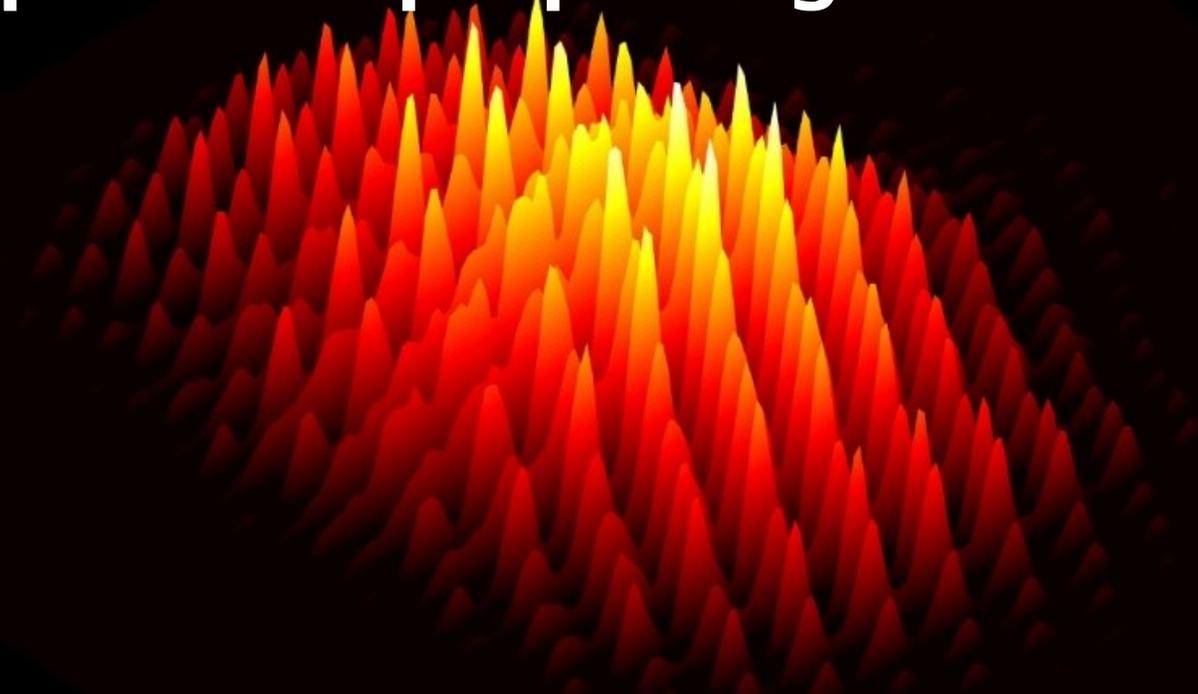


Peignes de fréquences optiques agiles et reconfigurables



Alexis Bougaud¹, Lynn Sader¹, Arnaud Mussot², Manal Arbati¹,
Benjamin Wetzel¹

¹XLIM Research Institute, CNRS UMR 7252, Université de Limoges, 87060 Limoges, France

²PhLAM



Peignes de fréquences optiques agiles et reconfigurables

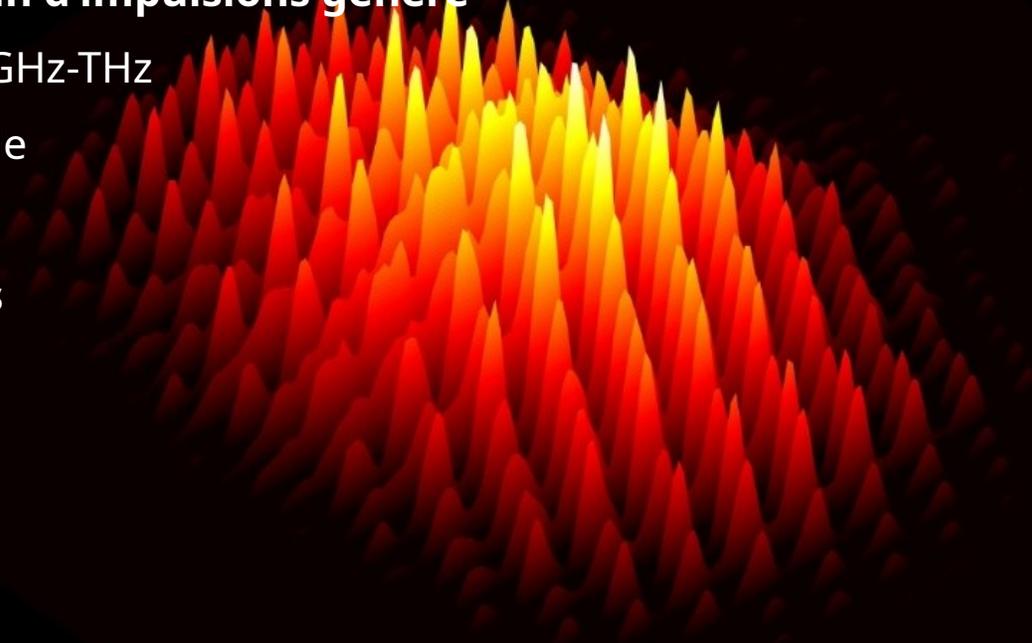
Objectif : Génération de train d'impulsions aux propriétés spectro-temporelles reconfigurables

Propriétés opérationnelles ajustables du train d'impulsions généré

- Taux de répétition couvrant la gamme GHz-THz
- Densité spectrale de puissance maniable

Spécificités techniques du train d'impulsions

- Faible gigue temporelle
- Compacité



Facteurs de mérite des peignes de fréquences optiques:

1. Accordabilité du taux de répétition
2. Précision sur le timing du train d'impulsion
3. Répartition de la DSP
4. Compacité du système de synthèse
5. Rendement énergétique du système de synthèse

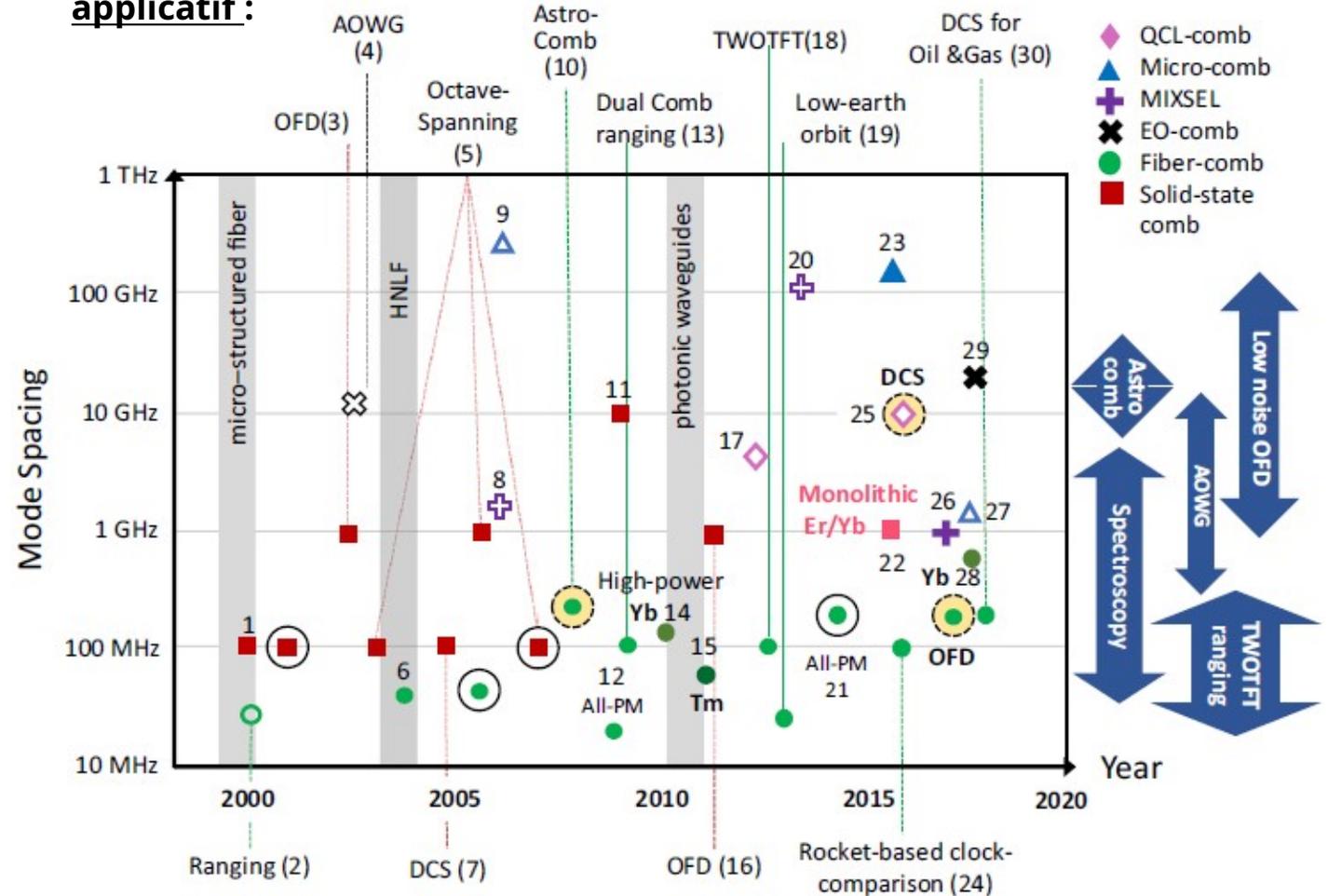
Les peignes de fréquences: méthodes de synthèse et de contrôle

Facteurs de mérite des peignes de fréquences optiques:

1. Accordabilité du taux de répétition
2. Précision sur le timing du train d'impulsion
3. Répartition de la DSP
4. Compacité du système de synthèse
5. Rendement énergétique du système de synthèse

→ Peigne Kerr

Multiplication des sources suivant le domaine applicatif :



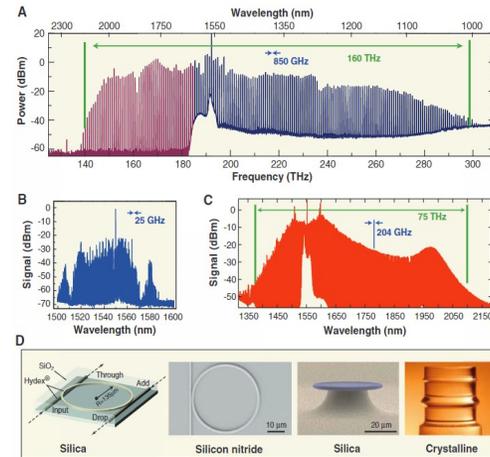
Méthodes de synthèse des peignes Kerr

I. Stimulation externe

Micro-disque

- Facteur Q élevé
- Couplage en espace libre
- Excitation par laser CW

2011

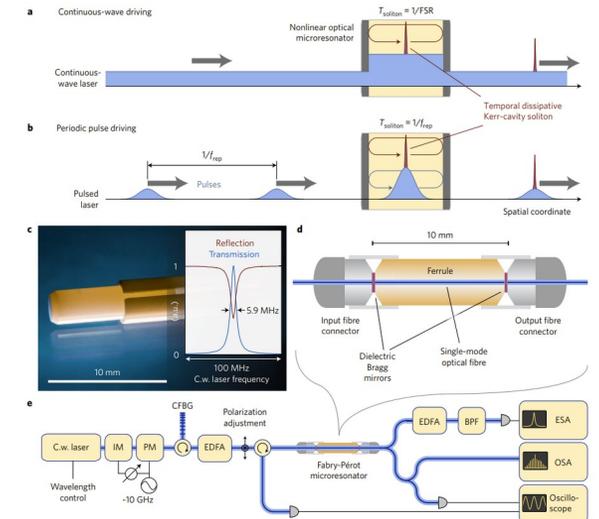


Kippenberg, Science, vol 332, issue 6029, Apr 2011

Résonateur fibré

- Dispositif fibré
- Excitation pulsée (synthèse EO)

2017

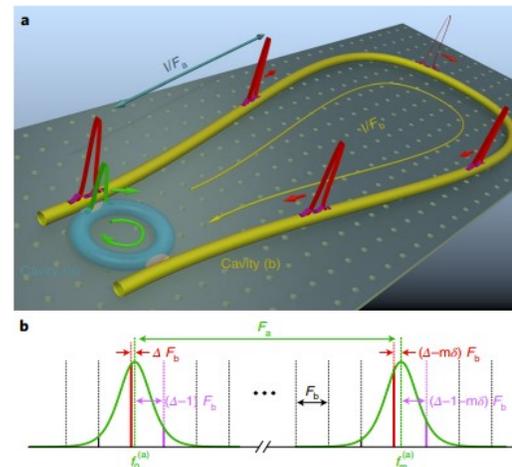


Obrzud, Nat.Phot 11, pp 600-607, Augt 2017

II. Système en cavités imbriquées

- Auto-démarrant
- Simplification du système d'asservissement

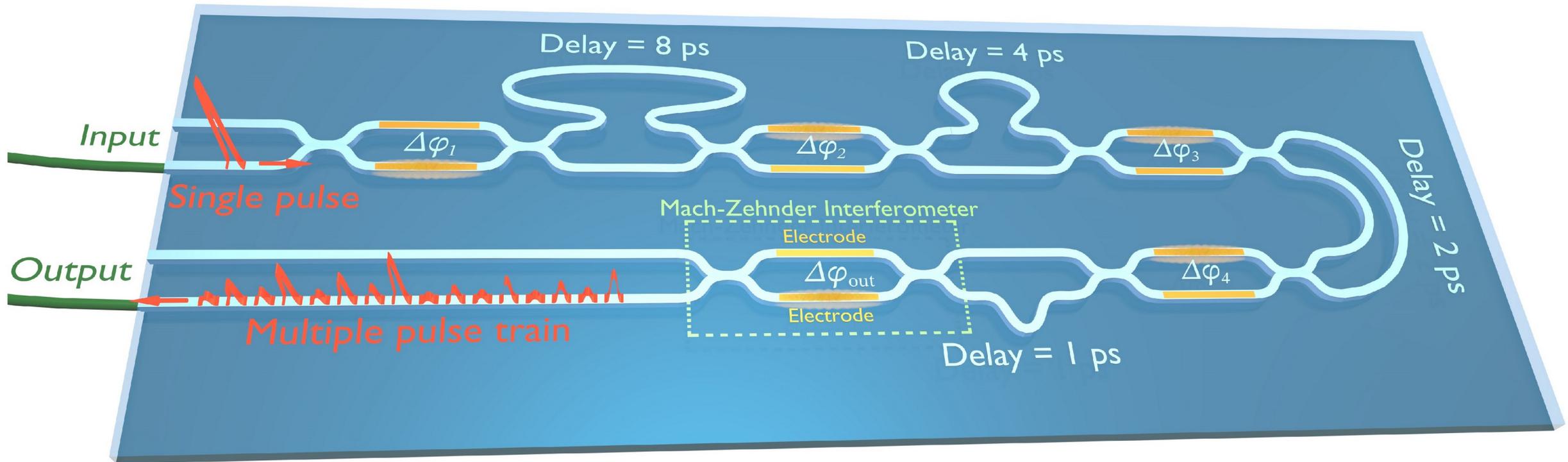
2019



1. Bao, Nat.Phot 13, pp 384-389, March 2019

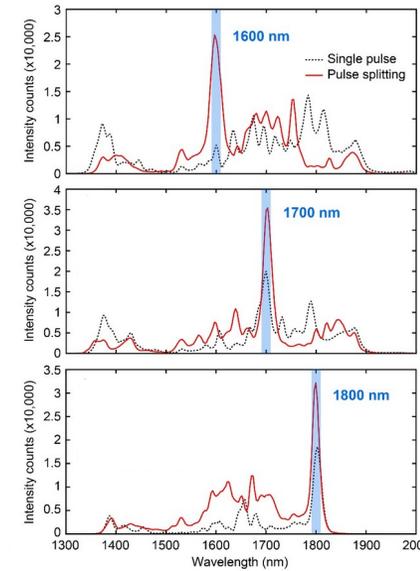
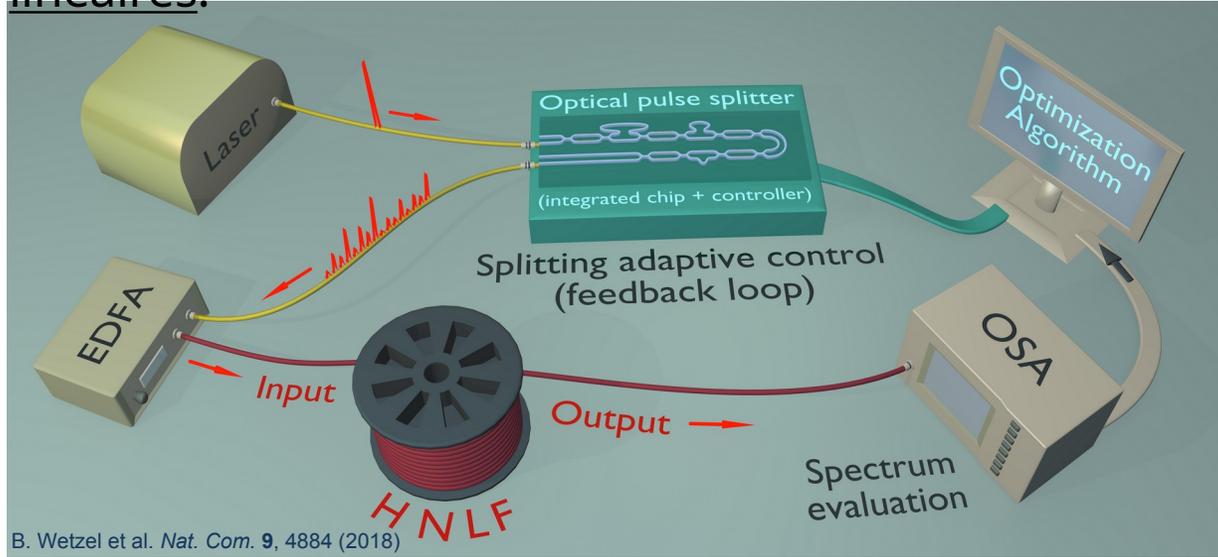
Entrelacement temporel: approche intégrée

Ligne à retard programmable en circuit intégré photonique



Contrôle des dynamiques non-linéaires (expertise locale)

L'entrelacement temporel pour le contrôle des dynamiques non-linéaires:



2018

ARTICLE
[DOI: 10.1038/s41467-018-07941-w](https://doi.org/10.1038/s41467-018-07941-w) OPEN
 Customizing supercontinuum generation via on-chip adaptive temporal pulse-splitting
 Benjamin Wetzel^{1,2}, Michael Kues^{1,3}, Piotr Roztock¹, Christian Reimer^{1,4}, Pierre-Luc Godin¹, Maxwell Rowley⁵, Brent E. Little⁶, Sai T. Chu⁵, Evgeny A. Viktorov⁷, David J. Moss⁸, Alessia Pasquazi⁹, Marco Peccianti⁷ & Roberto Morandotti^{7,8}

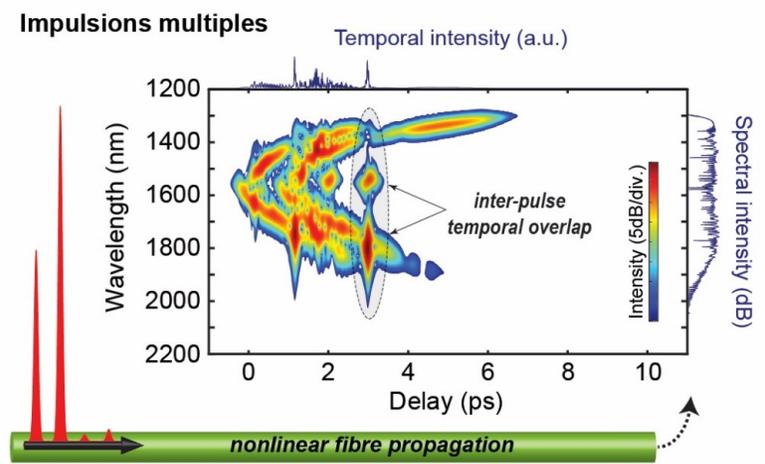
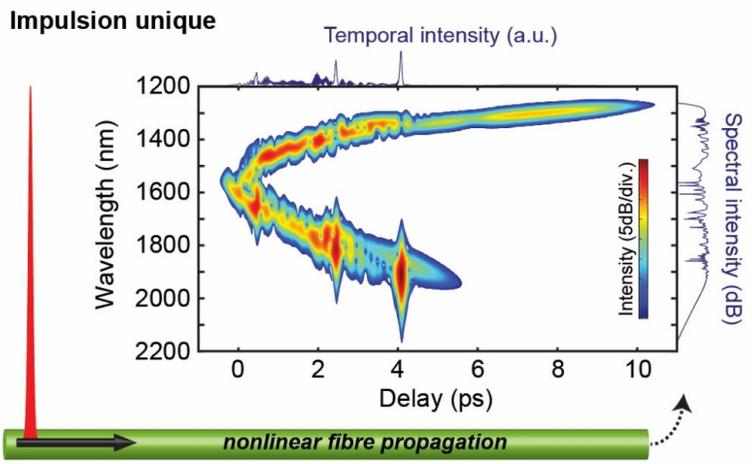
frontiers | Frontiers in Photonics
 Optimizing supercontinuum spectro-temporal properties by leveraging machine learning towards multi-photon microscopy
 Van Thuy Hoang, Yassin Boussafa, Lynn Sader, Sébastien Février, Vincent Couderc and Benjamin Wetzel*
 XLIM Research Institute, CNRS UMR 7252, Université de Limoges, Limoges, France

2022



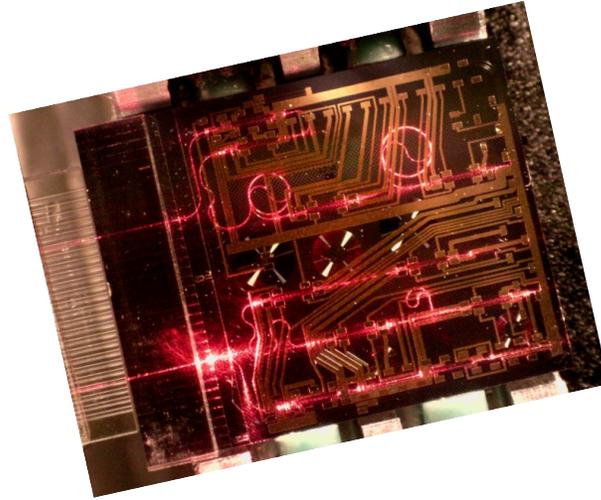
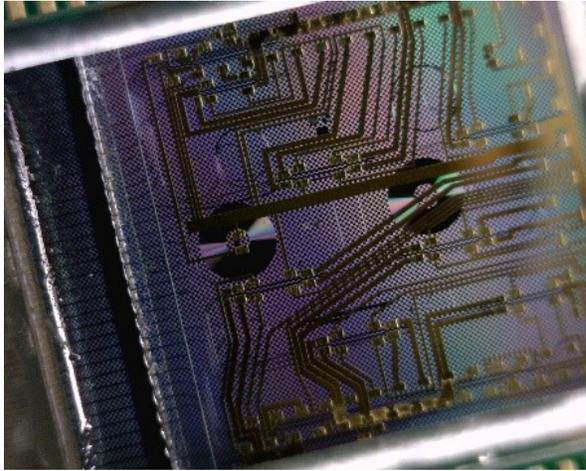
2023

Single-Photon Level Dispersive Fourier Transform: Ultrasensitive Characterization of Noise-Driven Nonlinear Dynamics
 Lynn Sader, Surajit Bose, Anahita Khodadad Kashi, Yassin Boussafa, Raktim Haldar, Romain Daultat, Philippe Roy, Marc Fabert, Alessandro Tonello, Vincent Couderc, Michael Kues,⁸ and Benjamin Wetzel⁸



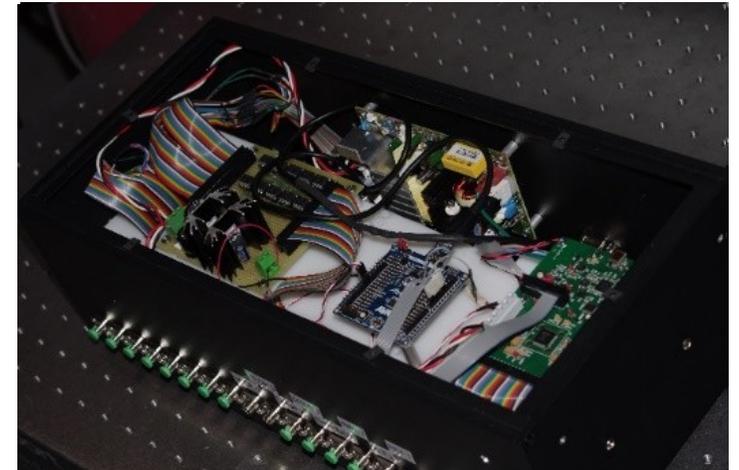
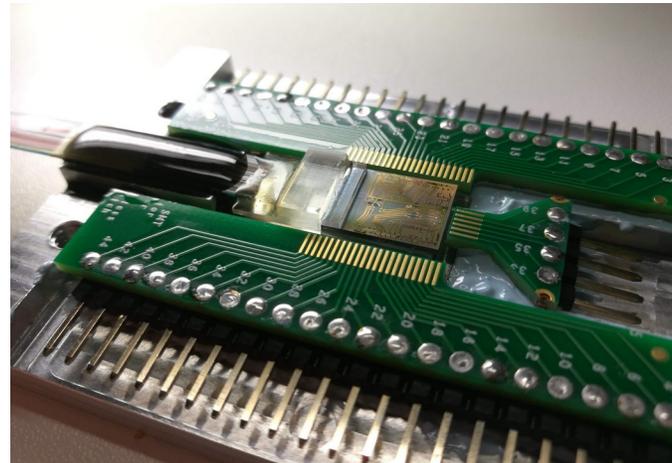
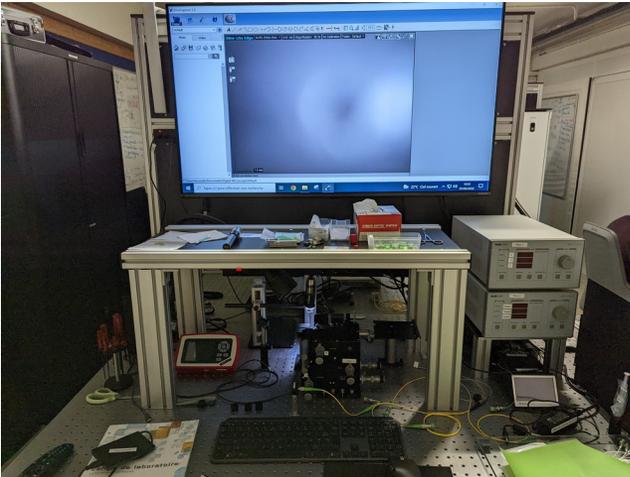
➤ Contrôle de la dynamique d'élargissement spectrale

Programmable Delay Line (PDL)



- **Cascade d'interféromètre de Mach Zehnder**
- Délai ajustable encodée sur un octet (base binaire)
 - Délai minimal : 1 ps
 - Délai maximal: 255 ps
- 6 puces (retard unitaire : 1, 2, 4, 8 ps)
- ✓ **Reconfigurabilité ps - ns**

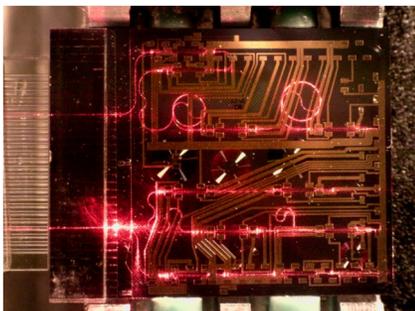
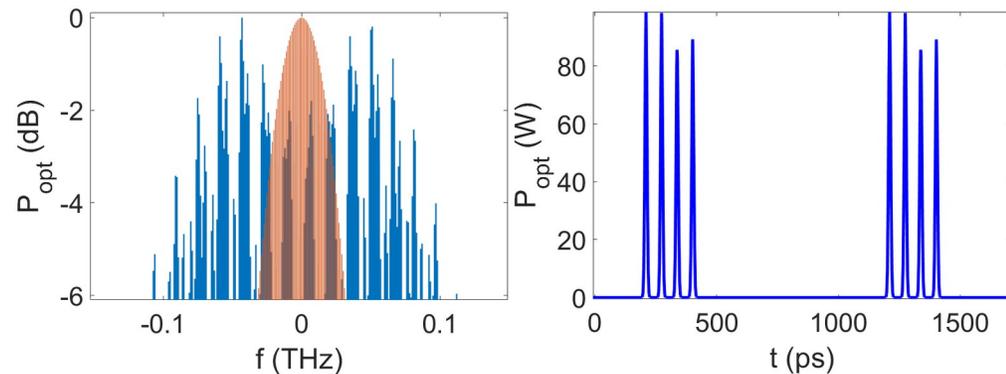
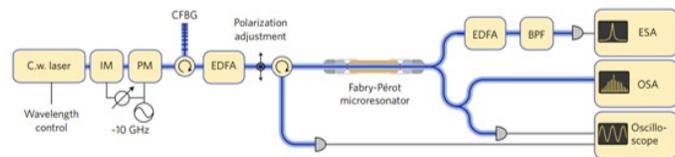
B. Little, et al., *IEEE Conference Avionics Fiber-Optics and Photonics*, 68-69 (2006)



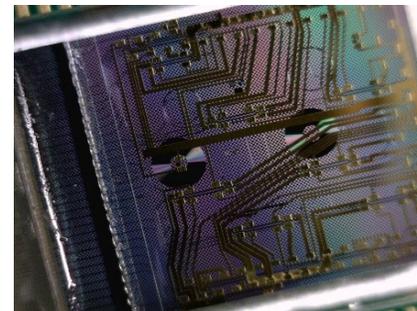
Mise en forme de signaux pour la génération de peigne Kerr

I. Stimulation externe

➤ Répartition de la DSP

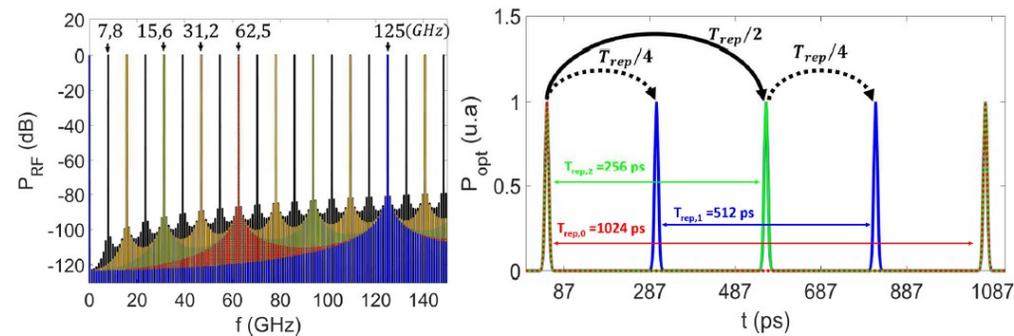
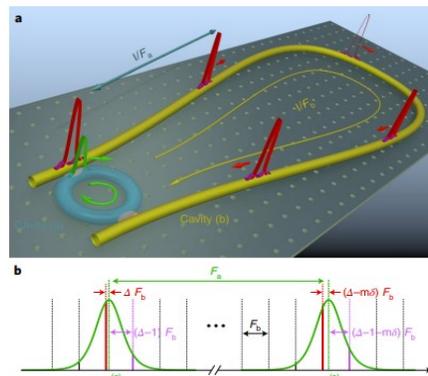


- Génération de motif GHz-THz
- Contrôle cohérent du motif
- Haut degré de reconfigurabilité



II. Système en cavités imbriquées

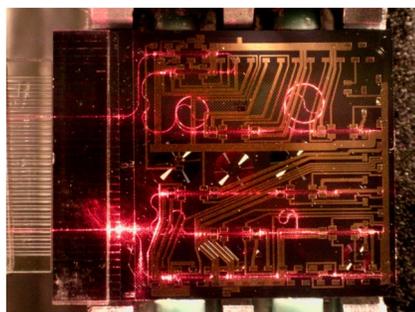
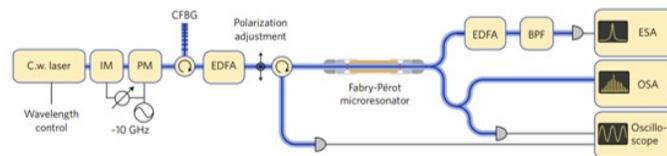
➤ Accordabilité du taux de répétition



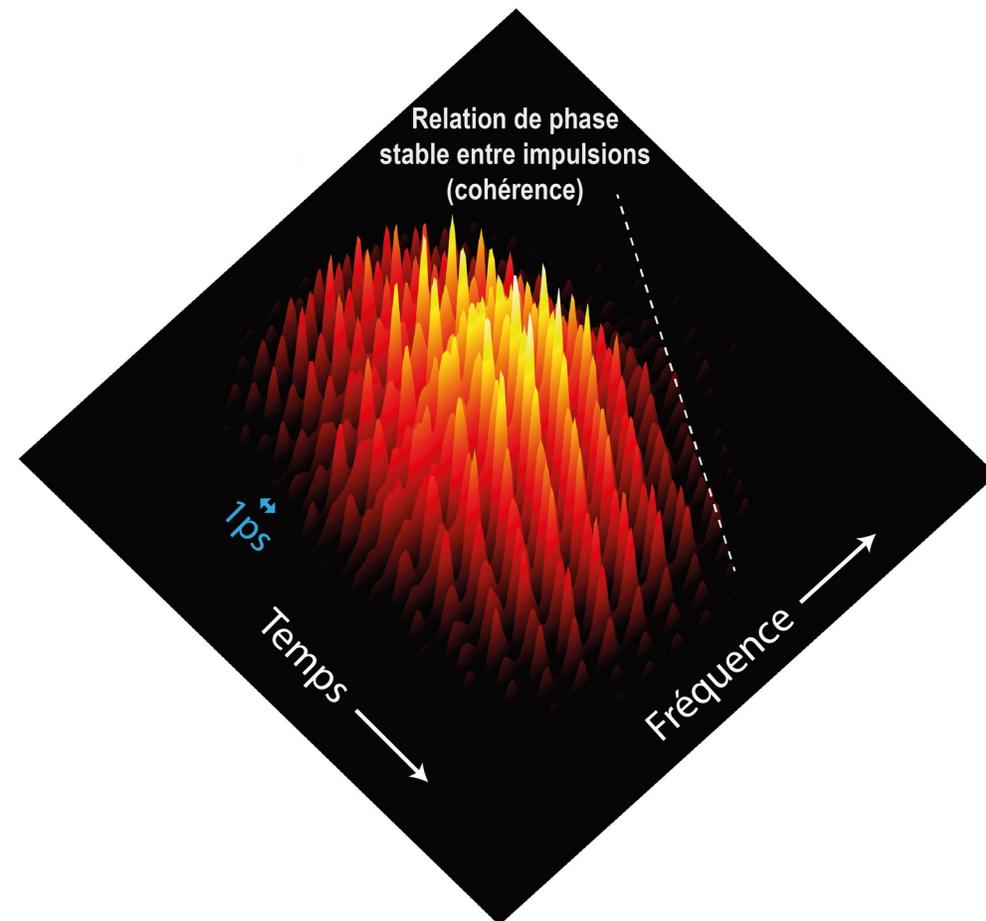
Mise en forme de signaux pour la génération de peigne Kerr

I. Stimulation externe

➤ Répartition de la DSP

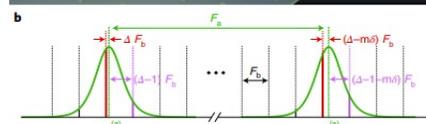
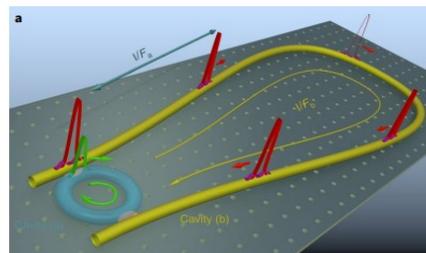


- Génération de motif GHz-THz
- **Contrôle cohérent du motif**
- Haut degré de reconfigurabilité



II. Système en cavités imbriquées

➤ Accordabilité du taux de répétition



Facteurs de mérite des peignes de fréquences  Apport d'une PDL

- Répartition de la DSP
- Précision sur le timing du train d'impulsion
- Accordabilité du taux de répétition
- Compacité du système de synthèse
- Rendement énergétique du système de synthèse

Facteurs de mérite des peignes de fréquences ↔ Apport d'une PDL

➤ **Répartition de la DSP** → **Stimulation externe**

➤ Précision sur le timing du train d'impulsion

➤ Accordabilité du taux de répétition

➤ Compacité du système de synthèse

➤ Rendement énergétique du système de synthèse

Facteurs de mérite des peignes de fréquences ↔ Apport d'une PDL

➤ **Répartition de la DSP** → **Stimulation externe**

➤ Précision sur le timing du train d'impulsion

➤ **Accordabilité du taux de répétition** → **Systeme en cavités imbriquées**

➤ Compacité du système de synthèse

➤ Rendement énergétique du système de synthèse

Facteurs de mérite des peignes de fréquences ↔ Apport d'une PDL

➤ **Répartition de la DSP** → **Stimulation externe**

➤ Précision sur le timing du train d'impulsion

➤ **Accordabilité du taux de répétition** → **Systeme en cavités imbriquées**

➤ **Compacité du système de synthèse** → **Circuit photonique intégré**

➤ Rendement énergétique du système de synthèse

Facteurs de mérite des peignes de fréquences ↔ Apport d'une PDL

➤ Répartition de la DSP → Stimulation externe **Étape I**

➤ Précision sur le timing du train d'impulsion

➤ Accordabilité du taux de répétition → Système en cavités imbriquées **Étape II**

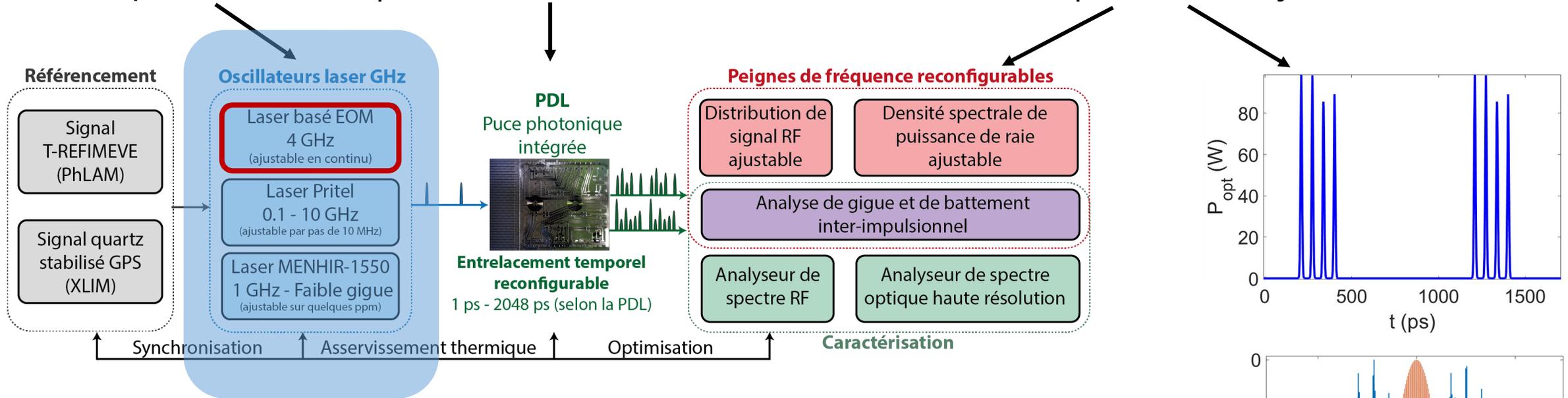
➤ Compacité du système de synthèse → Circuit photonique intégré

➤ Rendement énergétique du système de synthèse

Étape I: génération de signaux agile à partir d'une source primaire

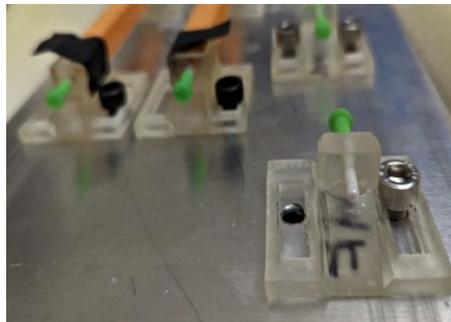
Génération de signaux agile à partir d'une source primaire :

1. Source primaire
2. Dispositif de contrôle
3. Source impulsionnelle ajustable

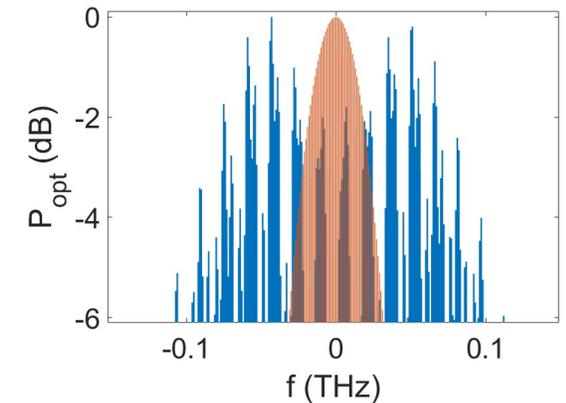
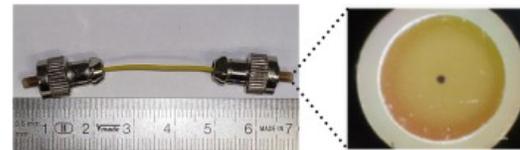


Résonateur Fabry-Pérot à disposition (collaborations) :

2017

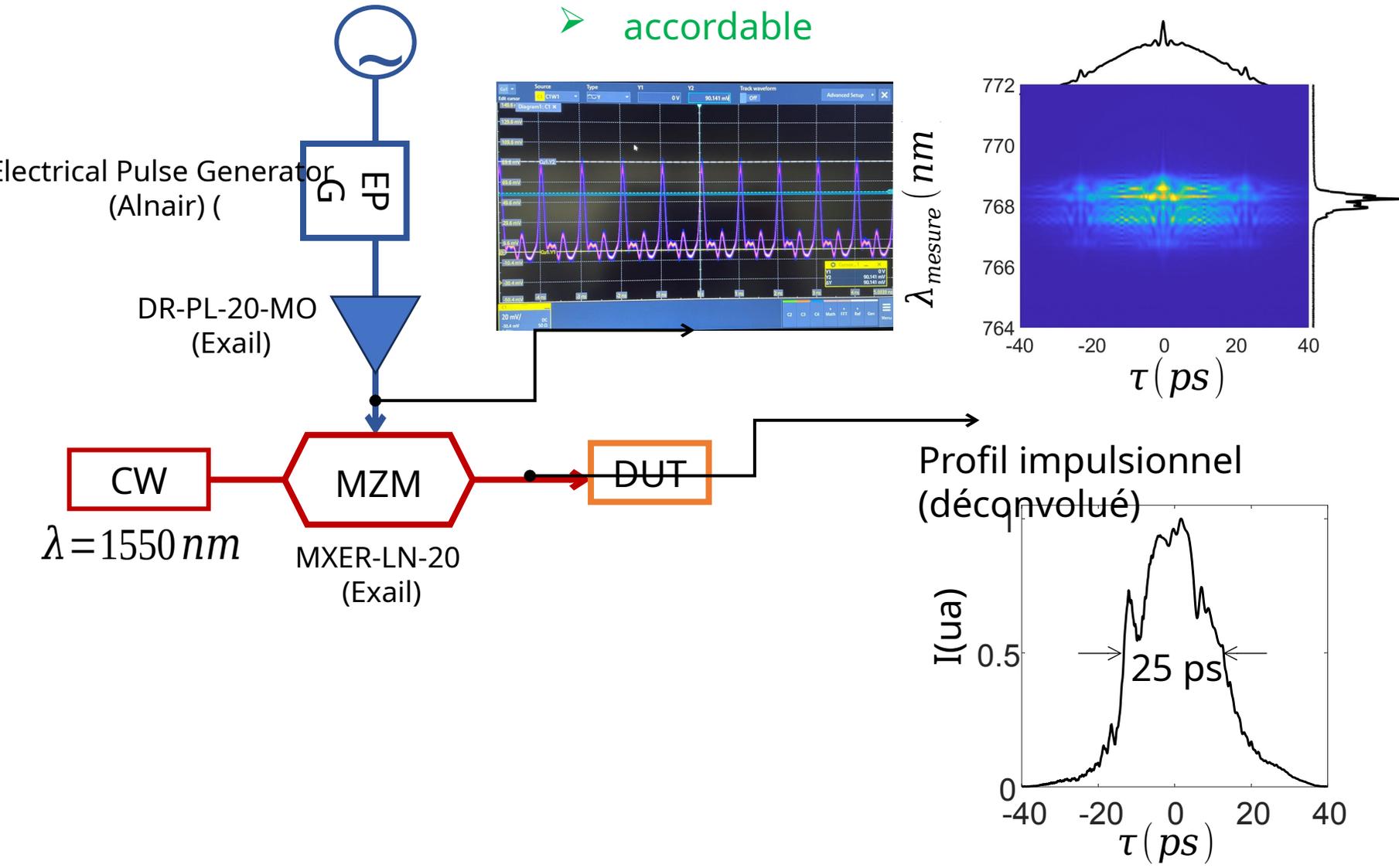


2023



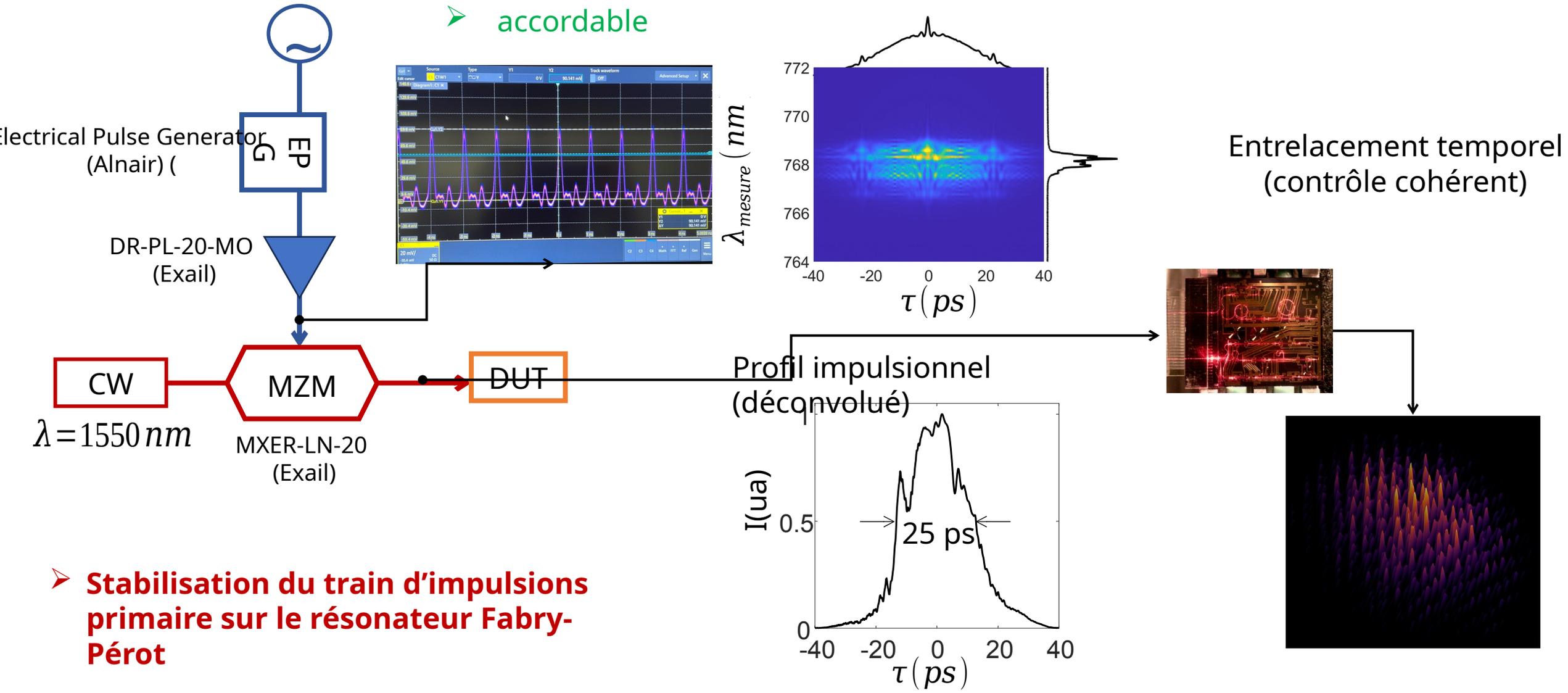
Étape I: génération de signaux agile à partir d'une source primaire

Système électrooptique pour la synthèse d'impulsions optiques primaires



Étape I: génération de signaux agile à partir d'une source primaire

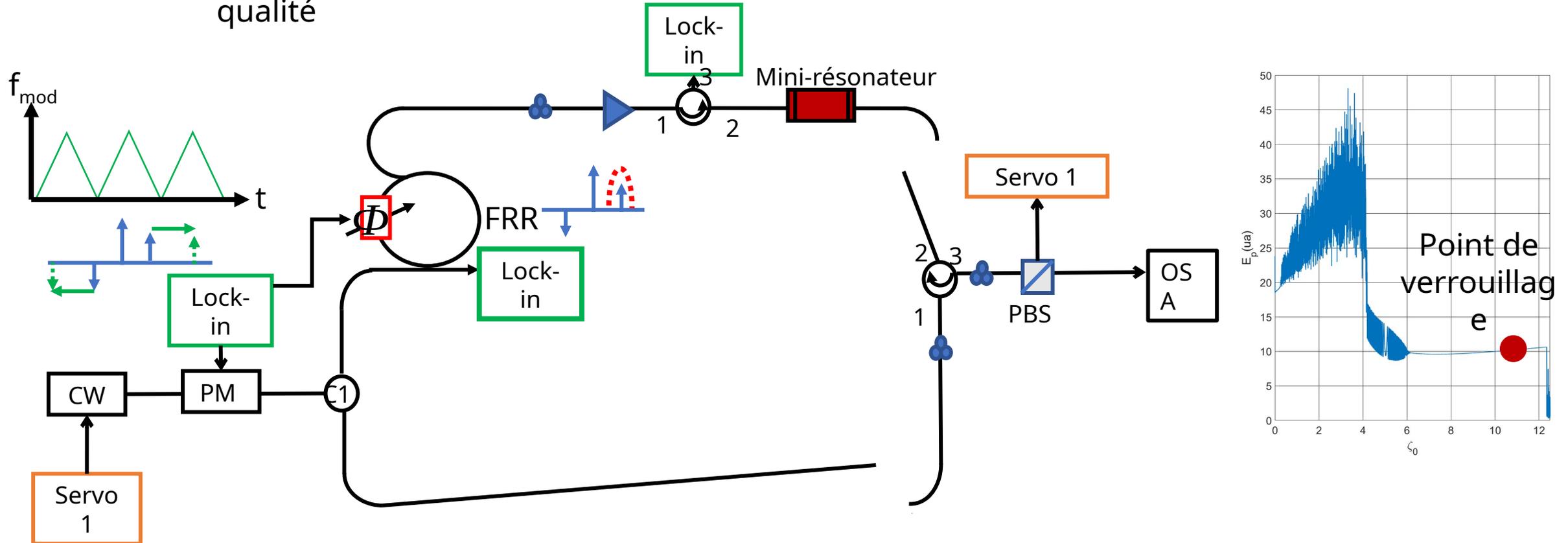
Système électrooptique pour la synthèse d'impulsions optiques primaires



➤ **Stabilisation du train d'impulsions primaire sur le résonateur Fabry-Pérot**

Étape I: génération de signaux agile à partir d'une source primaire

Système de stabilisation de la source primaire sur une cavité à fort facteur de qualité



Stabilisation en deux étapes¹:

1. Compensation des perturbations environnementales (résonance axe lent)

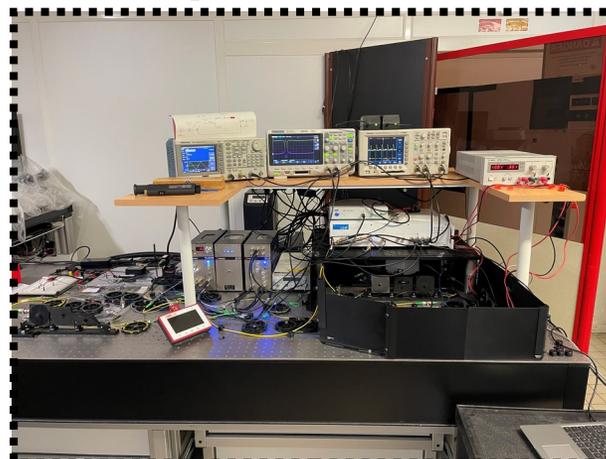
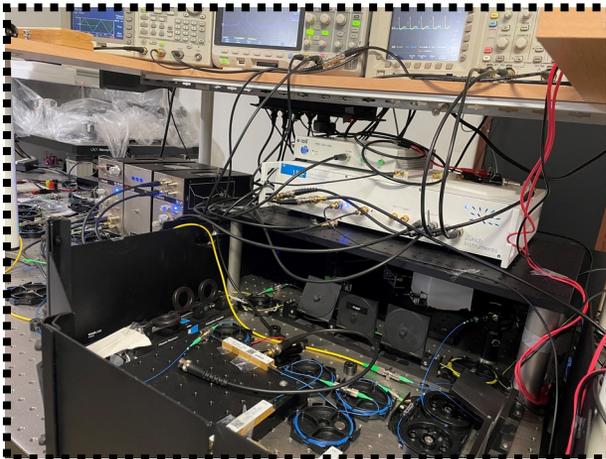
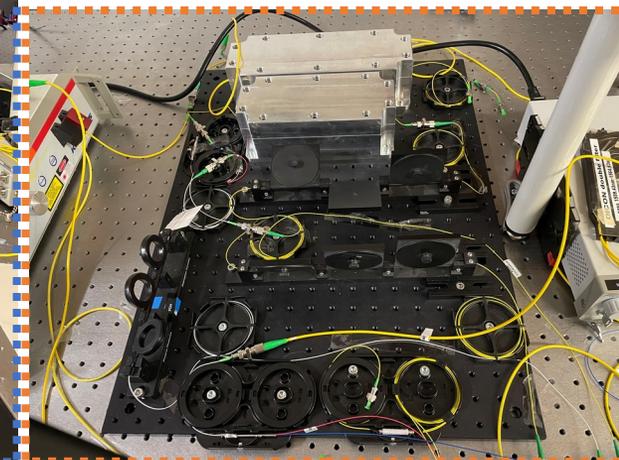
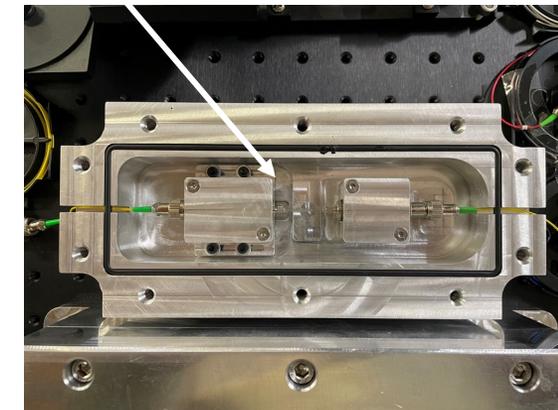
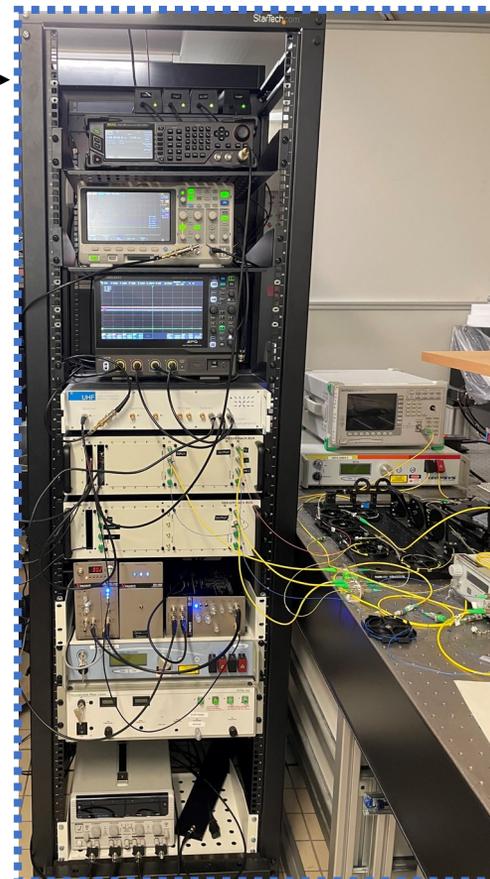
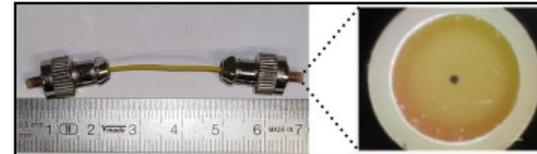
2. Chargement de la cavité et stabilisation du peigne Kerr (résonance

¹ T.Bunel, M.Conforti, Z.Ziani, J.Lunz, A. Mourou, A. Ferment, O. Loos, R. Roy, A. M. P. de K. Lyvo, A. M. P. de K. Lyvo, A. M. P. de K. Lyvo, « Observation of a high-quality Kerr frequency comb in a fiber Fabry-Pérot resonator », Optics Letters, Vol,48, No2,

Étape I: génération de signaux agile à partir d'une source primaire

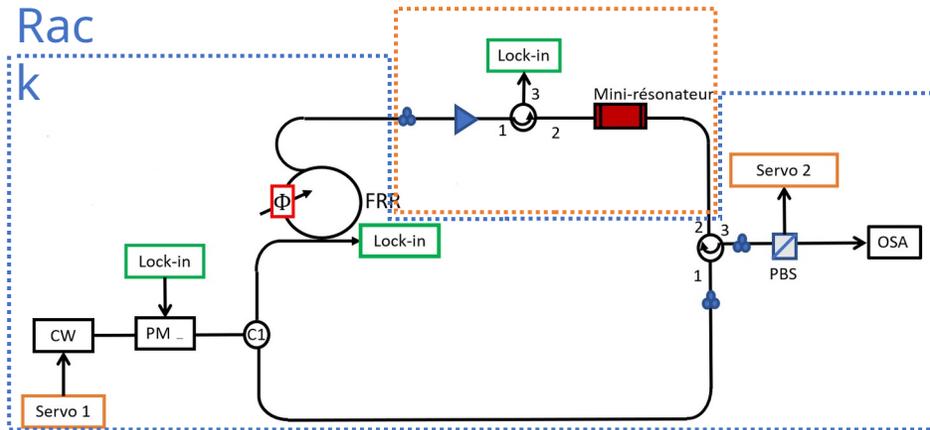
Mise en place du dispositif expérimental

- Compacité, stabilisation du système et montage sur rack



Étape I: génération de signaux agile à partir d'une source primaire

Mise en place du dispositif expérimental

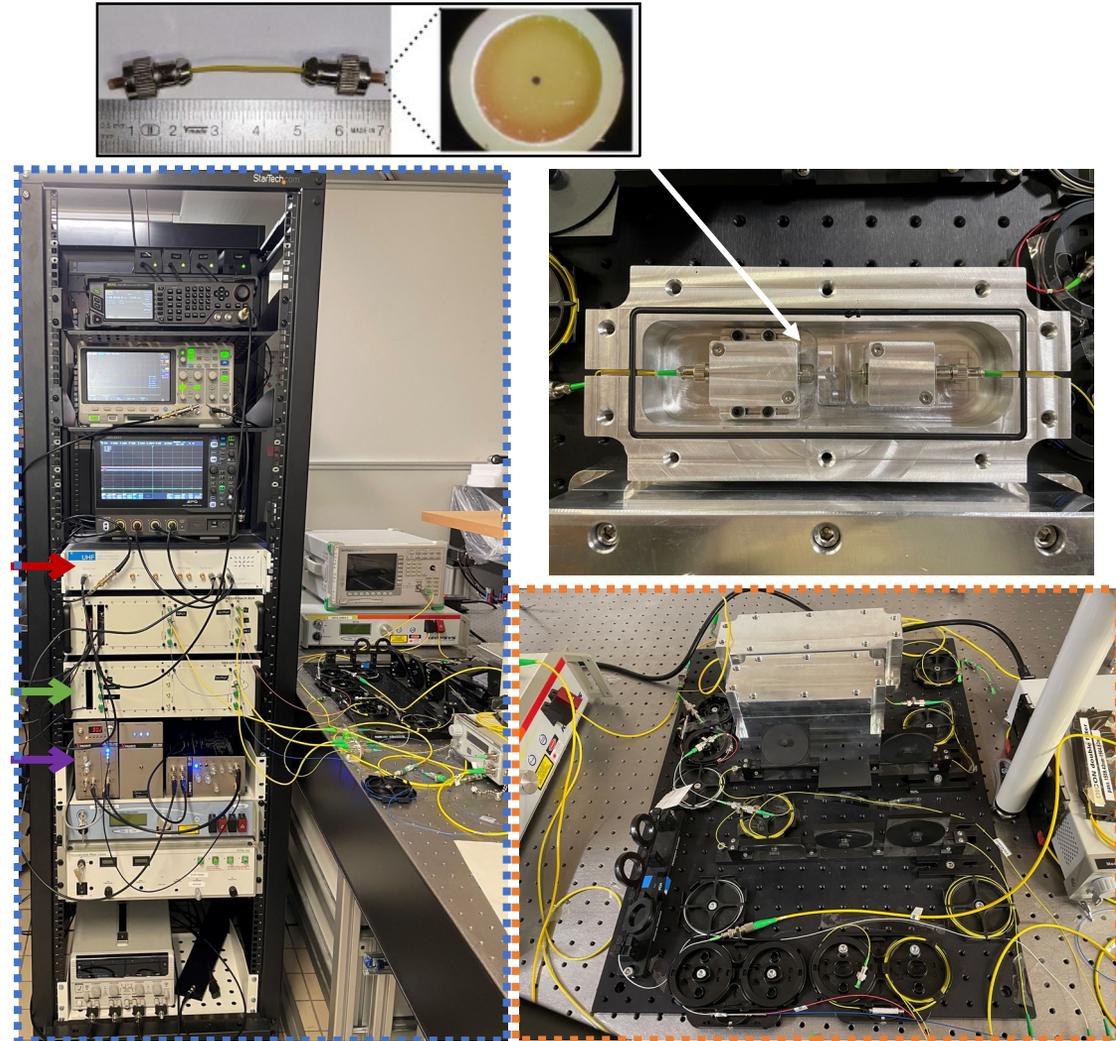


Dispositif expérimental (montage Rack):

➤ Système d'asservissement:

1. Lock-in (Zurich instrument) -> BP ~ 600 MHz
2. Laser ULN 15 (Thorlabs) -> FMHW ~100Hz
3. Laser contrôleur D2-105 (Vescent)
4. Servo D2-125 (Vescent)

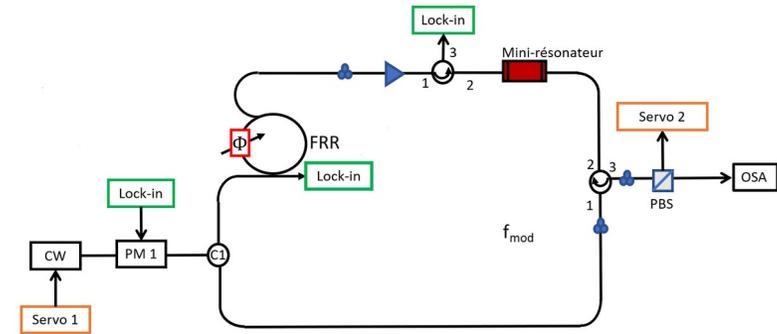
- ✓ Finalisation du dispositif expérimental
 - Montée en puissance du signal de pompe



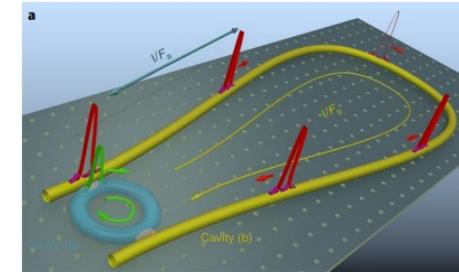
Vers l'élaboration d'une source impulsionnelle accordable autonome

Bilan et perspectives:

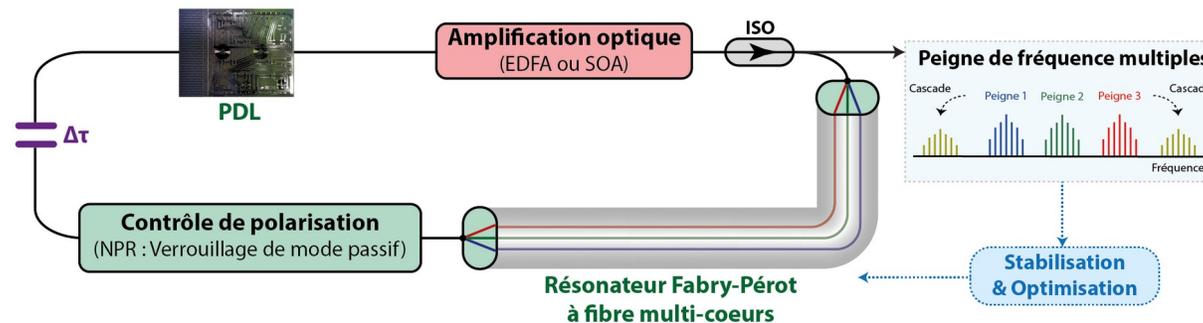
- Étape I : génération de peigne Kerr par stimulation externe



- Étape II : génération à partir d'un système de cavités imbriquées



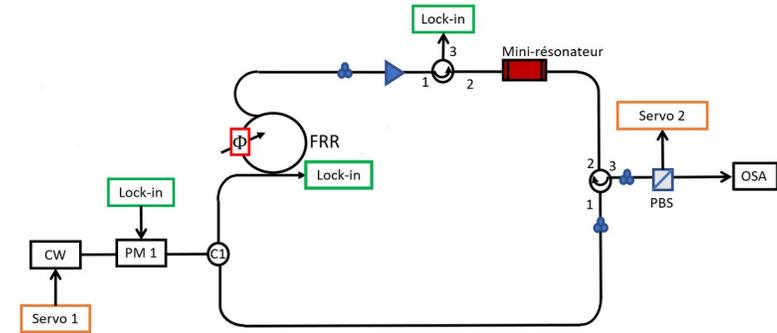
- Étape III (perspective) : vers la synthèse de peigne multi-porteuses ajustable



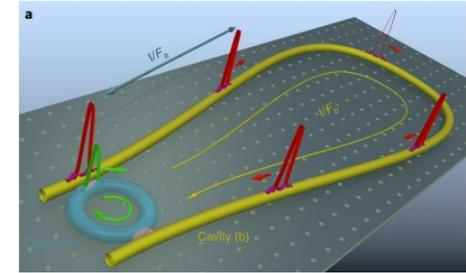
Vers l'élaboration d'une source impulsionnelle accordable autonome

Bilan et perspectives:

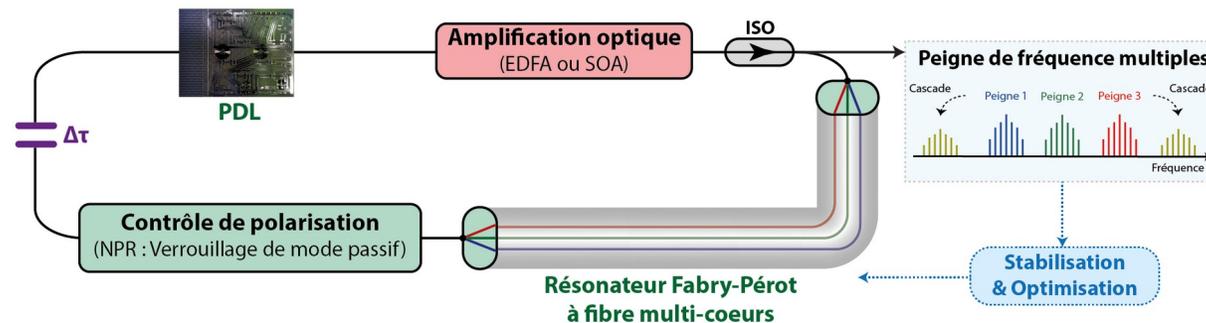
➤ Étape I : génération de peigne Kerr par stimulation externe



▪ Étape II : génération à partir d'un système de cavités imbriquées



▪ Étape III (perspective) : vers la synthèse de peigne multi-porteuses ajustable



Vers l'élaboration d'une source impulsionnelle accordable autonome (laser à verrouillage de modes agile)

Génération de signaux multiporteuses

Par stimulation EO (A.Musso)

➤ Peignes assignés à chacun des cœurs

nature communications



Article

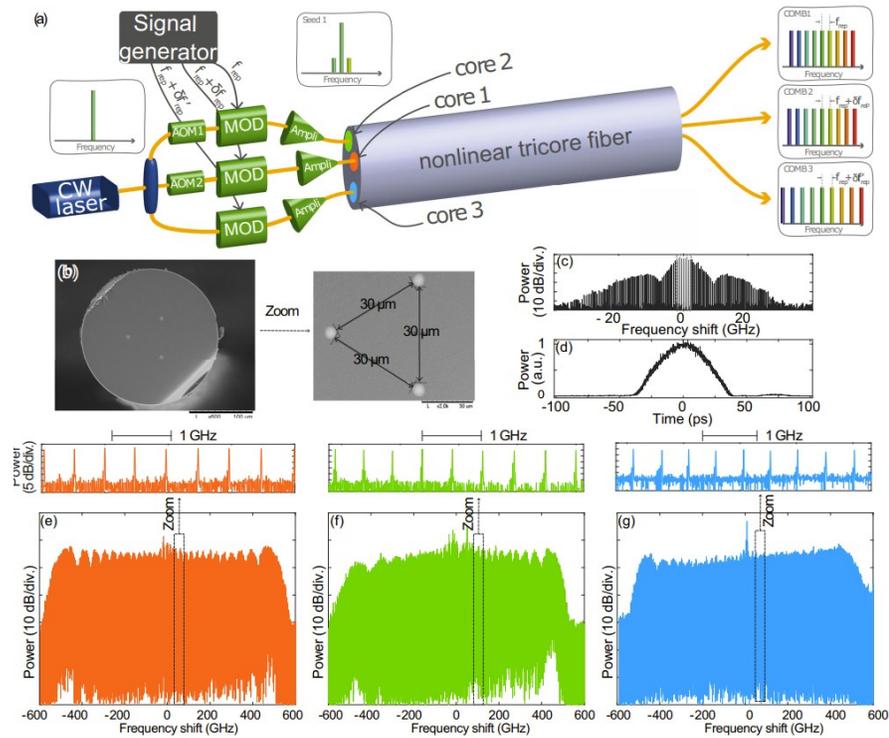
<https://doi.org/10.1038/s41467-023-43734-w>

All-fiber frequency agile triple-frequency comb light source

Received: 17 May 2023

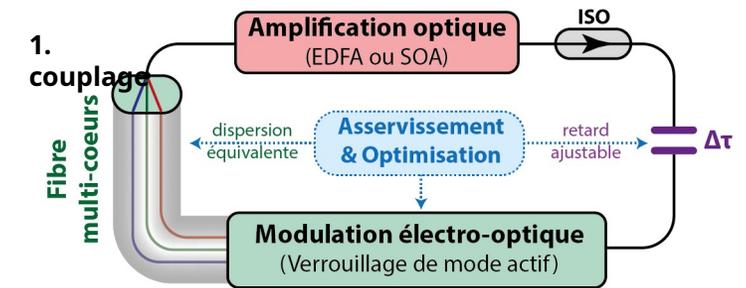
Accepted: 17 November 2023

Eve-Line Bancel^{1,2}, Etienne Genier¹, Rosa Santagata³, Matteo Conforti¹, Alexandre Kudlinski¹, Géraud Bouwmans¹, Olivier Vanvincq¹, Damien Labat¹, Andy Cassez² & Arnaud Musso¹✉

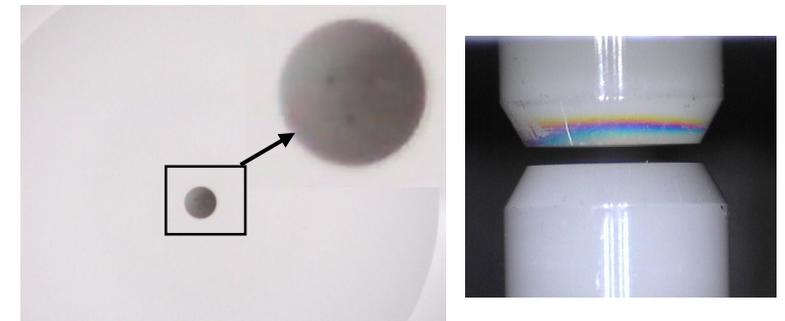


✓ Application pour la spectroscopie double peigne

➤ Génération de peigne multi-porteuses autonome

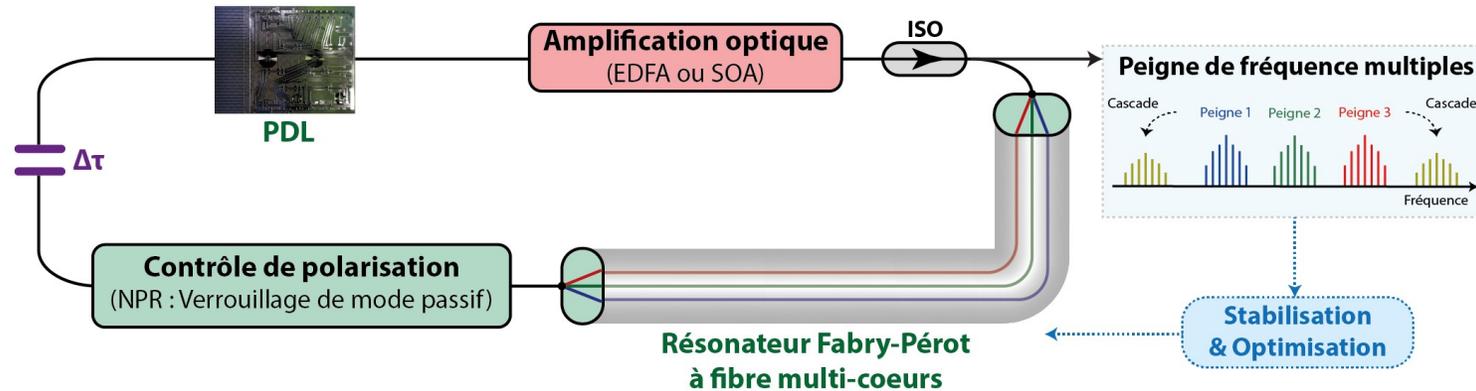


➤ Etape 1: Couplage individuel des cœurs vers une fibre SMF (FAN)



Vers l'élaboration d'une source impulsionnelle accordable autonome (laser à verrouillage de modes agile)

Génération de peigne de fréquence multi-porteuses auto-stabilisée
(Verrouillage de modes passifs)



- Verrouillage passif
- Génération d'impulsions multi-porteuses
- Système auto-stabilisé
- Versatilité des propriétés spectrales du signal

général

Peignes de fréquences optiques agiles et reconfigurables

Travaux antérieurs proposant :

- Un dispositif de génération de signaux adaptatif (POL)
- Génération de peigne Kerr



Ce projet propose :

- Système de contrôle de la NL intra-cavité
- Systèmes résonants autonomes et reconfigurables

Avancement du projet proposé (début en Novembre 2023) :

- Étude et réalisation du système d'asservissement sur cavité I
- Étude et réalisation d'une source primaire adaptative



**Lynn
Sader**

- Prochaine étape: estimation du contrôle apporté par la source adaptative externe sur la génération de peigne Kerr



Manal Arbati