



**HAL**  
open science

## Oscillateur optoélectronique (OEO) générant des peignes de fréquences et des trains d'impulsions optiques

Brian Sinquin, Goulc'Hen Loas, Steve Bouhier, Ludovic Frein, Marc Vallet,  
Mehdi Alouini, Marco Romanelli

### ► To cite this version:

Brian Sinquin, Goulc'Hen Loas, Steve Bouhier, Ludovic Frein, Marc Vallet, et al.. Oscillateur optoélectronique (OEO) générant des peignes de fréquences et des trains d'impulsions optiques. Journée du Club Optique et Micro-ondes (JCOM 2022), Jun 2022, Besançon, France. hal-03986413

**HAL Id: hal-03986413**

**<https://hal.science/hal-03986413v1>**

Submitted on 13 Feb 2023

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

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

## Oscillateur optoélectronique (OEO) générant des peignes de fréquences et des trains d'impulsions optiques

Brian Sinquin, Goulc'hen Loas, Steve Bouhier, Ludovic Frein, Marc Vallet, Mehdi Alouini, Marco Romanelli  
Univ. Rennes, CNRS, Institut FOTON UMR 6082, 35000 Rennes, France

Depuis une vingtaine d'années, les peignes de fréquences suscitent un fort intérêt tant du point de vue fondamental que pour de nombreuses applications, comme la spectroscopie résolue en temps/fréquence, les télécommunications optiques, le LIDAR, la génération de signaux d'horloge, etc [1]. Récemment, nous avons démontré la possibilité d'utiliser la modulation directe d'un laser semiconductor DFB comme source radiofréquence (RF) dans un oscillateur optoélectronique (OEO) [2]. L'objet de la présente communication est de présenter la génération de peignes de fréquences et de trains d'impulsions courtes au moyen de notre dispositif. Notre approche est différente de celle récemment exposée dans [3]. Dans notre cas, nous tirons parti de l'auto-modulation de phase du signal optique dans la ligne à retard fibrée [4], pour obtenir un fort élargissement spectral conduisant à un affinement temporel des impulsions en régime de dispersion anormal.

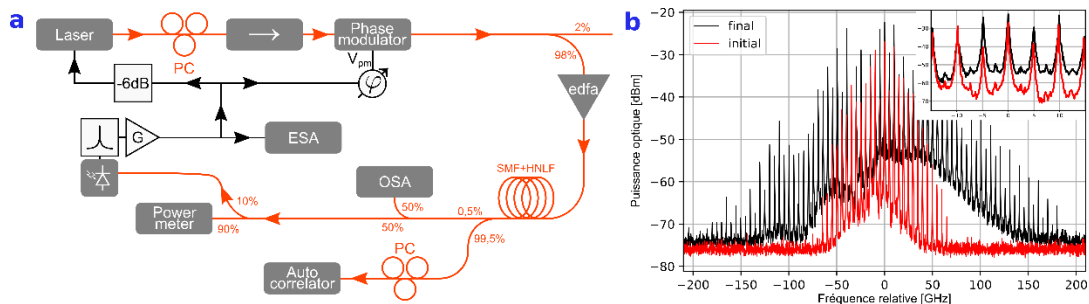


Fig. 1. a) Schéma d'OEO à modulation directe à effet Kerr. b) Peigne de fréquence généré. En rouge : spectre optique avant l'amplificateur optique (EDFA). En noir : spectre optique après propagation dans les fibres.

Le montage est schématisé sur la Fig. 1.(a). Le laser produit une onde optique à 1550 nm, qui est modulée en phase, puis amplifiée. Cette dernière se propage dans 5 km de fibre optique standard (SMF) puis dans 100 m de fibre hautement non-linéaire (HNLF) ; une partie de l'onde est ensuite prélevée pour être analysée par différents instruments de mesures (OSA, auto-corrélateur, puissance-mètre), le restant étant détecté au moyen d'une photodiode rapide. Le signal électrique généré est amplifié, filtré autour de 10 GHz avant d'être appliqué parallèlement sur le port de modulation du laser DFB et l'entrée du modulateur de phase. Un déphasage peut être ajusté entre ces deux voies.

Nous observons un peigne de fréquences (Fig. 1.(b)) dont le taux de répétition est de 5 GHz et dont la largeur à -30 dB est de 240 GHz. Notons que ce taux de répétition correspond à une sous-harmonique de la fréquence de modulation OEO. L'apparition de sous-harmoniques est dû au caractère non-linéaire de la dynamique du laser et a déjà été modélisée et observée expérimentalement dans le cas de fortes modulations directes de lasers à semi-conducteur [5]. En ajustant la phase du signal d'entrée du modulateur de phase optique, nous observons des impulsions à la sortie de la ligne à retard, de durée 4 ps (FWHM). Nous avons également observé, pour d'autres paramètres, un taux de répétition de 2,5 GHz, dû à deux doublings de période en cascade. Il est à remarquer que, même dans le régime impulsionnel, l'oscillation à 10 GHz de l'OEO reste très stable. Nous avons en effet mesuré un bruit de phase de -123 dBc/Hz à 10 kHz de la porteuse, et un plancher de bruit à -125 dBc/Hz, ce qui prouve la bonne cohérence de phase entre toutes les dents du peigne de fréquence.

Afin de vérifier que la dynamique intrinsèque du laser est bien à l'origine du taux de répétition inattendu des peignes, nous avons modulé directement la source optique à l'aide d'un synthétiseur de fréquence à  $f_0 = 10$  GHz, et avons mesuré le spectre RF de l'intensité optique de sortie (Fig. 2).

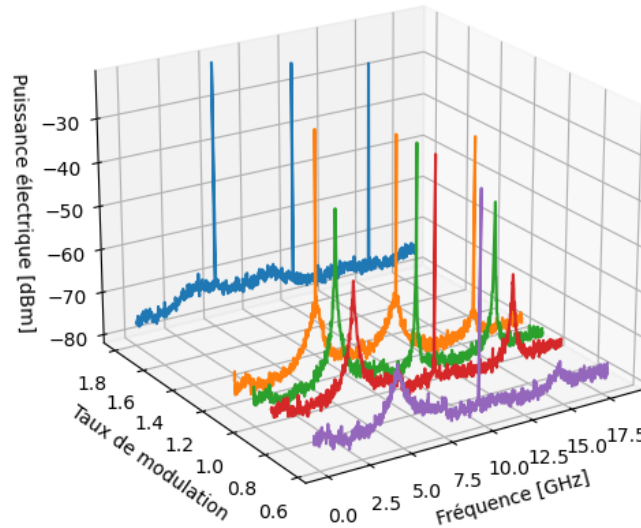


Fig. 2. Spectres de puissances électriques de l'intensité émise par le laser pour différents taux de modulation.

En augmentant le taux de modulation, on observe l'apparition de bandes latérales étroites et intenses situées à  $f_0/2$  de part et d'autre de la porteuse RF, i.e. à 5 GHz et 15 GHz. Cet effet ne se produit que si la fréquence des oscillations de relaxation du laser est proche de  $f_0/2$  : ici pour un courant d'injection fixé à 27 mA, soit 2 fois le courant de seuil, et pour un taux de modulation allant de 0,6 à 2. Cet effet de doublement de période peut s'accompagner, dans certains cas, d'un régime impulsionnel [5]. La génération d'impulsions directement en sortie du laser est potentiellement intéressante, car elle permet à l'effet Kerr d'affiner des impulsions préexistantes dans de la fibre à retard et donc de s'affranchir du modulateur de phase. Enfin, le doublement de période a pour effet de densifier le peigne d'un facteur 2, et présente donc un intérêt pour des applications de spectroscopie ou de multiplexage en longueur d'onde (WDM).

- [1] S. A. Diddams, K. Vahala, and T. Udem, "Optical frequency combs: Coherently uniting the electromagnetic spectrum" *Science* **369**, p. eaay3676 (2020).
- [2] B. Sinquin, M. Romanelli, S. Bouhier, L. Frein, M. Vallet, and M. Alouini, "Low Phase Noise Direct-Modulation Optoelectronic Oscillator" *J. Light. Technol.*, **39**, pp. 7788-7793 (2021). doi: 10.1109/JLT.2021.3111703.
- [3] C. D. Munoz, M. Varon, F. Destic, and A. Rissons, "Self-starting VCSEL-based optical frequency comb generator" *Optics Express* **28**, pp. 34860-34874 (2020).
- [4] Y. K. Chembo, A. Hmima, P. A. Lacourt, L. Larger, and J. M. Dudley, "Generation of Ultralow Jitter Optical Pulses Using Optoelectronic Oscillators With Time-Lens Soliton-Assisted Compression" *J. Light. Technol.* **27**, pp. 5160-5167 (2009). doi: 10.1109/JLT.2009.2028033.
- [5] L. Chusseau, E. Hemery, and J.-M. Lourtioz, "Period doubling in directly modulated InGaAsP semiconductor lasers" *Appl. Phys. Lett.* **55**, pp. 822-824 (1989).

# Oscillateur Optoélectronique (OEO) générant des peignes de fréquences et des trains d'impulsions optiques

B. Siquin, G. Loas, S. Bouhier, L. Frein, M. Vallet, M. Alouini, M. Romanelli

## Résumé

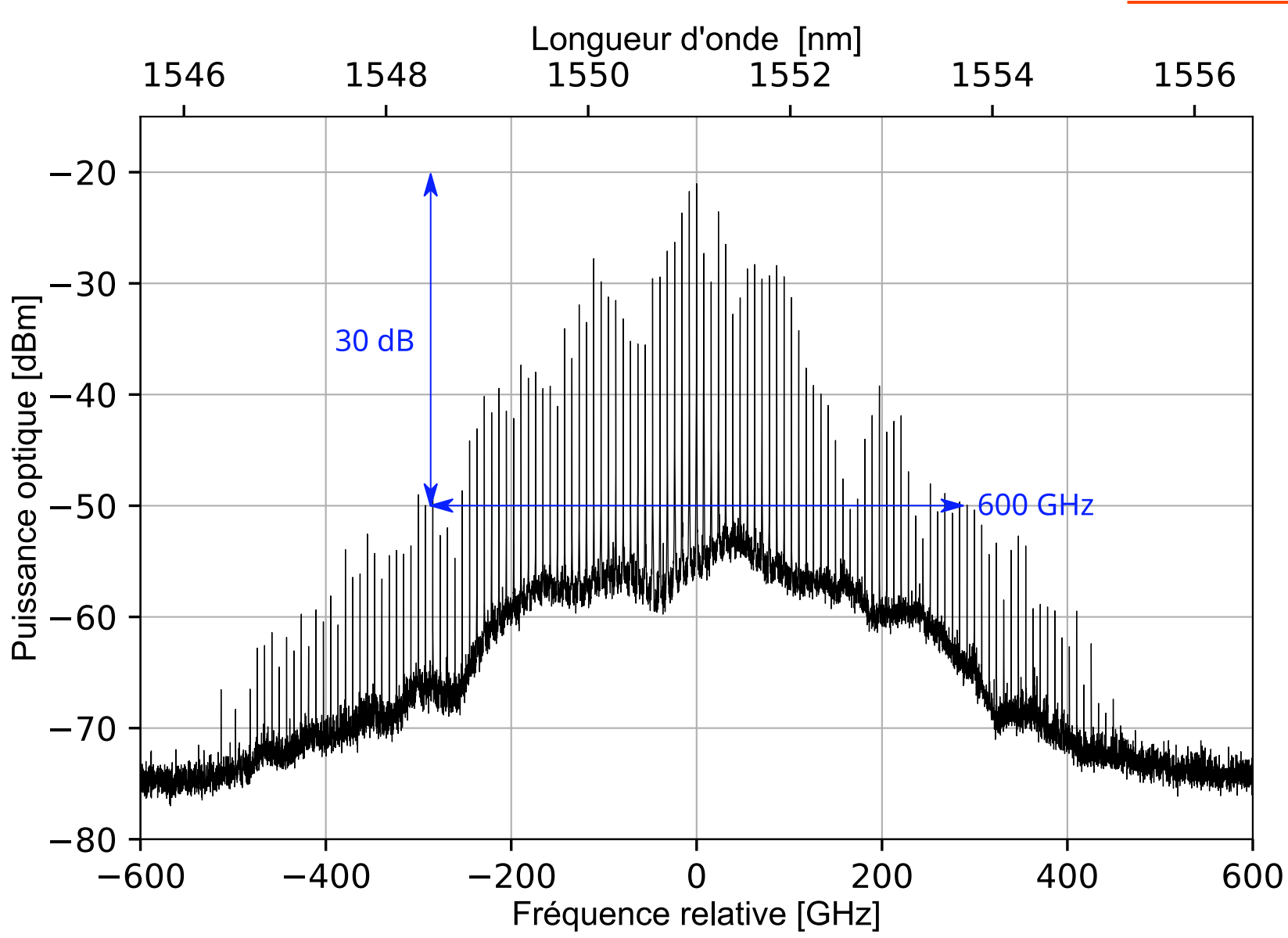
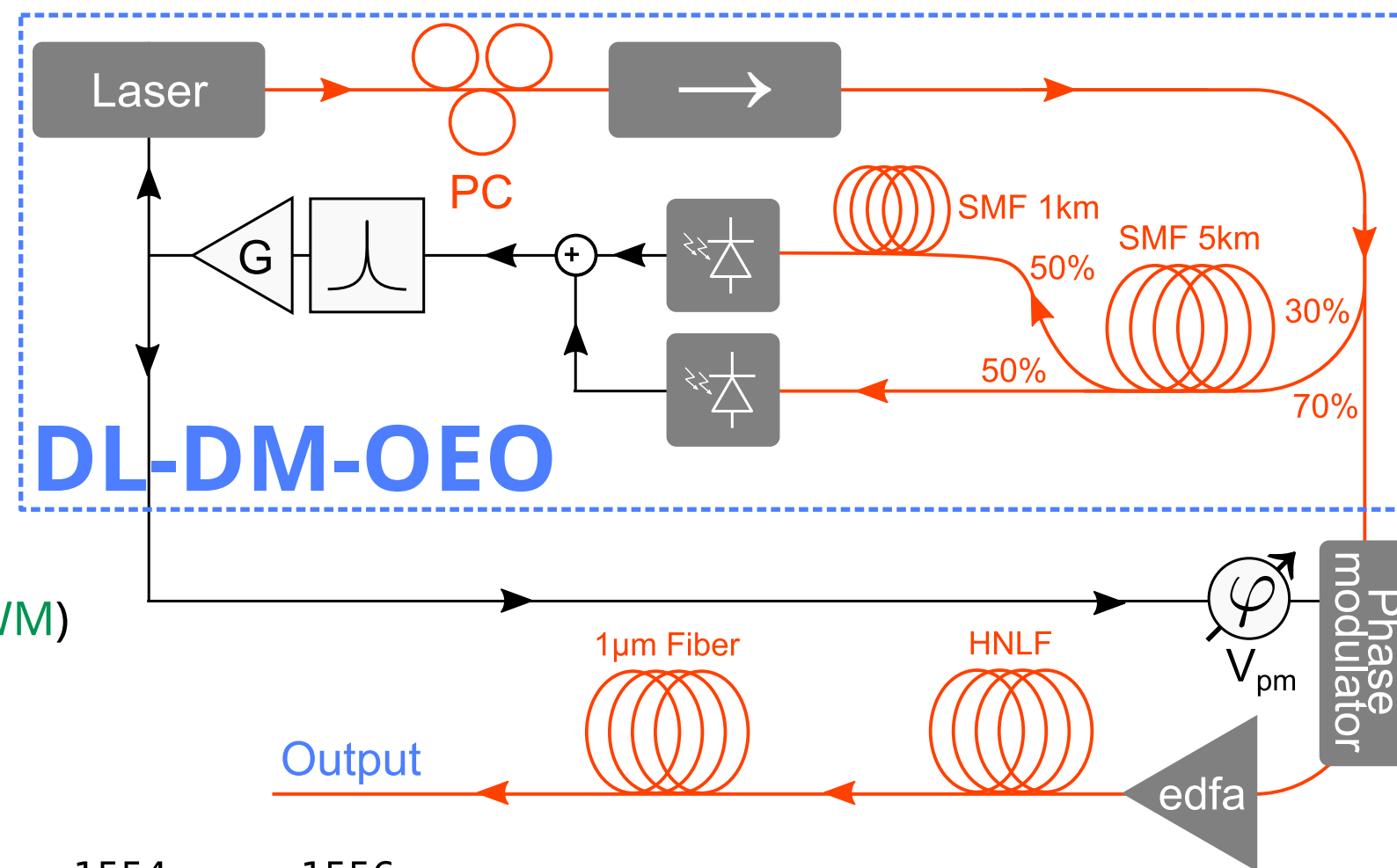
Démonstration de la génération de **peignes de fréquences** et de **régimes impulsions** optiques dans un OEO à modulation directe. L'automodulation de phase et la dispersion dans la fibre optique permettent une **compression** des impulsions tout en maintenant une **grande pureté spectrale** du signal RF dans le domaine électrique.

## Peignes de fréquences hors-boucle

**Principe** : Moduler la phase de la sortie optique d'un OEO avec sa sortie électrique  
 ⇒ Génération de **bandes latérales optiques** (ici séparées de 7,88 GHz)  
 Amplifier le signal optique + propagation dans une fibre  
 SPM ⇒ Élargissement de spectre ⇒ **Peigne de fréquence**  
 Dispersion négative + SPM ⇒ **Compression** d'impulsion ?

**DL-DM-OEO** : OEO à modulation directe à double boucle

**HNLF** : Fibre hautement non-linéaire  
 $L = 100 \text{ m}$ ,  $\gamma = 10 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$   
 Dispersion nulle @1550nm  
**1 $\mu\text{m}$  Fiber** : Fibre HI 1060 (@1550 nm)  
 $L = 5.7 \text{ km}$ ,  $\gamma = 1,72 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  (estimé par FWM)  
 ( $\gamma = 1,1 \text{ W}^{-1} \cdot \text{km}^{-1}$  dans la SMF28)  
 Dispersion inconnue

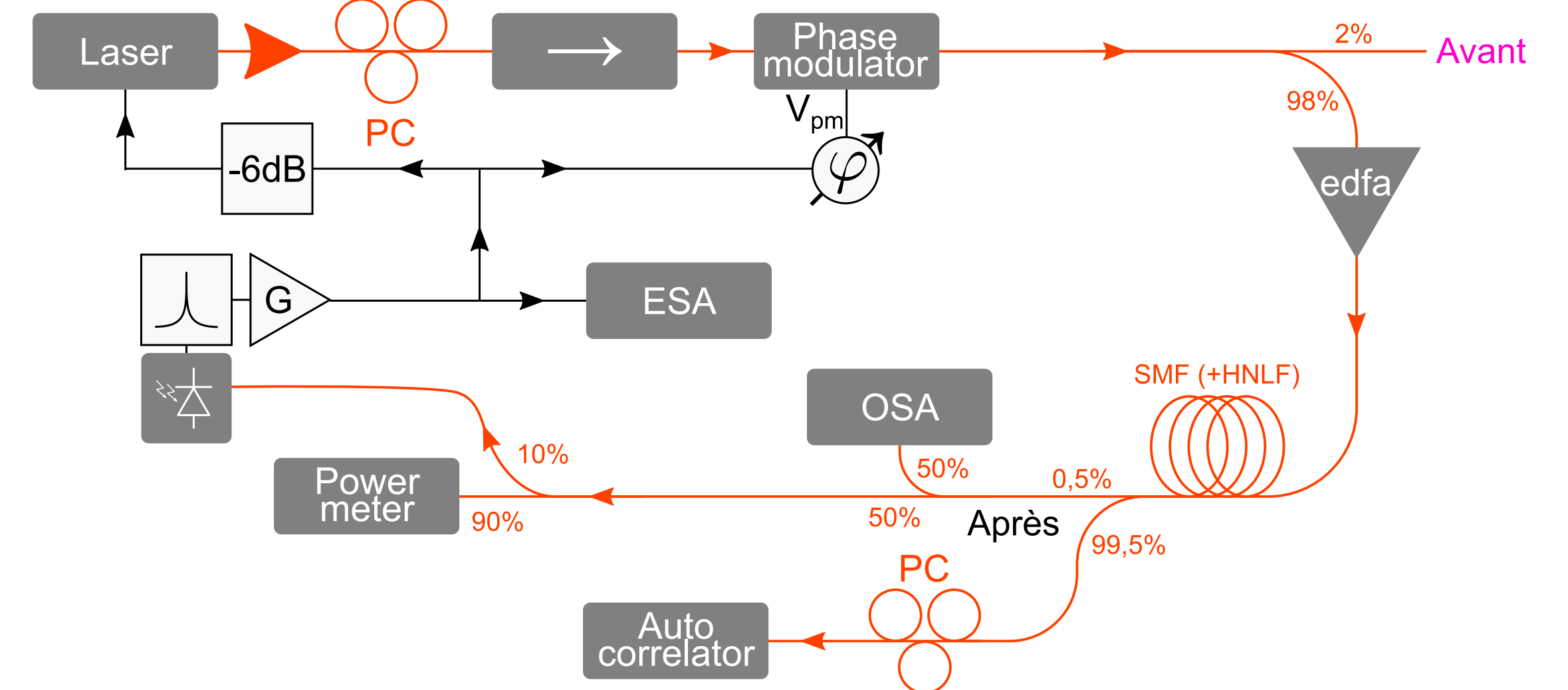


Résultats :

- ✓ **Peignes de fréquences optiques**  
 ⇒ Largeur à -30 dB de **600 GHz**
- ✗ **Pas d'impulsions**  
 ⇒ Pas de signal observé à l'auto-correlateur optique

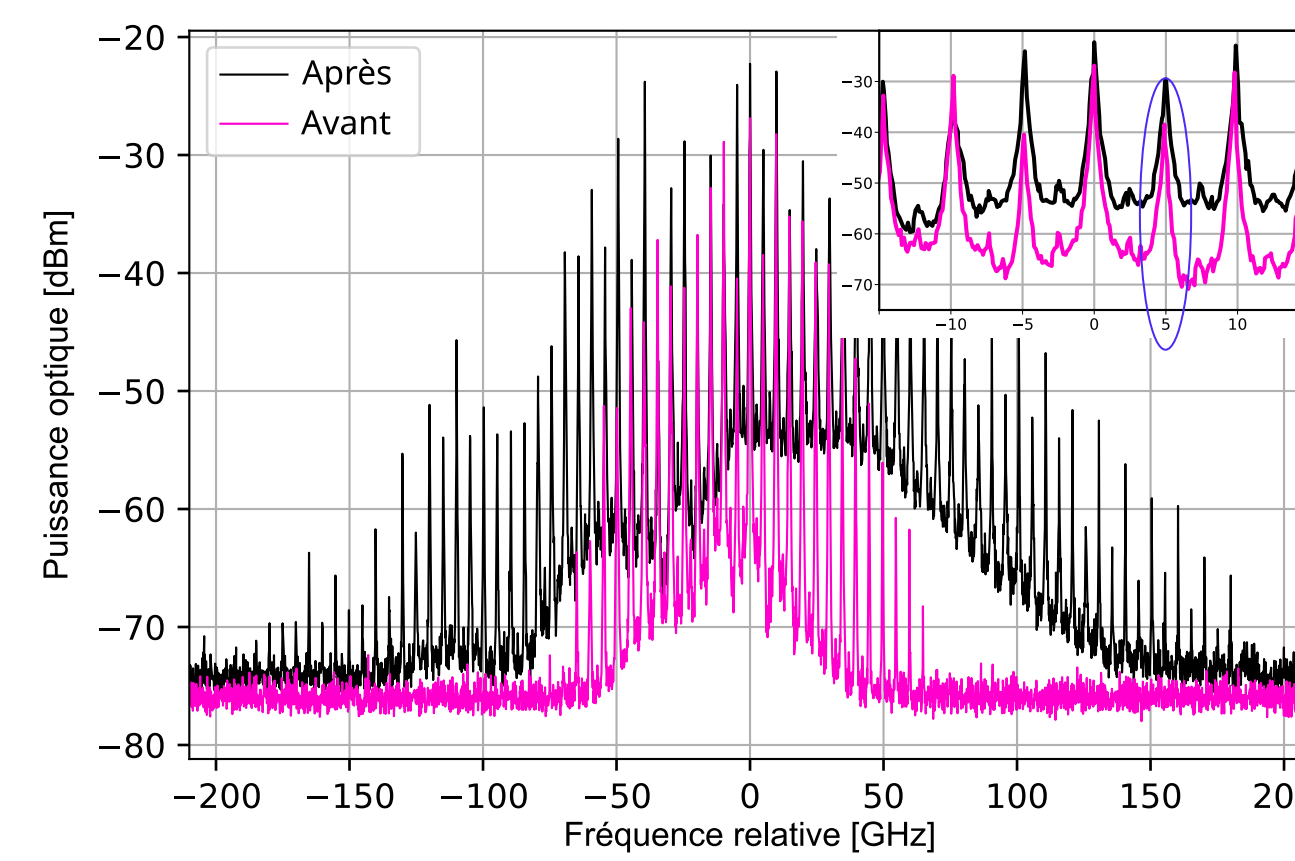
## Compression et Peigne de fréquences intra-boucle

**Principe** : Moduler la phase optique et exciter les non-linéarités de la fibre directement dans la boucle OEO  
 ⇒ Utiliser le **battement** du peigne à 10 GHz pour la **rétro-action**  
 ⇒ Peignes et impulsions **en sortie d'OEO**

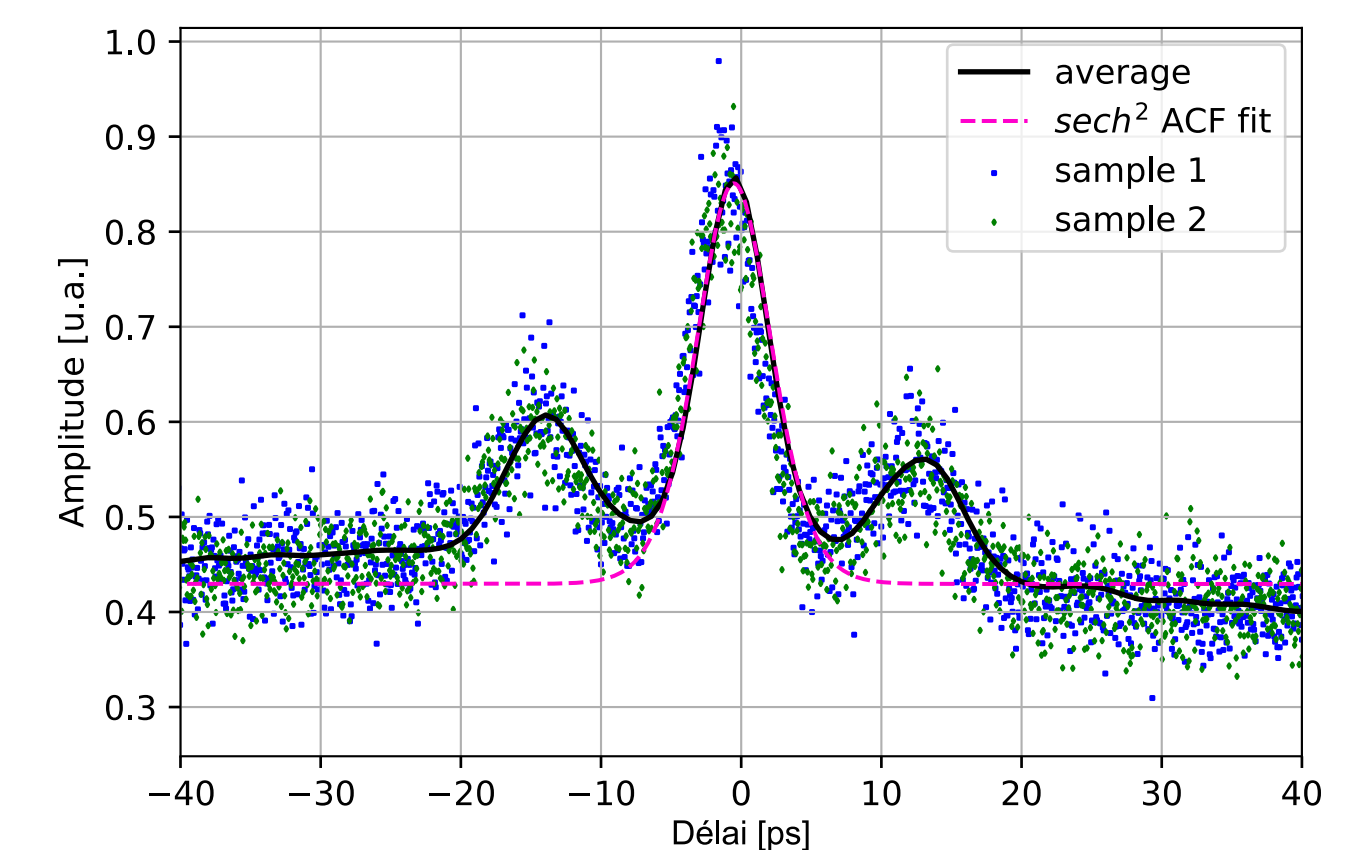
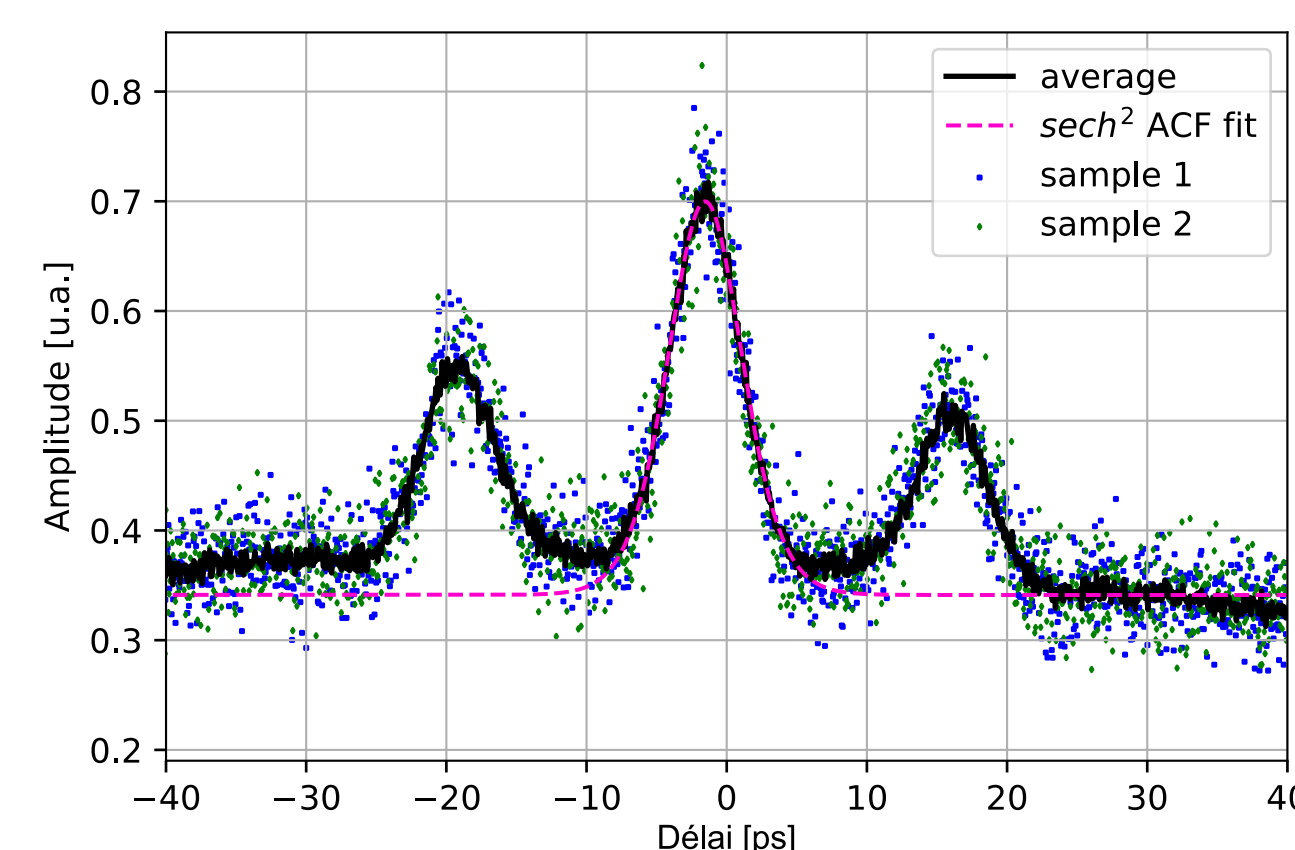
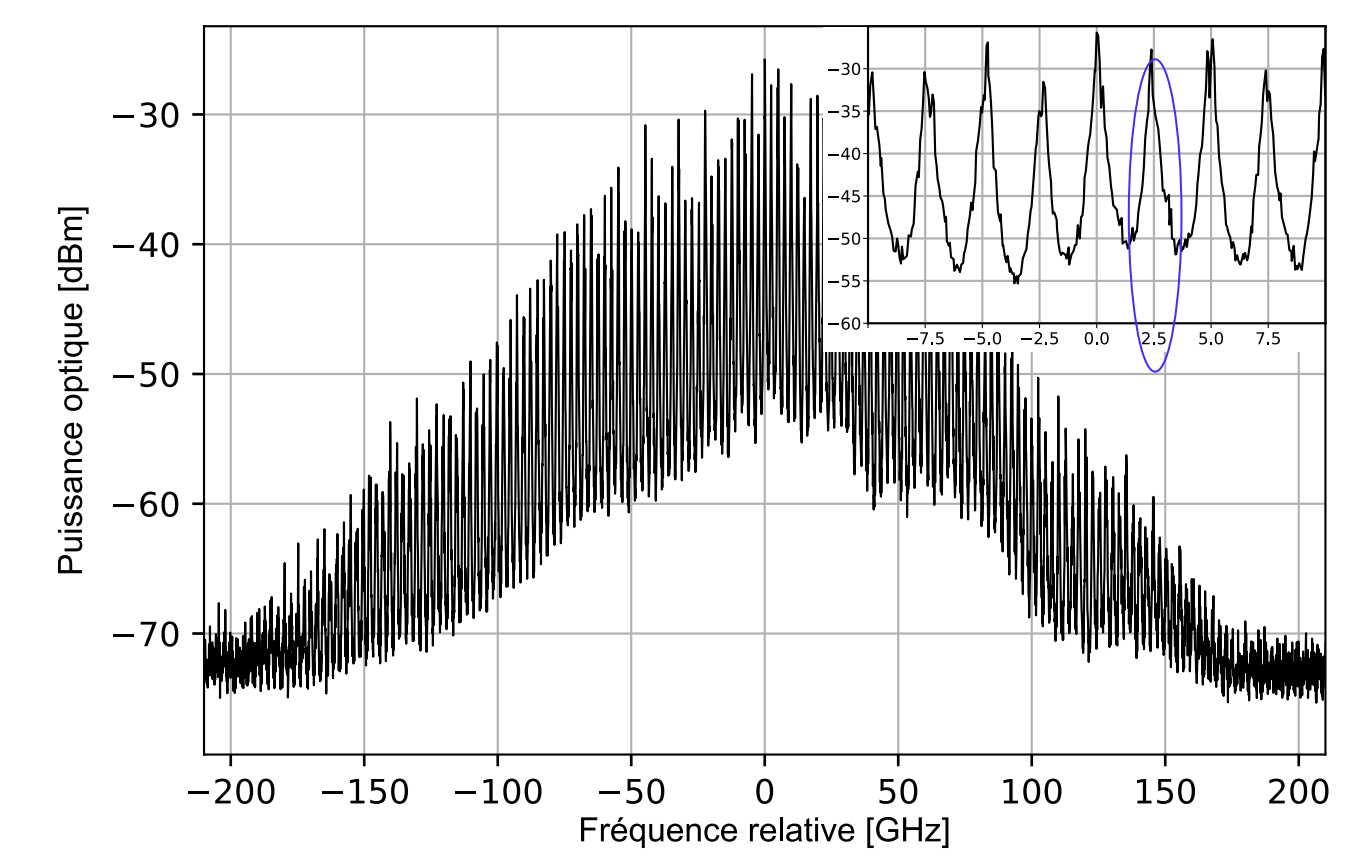


- ⇒ Utilisation du battement pour la modulation **directe** et de **phase**
- ⇒ Filtrage électrique à **10 GHz** avant **rétro-action**
- ⇒ Amplification dans la boucle (**EDFA**)
- ⇒ Fibras : 5 km de SMF28 **avec ou sans** 100 m de HNLF

### Doublément de période

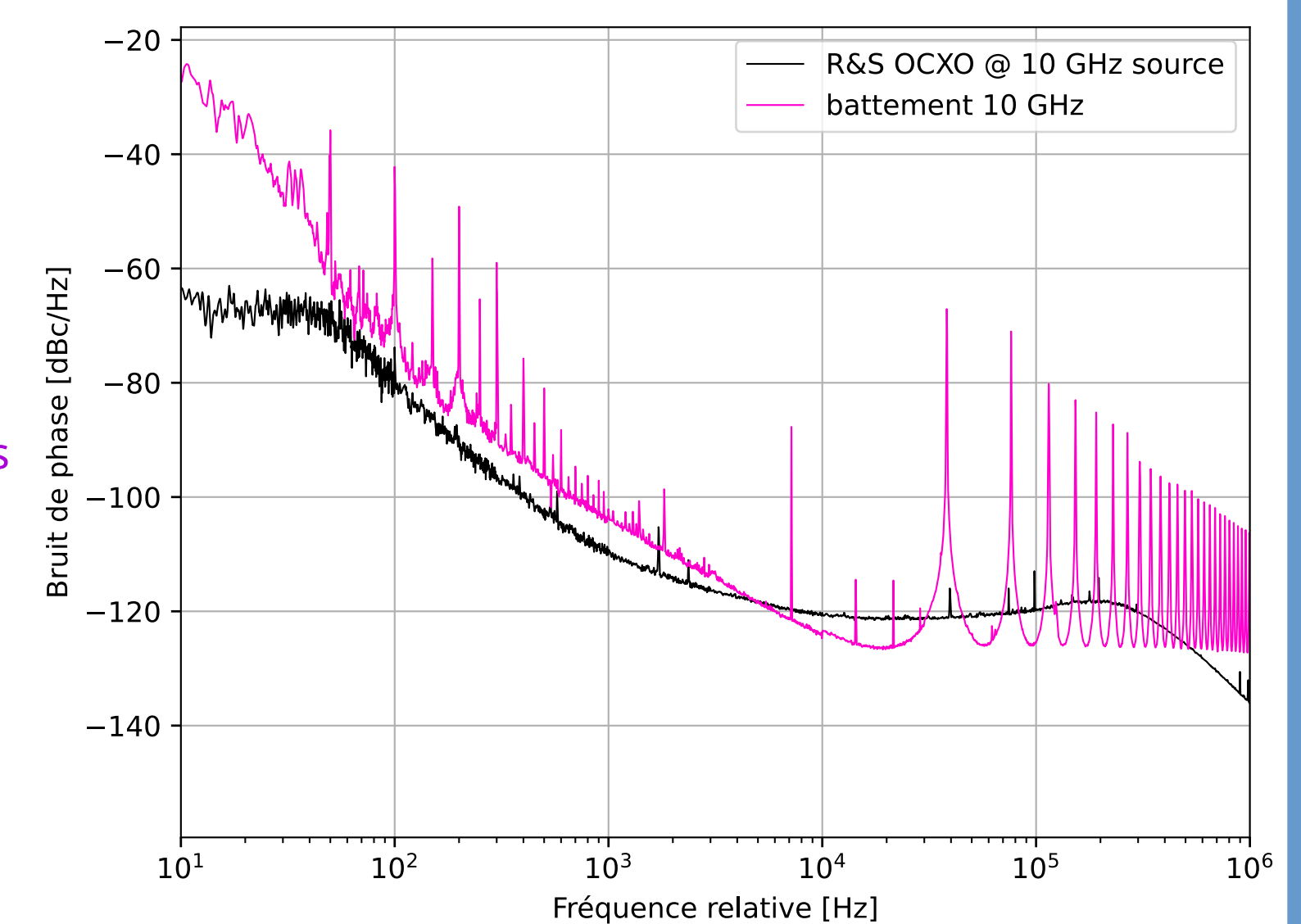


### Quadruplement de période



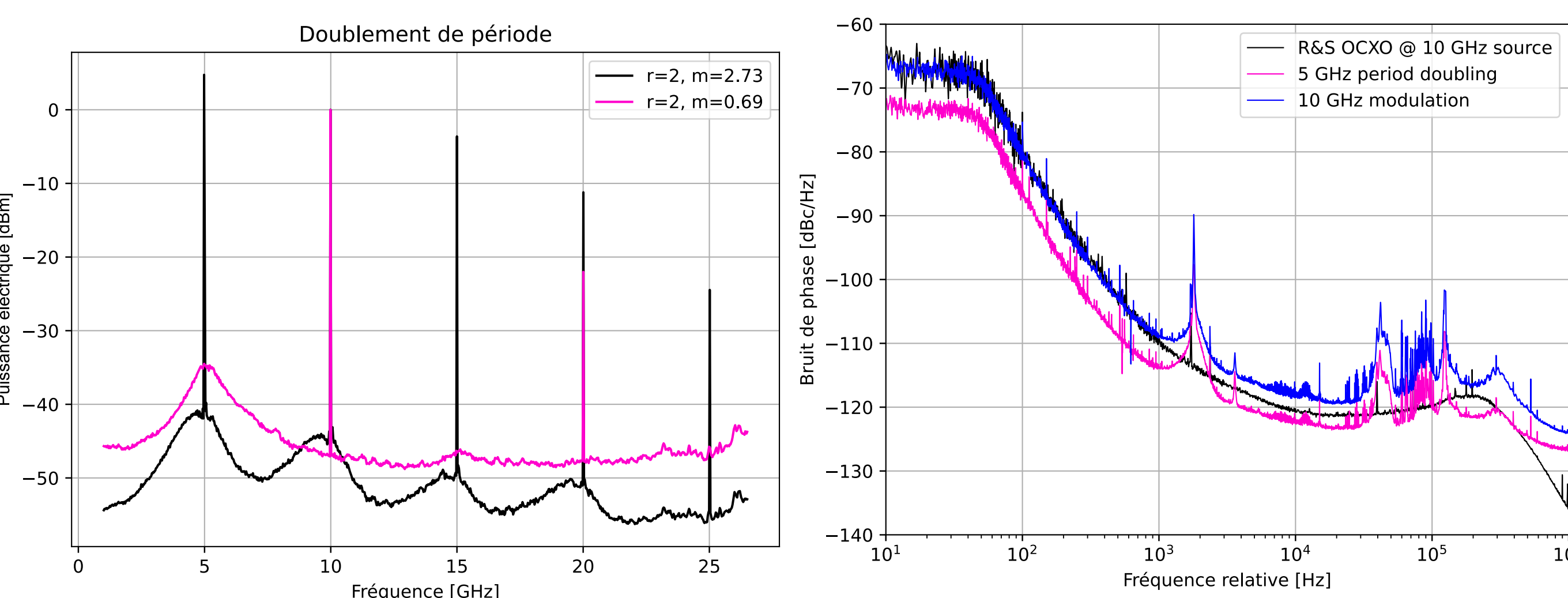
Résultats :

- ✓ **Peignes optiques**  
 ⇒ Largeur à -30 dB de **250 GHz**
- ✓ **Impulsions optiques**  
 ⇒ Train d'impulsions de durées estimés à **4 ps**
- ⚠ **Apparition de subharmoniques**  
 ⇒ Fréquence de répétition : **5 GHz** et **2,5 GHz**
- ✓ **Propriétés spectrales**  
 ⇒ Bruit de phase à 10 GHz à **-123 dBc/Hz** à 10 kHz de la porteuse  
 ⇒ Atteste d'une **cohérence** entre les raies espacées de 10 GHz



## Doublément de période

Laser DFB **modulé directement** par un sythétiseur de fréquence à 10 GHz  
 ⇒ Le **doublément de période** est dû à la dynamique du laser  
 Apparition de fréquences **sub-harmoniques** sous forte modulation lorsque la fréquence de relaxation avoisine la **moitié** de la fréquence de modulation



- ✓ **Génération sub-harmonique**  
 ⇒ 5 GHz, 15 GHz, 25 GHz  
 ⇒ SNR > 40 dB à 5 GHz
- ✓ **Pas de dégradation du bruit de phase**  
 ⇒ 6 dB d'écart entre le bruit à 10 et 5 GHz  
 ⇒ Bruit à 10 GHz proche du bruit de la source

## Références

[1] S. A. Diddams, K. Vahala, and T. Udem, "Optical frequency combs: Coherently uniting the electromagnetic spectrum" *Science* 369, p. eaay3676 (2020).  
 [2] B. Siquin, M. Romanelli, S. Bouhier, L. Frein, M. Vallet, and M. Alouini, "Low Phase Noise Direct-Modulation Optoelectronic Oscillator" *J. Light. Technol.*, 39, pp. 7788-7793 (2021). doi: 10.1109/JLT.2021.3111703.  
 [3] C. D. Munoz, M. Varon, F. Destic, and A. Rissons, "Self-starting VCSEL-based optical frequency comb generator" *Optics Express* 28, pp. 34860-34874 (2020).  
 [4] Y. K. Chembo, A. Hmila, P. A. Lacourt, L. Larger, and J. M. Dudley, "Generation of Ultralow Jitter Optical Pulses Using Optoelectronic Oscillators With Time-Lens Soliton-Assisted Compression" *J. Light. Technol.* 27, pp. 5160-5167 (2009). doi: 10.1109/JLT.2009.2028033.  
 [5] L. Chusseau, E. Hemery, and J.-M. Lourtioz, "Period doubling in directly modulated InGaAsP semiconductor lasers" *Appl. Phys. Lett.* 55, pp. 822-824 (1989).

## Conclusion

- ✓ **Génération de peignes de fréquences**  
 ⇒ **600 GHz** de largeur à -30 dB (hors-boucle)  
 ⇒ **250 GHz** de largeur à -30 dB (intra-boucle)
- ✓ **Génération de régimes impulsions**  
 ⇒ Impulsions de **4 ps** de durée
- ✓ **Identification du doublément de période**
- ✓ **Bruit de phase OEO comparable à l'état de l'art**  
 -123 dBc/Hz à 10 kHz de la porteuse (10 GHz)

## Perspectives

- Comprendre le rôle du chirp laser et de la dispersion de chaque fibre
- S'affranchir du modulateur de phase
- Élargir les peignes / Affiner les impulsions
- Optimisation du jitter
- Régime solitonique

## Applications

- Échantillonnage optique
- Multiplexage WDM
- LiDAR, RADAR