniques**, Y. Chembo, K. Volyanskiy, A. Hmima, H. Tavernier, P. Salzenstein, P.-A. Lacourt, E. Rubiola, J. Dudley et L. Larger, *Proc. "Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG)*, 38 (2010).
12. **Bifurcation d'enveloppe d'un oscillateur optoélectronique micro-onde à retard, à haute pureté spectrale**, L. Larger, Y. K. Chembo, H. Tavernier, R. Bendoula, P. Colet and E. Rubiola, *10th Nonlinear encounters, Institut Poincaré (Paris)*, 85 (2007).

## 2. Peignes de fréquences optiques

L'obtention en 2009 d'une bourse post-doctorale de la NASA (sur une base internationale et compétitive) nous a permis d'effectuer au *Jet Propulsion Laboratory* des travaux sur la génération de peignes de fréquences optiques en utilisant des résonateurs monolithiques à facteur de qualité ultra-élevé.

### 2.1. Peignes de Kerr

Les peignes de fréquences optiques sont des ensembles de raies spectrales équidistantes et s'étendant dans l'ultra-violet, le visible et l'infrarouge. Ils sont généralement produits en utilisant des lasers ultra-rapides (fs) à modes bloqués, et basés sur le fait que des trains d'impulsion ultra-courtes dans le domaine temporel correspondent à des raies spectrales extrêmement fines et corrélées dans le domaine fréquentiel. Plusieurs applications peuvent bénéficier de ces peignes : la physique fondamentale, la métrologie temps-fréquence, les systèmes de navigation, la spectroscopie, ou encore les systèmes d'ingénierie aérospatiale et de télécommunications.

Il a été récemment démontré que ces peignes pouvaient aussi être générés en utilisant des résonateurs monolithiques à mode de galerie et à facteur de qualité ultra-élevé. Typiquement, ces résonateurs sont des disques ou des sphères, de taille milli- ou micrométrique. Lorsqu'ils sont presque parfaitement polis, (rugosité sub-nanométrique), la radiation laser peut-être piégée à l'intérieur de ses modes propres, qu'on appelle généralement "modes de galerie" (voir Fig. 6).

Dans ces résonateurs, la fort confinement, la grande densité de photons et leur long temps de stockage (proportionnel au facteur  $Q$ ) induit une très forte interaction lumière-matière. Selon le matériau diélectrique, ce fort couplage peut générer un très efficace mélange à quatre ondes, où deux photons de la pompe se transforment en deux photons latéraux *via* l'effet Kerr (interaction hyper-paramétrique). Lorsque cette pompe est assez forte, un peigne de fréquences optique, souvent appelé *peigne de Kerr*, est généré à la suite d'une cascade de telles créations de photons latéraux, résultant d'un nombre gigantesque d'interactions photoniques pondérées impliquant tous les quadruplets de photons satisfaisant les lois de conservation de l'énergie et de l'impulsion. Les avantages essentiels de ce nouveau générateur de peignes sont multiples : simplicité intrinsèque, taille réduite, immunité aux interférences, grand potentiel d'intégration sur puces, et enfin, très faible consommation énergétique (voir Fig. 7).

Nous avons établi un cadre global d'analyse pour l'étude de la génération de peignes de fréquences optiques basés sur ces résonateurs. Nous avons ainsi construit sur une base semi-classique un ensemble d'équations temporelles couplées régissant la dynamique du champ électrique dans chaque mode, et nous avons ainsi pu approfondir l'état des connaissances sur ces systèmes, autant du point de vue fondamental que de celui des applications technologiques.

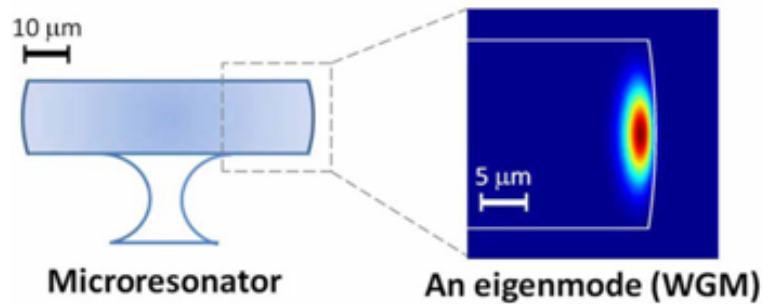


FIGURE 6 – Vue latérale d'un résonateur, d'après la référence [3]. Le zoom représente une coupe transversale d'un mode de galerie. La lumière laser est fortement confinée dans ce mode torique durant des périodes significativement longues (quelques  $\mu\text{s}$ ), et par conséquent excite les modes spectralement adjacents à travers différentes interactions non-linéaires. Dans le cas de ce micro-résonateur, l'intervalle spectral libre est égal à 1 THz, et nous avons théoriquement montré qu'il était possible de générer un peigne s'étendant de 100 à 300 THz environ (étalement sur plus d'une octave).

## 2.2. Approche d'expansion modale

Malgré la relative abondance de résultats expérimentaux sur la génération de peignes de fréquences optiques, il y a assez peu de travaux théoriques approfondis permettant de comprendre le comportement complexe des modes de galeries lorsqu'ils sont excités par une pompe laser. Cette rareté peut s'expliquer par la très grande difficulté associée à cette problématique. En particulier, il y a un grand éclatement entre les échelles de temps, dû au très grand facteur  $Q$  : radiation laser à 200 THz, intervalle spectral libre à 10 GHz, et largeurs de raies à 100 kHz. Un autre éclatement se retrouve aussi dans les échelles spatiales, notamment entre la longueur d'onde ( $1.55 \mu\text{m}$ ) et la taille de la cavité (quelques mm). Cette grande variabilité dans les échelles spatio-temporelles doit être combinée à une non-linéarité incontournable (car c'est elle qui génère le phénomène recherché) ainsi qu'à d'autres phénomènes tels que la dispersion chromatique et les pertes énergétiques (internes et de couplages). La prise en compte simultanée de tous ces paramètres rend la modélisation particulièrement ardue.

C'est dans ce contexte que nous avons introduit une approche différente et originale basée sur l'expansion modale. L'idée maîtresse dans ce cadre d'analyse est la projection hermitienne de l'équation de Maxwell sur les modes propres de la cavité, ce qui permet ainsi d'obtenir des équations différentielles ordinaires régissant la dynamique lentement variable de l'enveloppe complexe chaque champ modal. En utilisant ces équations, nous avons ainsi pu simuler la dynamique spectro-temporelle de ces peignes (voir Fig. 8). Nous avons aussi pu calculer analytiquement la valeur critique du nombre de photons nécessaire pour déclencher le processus de mélange à quatre ondes (puissance de seuil). D'un autre côté, notre analyse a montré que même si une dispersion chromatique forte est incompatible avec la génération de peignes, une dispersion faible est nécessaire pour lever la dégénérescence entre la zone instable d'hystérésis du mode central et la zone stable d'excitation hyper-paramétrique dans l'espace des paramètres.

L'analyse théorique a aussi montré que le mécanisme de cascade menant aux peignes à large spectre est complexe, puisque la pompe laser excite préférentiellement un ensemble

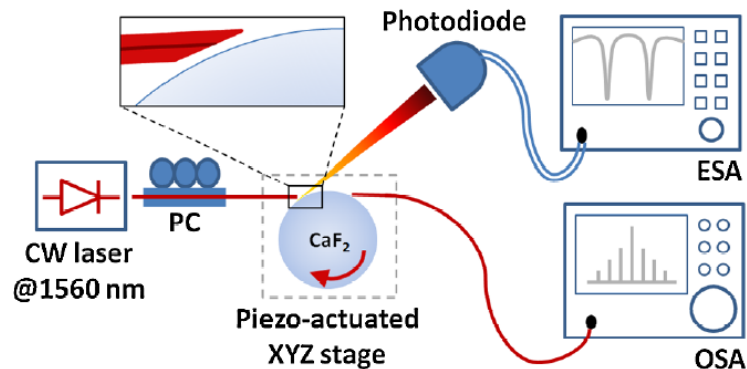


FIGURE 7 – Montage expérimental d'un générateur de peignes de fréquences optiques. (d'après réf. [1]). Les modes peuvent être identifiés en utilisant un analyseur de spectre électrique (ESA), tandis que le peigne en lui-même peut être visualisé en utilisant un analyseur de spectre optique (OSA).

restreint de modes (peigne primaire) et les utilise ensuite comme relai pour exciter les autres modes à travers un processus de pompage bi-chromatique (et qui n'a pas de seuil). Ce travail analytique a aussi permis d'expliquer le phénomène de versatilité, caractérisé par des peignes dont la périodicité spectrale est multiple de l'intervalle spectral libre du résonateur.

Notre analyse a aussi élucidé le rôle de la dispersion chromatique par rapport à la génération de ces peignes. Elle a aussi montré que le mécanisme de cascade conduisant à l'excitation de plusieurs centaines de modes était complexe, quoiqu'obéissant à un scénario précis que nous avons mis en évidence. Ces peignes, dans ce contexte, présentent donc une très forte similarité avec l'instabilité modulationnelle et la génération de supercontinuum.

Bien au-delà de l'étude de ces peignes, cette approche modale peut être utile pour étudier d'autres phénomènes non-linéaires dans les résonateurs à mode de galerie, en particulier lorsqu'ils sont utilisés comme lasers dopés à l'Erbium, comme lasers Raman, ou comme lasers Brillouin. Dans une perspective plus globale, cette théorie s'intègre dans le programme général de l'étude des phénomènes non-linéaires dans les cavités optiques et les guides d'ondes. C'est aussi un paradigme fructueux pour la photonique intégrée sur silicium ou cristalline. La quantification de notre modèle pourrait aussi permettre d'explorer plusieurs phénomènes intéressants dans le cadre de l'électrodynamique quantique des cavités.

Ces travaux ont donné lieu à plusieurs publications dans des revues internationales à comité de lecture [1–3], ainsi qu'à plusieurs communications orales dans des conférences internationales [4–6]. En particulier, la réf. [2] qui explicite les détails de la théorie que nous proposons a fait l'objet d'un *Viewpoint* dans la revue *Physics* de l'APS [D. A. Braje, *Physics* **3**, 75 (2010)].

### 2.3. Peignes de fréquences optiques étalés sur plus d'une octave

En métrologie optique, il est important que les peignes de fréquences s'étendent sur au moins une octave, c'est à dire qu'ils puissent contenir au moins une fréquence  $f_0$  et son double

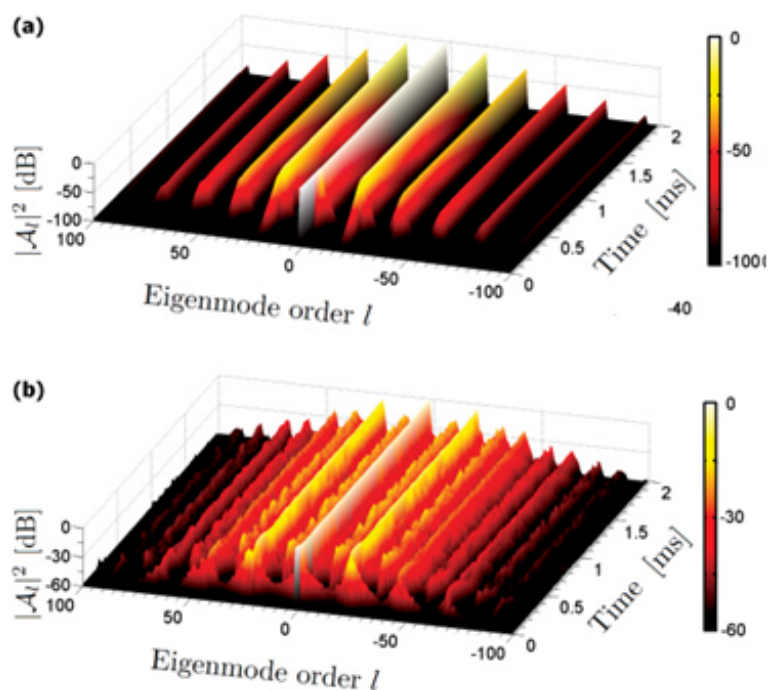


FIGURE 8 – Simulation numérique de la dynamique spectro-temporelle d'un peigne de fréquences dans le cas où il est stable (a) et dans celui où il est instable (b). D'après la réf. [2].

$2f_0$ . Cela permet d'établir une liaison cohérente en phase entre la fréquence de la porteuse optique et l'intervalle spectral libre radio-fréquence. Au niveau théorique, aucune étude n'avait jamais pu mettre en évidence de tels peignes, et il y avait deux raisons majeures à cela : premièrement, il n'y avait aucun modèle modal ou standard capable d'étudier ces peignes dans la littérature, et ensuite, les simulations numériques s'étendant sur une octave correspondant à une plage spectrale de plusieurs centaines de nanomètres représentent un très grand défi computationnel.

Nous avons donc entrepris des recherches pour combler cette lacune et nous avons ainsi pu effectuer des simulations numériques qui ont explicitement montré le mécanisme permettant l'émergence de tels peignes de fréquences optiques. Ces résultats ont été présentés dans la référence [3].



---

**PUBLICATIONS ASSOCIEES  
(REVUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE)**

1. **Spectrum and dynamics of optical frequency combs generated with whispering gallery mode resonators**, Y. K. Chembo, D. V. Strelakov and N. Yu, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 103902 (2010).
2. **Modal Expansion Approach to Optical Frequency Combs Generation with Monolithic Whispering Gallery Mode Resonators**, Y. K. Chembo and N. Yu, *Phys. Rev. A* **82**, 033801 (2010).
3. **On the generation of octave-spanning optical frequency combs using monolithic whispering gallery mode micro-resonators**, Y. K. Chembo and N. Yu, *Opt. Lett.* **35**, 2696 (2010).

**AUTRES PUBLICATIONS ASSOCIEES  
(ACTES DE COLLOQUES AVEC SELECTION DE RESUMES)**

4. **Challenges in octave-spanning and short free-spectral-range optical frequency comb generation using monolithic whispering gallery mode resonators** [Invited talk], Yanne K. Chembo and N. Yu, *Proc. SPIE Vol. 7913*, to appear (2011).
  5. **Parameter optimization for octave-spanning optical frequency comb generation in whispering-gallery mode resonators**, Yanne K. Chembo and N. Yu, *Proc. of the 2010 IEEE IFCS Conference*, 689 (2010).
  6. **Modelling of optical frequency comb generation in whispering gallery mode resonators and limiting effects**, Yanne K. Chembo and N. Yu, *Proc. SPIE Vol. 7582*, 758209 (2010).
-

### 3. Télécommunications optiques, théorie de l'information et complexité

Au-delà de la thématique centrale de nos recherches qui a été la photonique micro-onde, nous avons aussi participé à plusieurs activités de recherches dans le cadre de la dynamique non-linéaire des systèmes à retard et de leurs applications.

#### 3.1. Dynamique non-linéaire des systèmes à retard

Une première contribution a été faite par rapport aux phénoménologies associées au *breathers* chaotiques [1], travail effectué en collaboration avec l'Université Libre de Bruxelles. Nous avons ainsi mis en évidence que selon la valeur du gain de rétroaction et du point de fonctionnement sur la fonction de transfert non-linéaire, une grande variété de comportements dynamiques à échelles multiples pouvait être observée, à savoir les régimes de *breathers* en tant que tels, mais aussi des régimes d'auto-pulsations.

Plusieurs ces comportements dynamiques sont particulièrement intéressants parce qu'on ne les retrouve pas dans les dynamiques des systèmes d'Ikeda classiques. Il est à noter que sur cette thématique, la concordance entre développements analytiques, simulations numériques et mesures expérimentales a été excellente.

#### 3.2. Communications par chaos optique

Des activités de recherches dans le contexte des communications cryptées par phase optique ont été entreprises. L'effet de la dispersion chromatique et de la non-linéarité de Kerr sur la performance de ces crypto-systèmes a été évalué, en partenariat avec un groupe de recherche de l'IFISC (Institut de physique interdisciplinaire et de systèmes complexes, Palma de Majorque, Espagne) [2].

D'autres recherches ont été développées autour de l'étude des générateurs de chaos optoélectronique à double retard utilisant des modulateurs dédiés de type QPSK (*Quadrature-Phase Shift Keying*) [3]. Nous nous sommes principalement intéressés à la possibilité d'avoir des non-linéarités bidimensionnelles capables de renforcer la complexité de la porteuse hyperchaotique, et une nouvelle architecture a été proposée en ce sens.

#### 3.3. Chaos micro-onde pour les applications radar

La possibilité d'utiliser des micro-ondes chaotiques pour les applications radar est scientifiquement intéressante car contre-intuitive. En effet, on suppose toujours a priori qu'un radar doit avoir une fréquence de sortie la plus pure possible.

---

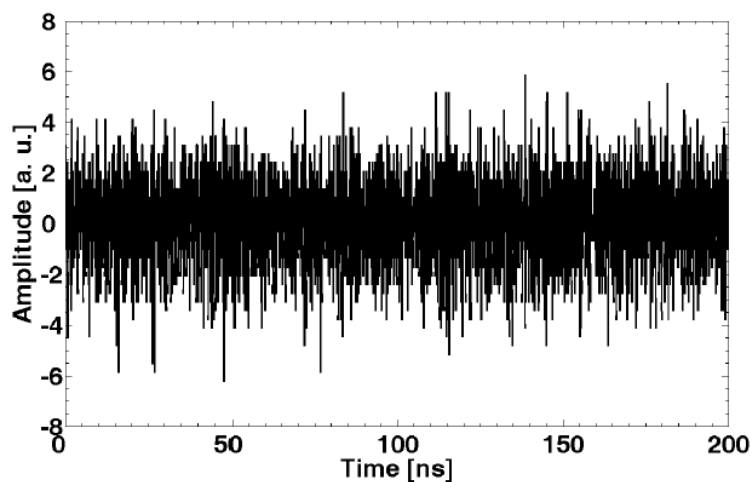


FIGURE 9 – Trace temporelle expérimentale d'une micro-onde hyper-chaotique, ayant une fréquence centrale de 3 GHz et une bande passante de 16 MHz.

Pourtant, la configuration diamétralement opposée (fréquence de sortie la plus aléatoire possible) possède aussi certains avantages (voir Fig. 9). En particulier, de tels radars sont insensibles aux échos car ces derniers sont temporellement orthogonaux entre eux (corrélation statistiquement nulle). De plus, ces radars n'interfèrent pas entre eux (pour les mêmes raisons), ce qui les rend particulièrement intéressants dans les environnements multi-utilisateurs et multi-tâches.

On peut aussi noter que ce type de micro-ondes possède un intérêt certain pour la cryptographie en espace ouvert. En effet, les réseaux en espace libre sont extrêmement vulnérables aux attaques puisque par principe les informations véhiculées sont accessibles à tout le monde. Une porteuse micro-onde chaotique permet de sécuriser l'information sur la couche physique, mais en plus, elle peut aussi permettre le brouillage des signaux dans une bande de fréquence donnée, tout en gardant soi-même la capacité (par anti-synchronisation) d'avoir accès à toutes les informations qui circulent.

Cette activité de recherche est encore dans sa phase de développement, et un article est en cours de rédaction sur ce sujet.

### 3.4. Application à la théorie de l'information : Machines à Etats Liquides et Générateurs de Nombres Aléatoires

Dans le cadre d'un projet européen (PHOCUS – “*towards a PHOtonic liquid state machine based on delay-CoUpled Systems*”), nous explorons actuellement une architecture de “machine à états liquide” capable d'effectuer des tâches de reconnaissance de structures en temps réel.

Ce nouveau paradigme de calcul a émergé en tant qu'alternative des machines de Turing qui, malgré leur puissance impressionnante, sont inadaptés pour certaines classes de tâches.

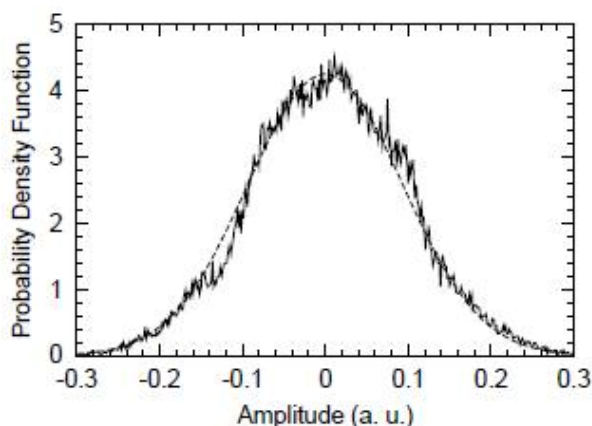


FIGURE 10 – Fonction de densité de probabilité expérimentale (ligne continue) d'un oscillateur hyper-chaotique large bande ayant un fort gain de rétroaction. On peut remarquer que cette fonction est très proche d'une gaussienne (ligne discontinue). Un tel système peut donc permettre de générer continûment des milliards de nombres pseudo-aléatoires par seconde, avec une statistique quasi-gaussienne.

Il est de plus notoire que les machines de Turing ne correspondent pas aux modèles computationnels des êtres vivants. Sous cet angle, les machines à états liquides se rapprochent beaucoup plus de ces modèles, même si des recherches plus approfondies doivent être menées pour savoir si cette ressemblance est fortuite ou alors structurellement pertinente.

Notre objectif dans le cadre de ce projet est de construire une architecture de machine à état liquide basée sur les systèmes photoniques à retard, et de tester ce "cerveau" embryonnaire (quelques centaines de neurones) par rapport à des tâches de classification standard en neuro-informatique (reconnaissance de chiffres prononcés, par exemple). Nous sommes actuellement très actifs sur cette thématique de recherche et un article est en rédaction par rapport à nos premiers résultats.

Toujours avec notre architecture d'oscillateur optoélectronique large bande, nous envisageons aussi d'engager des recherches sur le thème des générateurs de nombres aléatoires. Il est notoire que les architectures de type Ikeda produisent un hyper-chaos proche d'un bruit Orstein-Uhlenbeck (bruit blanc spectralement limité), et nous souhaitons utiliser cette propriété pour la génération à très haut débit de nombres pseudo-aléatoires ayant une statistique quasi-gaussienne (voir Fig. 10).

---

**PUBLICATIONS ASSOCIEES  
(REVUES INTERNATIONALES A COMITE DE LECTURE)**

1. **Routes to chaos and multiple time-scale dynamics in broadband bandpass nonlinear delay electro-optic oscillators**, M. Peil, M. Jacquot, Y. K. Chembo, L. Larger and T. Erneux, *Phys. Rev. E* **79**, 026208 (2009).
2. **Effect of Fiber Propagation on Chaos Communications using Optoelectronic Delay Systems with Nonlocal Nonlinearity**, R. M. Nguimdo, R. Lavrov, P. Colet, M. Jacquot, Yanne K. Chembo and L. Larger, *IEEE J. of Lightwave Technol.* **28**, 2688 (2010).
3. **Wideband chaos generation using a delayed oscillator and a two-dimensional nonlinearity induced by a quadrature phase-shift keying electro-optic modulator**, M. Nourine, Yanne K. Chembo and L. Larger *Opt. Lett.* **36**, 2833 (2011).

**AUTRES PUBLICATIONS ASSOCIEES  
(ACTES DE COLLOQUES AVEC SELECTION DE RESUMES)**

4. **Générateur de chaos optoélectronique à double retard pour les télécommunications optiques sécurisées à haut débit**, M. Nourine, L. Larger, Y. Chembo, K. Volyanskiy and M. Peil, *13th Nonlinear encounters, Institut Poincaré (Paris)*, 127 (2010).
  5. **Effets de dispersion sur un signal chaotique en phase généré par un dispositif électro-optique à retard**, R.M. Nguimdo, R. Lavrov, P. Colet, M. Jacquot, Y. Chembo et L. Larger, *Proc. "Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG)*, 44 (2010).
  6. **Echelles de temps multiples dans les équations intégral-différentielles à retard en optoélectronique**, L. Larger, M. Peil, M. Jacquot, Y. Chembo and T. Erneux *11th Nonlinear encounters, Institut Poincaré (Paris)*, 109 (2008).
-



## V. Perspectives de recherche

La partie la plus conséquente de nos perspectives de recherche pour les prochaines années se concentrera sur le projet ERC qui a été obtenu sur la base d'un programme de recherche prospectif élaboré au cours des deux dernières années. Ce programme se base sur les dernières orientations thématiques effectuées après la thèse, lors de nos travaux post-doctoraux au sein de l'équipe OPTO de l'institut FEMTO-ST et à la NASA/Caltech. Nous développons aussi des perspectives liées soit à des domaines plus anciens abordés pendant la thèse en collaboration avec l'institut FEMTO-ST, soit à des nouvelles directions de recherche, en particulier celles pilotées par le Prof. Laurent Larger dans le cadre du projet Européen PHOCUS, et dans lesquelles nous souhaitons aussi être impliqués en parallèle au projet ERC.

### Génèse de la thématique sur les cavités non-linéaires et objectifs scientifiques

Au Département d'Optique de l'Institut FEMTO-ST, nous développons depuis quelques années des activités de recherche soutenues dans le domaine des résonateurs à mode de galerie. Typiquement, ces résonateurs sont des disques diélectriques de taille micro- ou millimétrique, et lorsqu'ils sont presque parfaitement usinés (rugosité de surface sub-nanométrique), une radiation laser peut être piégée par réflexion interne dans les modes propres toriques de la cavité, qui sont précisément appelés *modes de galerie*. L'intervalle spectral libre de ces modes peut varier de quelques GHz à quelques THz selon le rayon du résonateur, tandis que son facteur de qualité  $Q$  (rapport  $f_0/\Delta f_0$  entre la fréquence centrale et la largeur de raie d'un mode propre de la cavité) peut être exceptionnellement élevé, de l'ordre de  $10^{10}$ .

Jusqu'à présent, notre intérêt pour ces résonateurs a été motivé par les applications en photonique micro-onde. En particulier, notre objectif principal était la génération de micro-ondes ultra-pures en utilisant les Oscillateurs Opto-Electroniques ( $O^2E$ ). Dans ce cas, les résonateurs à mode de galerie sont utilisés dans le régime linéaire en tant que filtres optiques étroits. Cet axe de recherche reste pertinent à nos yeux, et nous continuons à nous y impliquer en partenariat avec le CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) dont l'intérêt spécifique porte sur les applications radar. Nous coordonnons actuellement ce projet quadriennal de recherche pour l'Institut FEMTO-ST, et au niveau national, et nous sommes aussi impliqués en tant que partenaire dans le projet ANR intitulé ORA (*Optical Resonators and their Applications*), dont l'objectif est principalement orienté vers les applications en photonique micro-onde. Dans le

---

cadre de ces partenariats avec le CNES et l'ANR, notre contribution la plus importante a été la fabrication de résonateurs avec des matériaux inhabituels (notamment le  $\text{MgF}_2$ ) pour ce type de réalisation, et leur intégration dans la boucle d'oscillation d' $\text{O}^2\text{Es}$  compacts.

Cependant, un autre paradigme, exceptionnellement fructueux, a émergé il y a quelques années par rapport à ces résonateurs à mode de galerie. Dans les années initiales de recherche sur ces résonateurs, les scientifiques étaient particulièrement intéressés par leur potentiel dans le régime linéaire, afin d'effectuer par exemple du filtrage optique ultra-sélectif ou du stockage (piégeage) de photons. Dans ce contexte, tous les efforts étaient logiquement investis dans le but d'éviter les effets non-linéaires, qui étaient objectivement indésirables. Par contre, lorsque qu'un mode de cavité est pompé par un laser, le fort confinement modal, la forte densité de photons et la longue durée de stockage optique (proportionnel au facteur  $Q$ ) induit une forte interaction lumière-matière capable d'exciter les modes de galerie spectralement voisins. Cette excitation inter-modale peut s'effectuer à travers plusieurs phénomènes non-linéaires, tels que les effets Raman, Brillouin ou Kerr. En particulier, en ce qui concerne l'effet Kerr, les modes excités sont corrélés en phase, ce qui est une propriété essentielle que nous souhaitons exploiter du point de vue technologique.

La très grande majorité des travaux dans ce nouveau domaine des phénomènes non-linéaires dans les cavités à mode de galerie a été initiée dans le bassin de Pasadena (Californie, USA) par des laboratoires de physique affiliés au *California Institute of Technology* (Caltech), ou au *NASA Jet propulsion Laboratory* (ou JPL, aussi administré par Caltech pour la NASA). Ces physiciens ont montré que le renforcement de ces non-linéarités ouvrait la voie à une pléthore de nouvelles applications dans plusieurs disciplines scientifiques (électrodynamique quantique, physique de la matière condensée, etc.) et technologiques (ingénierie aérospatiale et des télécommunications, métrologie temps-fréquence, spectroscopie, etc.). En particulier, il a été montré que selon les propriétés du matériau diélectrique, l'accroissement de l'intensité de l'interaction lumière-matière induit par le facteur de qualité ultra-élevé pouvait générer un mélange à quatre ondes avec un très bon rendement énergétique, *via* la non-linéarité de Kerr. Au-delà d'un certain seuil, on obtient donc ainsi un peigne de fréquences optiques, dit *peigne de Kerr*, dont les avantages sont principalement, nous le rappelons, la taille réduite, la simplicité conceptuelle, la faible consommation énergétique, la robustesse intrinsèque, le fort potentiel d'intégration sur puce, et enfin, la possibilité d'avoir un composant hybride interconnectant les technologies photonique et hyperfréquence.

Ces peignes de Kerr peuvent donc être étudiés en tant que composants compacts capables de générer en sortie des lignes spectrales corrélées en phase dans le domaine optique. Notre intérêt pour ces peignes est justifié par les deux applications essentielles que nous souhaitons explorer au cours des prochaines années, à savoir la génération de micro-ondes ultra-stables pour les systèmes aérospatiaux, et la génération de porteuses optiques multi-longueurs d'ondes pour réseaux de télécommunication fibrés.

En ce qui concerne l'ingénierie aérospatiale, notre objectif principal sera de mettre en évidence un oscillateur photonique micro-onde dont les performances seront au moins équivalentes à celles des oscillateurs à quartz. En particulier, nous souhaitons montrer que ces oscillateurs satisfont aux impératifs de compacité, de versatilité, de stabilité fréquentielle et de bruit de phase qui garantissent un saut de qualité significatif par rapport au quartz. Dans la perspective de cet axe de recherche, un projet a été déposé pour l'édition 2011 de l'appel à projet



ERC *Starting Independent Researcher Grant*. Ce projet, intitulé NextPhase (*NEXT generation of microwave PHotonics systems for AeroSpace Engineering*), a finalement été sélectionné en 2011.

Par rapport aux applications en télécommunications optiques, nous souhaitons explorer la richesse de l'approche des porteuses cohérentes multi-longueurs d'ondes, et démontrer sa viabilité à travers des expériences sur le terrain. Nous visons concrètement un démonstrateur avec une vitesse supérieure à 160 Gb/s en utilisant un format de modulation avancé (constellation phase/intensité sur plusieurs canaux) dans un réseau métropolitain. Nous avons dans cette perspective fait la demande cette année pour le financement "ANR Jeune Chercheur" d'un projet intitulé INPHOCITY (*Intrinsically Nonlinear PHOtonic Components for Information TechnologY*). Ce projet de recherche a aussi été sélectionné pour financement en 2011.

Nous approfondissons dans les sections qui suivent notre programme de recherche dans ces deux domaines pour les prochaines années. Cette section sur nos perspectives de recherche est donc divisée en quatre parties : la première traitera de la génération de micro-ondes ultra-stables pour l'ingénierie aérospatiale ; dans la seconde nous présenterons notre projet par rapport à la génération de sources cohérentes multi-longueurs d'onde pour les réseaux de télécommunications ; ensuite, nous présenterons nos perspectives de recherche en théorie de l'information ; et enfin, nous analyserons les défis scientifiques et technologiques que nous devons surmonter, ainsi que l'impact global que pourraient avoir nos activités de recherche.

---

## 1. Systèmes photoniques pour l'ingénierie aérospatiale : générateur de micro-ondes ultra-stables

L'ingénierie aérospatiale a un besoin constant de micro-ondes ayant une très haute stabilité spectrale. Ceci est dû au fait que cette stabilité est directement reliée à presque tous les paramètres quantitatifs de performance dans les technologies associées (radars, horloges, etc.). Cependant, la génération de ces micro-ondes avec des sources compactes et transportables reste un défi extrêmement complexe, en particulier dans la gamme de fréquence des GHz.

Notre objectif principal pour les prochaines années dans ce domaine est d'effectuer des recherches permettant à terme d'implémenter un démonstrateur compact, versatile et ultra-stable de fréquences micro-ondes dans la gamme des GHz. La stabilité à court terme (au sens d'Allan) et le bruit de phase devront être au moins comparable à ceux des oscillateurs à quartz, qui sont actuellement les systèmes standards dans la plupart des applications en ingénierie aérospatiale. Ces oscillateurs pourront aussi jouer un rôle dominant en télécommunications, et devraient ouvrir des horizons nouveaux dans plusieurs domaines liés à la physique fondamentale et appliquée.

### 1.1. Etat de l'art pour les oscillateurs micro-ondes

En ingénierie aérospatiale, les oscillateurs à quartz ultra-stables jouissent d'une hégémonie écrasante en tant que sources micro-ondes. Ils sont en effet prédominants à la fois dans les systèmes de navigation (aéronefs, satellites, navettes spatiales, etc.) et de détection (radars, senseurs, etc.). Cette position dominante est à ce jour parfaitement justifiée, au vu des prouesses technologiques que le quartz a permis d'accomplir.

Cependant, il est aujourd'hui unanimement reconnu que la performance en stabilité à court terme de ces oscillateurs à quartz a atteint un plancher intrinsèque (déviations standard d'Allan  $\sim 10^{-14}$  à 1 seconde), et que cette performance ne s'améliorera plus de manière significative. De plus, leur faible fréquence de sortie (maximum typique  $\sim 100$  MHz pour les oscillateurs commerciaux) a été pendant longtemps, et reste toujours, une limite technologique récurrente. Le scénario le plus optimiste pour les prochaines années ne prévoit qu'une fréquence maximale de quelques GHz, en utilisant une technologie de type SAW (*Surface Acoustic Wave*).

Une stratégie pour résoudre ce problème serait de réduire la taille d'un oscillateur GHz reconnu comme exceptionnellement stable, dans le but de le rendre compact et compatible avec les exigences des systèmes embarqués. Dans cet esprit, les oscillateurs cryogéniques à Saphir seraient de bons candidats a priori (déviations d'Allan  $\sim 10^{-15}$ ), mais malheureusement, ils ont des inconvénients insurmontables malgré leur excellente stabilité en fréquence : ils sont nécessairement encombrants, délicats et exigeants en énergie à cause du refroidissement cryogénique à quelques Kelvins. Les autres solutions ne sont pas plus satisfaisantes : les masers à hydrogène (volume  $\sim 1$  m<sup>3</sup>) peuvent difficilement être miniaturisés, tout comme les horloges à atomes piégés (<sup>199</sup>Hg<sup>+</sup>, etc.), les lasers femto-seconde ou les fontaines atomiques (Cs, Rb, etc.).

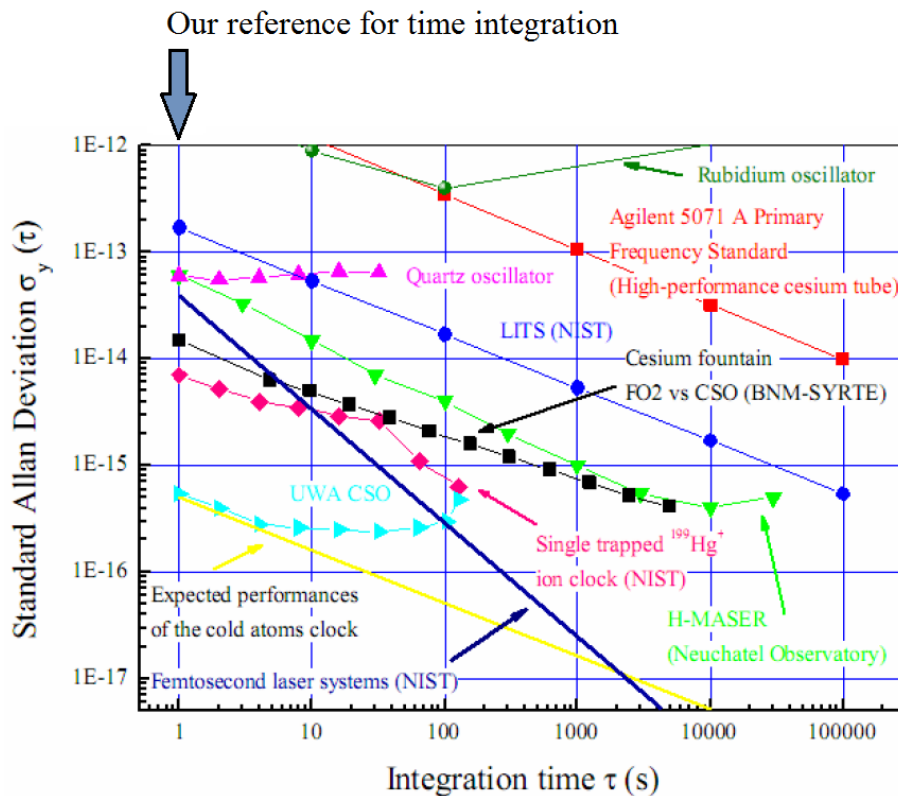


FIGURE 11 – La variation d’Allan pour certains parmi les oscillateurs micro-ondes les plus stables est représentée dans cette figure. [d’après P. Ulrich, LNE-SYRTE, Paris/France]. Si nous fixons arbitrairement  $\tau=1$  seconde comme notre référence pour l’intégration temporelle, nous pouvons identifier les oscillateurs plus stables que le quartz à savoir (du moins au plus stable) : le maser à hydrogène, les systèmes de laser femtoseconde, la fontaine atomique au Césium, l’horloge à ions Hg piégés, l’oscillateur cryogénique saphir, et enfin l’horloge à atomes froids. Il est intéressant de noter que tous ont un rendement énergétique relativement faible et qu’aucun d’entre eux ne peut-être facilement miniaturisé en deçà du  $\text{dm}^3$ .

La Figure 11 représente synthétiquement la déviation d’Allan typique de ces oscillateurs, et il apparaît clairement qu’ils ne deviennent plus stables que le quartz qu’au dépens d’autres paramètres extrêmement importants, tels que le volume et la simplicité conceptuelle. Ainsi, même si ces technologies sont parfaitement adaptées pour des stations terriennes ou pour établir des standards de fréquence exceptionnellement précis, ils ne sont pas optimaux pour les systèmes embarqués qui nécessitent de la versatilité et de la portabilité.

D’un autre côté, dans plusieurs systèmes aérospatiaux, le paramètre critique est le niveau de bruit de phase à une certaine fréquence de décalage par rapport à la porteuse, au lieu de la stabilité au sens d’Allan (à court terme). C’est par exemple le cas pour les radars Doppler, tel qu’expliqué à la Fig. 12. Ces radars nécessitent des planchers de bruit de phase particulièrement bas afin d’améliorer leur sensibilité et leur plage de détection. L’objectif affiché pour la prochaine génération de générateurs sensible au bruit de phase est de  $-160 \text{ dBc/Hz}$  à  $10 \text{ kHz}$  d’une porteuse de  $10 \text{ GHz}$  (ou rapportée à cette valeur pour d’autres fréquences).

Il y a actuellement une forte demande pour des sources compactes, versatiles et transportable satisfaisant ce niveau de performance, mais ici encore, le quartz n'offre plus d'alternatives d'évolution significative. Comme nous l'avons indiqué précédemment, les oscillateurs à quartz oscillent généralement autour de 100 MHz, de telle sorte que la génération de signaux à 10 GHz nécessite une multiplication en fréquence, ce qui induit automatiquement une perte de 6 dB en bruit de phase à chaque dédoublement. Ainsi, par exemple, même un oscillateur à quartz exceptionnellement stable à 100 MHz dont on multiplierait la fréquence jusqu'à 10 GHz verrait son bruit de phase se détériorer de 40 dB.

Plusieurs solutions alternatives sont actuellement étudiées dans le monde scientifique. Les micro-ondes générées en utilisant les composants à semiconducteur sont intéressants en ce sens qu'ils sont extrêmement compacts et versatiles, et peuvent atteindre des performances en bruit de phase de l'ordre de -120 dBc/Hz à 10 kHz d'une porteuse de 1 à 40 GHz [1]. Des recherches sont actuellement menées pour améliorer ces performances, particulièrement grâce à des astuces électroniques ou des matériaux à semiconducteur à faible bruit (SiGe). Toutefois, même dans le meilleur des cas, on ne devrait à priori s'attendre qu'à une amélioration de l'ordre de 20 dB avec cette technologie.

Les oscillateurs optoélectroniques (O<sup>2</sup>Es) sont aussi des architectures prometteuses [2]. Comme nous l'avons précédemment expliqué, ils sont capables de générer des micro-ondes ultra-stables grâce à leur grande capacité de stockage de photons (de l'ordre de la microseconde). Le principal inconvénient de cette architecture est que ce système est relativement encombrant à cause de la ligne à retard, et aussi exigeante énergétiquement à cause du contrôle en température de la boucle fibrée. Lorsqu'elle est remplacée par un résonateur à mode de galerie (objet de nos recherches dans le cadre du contrat CNES), l'O<sup>2</sup>E gagne en compacité (quelques dm<sup>3</sup>), mais cela se fait au dépend de la performance de bruit de phase (à ce jour, -90 dBc/Hz à 10 kHz d'une porteuse de 10 GHz).

Une autre famille d'oscillateurs micro-ondes compacts est basée sur les systèmes micro-électromécaniques (MEMS). Ces générateurs micro-ondes ont certainement un grand futur pour une large gamme d'applications, mais leurs performances typiques (-120 dBc/Hz à 10 kHz d'une porteuse à 1 GHz [3]; déviation d'Allan  $\sim 10^{-11}$  [4]) restent en deçà des performances que nous visons. Il est toutefois intéressant de noter que ces MEMS peuvent être miniaturisés à la taille du nanomètre (NEMS; une rupture technologique et scientifique majeure), mais dans ce cas, le bruit de phase se dégrade drastiquement (bruit de phase  $\sim -45$  dBc/Hz à 1 kHz d'une porteuse à 428 MHz [5]).

Ainsi, même si les oscillateurs à quartz continueront logiquement à régner sur le monde des oscillateurs pendant longtemps, ils arrivent progressivement à la fin de leur cycle technologique en ce qui concerne les applications les plus à la pointe en ingénierie aérospatiale. Les oscillateurs de nouvelle génération devront satisfaire des conditions extrêmement restrictives en termes de stabilité en fréquence (déviation d'Allan  $\sim 10^{-15}$ ), de bruit de phase (plancher  $< -160$  dBc/Hz à quelques kHz de la porteuse), et de versatilité (porteuse du GHz au THz). C'est pourquoi la recherche d'un autre standard technologique fait aujourd'hui l'objet d'une intense activité scientifique dans le monde.

C'est dans cette logique que nous proposons l'exploration d'une solution à la fois élégante et prometteuse, à savoir l'utilisation des cavités non-linéaires à mode de galerie et à facteur de

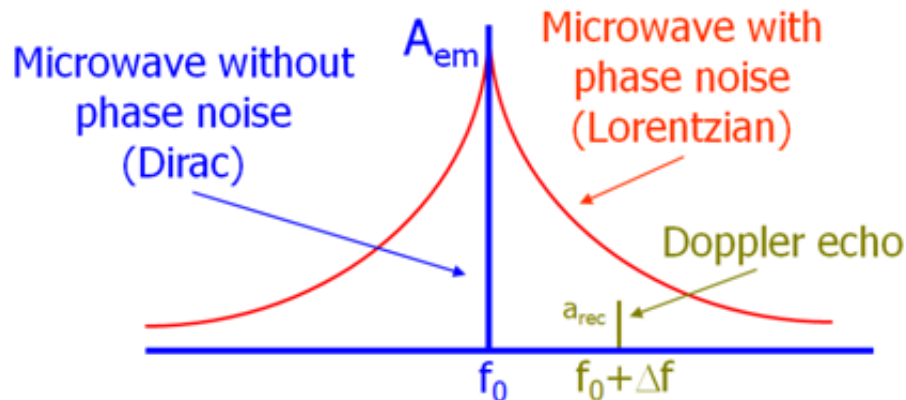


FIGURE 12 – Illustration de l'effet négatif du bruit de phase dans les radars Doppler. La micro-onde de référence d'amplitude  $A_{em}$  et de fréquence  $f_0$  est envoyée vers l'objet. Le signal réfléchi (ou écho) a une amplitude  $a_{rec}$  proportionnelle à la réflectivité de l'objet. La fréquence de l'écho  $f_0 + \Delta f$ , où le décalage Doppler  $\Delta f \propto -[v/c]f_0$  permet de déterminer la vitesse radiale  $v$  de l'objectif. Sans bruit de phase (cas idéal d'un pic de Dirac pur), le radar peut détecter des échos arbitrairement faibles et ayant des décalages Doppler arbitrairement petits. En réalité, le bruit de phase (raie Lorentzienne dans le cas le plus simple) introduit une limite de sensibilité : par exemple, dans cette figure, l'écho est submergé par le bruit de phase, et est donc indétectable. Les micro-ondes ayant un bruit de phase arbitrairement faible sont donc nécessaires pour les radars Doppler de haute précision/résolution. Dans les systèmes aérospatiaux, ils sont couramment utilisés pour détecter le mouvement des satellites, des avions, des navettes spatiales, ou des objets interplanétaires (astéroïdes, débris spatiaux, etc.).

qualité ultra-élevé, non seulement capable de satisfaire aux critères de stabilité en fréquence et de bruit de phase, mais aussi d'enrichir plusieurs autres disciplines scientifiques et technologiques.

## 1.2. Etat de l'art mondial par rapport aux phénomènes non-linéaires dans les résonateurs à mode de galerie et à facteur $Q$ ultra-élevés

L'exploitation des phénomènes non-linéaires dans les résonateurs à mode de galerie est un champ de recherche actuellement très actif (particulièrement aux Etats-Unis), quoique relativement récent. Les résultats obtenus durant ces 7 dernières années sont extrêmement prometteurs, et prouvent que les technologies associées aux résonateurs non-linéaires à mode de galerie sont matures en termes de processus de fabrication et de potentiel pour les technologies aérospatiales.

En ce qui concerne les peignes de Kerr, les premières contributions (génération de deux modes latéraux) ont été faites il y a 7 ans à Caltech [6] et au NASA *Jet Propulsion Lab* [7] (qui est en fait administré par Caltech). Ces contributions ont été suivies par une remarquable brèche ouverte à l'Institut Max Planck en Allemagne, à savoir la génération d'un peigne étendu comportant plusieurs dizaines de modes excités [8]. Les peignes s'étendant sur plus d'un octave sont en principe possibles : dans ce cas, ils peuvent être auto-référencés, ce qui rend possible le transfert des fréquences optiques vers les fréquences micro-ondes ou THz avec une précision métrologique [8,9]. Durant notre séjour au JPL, nous avons initié une approche origi-

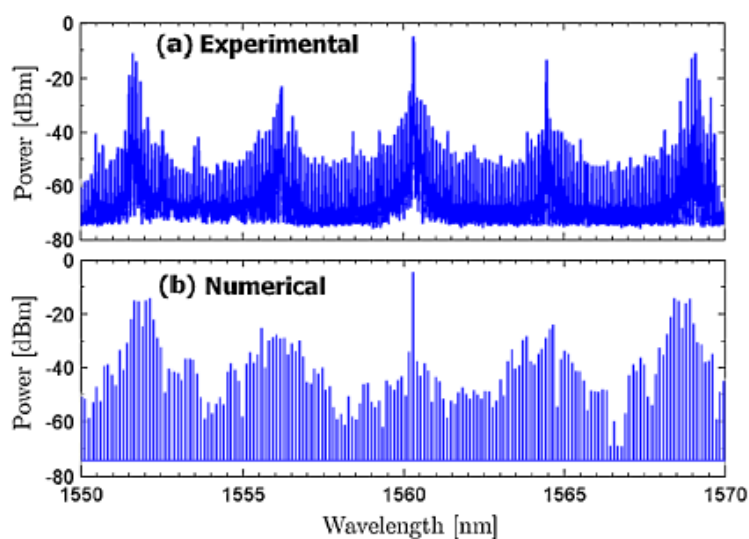


FIGURE 13 – Excitation de modes de galerie (>200) dans une cavité de fluorite de calcium à facteur  $Q$  ultra-élevé, avec un intervalle spectral libre de 14 GHz (d’après la réf. [10]). En complète conformité avec les mesures expérimentales, nous avons introduit une nouvelle approche qui a permis pour la première fois de comprendre comment un tel nombre de modes pouvait être excité simultanément. La théorie complète a été présentée dans la réf. [11], qui a été commentée dans un *Viewpoint* du journal *Physics* de l’APS [D. A. Braje, *Physics* **3**, 75 (2010)].

nale basée sur les dynamiques non-linéaires pour analyser ces peignes [9,10,11], permettant ainsi “*the first quantitative analysis of the massively cascaded hyper-parametric interactions*” [12]. Cette contribution fondamentalement pluridisciplinaire a permis pour la première fois de comprendre théoriquement les processus complexes qui surviennent dans ces cavités à toutes les échelles de temps pertinentes. Elle a aussi permis d’expliquer précisément le mécanisme d’excitation séquentiel des modes de galerie, en accord avec les expériences (voir Fig. 13 et réf. [10]).

L’émission Raman stimulée a aussi été le centre d’intérêt de plusieurs groupes depuis sa démonstration expérimentale à Caltech [13]. L’émission Brillouin stimulée a aussi été démontrée très récemment pour la première fois au NASA *Jet Propulsion Lab* [14], avec l’avantage spécifique de générer une raie Stokes ultra-étroite ( $\sim 0.3$  mHz), et ayant un décalage de l’ordre de 20 GHz. Un intérêt spécifique de ces lasers est leur large bande de gain ( $\sim 100$  MHz), qui garantit un signal de sortie stable, particulièrement insensible à la gigue de la pompe laser.

En ce qui concerne les facteur de qualité, des valeurs extrêmement élevés ont par contre été atteintes depuis 5 ans déjà au JPL, et il sont de l’ordre de  $10^{10}$  à 1550 nm (avec des pics à  $10^{11}$ ) en utilisant des cavités de Fluorite de Calcium [15].

Tous ces résultats préliminaires, ainsi que plusieurs autres publiés dans la littérature scientifique, renforce notre conviction que l’ingénierie aérospatiale peut bénéficier des phénomènes non-linéaires intrinsèques dans ces résonateurs à modes de galerie.

### 1.3. Vision programmatique

Pour mener à bien ce programme de recherche, nous comptons le structurer en cinq axes principaux, à savoir : modélisation théorique et simulations numériques ; résonateurs et architectures de couplage ; excitation non-linéaire des résonateurs à mode de galerie ; génération de micro-ondes ; optimisation de la stabilité fréquentielle et du bruit de phase. Ces axes sont détaillés ci-dessous.

#### Modélisation, théorie, et simulations numériques

L'objectif principal sera ici d'étudier les diverses architectures de résonateurs et de couplage, ainsi que les divers phénomènes non-linéaires dans la cavité. Nous souhaitons aussi étudier divers effets volumiques à travers des simulations en utilisant des algorithmes d'éléments finis. Il s'agira aussi ici d'optimiser les performances en stabilité de fréquence et en bruit de phase. En particulier, nous avons déjà démontré que l'approche multimodale a une complexité algorithmique polynomiale, qui se prête au calcul parallèle. Nous souhaitons aussi nous engager dans la programmation en éléments finis afin de prendre en compte simultanément les effets optiques, thermiques et électroniques dans la cavité non-linéaire.

Une difficulté majeure à ce niveau sera d'évaluer précisément les effets stochastiques volumiques, tels que les effets thermo-réfractifs, thermo-élastiques, pondéro-moteurs, photo-thermiques, ainsi que les fluctuations de dispersion ou d'auto-modulation de phase. Ces contributions stochastiques sont généralement très difficiles à évaluer et à intégrer dans des modèles, alors qu'elles jouent un rôle essentiel dans la dégradation de la performance de l'oscillateur. Une alternative à cette modélisation volumique serait d'intégrer ces sources de bruit en tant que sources phénoménologiques de Langevin (projection hermitienne).

#### Résonateurs et architectures de couplage

Nous souhaitons ici nous focaliser sur la fabrication de résonateurs à mode de galerie et à facteur de qualité de l'ordre de l'état de l'art ( $Q \sim 10^{10}$ ), et en utilisant un nouveau matériau ( $\text{MgF}_2$ ). Nous espérons ainsi obtenir des résultats significativement supérieurs à ceux obtenus avec d'autres matériaux amorphes (silice fondue) ou cristallins (fluorite de calcium). Un autre objectif ici est aussi d'étudier les meilleures architectures de couplage entre les résonateurs et les fibres optiques qui guident la lumière laser vers la cavité (couplage par fibre étirée, fibre biseautée, prisme, guide photo-induit, optique intégrée avec un guide-pont aminci).

Des facteurs de qualité de l'ordre de  $10^{10}$  ont déjà été réalisés au JPL dans l'infrarouge, avec un résonateur en  $\text{CaF}_2$ . Pour des raisons de stabilité et de robustesse, nous souhaitons plutôt utiliser un autre matériau, à savoir le  $\text{MgF}_2$ . Nous avons déjà réussi à fabriquer un résonateur à  $Q = 3 \times 10^8$  avec ce matériau et nous pensons pouvoir optimiser le protocole de fabrication pour atteindre au moins  $10^{10}$  d'ici quelques années.

---

### **Excitation non-linéaire des résonateurs**

L'intérêt principal de cet axe est l'excitation de résonateurs couplés au dessus de la puissance de seuil par rapport au phénomène non-linéaire considéré. Les différentes possibilités (Kerr, Raman, Brillouin, etc.) seront étudiées séparément, mais une attention particulière sera portée au cas où il pourraient survenir simultanément. Les modes latéraux générés devront remplir trois conditions : avoir une forte puissance relativement à la pompe, être extrêmement stables, et enfin avoir une large bande spectrale d'excitation (dans le meilleur des cas, s'étendre au-delà d'une octave). Alternativement, nous allons aussi étudier en détail le cas où la génération d'une seule paire de modes latéraux génère assez de puissance et de stabilité pour la micro-onde de sortie, en particulier dans le cas de l'émission stimulée Brillouin.

La difficulté principale ici sera justement d'obtenir le plus large et le plus stable peigne possible. Il est fort possible que ces deux contraintes soient contradictoires, et dans ce cas nous devons analyser les conditions optimales selon l'application précise visée. Par exemple, la fréquence de la micro-onde dépendra de l'intervalle spectral libre du résonateur, autrement dit de sa taille. Or, il est établi que plus le résonateur est petit, plus il est facile d'exciter des modes sur une large gamme spectrale. On peut aussi utiliser le fait que dans certains matériaux cristallins, le gain Brillouin est le plus élevé à environ 20 GHz de la pompe, et utiliser cette émission stimulée, reconnue comme exceptionnellement stable, pour exciter d'autres modes (pompe secondaire).

### **Génération de la micro-onde**

Différentes architectures de génération micro-onde vont être explorées dans cet axe de recherche. Notre ambition ici est de mettre en place un système de détection hétérodyne qui ne dégraderait pas significativement la stabilité spectrale et la pureté des micro-ondes générées. C'est à ce niveau qu'un travail délicat de conception de circuits hyper-fréquences devra être effectué, avec pour objectif la génération de micro-onde dans une gamme de fréquence s'étendant de 1 à plus de 100 GHz.

Le défi majeur à ce stade est la nécessité d'avoir des modes excités extrêmement stables, et très fortement corrélés. Il nous semble très probable que les effets Raman et Kerr puissent produire des peignes relativement larges (spectralement) et puissants, mais la stabilité fréquentielle pourrait être problématique. L'effet Brillouin par contre ne devrait a priori produire qu'un nombre très restreint de modes, mais beaucoup plus stables. Selon les applications un arbitrage devra donc être fait à ce niveau.

### **Optimisation de la stabilité fréquentielle et du bruit de phase**

Ce dernier axe chapeaute littéralement tous les autres car il est celui où nous essayerons d'optimiser les micro-ondes ultra-stables en question, afin d'atteindre un niveau de performance potentiellement intéressant pour les applications aérospatiales. Très clairement, l'objectif le plus ambitieux ici est d'avoir une stabilité à court terme de l'ordre de celle des oscillateurs à

---



---

quartz ( $10^{-14}$  à 1 s). Nous avons déjà démontré des O<sup>2</sup>Es fibrés ayant une déviation d'Allan  $\sim 10^{-12}$ , et donc nous pensons résolument pouvoir atteindre notre objectif au cours des prochaines années. Atteindre cet objectif de performance dépendra aussi de questions purement technologiques comme le packaging, mais aussi de facteurs qu'il est impossible de quantifier exactement, comme la capacité du matériau à supporter les contraintes thermiques imposées par la radiation laser confinée. L'objectif en bruit de phase (-160 dBc/Hz à 10 kHz d'une porteuse à 10 GHz) est très certainement extrêmement ambitieux, et peut-être difficilement atteignable dans un laboratoire universitaire, mais nous avons régulièrement atteint des performances de l'ordre de -155 dBc/Hz dans un autre contexte (O<sup>2</sup>Es), ce qui nous permet d'être relativement confiants dans notre capacité, dans le cas le plus favorable, à atteindre aussi ce niveau de bruit de phase avec des peignes de modes de galerie.

---

**REFERENCES**

1. A. Chenakin, *Microwave Journal* **79**, 124 (Oct. 2009).
  2. X. S. Yao and L. Maleki, *J. Opt. Soc. Am. B* **13**, 1725 (1996).
  3. C. Zuo *et al.*, *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Freq. Control* **57**, 82 (2010).
  4. C. Nguyen, *IEEE Trans. Ultrasonics, Ferroelectrics and Freq. Control* **54**, 251 (2007).
  5. X. L. Feng *et al.*, *Nature nanotechnology* **3**, 342 (2008).
  6. T. J. Kippenberg *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 083904 (2004).
  7. A. A. Savchenkov *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 243905 (2004).
  8. P. Del'Haye *et al.*, *Nature* **450**, 1214 (2007).
  9. Y. K. Chembo and N. Yu, *Opt. Lett.* **35**, 2696 (2010).
  10. Y. K. Chembo, D. V. Strekalov and N. Yu, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 103902 (2010).
  11. Y. K. Chembo and N. Yu, *Phys. Rev. A* **82**, 033801 (2010).
  12. D. A. Braje, *Physics* **3**, 75 (2010).
  13. S.M. Spillane *et al.*, *Nature* **415**, 621 (2002).
  14. I. S. Grudinin *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 043902 (2009).
  15. I. S. Grudinin, V. S. Ilchenko and L. Maleki, *Phys. Rev. A* **74**, 063806 (2006).
-

## 2. Systèmes photoniques pour les télécommunications : générateur de porteuses cohérentes multi-longueurs d'onde pour les réseaux fibrés

Il existe actuellement un intérêt croissant pour les formats de modulation en phase dans les télécommunications optiques fibrées. Cet engouement est fortement motivé par les perspectives d'augmentation de bande passante, grâce aux formats avancés de modulation de type phase/intensité. Ces architectures de communication cohérentes nécessitent une estimation précise de la phase optique de la porteuse au niveau du récepteur afin de permettre l'extraction du signal modulant. Par contre, ces systèmes sont extrêmement sensibles aux fluctuations de phase, de telle sorte qu'ils nécessitent l'utilisation de précises boucles de contrôle par rétroaction pour comparer cette phase à une valeur de référence donnée. Le temps de réponse de ces boucles de contrôle est aussi malheureusement assez souvent un facteur limitant pour la vitesse de modulation de la porteuse. De plus, dans les systèmes à multiplexage de longueur d'onde ultra-denses, il devient de plus en plus difficile de générer des dizaines de porteuses de ce type lorsqu'elles doivent être contrôlées précisément et individuellement.

Une solution élégante pour contourner simultanément tous ces problèmes est d'utiliser un peigne de fréquences optiques comme source cohérente multi-longueurs d'onde. Dans notre cas, la source serait un résonateur à mode de galerie à facteur de qualité ultra-élevé, et pompé par un laser à semiconducteur autour de 1550 nm. Ce signal optique multi-longueurs d'ondes (dans notre cas, un peigne de Kerr) sera donc constitué d'un ensemble de lignes spectrales quasi-équidistantes et corrélées en phase, et qui seront utilisées comme sous-porteuses dans notre architecture de communication cohérente. Nos travaux antérieurs sur la génération de peignes de Kerr ont déjà contribué à montrer leurs avantages aussi nombreux qu'essentiels.

Notre objectif sera donc ici l'adaptation de ces peignes de Kerr aux problématiques des systèmes de télécommunications optiques cohérentes à multiplexage de longueur d'onde. Nous souhaitons à terme démontrer la capacité de transmettre des données à plus de 100 Gb/s dans un réseau métropolitain de fibre optique, en utilisant un format de modulation avancé (constellation phase/intensité sur plusieurs canaux). Nous envisageons nous envisageons à cette fin d'utiliser les possibilités d'accès au réseau fibré "Lumière" de la ville de Besançon.

Nous prévoyons que les résultats finaux de ces recherches auront un intérêt pour les futures architectures FTTH (*Fiber To The Home*). Ces composants intrinsèquement non-linéaires sont aussi totalement compatibles avec le paradigme de la photonique sur silice/silicium, ainsi qu'avec la tendance actuelle qui privilégie les composants photoniques en télécommunication optique, qui permettent le traitement ultra-rapide des signaux [(de)modulation, amplification, (de)multiplexage, mixage, etc.]

Nous explicitons dans les sous-sections qui suivent les différentes articulations de ce second axe de notre projet de recherche, orienté vers les télécommunications optiques.

## 2.1. Résonateurs non-linéaires à mode de galerie pour les télécommunications optiques cohérentes

Il existe en réalité plusieurs motivations objectives derrière l'intérêt croissant pour les systèmes de télécommunication optiques cohérents. Évidemment, d'un point de vue général, c'est un truisme que de rappeler qu'en télécommunications, les formats de modulation en phase sont plus robustes que les formats de modulation en amplitude. En fait, les formats de modulation avancés combinent les deux.

Le plus simple (et le plus répandu) des formats de modulation est la modulation d'amplitude à deux niveaux, où les bits "0" et "1" sont codés avec une intensité optique basse et haute, respectivement ("*on-off shift keying*"). D'autres schémas de modulation multi-niveaux peuvent être utilisés pour coder plusieurs bits par symbole, augmentant ainsi la capacité par canal ("*amplitude shift keying*"; un schéma à quatre niveaux coderait par exemple 00, 01, 10 et 11).

Cependant, au-delà de la variable d'intensité, la porteuse dans la fibre optique est aussi caractérisée par d'autres paramètres comme sa longueur d'onde, sa phase optique, et sa polarisation. Une amélioration significative de la capacité de transmission par canal pourrait résulter de l'utilisation de ces degrés de liberté additionnels. L'utilisation par exemple de deux polarisations orthogonales double automatiquement la capacité d'un canal ; la modulation de plusieurs canaux est l'objet de la technique bien connue de multiplexage de longueur d'onde (*Wavelength Division Multiplexing* – WDM en anglais), et augmente ainsi multiplicativement le débit total proportionnellement au nombre de canaux (sous-porteuses). Chacune de ces sous-porteuses dans une architecture WDM peut être modulée en intensité (ce qui est assez facile), mais aussi en phase. Cette dernière tâche est beaucoup plus complexe, puisqu'elle nécessite de mixer chaque sous-porteuse avec une référence fixe (l'oscillateur local). Ce processus est le défi principal de la détection optique cohérente, dont l'objectif est de récupérer toute l'information véhiculée par un champ électrique (à savoir l'amplitude, la fréquence, la phase et la polarisation).

Plusieurs problèmes doivent en général être résolus dans ces réseaux de télécommunication cohérents.

En premier lieu, ils sont extrêmement sensibles aux dérives de la fréquence centrale du laser et aux fluctuations de phase induites par la propagation dans la fibre, ce qui fait qu'ils nécessitent généralement de complexes boucles de rétroaction pour verrouiller la porteuse à une valeur fixée. Deuxièmement, dans les réseaux WDM ultra-denses, la génération des sous-porteuses devient de plus en plus difficile quand on augmente le nombre de canaux, surtout lorsque chacun d'entre eux doit être contrôlé précisément et individuellement. Et enfin, la phase de l'oscillateur local doit être verrouillée à celle de la sous-porteuse en utilisant une boucle à verrouillage de phase (*Phase-Locked Loop* – PLL). Malheureusement, ces boucles à verrouillage de phase sont relativement lentes, ce qui est généralement un facteur limitant pour le débit de la porteuse modulée.

Une première méthode pour résoudre ces difficultés est d'utiliser des techniques de traitement numérique du signal (*Digital Signal Processing* – DSP) au niveau du récepteur. Les techniques DSP, qui agissent donc sur la couche logicielle du réseau, peuvent évaluer la phase

d'une porteuse à travers des codes capables de corriger très précisément les distorsions linéaires du signal induites dans la fibre (dispersion chromatique), et assez efficacement celles induites par les effets non-linéaires (effet Kerr). L'avantage essentiel des techniques DSP est qu'elles permettent de s'affranchir des boucles à verrouillage de phase (PLL) au niveau du récepteur. Malheureusement, l'efficacité du traitement numérique du signal reste limitée par le délai induit par le temps de calcul nécessaire pour effectuer les corrections en temps réel.

Dans le cadre de nos activités futures dans le domaine des télécommunications optiques, nous souhaitons explorer une solution originale impliquant la couche matérielle du réseau. Comme nous l'avons expliqué précédemment, les peignes de Kerr peuvent contenir des centaines de sous-porteuses quasi-équidistantes et corrélées en phase, car générées par un seul laser (voir Fig. 14). Les trois difficultés soulevées dans le paragraphe précédent se trouveraient ainsi automatiquement résolues : les sous-porteuses ne dérivent plus entre-elles au niveau du récepteur (en excluant l'effet de la dispersion chromatique, qui peut être facilement compensé) ; seul le laser de pompe doit être verrouillé en fréquence (les sous-porteuses suivent automatiquement car ce ne sont que des répliques) ; et enfin, il n'y a plus de besoin pour une boucle à verrouillage de phase au niveau du récepteur car n'importe quelle sous-porteuse non-modulée génère une référence de phase fiable.

Ce dernier point est particulièrement essentiel car toutes les sous-porteuses se propagent ensemble dans la même fibre, et par conséquent subissent les mêmes effets de fluctuations dues à l'inhomogénéité de la fibre. Par conséquent, la corrélation de phase entre les différentes composantes spectrales du peigne reste globalement identique, après la compensation de dispersion requise dans tout système WDM (puisque chaque sous-porteuse a sa propre vitesse de groupe). Il est aussi important de noter que cette solution hardware est totalement compatible avec la solution software que représente l'approche DSP. En fait, nous prévoyons que gérer la démodulation et la correction des effets de fluctuations de propagation au niveau de la couche matérielle du réseau permettrait d'allouer toute la puissance de calcul sur la couche logicielle à d'autres tâches, telles que la commutation ou la correction d'erreur.

## **2.2. Etat de l'art pour l'utilisation des peignes de fréquences optiques en télécommunications**

Jusqu'à présent, le sujet des peignes de fréquences optiques dans les systèmes cohérents de télécommunications a été presque exclusivement analysé à partir de la perspective des lasers à modes bloqués. Effectivement, la génération d'impulsions courtes et périodiques dans le domaine temporel produit un peigne aux composantes corrélées dans le domaine spectral. Ce type de systèmes est en fait l'archétype historique du concept de peigne de fréquences.

Un article pionnier par rapport à l'utilisation de ces peignes en télécommunications optiques est la réf. [1], où les perspectives applicatives sont mises en évidence et discutées en profondeur. Delfyett *et al.* ont montré que la nature périodique et cohérente en phase de ces peignes permettait la détection cohérente dans les architectures WDM, de même que le multiplexage temporel (*Time Division Multiplexing* – TDM), et l'accès optique multiple à répartition par code (*Optical Code Division Multiple Access* – OCDMA). En considérant des peignes générés avec des lasers à semiconducteur [2], ces auteurs ont démontré la propagation presque sans distor-

---

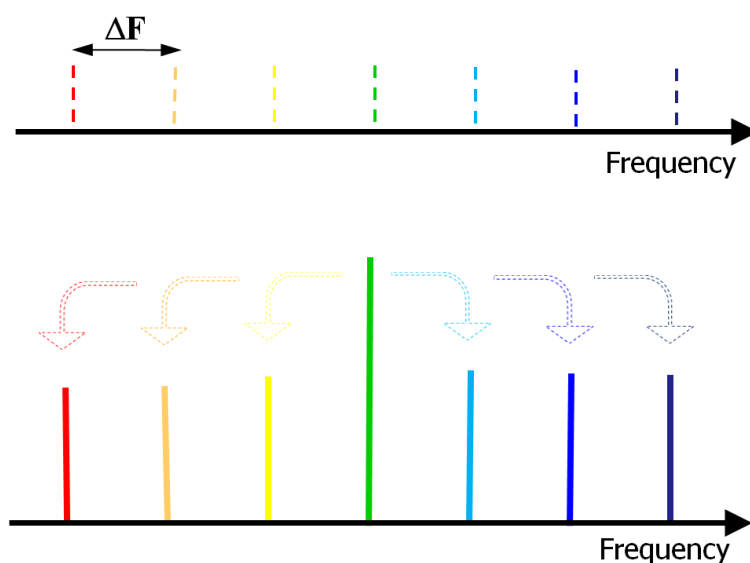


FIGURE 14 — **Haut** : Comme n'importe quelle cavité, les résonateurs à mode de galerie sont caractérisés par un certain nombre de modes propres. Grâce au facteur  $Q$  particulièrement élevé, ces modes ont des largeurs de raie extrêmement faibles. Ils sont de plus ils sont quasi-équidistants, avec un intervalle spectral libre  $\Delta F$  qui peut varier du GHz au THz selon la taille du résonateur. **Bas** : Des paires de photons provenant du laser de pompe (pic vert) sont symétriquement transférés aux autres modes de cavité grâce à la non-linéarité de Kerr, selon la réaction photonique  $2\hbar\omega_p \rightarrow \hbar(\omega_p + n\Delta\Omega) + \hbar(\omega_p - n\Delta\Omega)$ , où  $n$  est un entier et  $\Delta\Omega = 2\pi\Delta F$  (mélange à quatre ondes dégénéré). Par la suite, des réactions non-dégénérées du type  $\hbar\omega_\alpha + \hbar\omega_\beta \rightarrow \hbar\omega_\eta + \hbar\omega_\mu$  prennent progressivement le relais. De telles interactions peuvent donc conduire à une cascade de conversions en fréquence, excitant ainsi un large nombre de modes qui sont corrélés en phase (peigne de Kerr). Les composantes de ce peigne peuvent alors être utilisées comme des sous-porteuses dans les systèmes optiques cohérents et basés sur la technologie WDM.

sion de 10 canaux à 5 GHz à travers une fibre multimode. Ils ont mis une emphase particulière sur le potentiel de ces lasers à modes bloqués pour la transmission des données et pour l'accomplissement de tâches auxiliaires dans les réseaux photoniques. Plus récemment, le même groupe de recherche a exploré les possibilités technologiques offertes par la synchronisation de tels lasers [3], notamment par rapport à l'efficacité de la détection homo- ou hétérodyne.

### 2.3. Vision programmatique

Une partie de l'aspect "Systèmes de photonique micro-onde pour les télécommunications optiques" recoupe scientifiquement l'axe de recherche centré sur la génération de micro-ondes ultra-stables pour l'ingénierie aérospatiale. En effet, les peignes de Kerr que nous utiliserons seront exactement les mêmes, ce qui fait que toute la recherche que nous effectuerons analytiquement, numériquement et expérimentalement sur les résonateurs à haut facteur  $Q$ , sur leur couplage optimal, et sur la génération de peignes puissants et stables, seront automatiquement utilisés pour cette application en télécommunications.

Il y a toutefois deux axes principaux qui sont propres à l'application en télécommunications :

la modélisation théorique de la propagation des signaux ; et enfin, transmission dans un réseau métropolitain fibré et évaluation de la performance. Ces deux axes sont détaillés ci-dessous.

### **Modélisation théorique de la propagation des signaux**

Nous souhaitons analyser théoriquement les formats de modulation avancés pour ces peignes de Kerr (porteuse multi-longueur d'ondes). Plusieurs constellations phase/ intensité seront considérées et leur robustesse par rapport au bruit et aux fluctuations induites par la fibre sera étudiée en détail. En particulier, il est essentiel que les sous-porteuses non-modulées puissent constituer des références de phase stables au niveau du récepteur. Nous utiliserons à cet effet des modèles de propagation classiques de type Schrödinger non-linéaire pour prendre en compte tous les paramètres pertinents : bruit, dispersion chromatique et mélange à quatre ondes dans la fibre.

Le but final de ces analyses numériques sera d'évaluer et d'optimiser les performances de cette architecture en fonction du format de modulation, de la vitesse de modulation, et des paramètres physiques du réseau (émetteur, canal de transmission et récepteur).

### **Transmission dans un réseau métropolitain fibré**

L'objectif à terme ici est de démontrer la possibilité d'une transmission à plus de 160 Gb/s dans un réseau de fibre optique métropolitain, en utilisant un format de modulation avancé, avec un taux d'erreur sur les bits inférieur à  $10^{-9}$ . La première étape sera d'abord de définir le schéma de modulation optimal, en configuration dos-à-dos (à l'échelle d'un laboratoire). C'est à ce stade que l'optimisation des modules émetteur/récepteur pourra aussi être étudiée en détail.

Nous souhaitons par la suite utiliser un réseau fibré métropolitain (par exemple, le réseau "Lumière" de la ville de Besançon) pour étudier, en conditions réelles, les effets induits par la propagation des signaux dans la fibre (bruit, dispersion, non-linéarité, etc.). Nous comptons aussi étudier la stabilité à long terme de cette architecture (fonctionnement continu pendant plusieurs jours/semaines), ainsi que sa compatibilité avec les standards et les protocoles existants.

---

**REFERENCES**

1. P. J. Delfyett *et al.*, *IEEE J. of Lightwave Technol.* **24**, 2701 (2006).
  2. M. M. Mielke *et al.*, *IEEE J. on Sel. Areas Comm.* **25**, 120 (2007).
  3. W. Lee *et al.*, *IEEE J. of Lightwave Technol.* **26**, 908 (2008).
-



### 3. Systèmes photoniques non-linéaires pour la théorie de l'information

Les deux sections qui suivent, qui sont moins détaillées que les précédentes en ce qui concerne la description des perspectives et du potentiel scientifique, concernent des programmes de recherche auxquels nous souhaitons vivement contribuer, mais qui ne seront pas sous notre responsabilité directe. L'objectif est donc principalement de présenter et situer succinctement ces axes de recherche, et de décrire les grandes lignes de nos contributions futures dans ces thématiques.

#### 3.1. Communications optiques par chaos

Notre premier doctorat s'intéressait déjà aux interactions entre dynamiques non-linéaires et télécommunications optiques, mais c'est dans le cadre du second que nous avons eu l'opportunité de développer pour la première fois des recherches théoriques directement en parallèle avec des expériences de laboratoire dédiées. Ces expériences constituaient alors une phase de développement exploratoire dans le cadre d'un projet Européen FET (OCCULT – *Optical Chaos Communications Using Laser Transmitters*) : les communications optiques sécurisées par porteuse chaotique. Cette phase exploratoire de l'application a abouti sur un démonstrateur testé sur le terrain [1], et pour lequel nos contributions ont permis d'étudier analytiquement et numériquement des propriétés fondamentales des générateurs de chaos alors développés expérimentalement par le groupe de Besançon-Metz (Breathers chaotiques [2]), ainsi que des propriétés globales du système de communication sécurisé par chaos comme par exemple la sensibilité de la qualité du décodage par rapport aux écarts de paramètres entre émetteur et récepteur [3].

Durant le premier post-doctorat, la thématique s'est poursuivie dans le cadre d'un second projet Européen plus applicatif (PICASSO – *Photonic Integrated Components Applied to Secure chaos encoded Optical communication systems*), auquel nous n'avons participé que marginalement puisque notre activité s'était alors concentrée sur une thématique émergente à Besançon, et en France (projet O<sup>2</sup>E). De nouvelles architectures expérimentales ont alors été développées (générateur de chaos en phase optique au lieu de l'intensité), plus compatibles avec les réseaux de télécommunications optiques, tant en termes de performances (état de l'art établi à 10 Gb/s, démontré pour la première fois sur le réseau "Lumière" de Besançon [4]) qu'en termes de souplesse d'utilisation et de reconfiguration (possibilité d'insertion de composants photoniques dédiés qui augmentent la taille de la clé physique, et donc la sécurité).

Sur la base de ces dernières évolutions d'architectures, nous proposons d'aborder la levée d'un des derniers verrous scientifiques du domaine, celui de la quantification précise du niveau de sécurité. En effet un des derniers résultats qualitatifs sur les communications optiques par chaos a permis de mettre en avant une idée originale de mélange d'entropie entre une source analogique (la dynamique à l'origine du comportement chaotique) et une source numérique (un générateur algorithmique de pseudo-aléa binaire, donc déterministe) [5]. Ce principe original (voir Fig. 15) s'est montré très efficace pour mettre en défaut les principales techniques

---

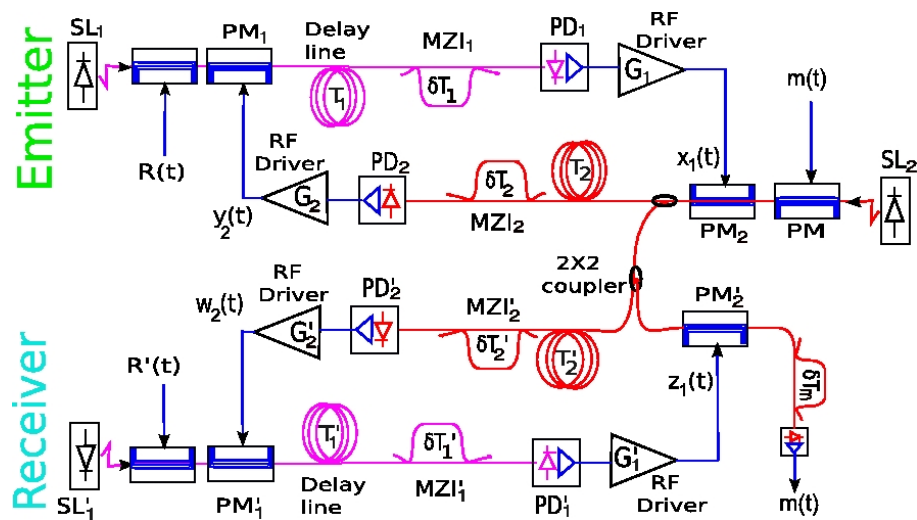


FIGURE 15 – Système hybride émetteur-récepteur de communication sécurisé par chaos réalisant une amplification d'entropie par mélange entre une source de pseudo-aléa numérique ( $R$  et  $R'$ ), et une source analogique réalisée par des processus non-linéaires à retard par modulation différentielle de phase optique.

d'analyse de série temporelle qui permettaient jusqu'à présent d'identifier un paramètre clé des systèmes de communications optiques par chaos, le retard temporel impliqué dans la dynamique non-linéaire à retard.

Il reste à confirmer théoriquement l'efficacité cryptographique de cette nouvelle stratégie de codage. Pour cela nous envisageons d'utiliser différents outils de la théorie de l'information : calcul d'entropie dans différentes architectures expérimentales ; évaluation des informations mutuelles moyenne entre les correspondants légitimes, entre l'émetteur et l'espion, entre le récepteur et l'espion. Compte tenu de la nature particulière du système cryptographique (système hybride analogique et numérique), nous anticipons qu'un nouveau formalisme sera nécessaire, s'appuyant toutefois sur des bases existantes dans la littérature, comme la théorie ergodique du chaos ou la théorie de l'information numérique.

Cet axe de recherche sur le niveau de sécurité de la dernière génération de systèmes de communications optiques par chaos sera aussi probablement intéressant à double titre, non seulement pour la quantification du niveau de sécurité, mais également en ce qui concerne un domaine de recherche très actif actuellement, et qui concerne la génération de nombres aléatoires à très haut débit pour diverses applications, en cryptographie bien sûr, mais aussi en analyse numérique Monte-Carlo, ou encore en théorie des jeux. Le verrou essentiel que nous souhaiterions aborder dans cette direction concerne en fait la génération d'un pseudo-aléa quasi-parfait qui soit capable de passer tous les tests de mesure d'aléa (NIST, Diehard, etc.) comme cela a déjà été obtenu récemment dans la littérature avec des systèmes chaotiques [6,7], ou avec des sources de bruit physique comme sources optique à large spectre dont on mesure des tranches spectrales [8].

Nous souhaitons aussi par contre que cette source d'aléa soit synchronisable, ce qui est une propriété essentielle en cryptographie, mais qui reste encore à ce stade un point dur du domaine. A partir de la connaissance des sources de déterminismes (la dynamique non-linéaire

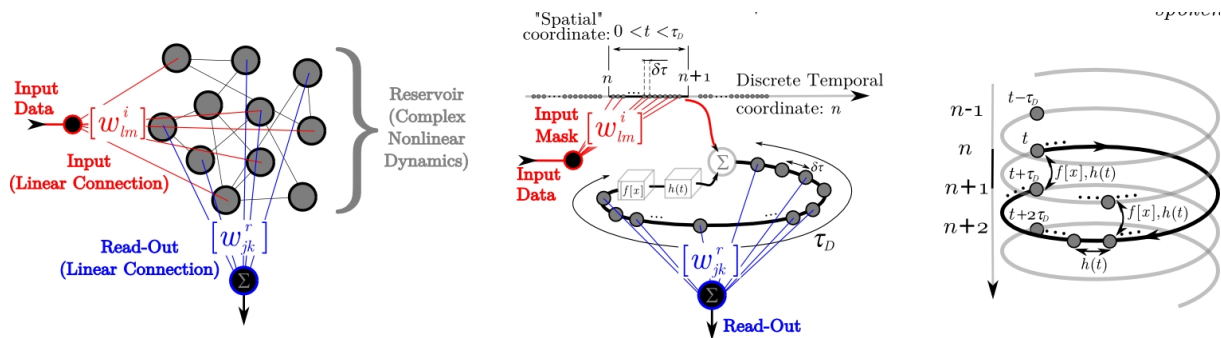


FIGURE 16 – **Gauche** : architecture standard d'un calculateur neuromorphique utilisant les transitoire non linéaire d'une dynamique complexe de type "réseau de neurone". **Milieu** : transposition du principe avec une dynamique à retard. **Droite** : analogie spatio-temporelle d'une dynamique à retard, une spirale représentant un intervalle de temps correspond au retard (avec une dimension spatiale virtuelle correspondant à un temps court), et le passage d'une spirale à la suivante représente le temps discret d'itération d'un retard au suivant.

à retard d'un côté, et l'algorithme de génération de pseudo-aléa binaire à mélanger avec la dynamique analogique de l'autre), nous proposons de développer des techniques de synchronisation / répliation des séquences aléatoires.

### 3.2. Calculateur neuromorphique utilisant des transitoires complexes de dynamique non-linéaire

Ce dernier thème de recherche est extrêmement récent, très prometteur pour les 10 à 20 ans à venir, et se situe au coeur de plusieurs disciplines : les dynamiques non-linéaires, les systèmes complexes, les calculateurs à réseaux de neurone, les sciences cognitives du cerveau, la théorie de l'information, et bien sûr l'optoélectronique et la photonique au travers de la solution expérimentale développée récemment entre autre par FEMTO-ST dans le cadre du projet Européen PHOCUS (2010-2013).

L'objectif est la démonstration expérimentale d'un système physique mettant en oeuvre des principes récents de calculateur analogique découverts indépendamment en 2001 et 2002 par des chercheurs du domaine du calcul à réseaux de neurones [9,10], et de celui des sciences cognitives du cerveau [11]. Le principe générique de cette approche est représenté à la Fig. 16, et le coeur du système, parfois appelé le "réservoir", est en fait un système dynamique complexe dans un état stationnaire stable. Celui-ci est excité par le signal d'entrée correspondant à une formulation dynamique du problème à traiter.

Lors de cette excitation, le système dynamique développe une réponse transitoire, non-linéaire, dans son espace des phases, qui est typiquement interprété comme une expansion de l'information d'entrée dans un espace de plus grande dimension (celui du système dynamique complexe). Si cette expansion est suffisamment efficace, il est possible de lire tous les détails de l'information d'entrée qui se trouvent ainsi "linéairement séparables" dans ce nouvel espace. Cette lecture linéaire s'effectue concrètement par la recherche d'un (ou plusieurs) hyperplan(s)

lors de la phase d'apprentissage, c'est à dire par le calcul des coefficients d'une combinaison linéaire de l'état du système complexe lors du transitoire.

De manière schématique et comparativement au cas des calculateurs à réseaux de neurones récurrents, ce principe propose en fait de considérer le réseau de neurones comme un système dynamique non-linéaire complexe dont les interconnexions sont figées. Contrairement au cas du calcul à réseau de neurones qui essaie d'optimiser les connexions internes du réseau lors d'une phase d'apprentissage, ces nouveaux calculateurs neuromorphiques optimisent la lecture uniquement lors de l'apprentissage en question.

Dans notre cas, c'est en fait la lecture de l'état de ce réseau complexe (suite à son excitation par les données d'entrée correspondant au problème à résoudre) qui est optimisée lors de cette phase d'apprentissage. Une théorie a été établie pour expliquer le fonctionnement de ce nouveau type de calculateur. Elle décrit les propriétés que doit remplir le système dynamique complexe (le réseau de neurone figé) afin de disposer d'une puissance de calcul a priori universelle. Ces propriétés sont typiquement l'évanouissement de la réponse du système dynamique complexe (FP, *fading-memory property*) afin de s'assurer une certaine stationnarité des conditions initiales à la réponse, la sensibilité par rapport au signal d'excitation de la dynamique (SP, *separation property*) afin de pouvoir séparer des stimuli correspondant à des informations différentes, et enfin la propriété d'approximation (AP, *approximation property*) afin d'assurer une certaine robustesse par rapport à des stimuli légèrement différents mais contenant la même information.

Toutes ces propriétés ont déjà été explorées dans les cas classiques de réseaux complexes de noeuds à dynamiques non-linéaires. Jusqu'à présent, cela s'est fait soit sur la base d'une dynamique spatiale discrète avec une non linéarité sigmoïdale comme c'est le cas en calculateurs à réseaux de neurones, soit dans le contexte des sciences du vivant avec des modèles de neurones à temps continu, par exemple de type Hodgkin-Huxley. Cependant, une des originalités conceptuelles proposées dans PHOCUS, concerne justement l'utilisation d'une dynamique complexe particulière, mais qui n'est pas un système dynamique spatio-temporel : c'est une dynamique non-linéaire à retard.

Le champ d'exploration des propriétés fondamentales des dynamiques à retard dans le contexte des calculateurs neuromorphiques est quasiment vierge, et représente des perspectives très intéressantes, surtout en considérant les premiers résultats expérimentaux de PHOCUS qui ont déjà dépassé toutes les attentes [12]. Nous avons déjà commencé des développements théoriques pour précisément démontrer dans quelles conditions les dynamiques à retard peuvent vérifier les trois propriétés de base FP, AP et SP. Il existe aussi de nombreux points à explorer en ce qui concerne le caractère optimal de ces propriétés pour l'efficacité de calcul, leur lien avec les paramètres caractéristiques de la dynamique, et les conditions de mise en forme de l'information à injecter dans le système à retard par rapport à ses paramètres dynamiques.

---

---

**REFERENCES**

1. A. Argyris *et al.*, *Nature* **438**, 343 (2005).
  2. Y. Chembo Kouomou *et al.*, *Phys.Rev. Lett.* **95**, 043903 (2005).
  3. Y. Chembo Kouomou *et al.*, *Phys. Rev. E* **69**, 056226 (2004).
  4. R. Lavrov *et al.*, *IEEE J. Quant. Electron.* **46**, 1430 (2010).
  5. R. M. Nguimdo *et al.*, *Phys.Rev. Lett.* **107**, 34103 (2011).
  6. A. Uchida *et al.*, *Nat. Photon.* **2**, 728 (2008).
  7. I. Reidler *et al.*, *Phys.Rev. Lett.* **103**, 024102 (2009).
  8. C. Williams *et al.*, *Opt. Express* **18**, 23584 (2010).
  9. H. Jaeger, *Tech. Rep. GMD* **148**, (2001).
  10. H. Jaeger and H. Haas, *Science* **304**, 78 (2004).
  11. W. Maass, T. Natschläger, H. Markram, *Neur. Comput.* **14**, 2531 (2002).
  12. L. Appeltant *et al.*, *Nat. Commun.* **2**, 1 (2011).
-

## 4. Défis scientifiques et technologiques : impact global du programme de recherche

Nous anticipons dans cette section sur les défis majeurs auxquels nous serons confrontés par rapport aux deux axes centraux de notre programme de recherche, à savoir l'utilisation de résonateurs à mode de galerie pour les systèmes aérospatiaux et de télécommunications.

### 4.1. Défis scientifiques et technologiques

L'obtention à partir de cavités monolithiques de peignes de haute qualité, et la compréhension de leur comportement dynamique, sont par essence des sujets difficiles, qui ne sont pour l'instant étudiés que par un nombre très restreint de groupes de recherche dans le monde. L'étude théorique et expérimentale de ces systèmes est en fait à l'intersection de plusieurs disciplines : l'optoélectronique, la physique de la matière condensée, la dynamique non-linéaire, le calcul stochastique, la physique quantique, la cristallographie et la complexité algorithmique pour n'en citer que quelques unes.

Ce large spectre de disciplines implique donc qu'une triple approche analytique, numérique et expérimentale soit concrètement mise en place pour mener à bien ce programme de recherche.

D'un point de vue purement théorique, les modèles existants se basent pratiquement tous sur les solutions obtenues à partir de cavités sphériques, puisque ce sont les seules pour lesquelles des solutions analytiques sont disponibles. Cependant, les disques fabriqués expérimentalement ne respectent pratiquement jamais cette symétrie sphérique, et par conséquent supportent des modes propres qui peuvent dévier significativement par rapport aux solutions analytiques de la cavité sphérique. Il nous semble indispensable de s'investir dans la recherche de méthodes permettant de mieux comprendre la répartition spatiale de ces modes, sans quoi une optimisation objective des interactions non-linéaires entre ces modes restera inévitablement floue.

Une autre difficulté théorique est que la quasi-totalité des études sur les peignes part du postulat que les modes de cavité "froids" (ceux qu'on trouve en considérant qu'il n'y a aucun champ dans la cavité) sont de bonnes approximations des modes de cavité "chauds" (ceux qui correspondent à la cavité pompée par le laser). Ce problème est très ancien et est récurrent en physique des lasers : l'approximation des modes de cavité froids perd rapidement de sa validité lorsque le champ confiné modifie localement l'indice de réfraction de manière significative (effet de lentille Kerr). Ce changement local de l'indice de réfraction induit un changement de la répartition spatiale des modes, et par conséquent affecte le coefficient de couplage intermodal ; de plus, il induit un décalage des fréquences propres qu'il est bien entendu crucial de déterminer précisément pour les applications métrologiques.

L'effet de lentille thermique est un effet assez proche de l'effet de lentille Kerr, sauf qu'ici le changement localisé de l'indice de réfraction est induit par le réchauffement différencié de la cavité dans l'espace torique où les photons sont confinés. Cet effet est notoirement com-

plexe à étudier, et il est malgré tout d'une importance critique dans le cadre des applications envisagées.

Dans la perspective des peignes s'étendant sur plus d'une octave, plusieurs effets physiques nouveaux entrent en jeu : absorption non-uniforme, dispersion matérielle fortement variable, dispersion géométrique complexe, etc. L'obtention de tels peignes nécessite de pomper très fortement la cavité (probablement au-delà du watt), ce qui exacerbera inévitablement les effets de lentille discutés précédemment.

L'excitation non-linéaire de la cavité à modes de galerie est un phénomène complexe qui implique à la fois les paramètres du laser de pompe (intensité, polarisation, longueur d'onde, etc.) et ceux de la cavité (indice de réfraction, dispersion chromatique, non-linéarités, modes propres, etc.).

Le problème déterministe est déjà en soi difficile à appréhender, et bien sûr son équivalent stochastique l'est encore plus. Ces effets stochastiques trouvent leur origine dans les diverses fluctuations qui sont inévitablement présentes dans le système, que ce soit au niveau du laser de pompe, ou au niveau des fluctuations thermiques de la cavité. Ces sources de bruit déterminent univoquement la dégradation de la corrélation en phase entre les diverses composantes spectrales du peigne, ce qui a un impact automatiquement négatif sur les applications que nous visons. La compréhension des diverses interactions mettant en jeu ces sources de bruit reste un problème essentiellement ouvert.

Du point de vue numérique, la simulation de la dynamique des peignes de fréquence optique exige de grandes capacités de calcul. Les propriétés physiques des cavités monolithiques qui les génèrent ont des échelles spatio-temporelles si éclatées que sans une puissance de calcul conséquente, les simulations numériques deviennent déraisonnablement longues. Des alternatives telles que le calcul parallèle (codes en MPI par exemple) et les super-ordinateurs doivent être considérées.

Des algorithmes en éléments finis peuvent aussi être utiles pour étudier les effets de volume. Par exemple, il est extrêmement important de comprendre comment la chaleur se diffuse dans la cavité, au vu des gradients thermiques conséquents qu'elle subit entre les zones où le champ est confiné et le reste de la cavité. De même, pour les applications aérospatiales, se pose le problème élastostatique de la déformation de cette cavité (et donc, du changement de ses fréquences propres) lorsqu'elle est soumise à des accélérations et à des vibrations.

Enfin, du point de vue expérimental, le défi est triple : fabriquer des cavités avec des facteurs de qualité ultra-élevés, optimiser le couplage pour obtenir des peignes puissants et stables, et enfin garantir la pureté spectrale et la cohérence des signaux (optique ou micro-onde) générés pour les applications visées. Le but ultime reste toutefois l'intégration totale de ces systèmes (cavité et système de couplage) sur une puce ou sur un substrat monolithique.

---

## 4.2. Impact global du programme de recherche

Le fait que ce programme de recherche soit à l'intersection d'autant de disciplines scientifiques et technologiques est un indicateur fort de l'impact qu'il pourrait avoir dans plusieurs domaines.

Au-delà de la génération de peignes de fréquences optiques, nos activités de recherche ouvriront de nouveaux horizons pour d'autres applications des résonateurs à modes de galerie, comme par exemple les lasers dopés aux terres rares, les lasers Raman et les lasers Brillouin. Le fort confinement et la longue durée de vie dans les modes propres toriques de la cavité offrent une excellente opportunité d'effectuer des recherches sur plusieurs problèmes fondamentaux en physique, notamment dans le cadre des phénomènes non-linéaires dans les cavités et guides d'ondes pour la photonique sur silice/silicium, ou pour étudier certains phénomènes d'électrodynamique quantique. Il est aussi utile de mentionner que dans le cadre même de la génération de micro-ondes ultra-pures, les enjeux touchent au coeur même de la physique. Par exemple, de telles micro-ondes peuvent être utilisées pour tester l'invariance de Lorentz, ou pour détecter des ondes gravitationnelles.

En ce qui concerne les télécommunications optiques, le retour en force des architectures cohérentes est justifié par une réalité simple : la plupart des systèmes déployés (et basés sur la modulation d'amplitude) atteignent un plafond en terme de performance comparativement au coût. Il y a actuellement un grand besoin pour des architectures simples, robustes et fiables, capables de véhiculer des signaux codés avec des formats de modulation avancés en WDM, et au-delà de 10 Gb/s par canal. Les principaux bénéficiaires de ces avancées seraient, nous l'avons dit, les systèmes FTTH.

Une deuxième motivation derrière cet axe de recherche est que nous souhaitons apporter notre contribution à l'un des plus grands défis de l'optique moderne, à savoir la photonique sur silicium/silice. Ce concept est basé sur la nécessité de contourner les technologies des semiconducteurs III-V, et de fabriquer des routeurs, processeurs et circuits photoniques ultra-rapides, qui soient conceptuellement simples et à coût réduit. Les leaders dans le monde des technologies de l'information comme IBM et Intel sont particulièrement actifs dans cette thématique, et ont déjà annoncé des résultats révolutionnaires dans ce domaine, par exemple dans le contexte du transfert des données intra-puce.

Il est intéressant de noter que les systèmes de télécommunications sont aussi demandeurs par rapport aux micro-ondes ultra-pures. En effet, les réseaux de télécommunication à fort débit ont besoin d'horloges rapides et stables, d'oscillateurs locaux pour la synchronisation des réseaux, et de porteuses ultra-stables pour la synthèse des horloges ultra-rapides cadencant les données à transmettre.

D'un point de vue plus large, notre démarche s'inscrit dans la tendance actuelle des composants tout-optiques qui permettent un traitement quasi-instantané des signaux, car affranchis de la nécessité de manipuler des électrons massifs (et donc, lents). Ce concept de composants photoniques compacts où des photons contrôlent des photons *via* un milieu non-linéaire permet d'éviter le goulot d'étranglement créé par la lenteur des composants optoélectroniques, qui ne parviennent pas à traiter en temps réel les signaux provenant des canaux de transmission optiques dont la bande passante est démesurément grande.

---



Ainsi donc, au-delà des applications spécifiques que nous visons en ingénierie aérospatiale et en télécommunications, les peignes de fréquences optiques générés avec les résonateurs à modes de galerie représentent un enjeu considérable en photonique micro-onde, ce qui justifie notre intérêt et celui de plusieurs centres de recherche parmi les plus renommés dans le monde scientifique.

---



## VI. Activités d'animation de la recherche

L'essentiel des activités de recherche que nous avons développées au Département d'Optique de l'Institut FEMTO-ST est effectué dans le cadre de la photonique micro-onde, des télécommunications optiques, et enfin du calcul optoélectronique basé sur le principe des machines à état liquide.

### Projets de recherche depuis la fin des études doctorales

- **2011** : Candidature pour un "ERC Starting Grant".  
Titre du Projet : NEXTPHASE (*NEXT generation of microwave PHotonics systems for AeroSpace Engineering*).  
Projet sélectionné par l'ERC en 2011.  
Budget : 1.4M€ sur 5 ans.
  - **2011** : Candidature pour un financement "ANR Jeune Chercheur".  
Titre du projet : INPHOCITY (*Intrinsically Nonlinear PHOtonic Components for Information Technology*)  
Projet sélectionné par l'ANR en 2011 [décliné en faveur du financement ERC].  
Budget : 177k€ sur 3 ans.
  - **2011 – 2015** : Porteur pour FEMTO-ST du projet CNES "SHYRO" (Sources HYperfréquences à haute pureté spectrale à base de Résonateurs Optiques : phase de démonstration de la performance).  
Budget : 175k€ sur 4 ans [incluant un co-financement de bourse doctorale CNES/Région de Franche-Comté].
  - **2011 – 2013** : Participation au projet ANR "ORA" (*Optical Resonators and their Applications*).
  - **2011 – 2013** : Participation au projet européen PHOCUS ("towards a PHOtonic liquid state machine based on delay-CoUpled Systems").
  - **2007 – 2009** : Participation au projet ANR O<sup>2</sup>E (Oscillateurs OptoElectroniques).
  - **2007 – 2009** : Participation au projet CNES "Sources hyperfréquences à très haute pureté spectrale à base de résonateurs optiques : phase de développement"
-

- **2007 – 2009** : Participation au projet européen PICASSO (Photonic Integrated Components Applied to Secure chaos encoded Optical communication systems).

## **Collaborations internationales**

- **2010** – Collaboration en cours avec le NASA *Jet Propulsion Laboratory*, USA (depuis la fin du post-doctorat, 1 acte de colloque conjoint, et visite de 10 semaines au JPL en 2011).
- **2007** – Collaboration en cours avec l'IFISC de Palma de Majorque, Espagne (depuis la fin de la thèse, 3 publications conjointes).

## **Organisation de colloques**

- **2011** : Membre du comité d'organisation de la conférence internationale "SPIE Photonics West 2012", San Francisco, USA.
- **2008** : Co-organisation avec les Profs. Larger et Dudley d'une journée internationale sur les dynamiques non-linéaires à Besançon.

## **Instances de recherches nationales**

- **2011** : Inscription et participation au GDR ONDES
  - **2010** : Inscription et participation au GDR DYCOEC
-

## VII. Activités d'encadrement

### Co-direction de thèses

- **2007** – : Avec L. Larger, thèse de A. Hmima  
Sujet : *Dynamique non-linéaire dans les oscillateurs optoélectroniques micro-ondes.*  
Université de Franche-Comté.
- **2010** – : Avec L. Larger et M. Jacquot, thèse de R. Martinenghi  
Sujet : *Systèmes optoélectroniques à retard pour les calculateurs de type machine à état liquide.*  
Université de Franche-Comté.

### Participation à l'encadrement de thèses

- **2007 – 2010** : Avec L. Larger et J. Dudley, thèse de H. Tavernier.  
Sujet : *Fabrication et caractérisation de résonateurs optiques et applications aux oscillateurs optoélectroniques.*  
Université de Franche-Comté. Thèse défendue en Mars 2011.
- **2007 – 2010** : Avec L. Larger, thèse de M. Nourine.  
Sujet : *Etude des communications optiques sécurisées par chaos intégrant une clé physique via un composant électro-optique dédié.*  
Université de Franche-Comté. Thèse défendue en Septembre 2010.
- **2007 – 2009** : Avec L. Larger et E. Rubiola, thèse de K. Volyanskiy.  
Sujet : *Etude spectrales de bruit de phase dans les oscillateurs optoélectroniques micro-ondes à retard.*  
Université de Franche-Comté. Thèse défendue en Mars 2009.

### Co-direction de mémoires

- **2011** : Avec L. Larger et M. Jacquot, Mémoire de Master 2 de R. Henriët.  
Sujet : *Fabrication de résonateurs optiques millimétriques.*  
Université de Franche-Comté. Mémoire défendu en Juillet 2011.
-

### **Autres co-encadrements d'étudiants**

- **2011** : Avec L. Larger, Stage d'Ingénieur d'Etude de I. Balakireva.  
Sujet : *Applications des résonateurs optiques millimétriques.*  
Université de Franche-Comté.
-

## VIII. Activités d'intérêt collectif

### Vulgarisation scientifique

- **2010** : Participation à l'animation de la "Nuit des chercheurs" en Septembre. Evènement de vulgarisation sur le monde de la recherche scientifique auprès du public de la ville de Besançon. Organisé par l'Université de Franche-Comté.

### Enseignement (Université de Franche-Comté)

- **2010** : Physique des phénomènes non-linéaires [6h]. Travaux pratiques de Master 1.
- **2010** : Méthodes numériques avancées [12h]. Travaux pratiques de Master 1.
- **2008** : Méthodes numériques avancées [12h]. Travaux pratiques de Master 1.

### Activités de relecteur pour les agences de recherche

- Agence Nationale pour le Recherche (ANR).

### Relecteur pour les revues scientifiques internationales

- Physical Review Letters (APS)
  - Physical Review A (APS)
  - Physical Review B (APS)
  - Physical Review E (APS)
  - Optics Letters (OSA)
  - Optics Express (OSA)
-

- Applied Optics (OSA)
  - Journal of the Optical Society of America B (OSA)
  - Journal of Lightwave Technology (OSA/IEEE)
  - Journal of Quantum Electronics (IEEE)
  - Journal of Photonics (IEEE)
  - Applied Physics B - Lasers and Optics (Springer)
  - Optics Communications (Elsevier)
  - Journal of Communications (Academy Publisher)
  - International Journal of Bifurcation and Chaos (World Scientific)
-



---

## IX. Liste des publications

### Liste des publications dans les revues internationales à comité de lecture

1. **Wideband chaos generation using a delayed oscillator and a two-dimensional non-linearity induced by a quadrature phase-shift keying electro-optic modulator**, M. Nourine, Yanne K. Chembo and L. Larger *Opt. Lett.* **36**, 2833 (2011).
  2. **Magnesium Fluoride Whispering Gallery Mode Disk-Resonators for Microwave Photonics Applications**, H. Tavernier, P. Salzenstein, K. Volyanskiy, Yanne K. Chembo and L. Larger, *IEEE Phot. Tech. Lett.* **22**, 1629 (2010).
  3. **Compact Optoelectronic Microwave Oscillators using Ultra-High Q Whispering Gallery Mode Disk-Resonators and Phase Modulation**, K. Volyanskiy, P. Salzenstein, H. Tavernier, M. Pogurmirskiy, Yanne K. Chembo and L. Larger, *Opt. Express* **18**, 22358 (2010).
  4. **Contribution of Laser Frequency and Power Fluctuations to the Microwave Phase Noise of Optoelectronic Oscillators**, K. Volyanskiy, Yanne K. Chembo, L. Larger and E. Rubiola, *IEEE J. of Lightwave Technol.* **28**, 2730 (2010).
  5. **Effect of Fiber Propagation on Chaos Communications using Optoelectronic Delay Systems with Nonlocal Nonlinearity**, R. M. Nguimdo, R. Lavrov, P. Colet, M. Jacquot, Yanne K. Chembo and L. Larger, *IEEE J. of Lightwave Technol.* **28**, 2688 (2010).
  6. **On the generation of octave-spanning optical frequency combs using monolithic whispering gallery mode micro-resonators**, Y. K. Chembo and N. Yu, *Opt. Lett.* **35**, 2696 (2010).
  7. **Modal Expansion Approach to Optical Frequency Combs Generation with Monolithic Whispering Gallery Mode Resonators**, Y. K. Chembo and N. Yu, *Phys. Rev. A* **82**, 033801 (2010).
  8. **Spectrum and dynamics of optical frequency combs generated with whispering gallery mode resonators**, Y. K. Chembo, D. V. Strekalov and N. Yu, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 103902 (2010).
  9. **Generation of ultralow jitter optical pulses using optoelectronic oscillators with time-lens soliton-assisted compression**, Y. Kouomou Chembo, A. Hmima, P.-A. Lacourt, L. Larger, and J. M. Dudley, *IEEE J. of Lightwave Technol.* **27**, 5160 (2009).
-

10. **Determination of phase noise spectra in optoelectronic microwave oscillators : a Langevin approach**, Y. Kouomou Chembo, K. Volyanskiy, L. Larger, E. Rubiola and P. Colet, *IEEE J. of Quantum Electron.* **45**, 178 (2009).
  11. **Controlling the emission properties of multimode vertical-cavity surface-emitting lasers via polarization- and frequency-selective feedback**, Y. Kouomou Chembo, S. K. Mandre, I. Fischer, W. Elsaesser and P. Colet, *Phys. Rev. A* **79**, 013817 (2009).
  12. **Routes to chaos and multiple time-scale dynamics in broadband bandpass nonlinear delay electro-optic oscillators**, M. Peil, M. Jacquot, Y. K. Chembo, L. Larger and T. Erneux, *Phys. Rev. E* **79**, 026208 (2009).
  13. **Nonlinear dynamics and spectral stability of optoelectronic oscillators**, Y. K. Chembo, L. Larger and P. Colet, *IEEE J. of Quantum Electron.* **44**, 858 (2008).
  14. **Effect of gain and bandwidth on the multimode dynamics of optoelectronic microwave oscillators**, Y. K. Chembo, L. Larger, R. Bendoula and P. Colet, *Opt. Express* **16**, 9067 (2008).
  15. **Optoelectronic delay dynamics : from optical chaos communications to high purity microwave oscillators** [Invited article], M. Jacquot, Yanne Chembo and L. Larger, *Ann. Phys. – France* **32**, 39 (2007).
  16. **Dynamic instabilities of microwaves generated with optoelectronic oscillators**, Y. K. Chembo, L. Larger, H. Tavernier, R. Bendoula, E. Rubiola and P. Colet, *Opt. Lett.* **32**, 2571 (2007).
  17. **Chaotic breathers in delayed electro-optical systems**, Y. Chembo Kouomou, P. Colet, L. Larger and N. Gastaud, *Phys. Rev. Lett.* **95**, 203903 (2005).
  18. **Mismatch-induced bit error-rate in optical chaos communications using semiconductor lasers with electro-optical feedback**, Y. Chembo Kouomou, P. Colet, L. Larger and N. Gastaud, *IEEE J. of Quantum Electron.* **41**, 156 (2005).
  19. **Effect of parameter mismatch on the synchronization of semiconductor lasers with electro-optical feedback**, Y. Chembo Kouomou, P. Colet, N. Gastaud and L. Larger, *Phys. Rev. E* **69**, 056226 (2004).
  20. **Triple resonant states and chaos control in an electrostatic transducer with two outputs**, Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *J. of Sound and Vib.* **270**, 75 (2004).
  21. **Cluster synchronization in coupled chaotic semiconductor lasers and application to switching in chaos-secured communication networks**, Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Opt. Comm.* **223**, 283 (2003).
  22. **Transitions from spatiotemporal chaos to cluster and complete synchronization states in a shift-invariant set of nonlinear coupled oscillators**, Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Phys. Rev. E* **67**, 046205 (2003).
  23. **Stability analysis for the synchronization of semiconductor lasers with ultra-high frequency current modulation**, Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Phys. Lett. A* **308**, 381 (2003).
-

24. **Optimization and stability boundaries for the synchronization of semiconductor lasers with external optical feedback** , Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Phys. Rev. E* **67**, 026214 (2003).
25. **Generalized correlated states in a ring of coupled nonlinear oscillators with a local injection** , Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Phys. Rev. E* **66**, 066201 (2002).
26. **Stability and optimal parameters for continuous feedback chaos control** , Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Phys. Rev. E* **66**, 036205 (2002).
27. **Stability and optimization of chaos synchronization through feedback coupling with delay** , Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Phys. Lett. A* **298**, 18 (2002).
28. **Stability and chaos control in electrostatic transducers** , Y. Chembo Kouomou and P. Woafu, *Phys. Scr.* **62**, 255 (2000).

### Liste des comptes-rendus de colloques (avec sélection de résumé)

1. **Resonance measurements techniques of optical whispering gallery mode mini-disc resonators for microwave photonics applications**, P. Salzenstein, M. Jelínek, Y. K. Chembo, M. Pogurmiskiy, H. Tavernier, K. Volyanskiy, K.-P. Huy, M. Chauvet, L. Larger, and V. Kubecek, *Proc. SPIE* **8071**, 807104 (2011).
  2. **Optoelectronic phase noise system designed for microwaves photonics sources measurements in metrology application**, P. Salzenstein, N. Cholley, M. Zarubin, E. Pavlyuchenko, A. Hmima, Y. K. Chembo, and L. Larger, *Proc. SPIE* **8071**, 807111 (2011).
  3. **Challenges in octave-spanning and short free-spectral-range optical frequency comb generation using monolithic whispering gallery mode resonators** [Invited talk], Yanne K. Chembo and N. Yu, *Proc. SPIE Vol. 7913*, to appear (2011).
  4. **Compact optoelectronic oscillator using whispering gallery mode resonators for radio-frequency and millimeter wave generation**, K. Volyanskiy, P. Salzenstein, H. Tavernier, M. Pogurmiskiy, Yanne K. Chembo and L. Larger, *Proc. SPIE Vol. 7936*, to appear (2011).
  5. **Génération de Micro-ondes Ultra-pures et de Pulses Optiques à Gigue Ultra-faible en Utilisant les Oscillateurs Optoélectroniques**, Y. Chembo, K. Volyanskiy, A. Hmima, H. Tavernier, P. Salzenstein, P.-A. Lacourt, E. Rubiola, J. Dudley et L. Larger, *Proc. "Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG)*, 38 (2010).
  6. **Effets de dispersion sur un signal chaotique en phase généré par un dispositif electro-optique à retard**, R.M. Nguimdo, R. Lavrov, P. Colet, M. Jacquot, Y. Chembo et L. Larger, *Proc. "Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG)*, 44 (2010).
  7. **Parameter optimization for octave-spanning optical frequency comb generation in whispering-gallery mode resonators**, Yanne K. Chembo and N. Yu, *Proc. of the 2010 IEEE IFCS Conference*, 689 (2010).
-

8. **Générateur de chaos optoélectronique à double retard pour les télécommunications optiques sécurisées à haut débit**, M. Nourine, L. Larger, Y. Chembo, K. Volyanskiy and M. Peil, *13th Nonlinear encounters, Institut Poincaré (Paris)*, 127 (2010).
  9. **Modelling of optical frequency comb generation in whispering gallery mode resonators and limiting effects**, Yanne K. Chembo and N. Yu, *Proc. SPIE Vol. 7582*, 758209 (2010).
  10. **Echelles de temps multiples dans les équations intégro-différentielles à retard en optoélectronique**, L. Larger, M. Peil, M. Jacquot, Y. Chembo and T. Erneux *11th Nonlinear encounters, Institut Poincaré (Paris)*, 109 (2008).
  11. **Bifurcation d'enveloppe d'un oscillateur optoélectronique micro-onde à retard, à haute pureté spectrale**, L. Larger, Y. K. Chembo, H. Tavernier, R. Bendoula, P. Colet and E. Rubiola, *10th Nonlinear encounters, Institut Poincaré (Paris)*, 85 (2007).
  12. **Fast scale hyperchaos on top of slow scale periodicity in delayed dynamical systems**, Y. Chembo Kouomou, P. Colet, L. Larger and N. Gastaud, *1st IFAC conference on analysis and control of chaotic systems*, 375 (2006).
  13. **Effect of chaotic noise on the performance of optical chaos cryptosystems**, Y. Chembo Kouomou, P. Colet, L. Larger and N. Gastaud, *Proc. SPIE Vol. 5847 : Noise in communication systems*, 10 (2005).
  14. **Hyperchaotic Breathers in Semiconductor Lasers with Delayed Electro-Optical Feedback**, Y. Chembo Kouomou, P. Colet, L. Larger and N. Gastaud, *Quantum Electronics and Laser Science Conference (QELS)*, 1005 (2005).
-

## X. Liste des communications

### Conférence sur invitation personnelle

- **2011** : San Francisco, USA [oral]  
**Challenges in octave-spanning and short free-spectral-range optical frequency comb generation using monolithic whispering gallery mode resonators**  
*SPIE conference on Laser Resonators and Beam Control XIII (Photonics West 2011)*

### Communications à des colloques internationaux avec sélection de résumés

- **2011** : San Francisco, USA [oral]  
**Compact optoelectronic oscillator using whispering gallery mode resonators for radio-frequency and millimeter wave generation**  
*SPIE conference on RF and Millimeter-Wave Photonics (Photonics West 2011).*
  - **2010** : San Francisco, USA [oral]  
**Modelling of optical frequency comb generation in whispering gallery mode resonators and limiting effects**  
*SPIE conference on nonlinear frequency generation and conversion : materials, devices, and applications (Photonics West 2010).*
  - **2010** : Lille, FRANCE [poster]  
**Experimental evidence of microwave envelope chaos using an integro-differential optoelectronic system**  
*The 11th Experimental chaos and Complexity Conference .*
  - **2009** : Besançon, FRANCE [oral]  
**A time-domain stochastic theory for phase noise in optoelectronic microwave oscillators**  
*European Frequency and Time Forum – International Frequency Control Symposium (EFTF-IFCS).*
  - **2005** : Austin-Texas, USA [oral]  
**Effect of Chaotic Noise on the Performance of Optical Chaos Cryptosystems**  
*The 3rd SPIE Conference on Noise and Fluctuations.*
-

- **2004** : Florence, ITALY [poster]  
**Coexistence of fast-scale hyperchaos and slow-scale periodicity in delayed optical systems**  
*The 8th Experimental Chaos Conference.*
- **2002** : Trieste, ITALIE [oral]  
**Analytical study of the transitions from spatiotemporal chaos to cluster and complete synchronization states in a shift-invariant set of nonlinear coupled oscillators**  
*School and Conference on Spatiotemporal Chaos at the Abdus Salam International Centre of Theoretical Physics (ICTP).*
- **2001** : Cotonou, BENIN [oral]  
**Synchronization of chaotic systems and application to secure communications**  
*The 4th Edouard Bouchet Abdus Salam Institute (EBASI) International Conference on Physics and High Technology.*

## Communications à des colloques nationaux avec sélection de résumés

- **2010** : Besançon, FRANCE [poster]  
**Sur la génération de micro-ondes ultra-pures et de pulses optiques à gigue ultra-faible en utilisant les oscillateurs optoélectroniques**  
*Journées Nationales d'Optique Guidée (JNOG).*

## Conférences et colloques scientifiques

- **2011** : Peyresq, FRANCE [oral]  
**Régimes dynamiques du circuit de Chua**  
*Peyresq Summer School on Nonlinear Dynamics.*
- **2010** : Besançon, FRANCE [oral]  
**Phase noise modeling of microwave optoelectronic oscillators with very long time delays**  
*Franco-Russian (CNRS-RFBR) seminar on nonlinear dynamics and applications.*
- **2010** : Besançon, FRANCE [oral]  
**A technological application of time-delayed systems : Ultra-pure microwave generation using optoelectronic oscillators**  
*DYCOEC (DYnamique et COntrôle des Ensembles Complexes) Meeting.*
- **2010** : Buea, CAMEROUN [oral]  
**Nonlinear Dynamics and Chaos in a Time-Delayed Electro-Optic Feedback System**  
*Hands-on Research on Complex Systems Advanced Study Institute.*

- **2009** : Pasadena, USA [poster]  
**Generation of optical frequency combs using whispering gallery mode resonators**  
*NASA/JPL Postdoc Day.*
- **2008** : Besançon, FRANCE [oral]  
**Approche dynamique non-linéaire des oscillateurs optoélectroniques micro-ondes à haute pureté spectrale**  
*Nonlinear dynamics and applications conference.*
- **2008** : Peyresq, FRANCE [oral]  
**Ultra-stable microwave oscillators with high spectral purity**  
*Peyresq Summer School on Nonlinear Dynamics.*
- **2007** : Punta del Este, URUGUAY [oral]  
**Stability properties of a pure microwave oscillation in a narrow-band electrooptic delay oscillator**  
*3rd "Rio de la Plata" Workshop on Noise, Chaos and Complexity in Lasers and Nonlinear Optics.*
- **2006** : Granada, ESPAGNE [poster]  
**A stochastic model for optoelectronic radar-frequency generators**  
*Statistical Physics Conference (Fises).*
- **2004** : Palma de Mallorca, ESPAGNE [oral]  
**Simultaneous fast-scale hyperchaos and slow-scale periodicity in delayed optical systems**  
*Dynamics Days.*
- **2004** : Porto, PORTUGAL [oral]  
**Optical chaos cryptography using in semiconductor lasers with electro-optical feedback**  
*School and Workshop on Dynamical Systems and Applications.*
- **2003** : Berlin, ALLEMAGNE [oral]  
**Influence of parameter mismatch on the performance of an electro-optical hyperchaotic communication scheme**  
*Weierstrass Institute for Applied Analysis and Stochastics (WIAS) workshop on "Dynamics of semiconductor lasers".*
- **2003** : Palma de Mallorca, ESPAGNE [oral]  
**On the mismatch-induced degradation of synchronization in hyperchaotic electro-optical systems.**  
*Dynamics Days.*

## Présentations orales durant les visites et séjours académiques

- **2011 – NASA Jet propulsion Laboratory, Pasadena-CA, USA**  
*Kerr optical frequency combs and applications in aerospace engineering*
-

- **2011 – University of Maryland, College Park-MD, USA**  
*Nonlinear dynamics of laser light in ultra-high  $Q$  whispering gallery mode resonators*
  - **2011 – Army Research Laboratory, Adelphi-MD, USA**  
*Optoelectronic microwave oscillators : architectures, stability and performances*
  - **2011 – ENSSAT, Lannion, FRANCE**  
*Modal expansion formalism for optical frequency comb generation in WGM resonators*
  - **2009 – NASA Jet propulsion Laboratory, Pasadena-CA, USA**  
*Spectral stability and phase noise performance of optoelectronic oscillators*
  - **2009 – University of Maryland, College Park-MD, USA**  
*Using optoelectronic oscillators for the generation of ultra-pure microwaves and optical pulses*
  - **2008 – New England Complex Systems Institute (NECSI), Cambridge-MA, USA**  
*Memory effects of time-delay in complex systems*
  - **2006 – Centre National d'Etudes Spatiales (CNES), Toulouse, FRANCE**  
*A model for single-mode optoelectronic oscillators*
  - **2004 – Technical University of Darmstadt (DTU), Darmstadt, GERMANY**  
*Simultaneous fast-scale hyperchaos and slow-scale periodicity in delayed optical systems*
-



## XI. Conclusion générale

Les systèmes de photonique micro-onde ont indubitablement un avenir prometteur en ingénierie aérospatiale et en télécommunications. Nos travaux dans ce domaine, qui se sont principalement concentrés sur les générateurs de micro-ondes ultra-pures et de peignes de fréquences optiques, avaient pour but principal de permettre une meilleure compréhension de leurs caractéristiques et performances, afin de faciliter leur intégration dans les architectures standards.

Le fait que ces systèmes de photonique micro-onde soient à l'intersection de plusieurs domaines scientifiques fondamentaux et appliqués est un indicateur de leur très fort potentiel pour un large spectre de disciplines. Nos résultats permettent ainsi d'entrevoir de grandes possibilités pour l'approfondissement des connaissances, autant du point de vue fondamental (physique de la matière condensée, interaction lumière-matière, électrodynamique quantique en cavité, dynamiques non-linéaires et stochastiques, etc.) et qu'applicatif (génération de micro-ondes ultra-pures, lasers Raman/Brillouin, sources cohérentes multi-longueurs d'onde, etc.). Ces axes de recherche ont fait l'objet de projets qui ont été évalués favorablement par l'ANR (Agence Nationale pour la Recherche) et l'ERC (*European Research Council*).

Au niveau académique, les années de recherche qui ont suivi la thèse nous ont permis de coécrire 13 articles dans des revues internationales à comité de lecture, ainsi que 11 actes de colloques avec sélection de résumés. Nous avons aussi contribué à l'animation scientifique de la communauté internationale, à travers les activités de relecteur pour 13 revues internationales à comité de lecture, la participation à 6 projets de recherche nationaux et internationaux, ainsi qu'à travers la participation à l'organisation de deux conférences scientifiques. Les activités d'enseignement se sont concentrées sur des cours de physique des phénomènes non-linéaires et de méthodes numériques avancées, dispensées au niveau Master à l'Université de Franche-Comté. Nous avons aussi participé à l'encadrement d'étudiants en thèse dans cette même université (3 thèses défendues, et 2 en cours).

Nous comptons approfondir, valoriser et diversifier toutes ces activités scientifiques et académiques durant les années à venir.

---



---

# Annexe : Articles publiés après les thèses

## Revue internationale à comité de lecture

1. **Wideband chaos generation using a delayed oscillator and a two-dimensional nonlinearity induced by a quadrature phase-shift keying electro-optic modulator**, M. Nourine, Yanne K. Chembo and L. Larger, *Opt. Lett.* **36**, 2833 (2011).
  2. **Magnesium Fluoride Whispering Gallery Mode Disk-Resonators for Microwave Photonics Applications**, H. Tavernier, P. Salzenstein, K. Volyanskiy, Yanne K. Chembo and L. Larger, *IEEE Phot. Tech. Lett.* **22**, 1629 (2010).
  3. **Compact Optoelectronic Microwave Oscillators using Ultra-High Q Whispering Gallery Mode Disk-Resonators and Phase Modulation**, K. Volyanskiy, P. Salzenstein, H. Tavernier, M. Pogurmirskiy, Yanne K. Chembo and L. Larger, *Opt. Express* **18**, 22358 (2010).
  4. **Contribution of Laser Frequency and Power Fluctuations to the Microwave Phase Noise of Optoelectronic Oscillators**, K. Volyanskiy, Yanne K. Chembo, L. Larger and E. Rubiola, *IEEE J. of Lightwave Technol.* **28**, 2730 (2010).
  5. **Effect of Fiber Propagation on Chaos Communications using Optoelectronic Delay Systems with Nonlocal Nonlinearity**, R. M. Nguimdo, R. Lavrov, P. Colet, M. Jacquot, Yanne K. Chembo and L. Larger, *IEEE J. of Lightwave Technol.* **28**, 2688 (2010).
  6. **On the generation of octave-spanning optical frequency combs using monolithic whispering gallery mode micro-resonators**, Y. K. Chembo and N. Yu, *Opt. Lett.* **35**, 2696 (2010).
  7. **Modal Expansion Approach to Optical Frequency Combs Generation with Monolithic Whispering Gallery Mode Resonators**, Y. K. Chembo and N. Yu, *Phys. Rev. A* **82**, 033801 (2010).
  8. **Spectrum and dynamics of optical frequency combs generated with whispering gallery mode resonators**, Y. K. Chembo, D. V. Strekalov and N. Yu, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 103902 (2010).
  9. **Generation of ultralow jitter optical pulses using optoelectronic oscillators with time-lens soliton-assisted compression**, Y. Kouomou Chembo, A. Hmima, P.-A. Lacourt, L. Larger, and J. M. Dudley, *IEEE J. of Lightwave Technol.* **27**, 5160 (2009).
  10. **Determination of phase noise spectra in optoelectronic microwave oscillators : a Langevin approach**, Y. Kouomou Chembo, K. Volyanskiy, L. Larger, E. Rubiola and P. Colet, *IEEE J. of Quantum Electron.* **45**, 178 (2009).
-

11. **Routes to chaos and multiple time-scale dynamics in broadband bandpass nonlinear delay electro-optic oscillators**, M. Peil, M. Jacquot, Y. K. Chembo, L. Larger and T. Erneux, *Phys. Rev. E* **79**, 026208 (2009).
  12. **Nonlinear dynamics and spectral stability of optoelectronic oscillators**, Y. K. Chembo, L. Larger and P. Colet, *IEEE J. of Quantum Electron.* **44**, 858 (2008).
  13. **Optoelectronic delay dynamics : from optical chaos communications to high purity microwave oscillators** [Invited article], M. Jacquot, Yanne Chembo and L. Larger, *Ann. Phys. – France* **32**, 39 (2007).
-