



Fonctions Optiques pour les
Technologies de l'information



Génération de dual-combs dans les boucles à décalage de fréquence. Quelques exemples d'applications aux capteurs et au traitement de signaux

H. Guillet de Chatellus

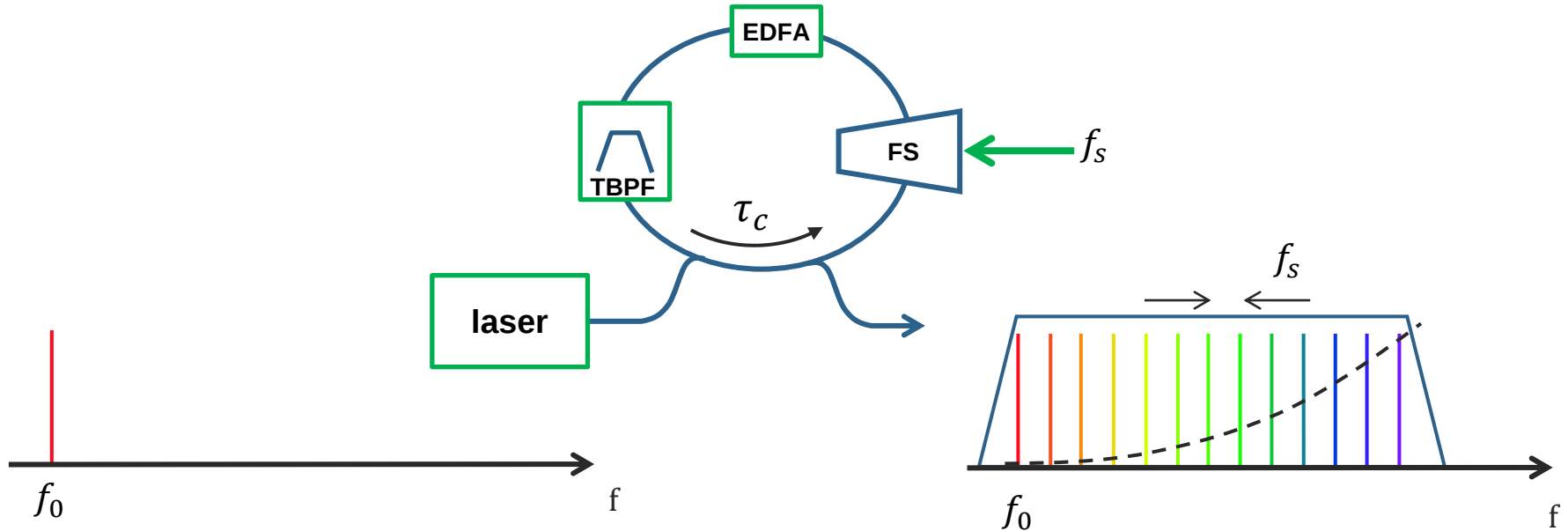
Univ Rennes, CNRS, Institut FOTON - UMR 6082, 35000 Rennes, France

- 1) Peignes de fréquences dans les boucles à décalage de fréquence
- 2) Dual-comb pour la télémétrie Lidar
- 3) Dual-comb pour les capteurs à fibre distribués
- 4) Corrélation de signaux large bande
- 5) Analyse spectrale de signaux large bande

- 1) Peignes de fréquences dans les boucles à décalage de fréquence
- 2) Dual-comb pour la télémétrie Lidar
- 3) Dual-comb pour les capteurs à fibre distribués
- 4) Corrélation de signaux large bande
- 5) Analyse spectrale de signaux large bande

Boucles à décalage de fréquence (BDF)

Architecture



Champ électrique en sortie

$$E_{out}(t) = E_0 \sum_{0 \leq n \leq N} g(n) e^{-i2\pi(f_0 + nf_s)t} e^{i2\pi\left(nf_0 + \frac{n(n+1)}{2}f_s\right)\tau_c}$$

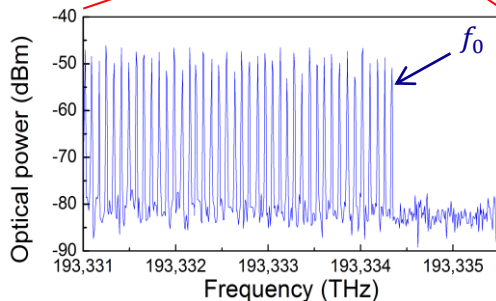
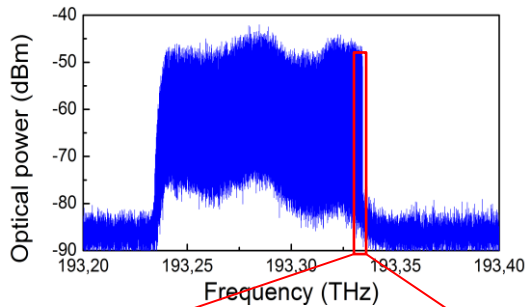
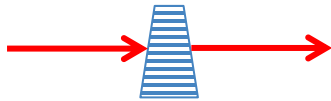
fréquences du peigne

phase spectrale quadratique

- ✓ peignes de fréquences, d'espacement f_s
- ✓ phase spectrale quadratique (équivalente à GVD) régie par : $f_s \tau_c$.

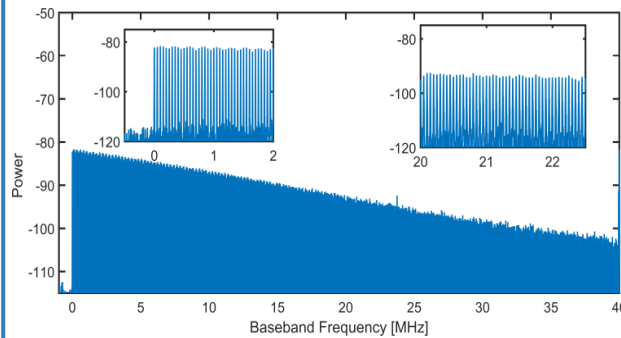
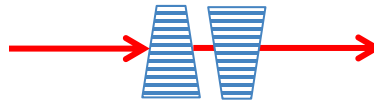
Génération de peignes de fréquences dans les BDF

Modulateur acousto-optique simple (AOFS)



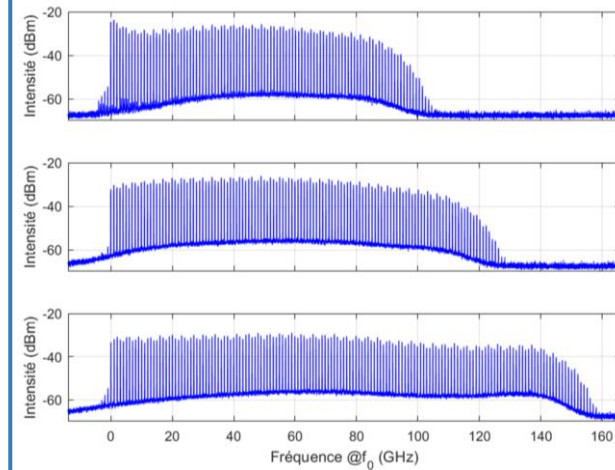
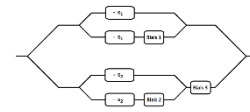
- $f_s = -80$ MHz, 1200 lignes

Modulateur acousto-optique double (AOFS)



- $f_s = 50$ kHz, 800 lignes

Modulateur électro-optique (SSB-MZM)



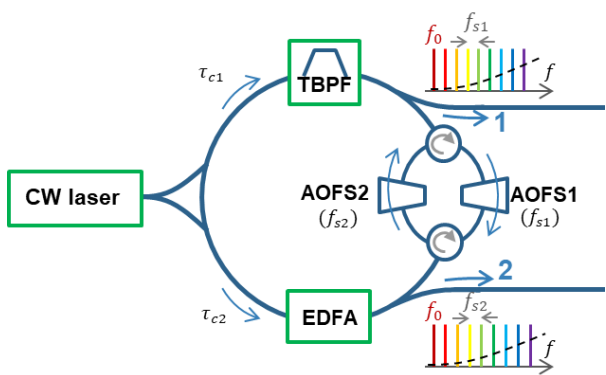
- $f_s = 1$ GHz, 120 lignes

- 1) Peignes de fréquences dans les boucles à décalage de fréquence
- 2) Dual-comb pour la télémétrie Lidar
- 3) Dual-comb pour les capteurs à fibre distribués
- 4) Corrélation de signaux large bande
- 5) Analyse spectrale de signaux large bande

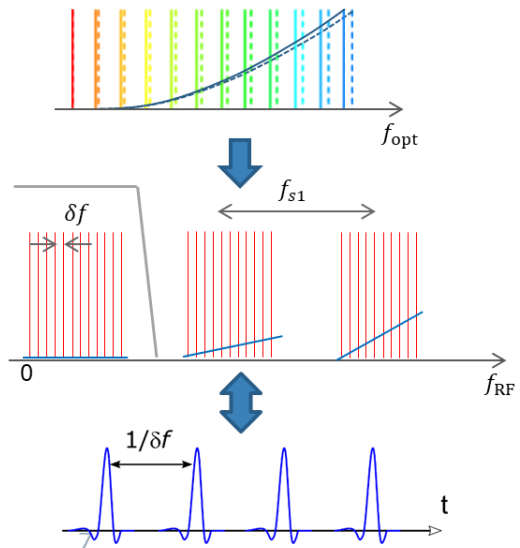
« Duals comb » dans les BDF

Principe

Génération de deux peignes mutuellement cohérents, d'espacements f_{s1} , $f_{s2} = f_{s1} + \delta f$

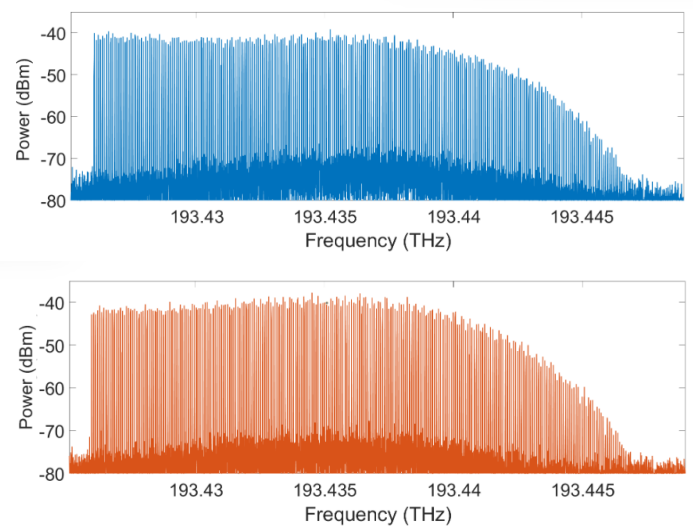


Interférométrie multi-hétérodyne

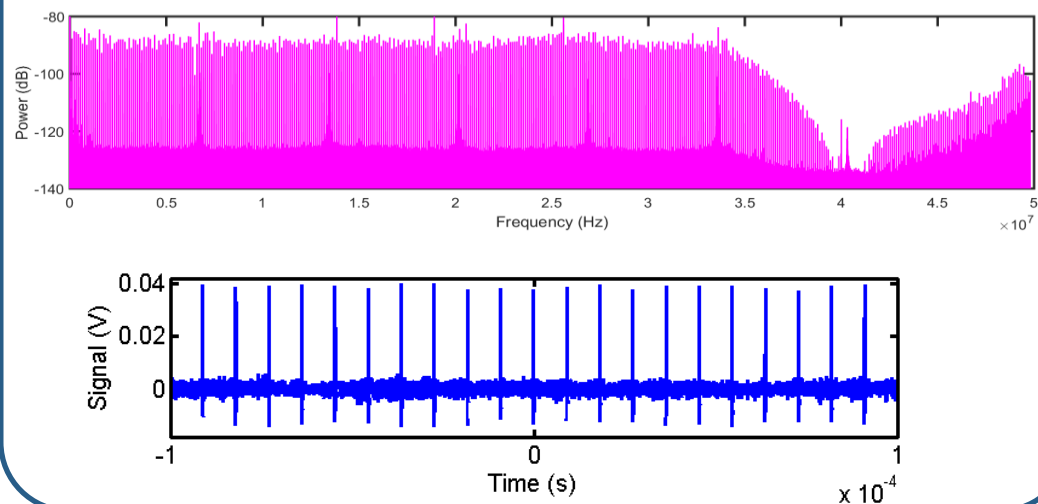


Résultats expérimentaux

Peignes optiques

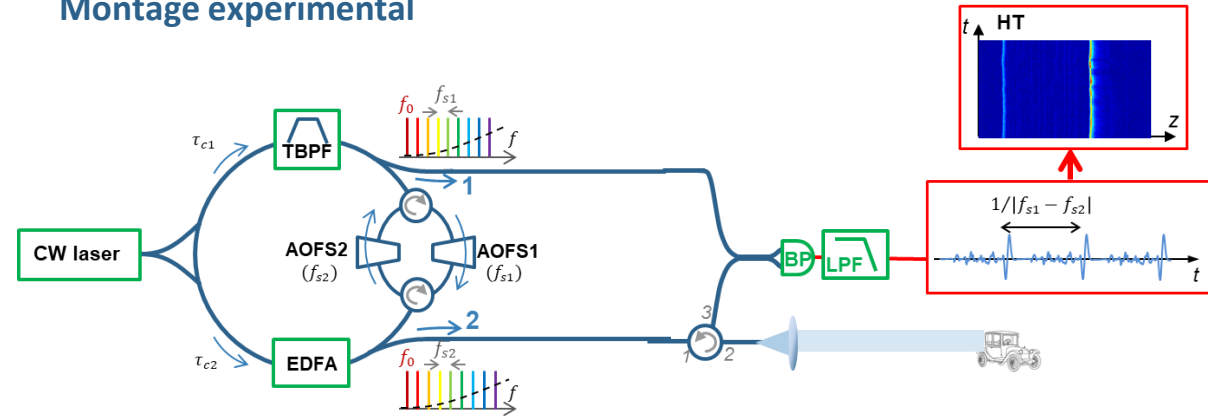


Peigne hétérodyne

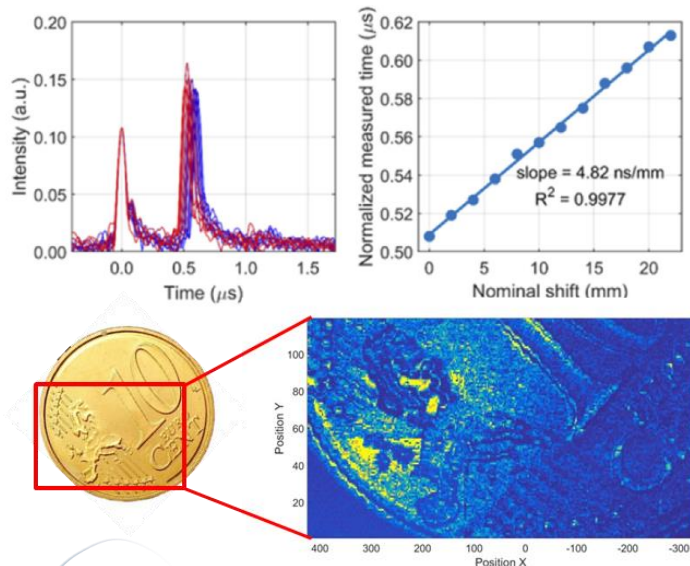


Télémétrie Lidar dual-comb

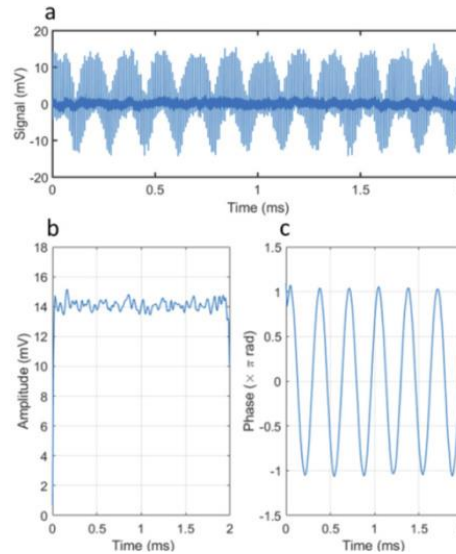
Montage expérimental



Mesures d'amplitude



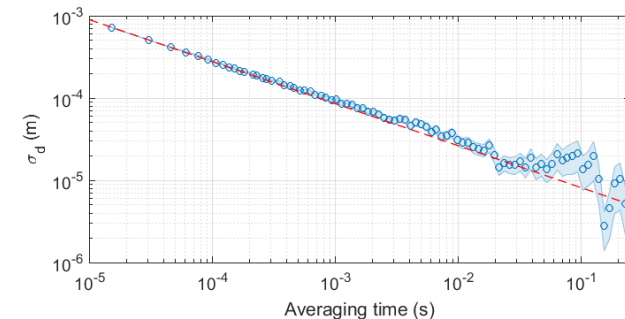
Mesures de phase



Performances

- résolution : < 1 cm
(largeur spectrale du peigne : 16 GHz)
- BP de détection < 10 MHz
- distance d'ambiguïté: 2 m
(espacement du peigne : 80 MHz)
- taux d'acquisition : 50 μ s
(différence d'espacement : $\delta f = 20$ kHz)

Précision de la mesure



V. Billault, et al., *All-optical coherent pulse compression for dynamic laser ranging using an acousto-optic dual comb*, Opt. Express **29**, 21369-21385 (2021)

- **ANR COCOA (ANR-21-CE42-0025)**

Lidar cohérent à compression d'impulsions analogique tout-optique

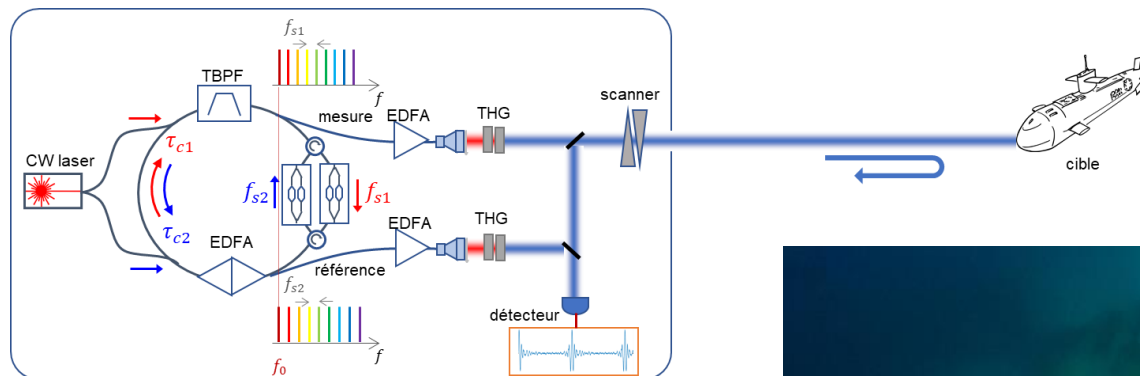
(H. Guillet de Chatellus, LIPhy, FOTON), 2021-2025



- **ANR Astrid RACoon (ANR-23-ASZC-0002)**

Lidar dual-comb cohérent adapté au milieu marin

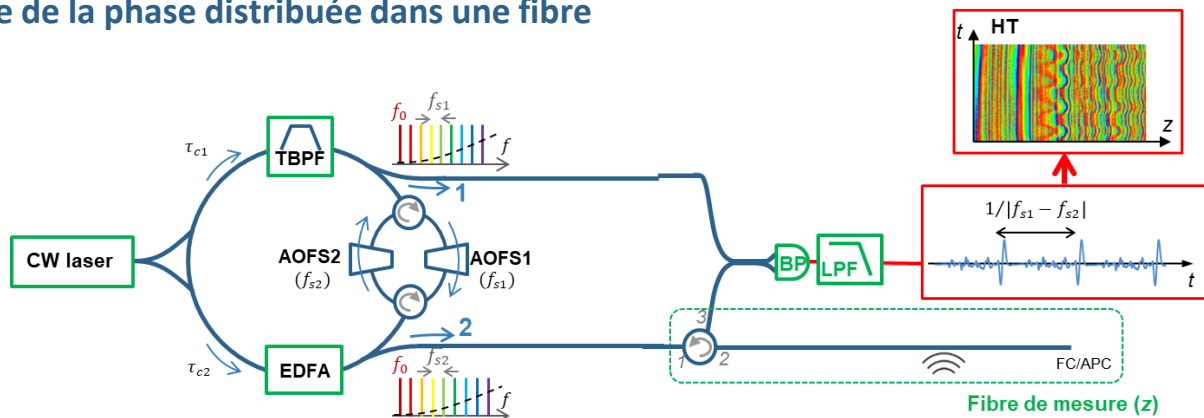
(M. Brunel, FOTON), 2023-2027



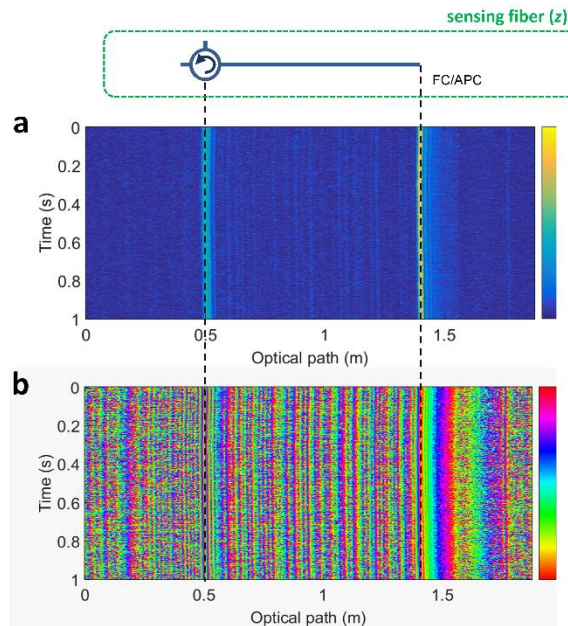
- 1) Peignes de fréquences dans les boucles à décalage de fréquence
- 2) Dual-comb pour la télémétrie Lidar
- 3) Dual-comb pour les capteurs à fibre distribués
- 4) Corrélation de signaux large bande
- 5) Analyse spectrale de signaux large bande

Capteurs à fibre distribués dual-comb

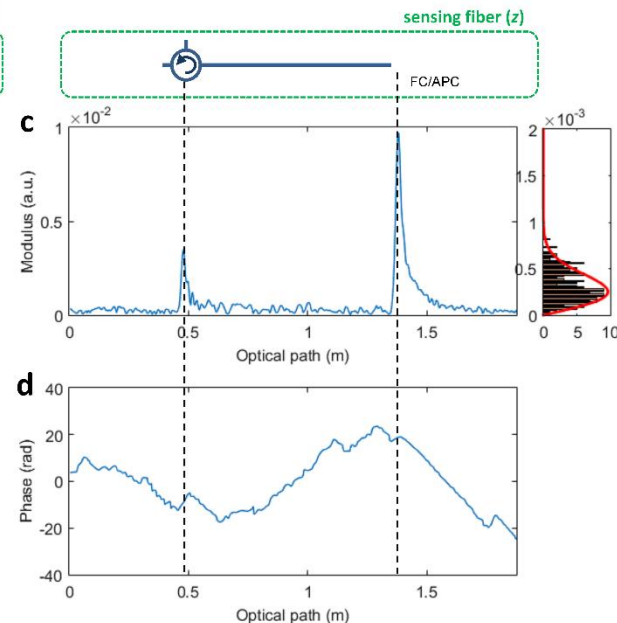
Mesure de la phase distribuée dans une fibre



Amplitude



Phase



L. Alliot de Borggraef et al., *Phase-sensitive distributed Rayleigh fiber sensing enabling the real-time monitoring of the refractive index with a sub-cm resolution by all-optical coherent pulse compression*, Opt. Express **31**, 1167-1180 (2023)

Extraction de la variation d'indice

Méthode

Indice local:

$$n(z) = n_0 + \epsilon(z)$$

Signal de détection:

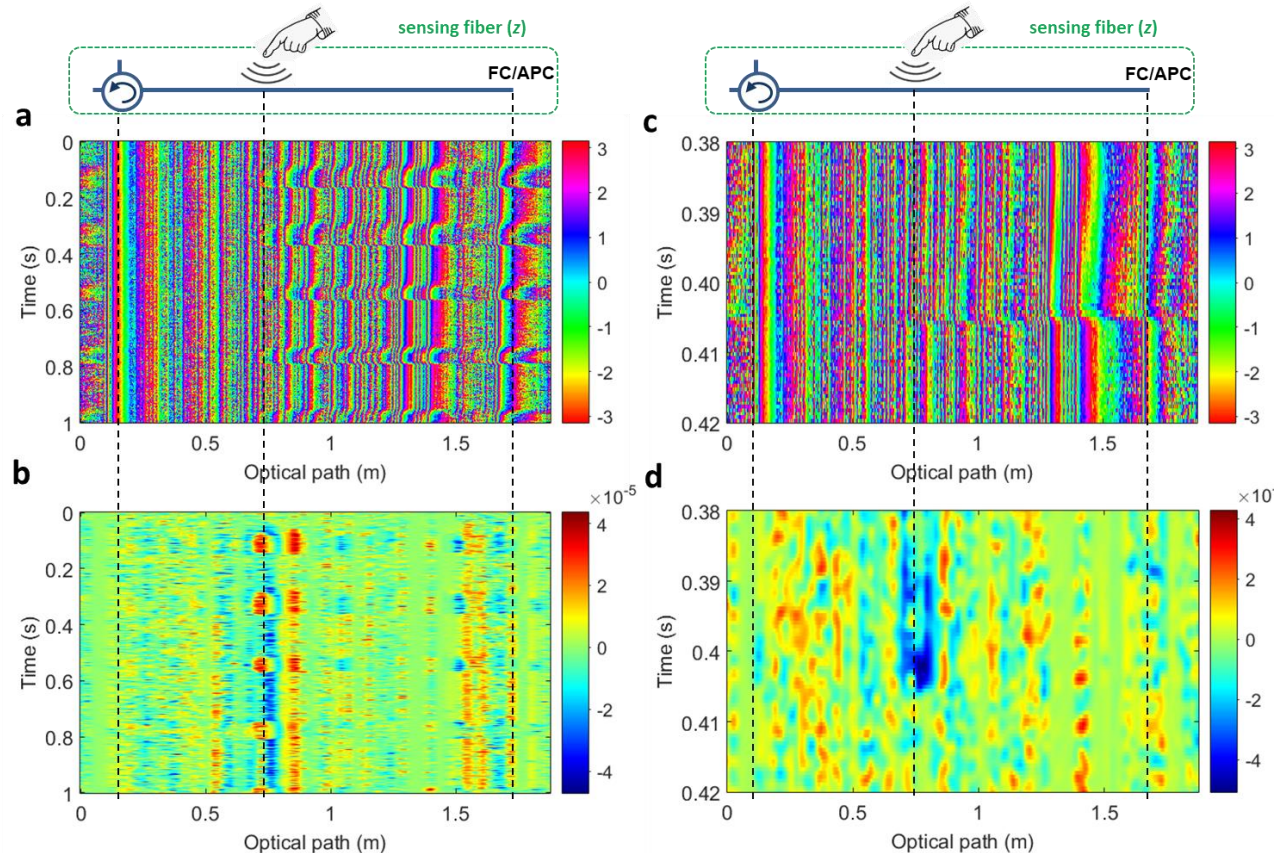
$$I(t) = I_{\text{ref}}(t) \times e^{i4\pi \frac{f_0}{c} \int_0^{\frac{c\Delta f}{2n_0 f_s^2} t} \epsilon(z) dz}$$

Extraction de l'indice local:

$$\epsilon(z) = \frac{1}{4\pi f_0} \frac{c}{dz} \frac{d\phi(z)}{dz}$$

+ filtrage/moyenne

Résultats expérimentaux



Performances

Fibre PM commerciale
(Rayleigh: -100 dB/mm)

résolution indice : 10^{-5} ,
résolution temporelle : 1 ms
résolution spatiale : 2 cm
distance d'ambiguïté : 1.4 m

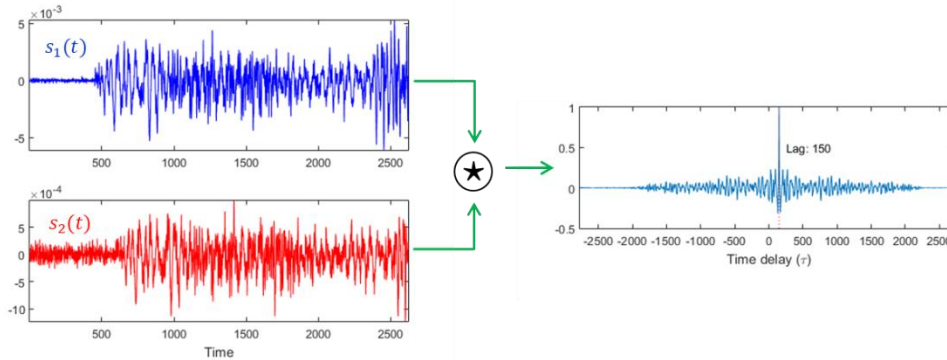
- ANR Astrid **MECHOU** (ANR-22-ASTR-0026)
Mesure d'écoulement à haute résolution par boucle à
décalage de fréquence bidirectionnelle
(V. Crozatier, Thales TRT, FOTON, LIPhy, ENSTA), 2022-2026



- 1) Peignes de fréquences dans les boucles à décalage de fréquence
- 2) Dual-comb pour la télémétrie Lidar
- 3) Dual-comb pour les capteurs à fibre distribués
- 4) **Corrélation de signaux large bande**
- 5) Analyse spectrale de signaux large bande

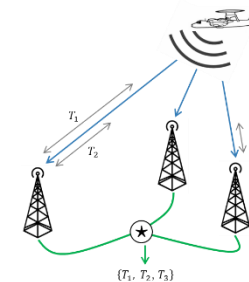
Fonction de corrélation croisée (FCC):

Mesure du degré de similarité de deux signaux en fonction leur retard τ : $C_{1,2}(\tau) = \langle s_1(t)s_2(t + \tau) \rangle$

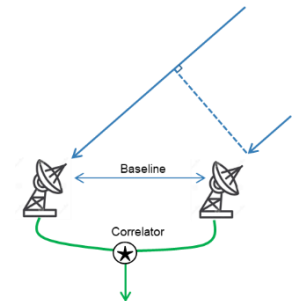


Applications :

Localisation d'émetteurs



Interférométrie

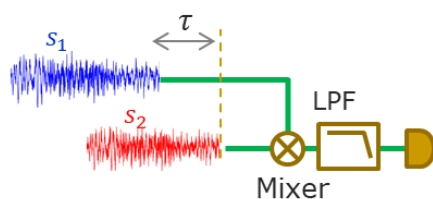


Approche numérique :

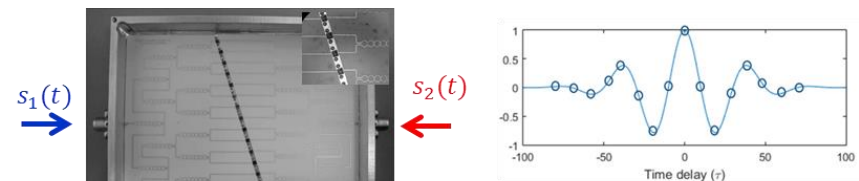
- Numérisation : $f_{éch}$
- Calcul à la volée : $2 \times N \times f_{éch}$ ops /s
(N : nombre de points de la FCC /nombre de retards)

Approches analogiques :

1. « Scanning correlator »



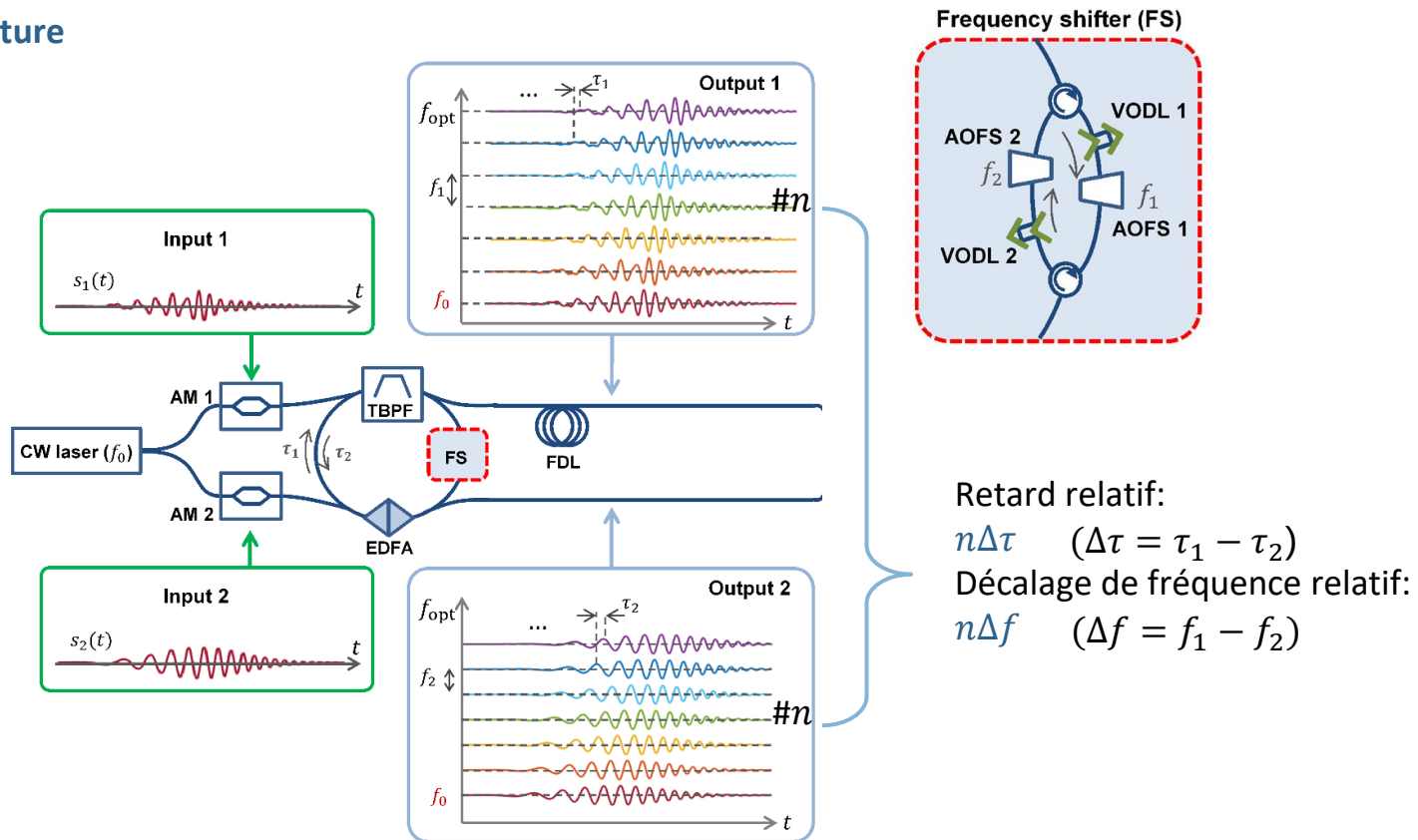
2. Corrélateur à retards



Holler, IEEE TIM (2011)

Corrélation de signaux dans une BDF

Architecture



BDF #1 produit des répliques de $s_1(t)$

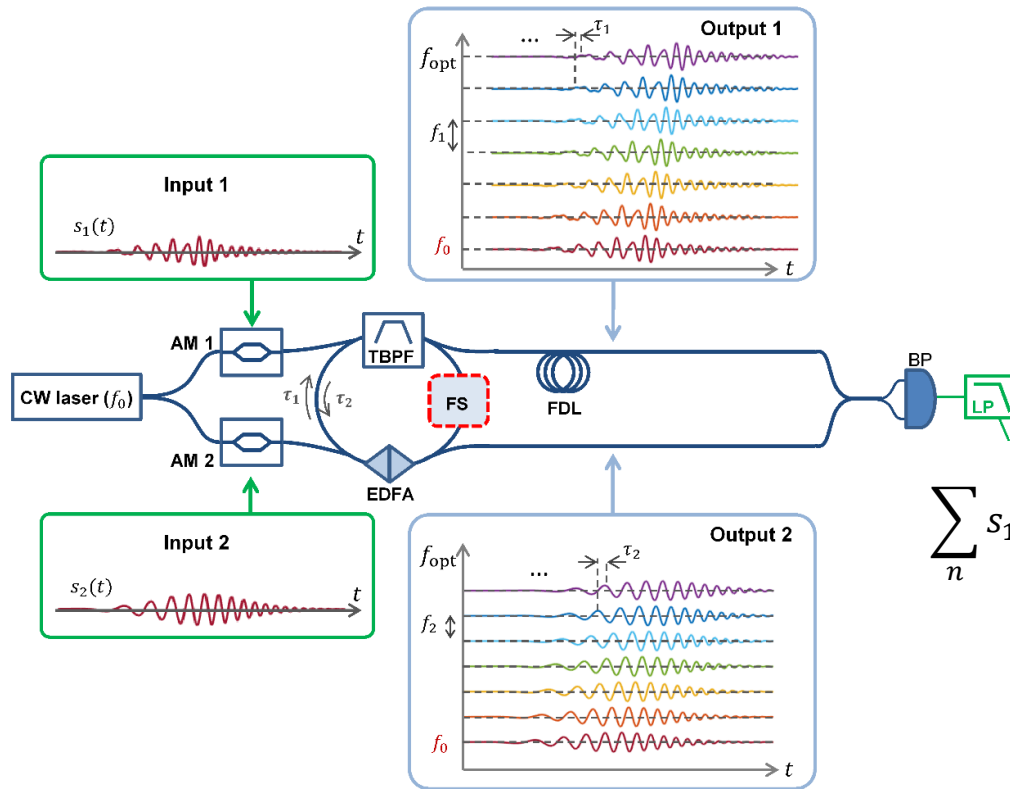
La réplique # n est retardée de $n\tau_1$ et décalée en fréquence de nf_1

BDF #2 produit des répliques de $s_2(t)$

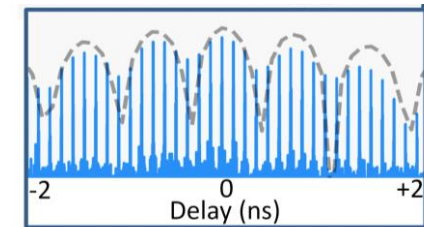
La réplique # n est retardée de $n\tau_2$ et décalée en fréquence de nf_2

Corrélation de signaux dans une BDF

Architecture



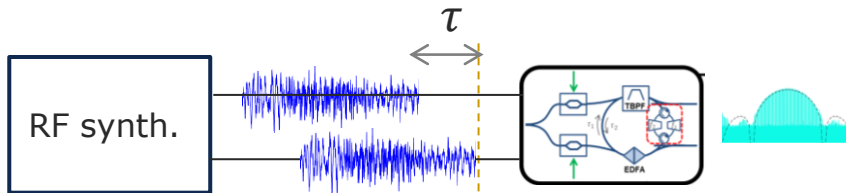
$$\sum_n s_1(t) s_2(t + n\Delta\tau) \cos(2\pi n\Delta f t + \varphi_n)$$



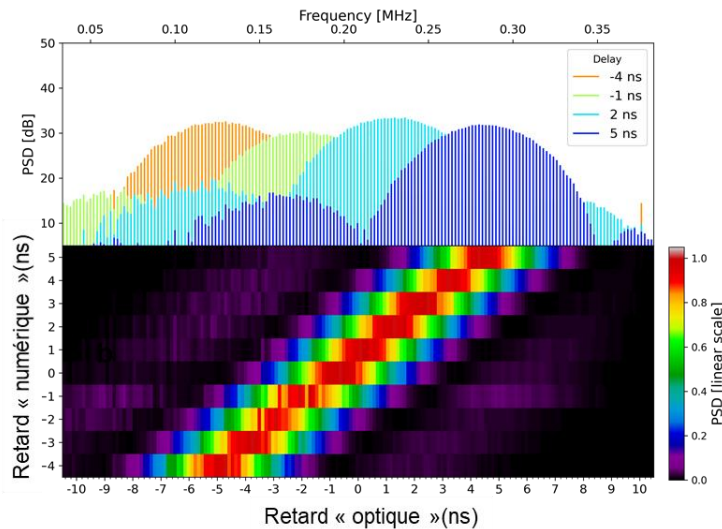
La composante fréquentielle à $n\Delta f$ donne la valeur de la FCC à $n\Delta\tau$

Mesure de retards temporel

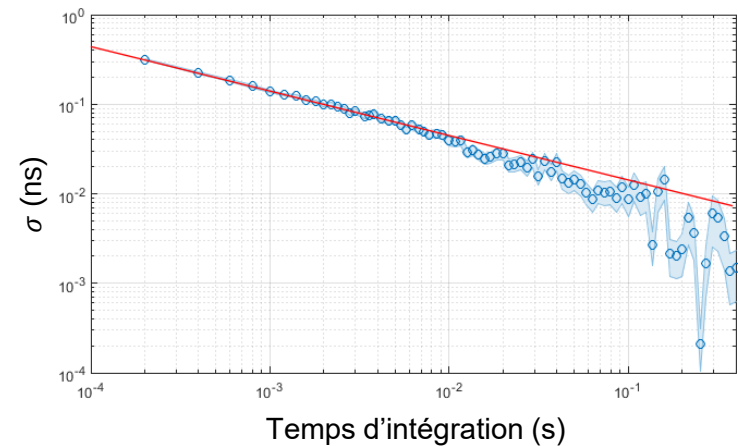
Principe



Deux versions retardées du même signal (120 MHz BW) sont envoyées vers le corrélateur.



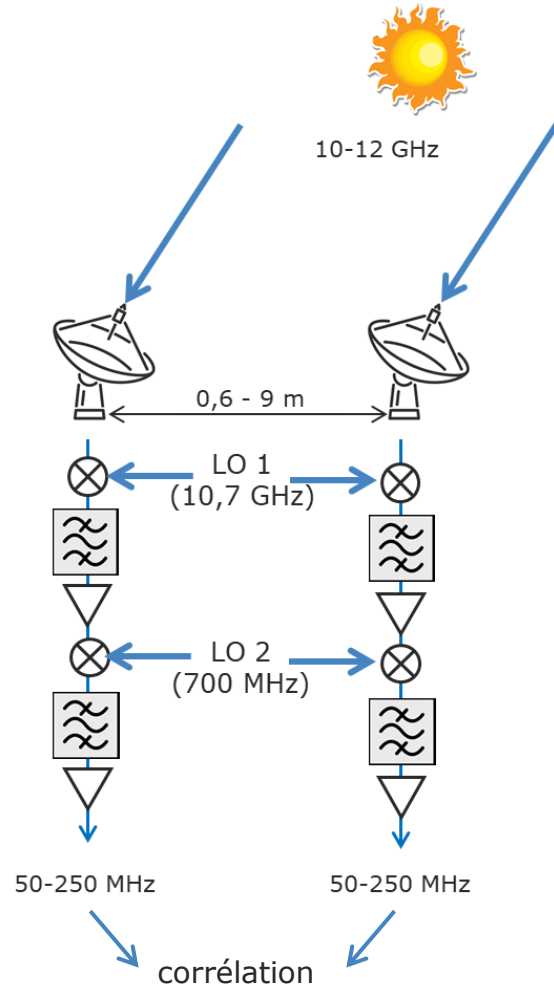
Précision sur la mesure de retards



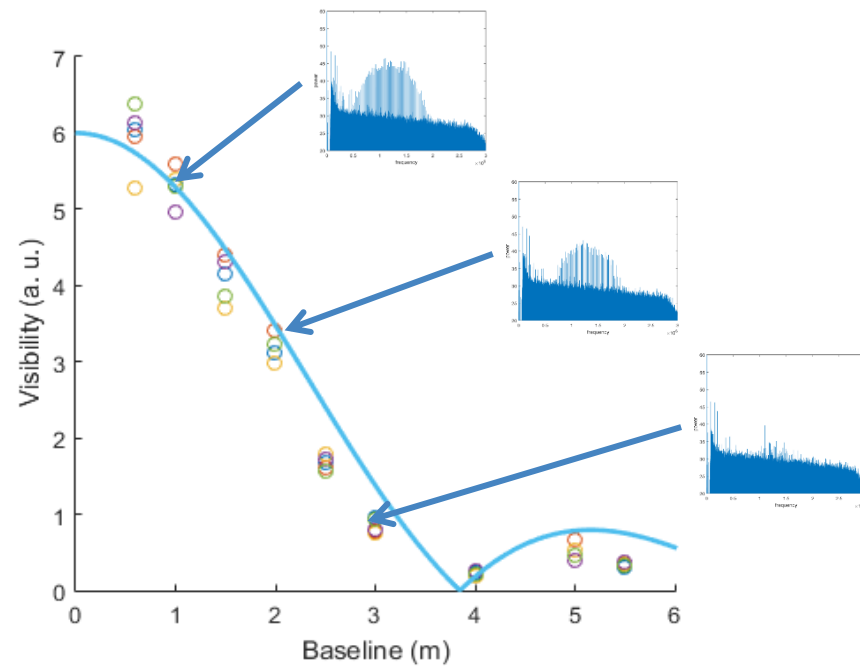
Précision : 10 ps (100 ms intégration)
<< 8,3 ns (temps de cohérence du signal d'entrée)

Expérience 13cm (Grenoble 2022, Rennes 2024)

Principe de l'interférométrie radio

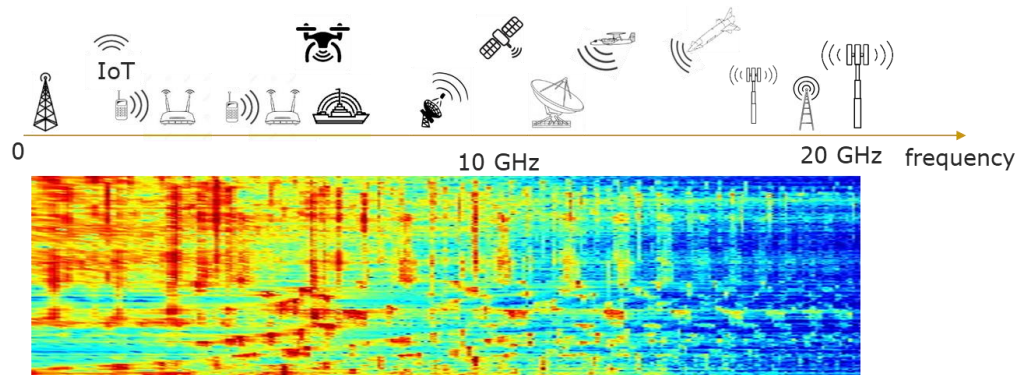


Résultats expérimentaux (corrélation photonique)

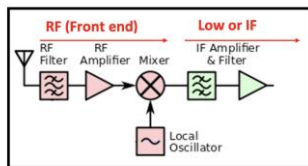


- 1) Peignes de fréquences dans les boucles à décalage de fréquence
- 2) Dual-comb pour la télémétrie Lidar
- 3) Dual-comb pour les capteurs à fibre distribués
- 4) Corrélation de signaux large bande
- 5) Analyse spectrale de signaux large bande

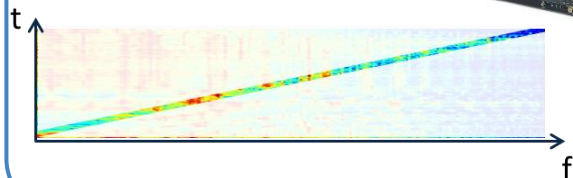
Analyse spectrale de signaux



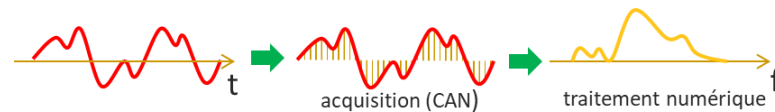
Techniques analogiques



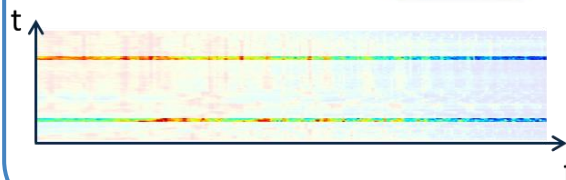
Analyseur de spectre électrique



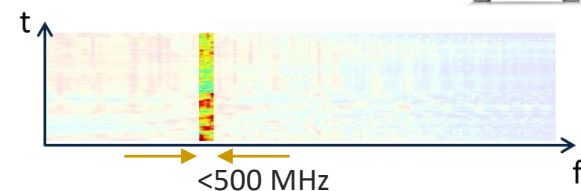
Techniques numériques



Oscilloscope rapide



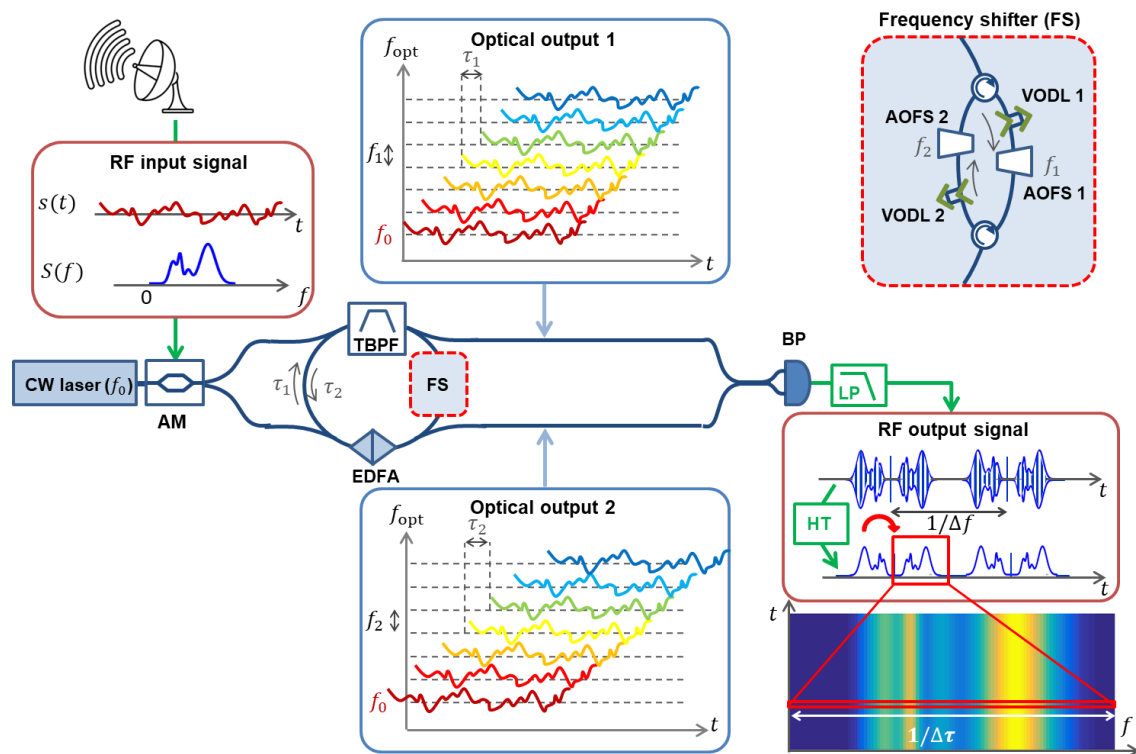
Analyseur de spectre temps-réel



➔ Comment faire l'analyse spectrale de signaux radio large bande (0-20 GHz), en temps réel (100% de probabilité d'interception) ?

Analyse spectrale dans une BDF

Architecture

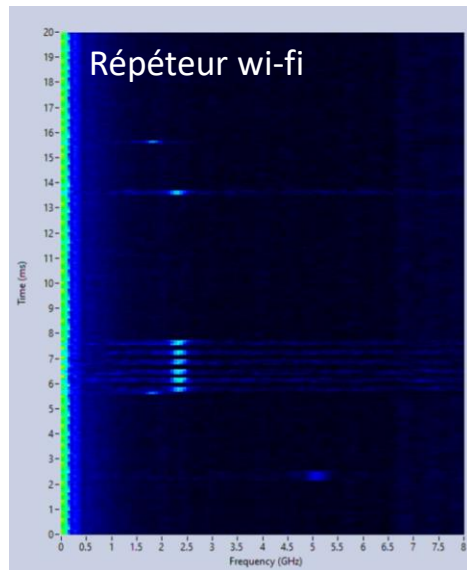
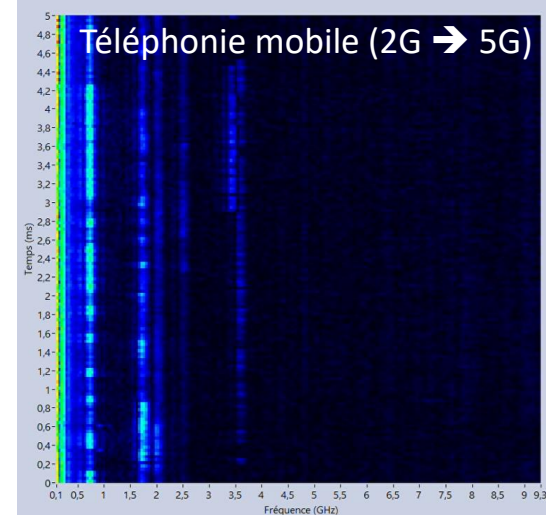
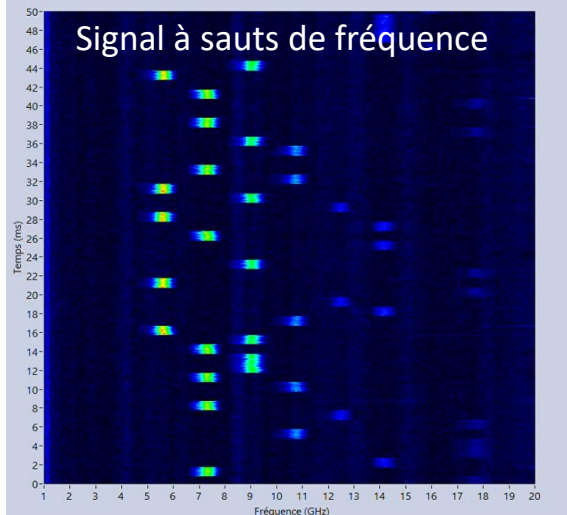


Entrée	TF trace temporelle	Trace temporelle
$s_1(t), s_2(t)$	Corrélation croisée (FCC)	Densité spectrale de puissance croisée (CPSD)
$s_1(t), s_1(t)$	Auto-corrélation	Densité spectrale de puissance (PSD)

Projection fréquence-temps
(« frequency-to-time mapping ») :

Le spectre du signal d'entrée se retrouve dans la trace temporelle du signal de sortie.

Résultats expérimentaux



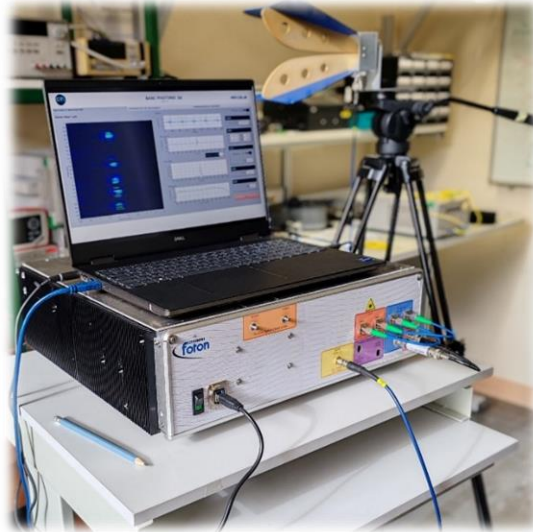
Performances

Largeur de bande	20 GHz
Dynamique (50 μ s)	23 dB
Sensibilité	-18 dBm (RF input power)
Résolution fréquentielle	80 MHz
Résolution temporelle	50 μ s
Probabilité d'interception	100 %
Données de sortie	10 MSa/s

Financement : Prématuration CNRS (Photonic ASP, 2020)



Conclusion



- Réalisation d'un prototype compact (19 ")
- Plate-forme commune (double BDF) permettant de réaliser l'ensemble des fonctionnalités (applications capteurs, photonique micro-ondes)
- Limites intrinsèques (dynamique, SNR, non-linéarité de la réponse) dues principalement à l'ASE / la saturation du milieu à gain

LIPhy

Côme Schnébelin
Nithyanandan Kanagaraj

Institut FOTON

Louis Alliot de Borggraef
Tituan Allain
Marc Brunel
Goulc'hen Loas
Anthony Carré
Cyril Hamel
Steve Bouhier
Ludovic Frein

Thales TRT

Vincent Billault
Vincent Crozatier
Guénolé Dandé

IPAG

Guillaume Bourdarot
Jean-Philippe Berger

José Azaña
Vicente Duran
Carlos Fernandez-Pousa
...