

BRIOCHE

Vincent Crozatier, Thales R&T

Workshop First TF
Rennes 09/10/2025

www.thalesgroup.com

BRIOCHE = BRiques technologiques pour l'Interrogation Optique Cohérente de Haute rEsolution

> Astrid Maturation, poursuite de la thèse CIFRE DGA/AID Guillaume Arpison

- « Nouvelle stratégie de mesure d'ondes acoustiques par capteur à fibre optique distribué »
- Collaboration Thales (Arnaud Peigné, Vincent Kemlin) / LIPhy Grenoble (Eric Lacot)

> Problématique : comment mesurer une onde acoustique avec un capteur à fibre optique distribué (DAS) ?

- Échantillonnage temporel/spatial : **>10 kHz / <10 cm**
- Grande longueur de fibre : **>>1 km**
- Problématiques similaires en **LiDAR (profilométrie)**

OFDR (optical frequency domain reflectometry)

> Objectif principal : montée en maturité de 3 briques technologiques

- Source laser agile en fréquence
 - Balayages en fréquence : **>1 GHz en <100 μs**
 - Haute pureté spectrale
- Système interférométrique de calibration compact
 - Correction des non-linéarités résiduelles des chirps **< 10⁻⁴**
- Référence optique ultra-stable **transportable**
 - Métrologie et stabilité long terme

Filières industrielles @ TRL5

→ Laser = Teem Photonics

→ Interféromètre = Silentsys

Fin 2026 !

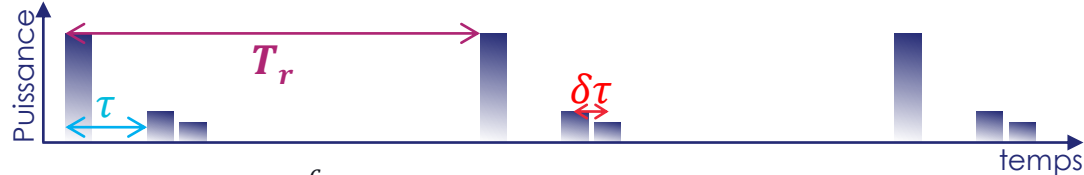
TRL4

→ LPL

Interrogation : pourquoi l'OFDR?

> Optical Time Domain Reflectometry (OTDR)

▸ Paramètres de mesure



- Position $z = \frac{c}{2n} \tau$ → **codage position / temps de vol**
- Taux de rafraichissement $f = \frac{1}{T_r}$
- Distance d'ambiguïté $ZA = \frac{c}{2n} T_r$
- Résolution $\delta z = \frac{c}{2n} \delta \tau$

▸ Contraintes sur la source laser (impulsionnelle)

- Taux rafraichissement > 10 kHz

→ **Cadence de tir**

- Distance d'ambiguïté

→ **Cadence de tir**

- Résolution < 10 cm

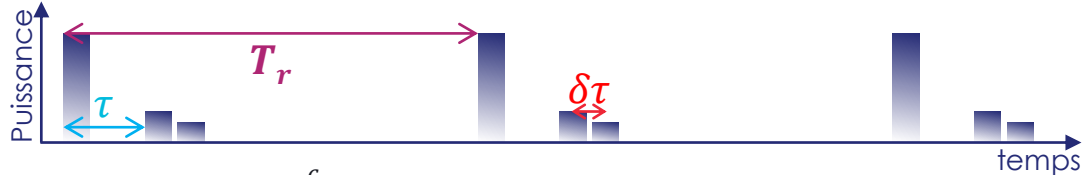
→ **Durée d'impulsion < 0,5 ns**

dispersion, non-linéarités, bande passante de détection...

Interrogation : pourquoi l'OFDR?

> Optical Time Domain Reflectometry (OTDR)

Paramètres de mesure



- Position $z = \frac{c}{2n} \tau \rightarrow$ **codage position / temps de vol**
- Taux de rafraichissement $f = \frac{1}{T_r}$
- Distance d'ambiguïté $ZA = \frac{c}{2n} T_r$
- Résolution $\delta z = \frac{c}{2n} \delta \tau$

Contraintes sur la source laser (impulsionnelle)

- Taux rafraichissement $> 10 \text{ kHz}$

$\rightarrow$ Cadence de tir

- Distance d'ambiguïté

$\rightarrow$ Cadence de tir / cohérence du laser

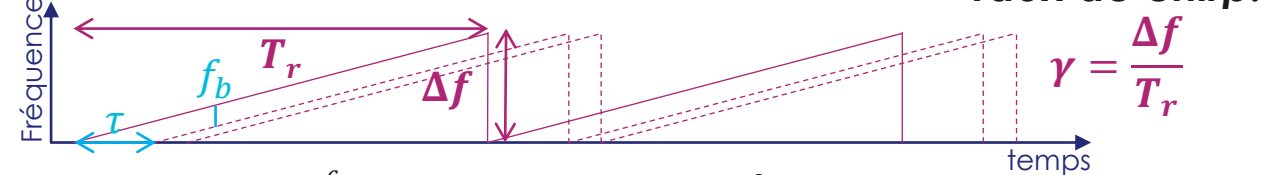
- Résolution $< 10 \text{ cm}$

$\rightarrow$ Durée d'impulsion $< 0,5 \text{ ns}$

dispersion, non-linéarités, bande passante de détection...

> Optical Frequency Domain Reflectometry (OFDR)

Paramètres de mesure



- Position $z = \frac{c}{2n\gamma} f_b \rightarrow$ **codage position / fréquence**
- Taux de rafraichissement $f = \frac{1}{T_r}$
- Distance d'ambiguïté $ZA = \frac{c}{2n\gamma} \Delta f = \frac{c}{2n} T_r$
- Résolution $\delta z = \frac{c}{2n} \cdot \frac{1}{\Delta f}$ (hors fenêtrage)

Contraintes sur la source laser (continue)

- Taux rafraichissement $> 10 \text{ kHz}$

$\rightarrow$ Cadence du chirp

- Distance d'ambiguïté

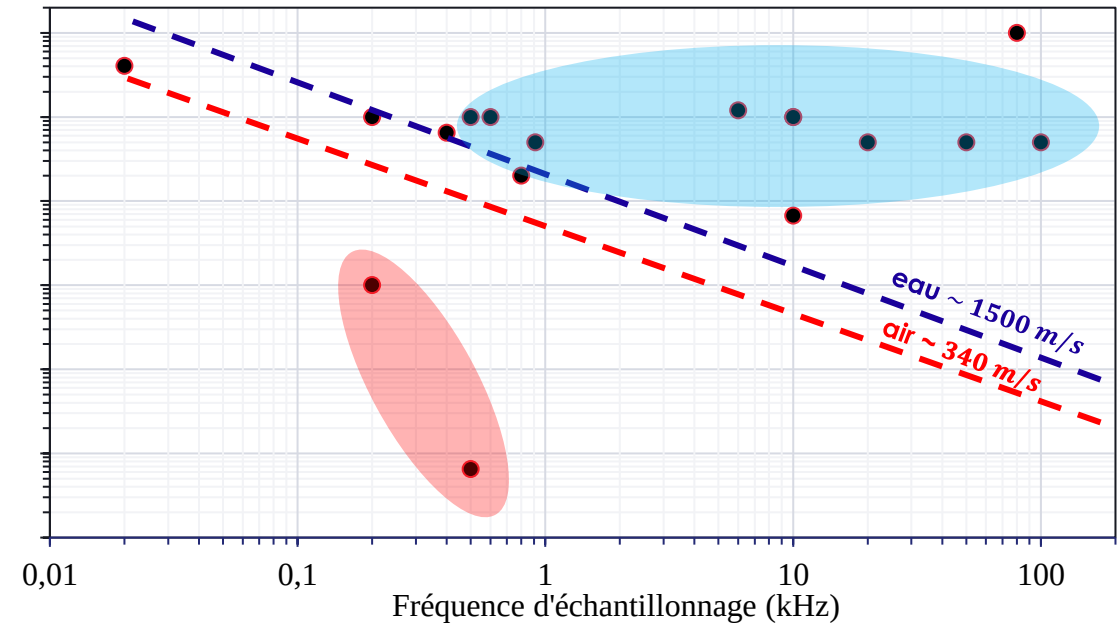
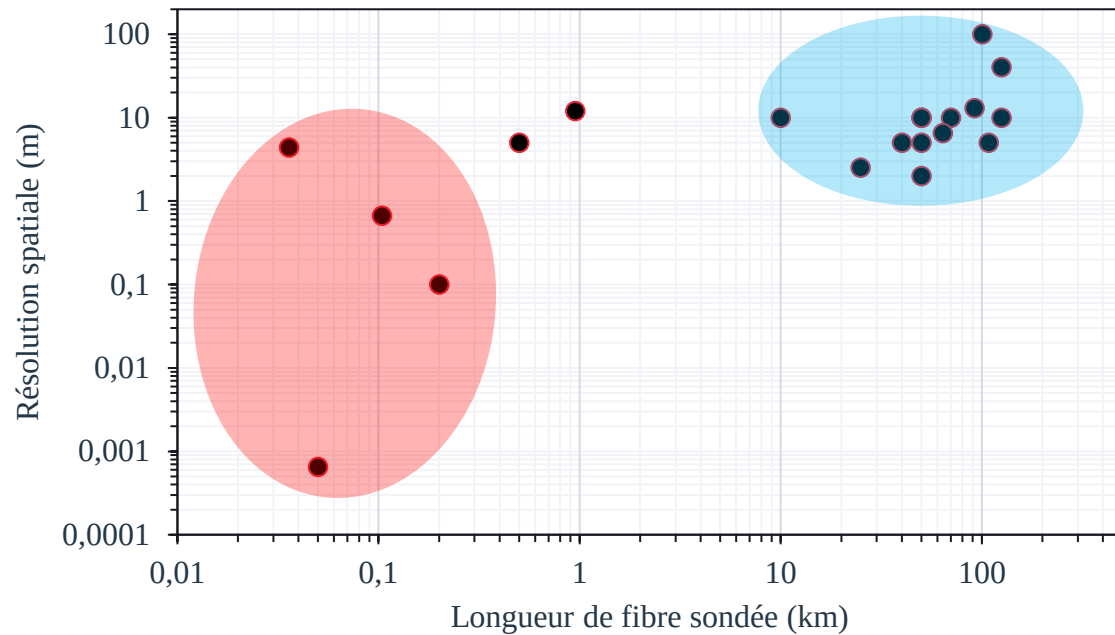
$\rightarrow$ Cadence de tir / cohérence du laser

- Résolution $< 10 \text{ cm}$

$\rightarrow$ Amplitude du chirp $> 1 \text{ GHz}$

**Taux de chirp:
 $\gamma > 10^{13} \text{ Hz/s}$**

Interrogation : pourquoi l'OFDR?



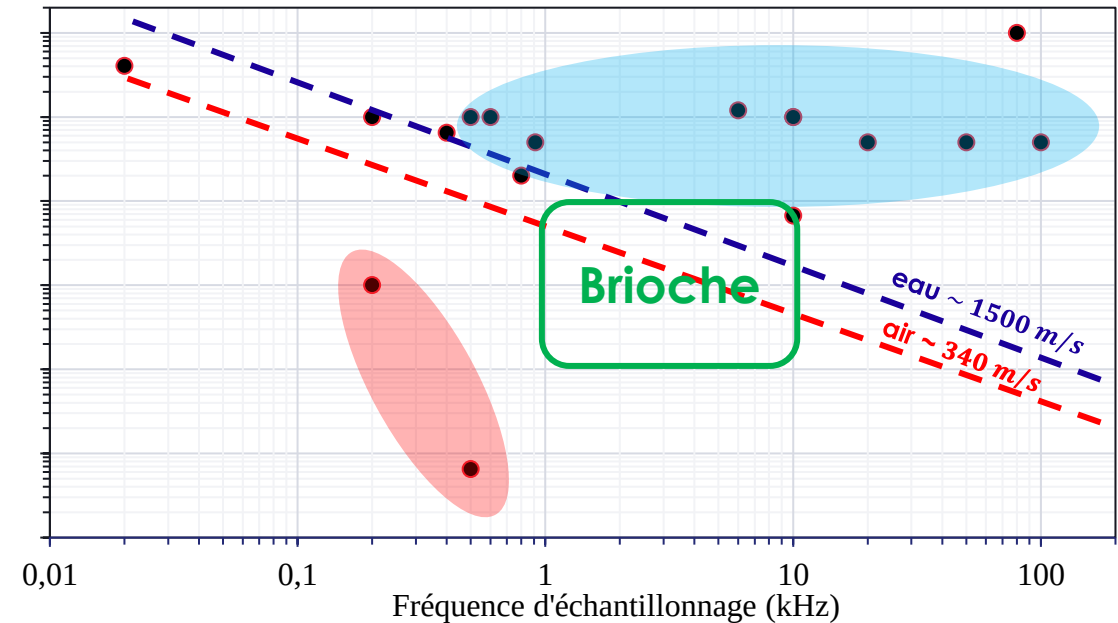
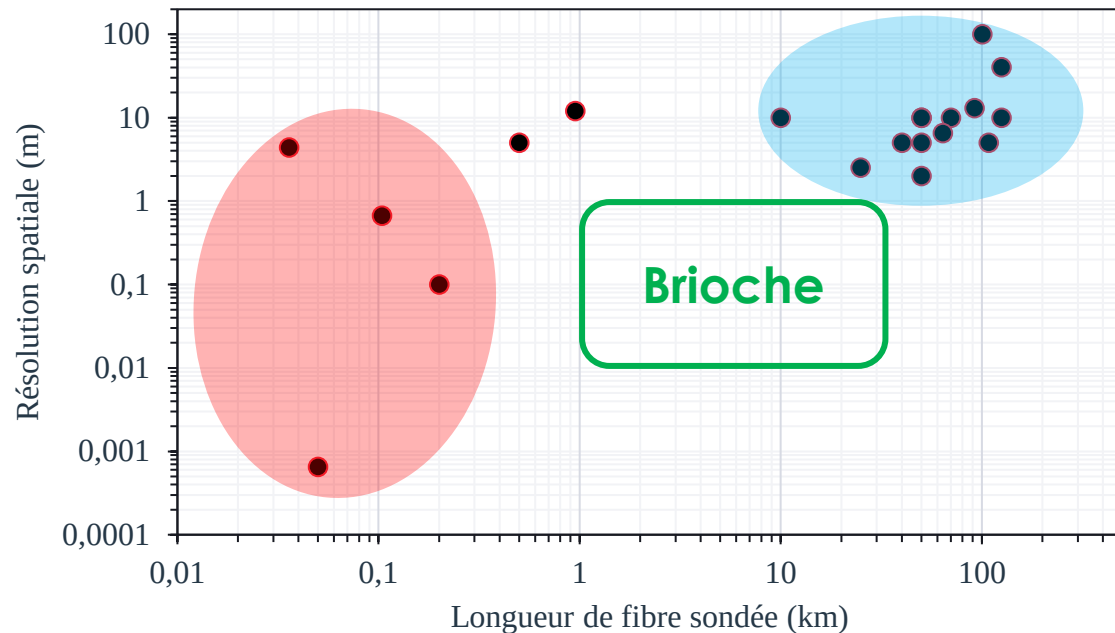
OTDR

- Longues distances (>10 km)
- Faibles résolutions spatiales (>1 m)
- Fréquence d'échantillonnage élevée (>1 kHz)

OFDR

- Courtes distances (< 500 m)
- Hautes résolutions spatiales (<< 1 m)
- Faible fréquence d'échantillonnage (< 1 kHz)

Interrogation : pourquoi l'OFDR?



OTDR

- Longues distances (>10 km)
- Faibles résolutions spatiales (>1 m)
- Fréquence d'échantillonnage élevée (>1 kHz)

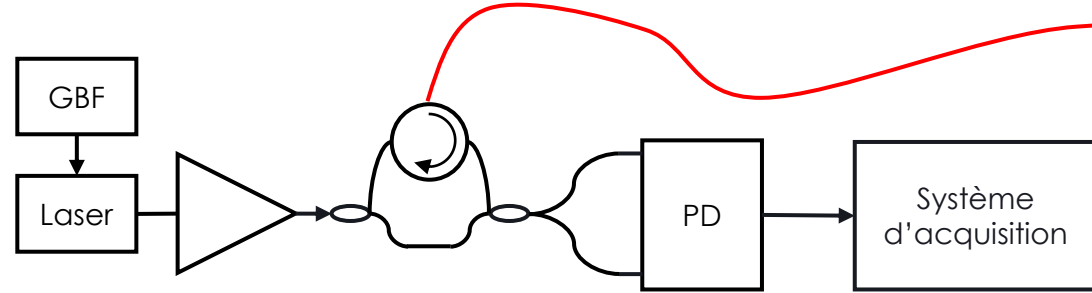
OFDR à la mode de BRIOCHE

- Longues distances (>10 km)
- Hautes résolutions spatiales (< 1 m)
- Fréquence d'échantillonnage élevée (>1 kHz)

Mesure DAS OFDR « typique »

> Architecture

- Laser accordable
- Signal d'intérêt = **phase** $\propto$ **étirement local**
- Interféromètre autour de la fibre « capteur » + détection cohérente + traitement de signal



> Mesure acoustique : rétrodiffusion Rayleigh

- Pas de décalage en longueur d'onde
 - Détection cohérente
- Intrinsèque à la fibre
 - Pas besoin d'instrumenter la fibre → **utilisation de fibres déployées (câbles sous-marins, FTTH...)**
 - Capteurs « virtuels » tout au long de la fibre → **résolution spatiale liée à l'interrogation (amplitude de chirp)**
- **Rétrodiffusion**
 - **Faible coefficient : -73 dB/m**
 - **« Fading »**

Laser accordable?

> Besoins

- $\lambda = 1550\text{ nm}$: compatibilité de réseaux télécom
- Chirp $> \text{GHz}$ en $< 1\text{ ms}$ (idéalement 10 GHz en $100\text{ }\mu\text{s}$) + faible bruit de phase

> ~~Laser CW + modulateur externe + AWG RF~~

- Très faible bruit (par ex DFB fibre), linéarité « parfaite »
- Montage optique complexe, pertes, AWG RF \$\$\$

> Laser accordable?

- [1] Crozatier et al., Appl. Phys. Lett. **89**, 261115 (2006)
- [2] Siddarth et al., Nat. Photon. **19**, p.709 (2025)
- [3] Lihachev et al., Nat. Commun. **13**, 3522 (2022)

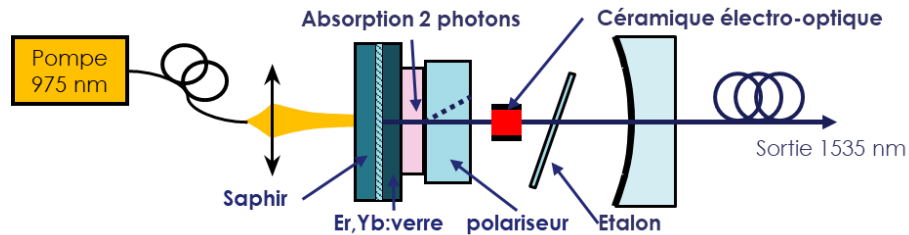
→ Y en a pas !

Type de laser	Référence	Pureté spectrale	Chirp	nonlinéarité
DFB fibre	NKT koheras	< 100 Hz (RIN)	Bof (piezo)	?
DFB SC	G&H	~100 kHz	4 GHz / 100 μs	>%
DFB SC ++	Teraxion (Indie)	~10 kHz	3 GHz / 10 μs	>%
ECDL	[1]	~kHz	3 GHz / 20 μs	>%
ECDL PIC	Rio	~kHz	< GHz / 100 μs	
eDBR	Deeplight [2]	<10 kHz	10 GHz / 10 μs	>%
SIL	Deeplight [3]	< 100 Hz	350 MHz / 10 μs	<%

Laser acordable? BRIOCHE : objectif technique #1

> Laser état solide agile en fréquence [1]

- Architecture développée à TRT depuis près de 20 ans (laser “bifréquence”)



- Milieu à gain état solide → **très bas bruit de phase**
 - $\text{Er}^{3+}:\text{verre}$ → 1,5 μm + pompe télécom
- Élément non-linéaire intra-cavité [2] → suppression des oscillations de relaxation → **faible bruit d'intensité**
- Céramique électro-optique → **accordabilité**
 - Amplitude limitée par l'intervalle spectral libre du laser → cavité courte
 - Vitesse limitée par l'électronique/capacité équivalente de la céramique
- Packaging qq cm^3



> Objectifs

- Transfert technologique vers
- Performances visées
 - >10 mW sortie de fibre
 - 10 GHz en 100 μs
 - Faible largeur de raie (bruit de phase <-110 dBc/Hz @ 1 MHz)

TRL5



[1] Maxin et al., J. Lightw. Technol. **31**, 2919 (2013)
[2] El Amili et al., Opt. Lett. **39**, 5014 (2014).

Laser accordable linéairement ?

> Besoins

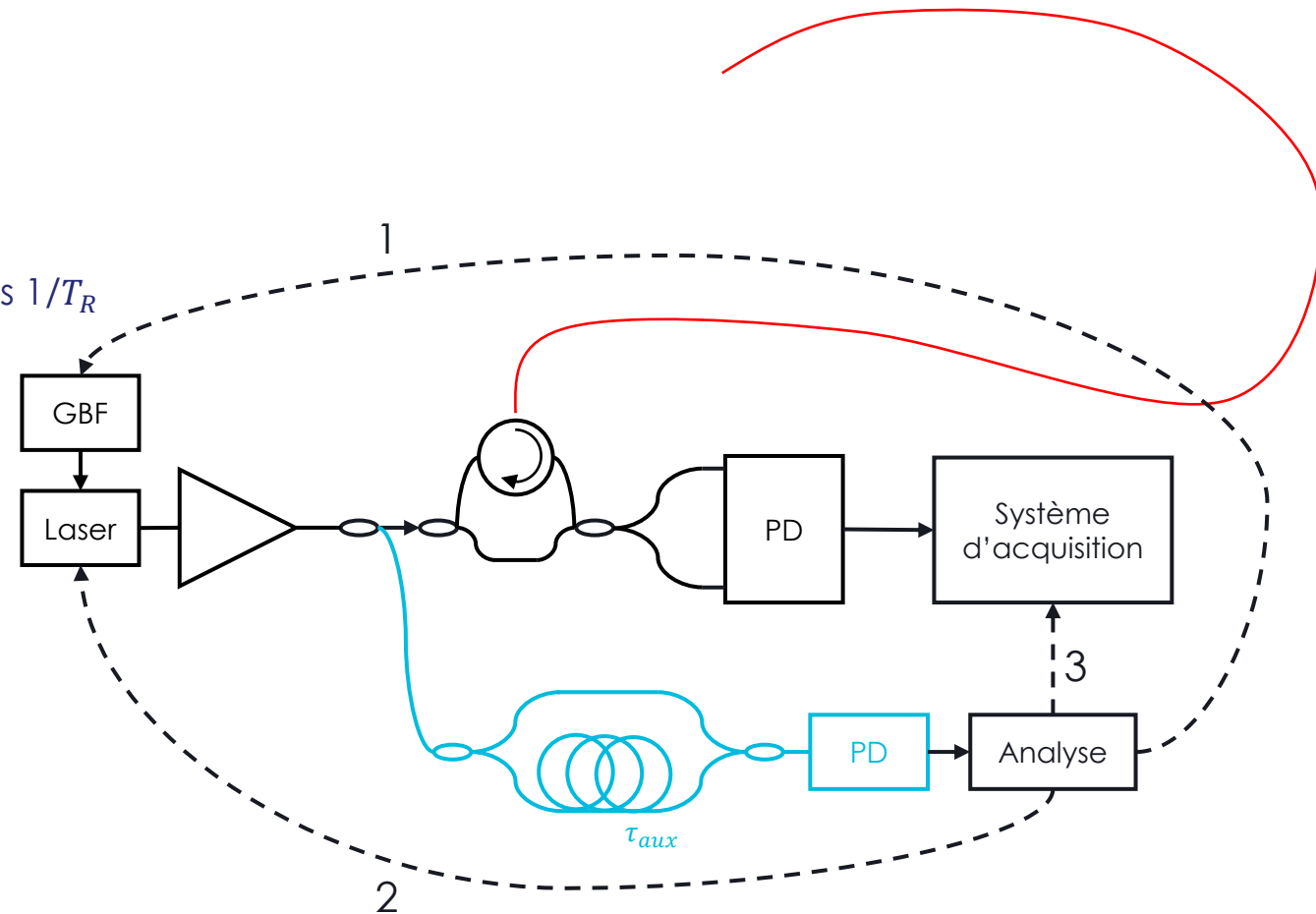
- OFDR = compression d'impulsion
- Amplitude des non-linéarités idéalement contenues dans $1/T_R$
- Vrai critère pas évident à définir...

> Mesure de non-linéarités ?

- Interféromètre déséquilibré en transmission
- Signal de battement $f_b = \gamma \cdot \tau_{aux} + \text{« bruits »}$ [1]

> Et après?

- Précompensation de la commande [2]
- Asservissement sur une fréquence de référence [3]
- Post-processing des données (« **deskew filter** ») [4]
- ...



[1] Gorju et al., Eur. Phys. J. Appl. Phys. **30**, 175 (2005)

[2] Feneyrou et al. Appl. Opt. **56**, 9676 (2017)

[3] Crozatier et al., Appl. Phys. Lett. **89**, 261115 (2006)

[4] Ding et al. Opt. Express **21**, 3826 (2013)

Laser acordable linéairement ? BRIOCHE : objectif technique #2

> Système interférométrique de calibration compact

- Interféromètre Mach-Zehnder déséquilibré en transmission
 - Retard ajusté en fonction du taux de chirp
- Grande dynamique de mesure
 - Photodétection adaptée au bruit de la source / système d'acquisition
- Effort de packaging pour limiter la sensibilité environnementale de l'interféromètre
 - Thermique
 - Vibratoire/acoustique

> Objectifs

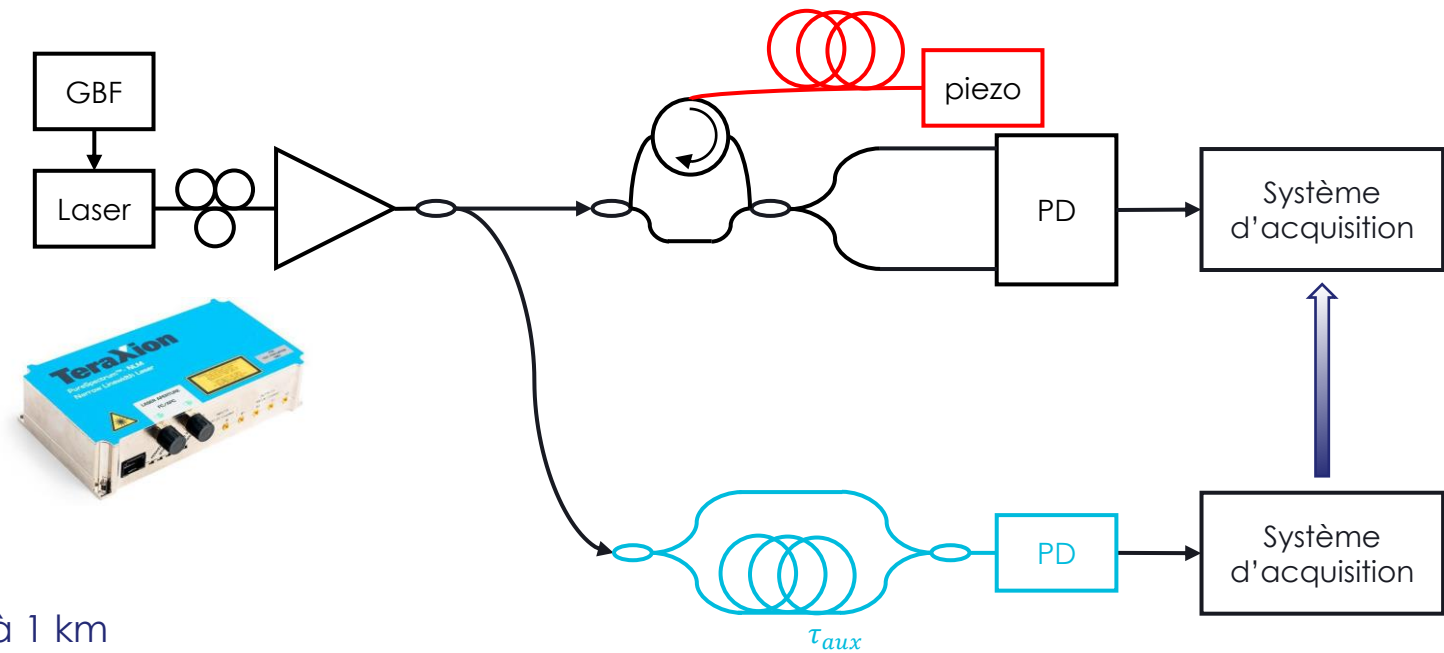
- Performances
 - Non-linéarité résiduelle $<10^{-4}$ après correction
 - Stabilité 10^{-10} sur 1 min
- TRL5

SILENTSYS
ultra low noise systems

Un exemple

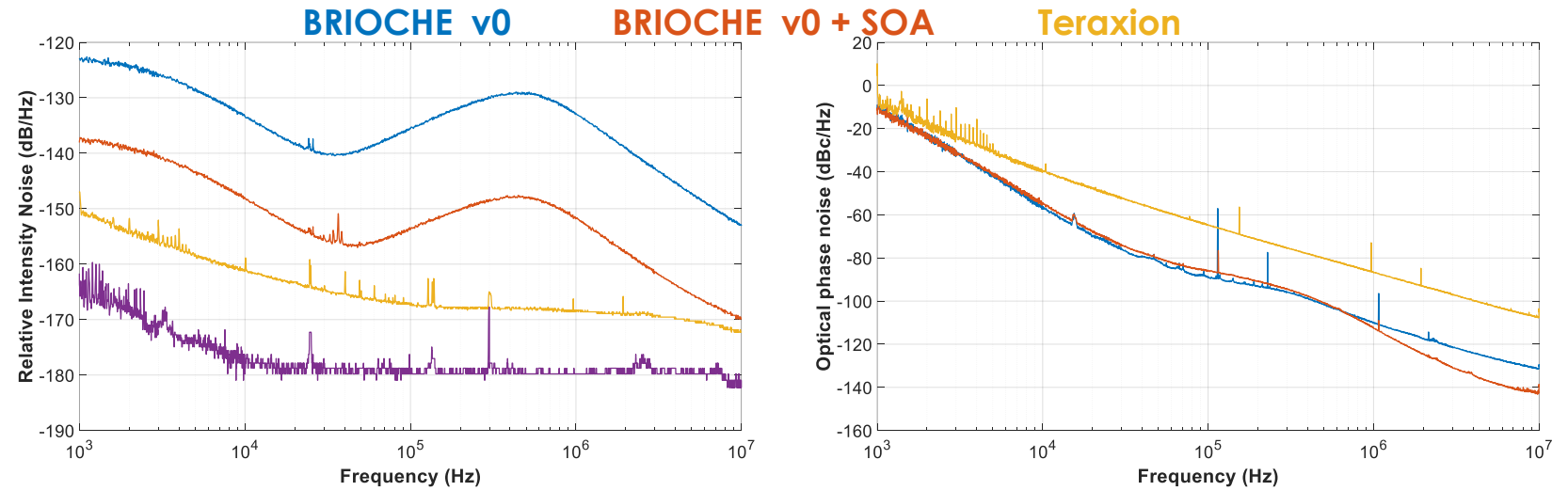
> Comparaison entre deux lasers

- ▶ Laser TRT (BRIOCHE v0) vs Laser Teraxion NLM
 - $\Delta f = 1 \text{ GHz} \rightarrow \delta z = 10 \text{ cm}$
 - $f_{\text{mod}} = 3 \text{ kHz} \rightarrow \delta t = 300 \mu\text{s}$
- ▶ Amplification optique (SOA)
- ▶ **Correction de non-linéarité par « deskew »**
- ▶ Mesure DAS : étireur piezoélectrique « ponctuel » à 1 km
 - IDIL ST020LF
 - Sinus à 300 Hz



> Constat de départ

- ▶ RIN
- ▶ Bruit de phase optique
 - Mesure autohétérodyne

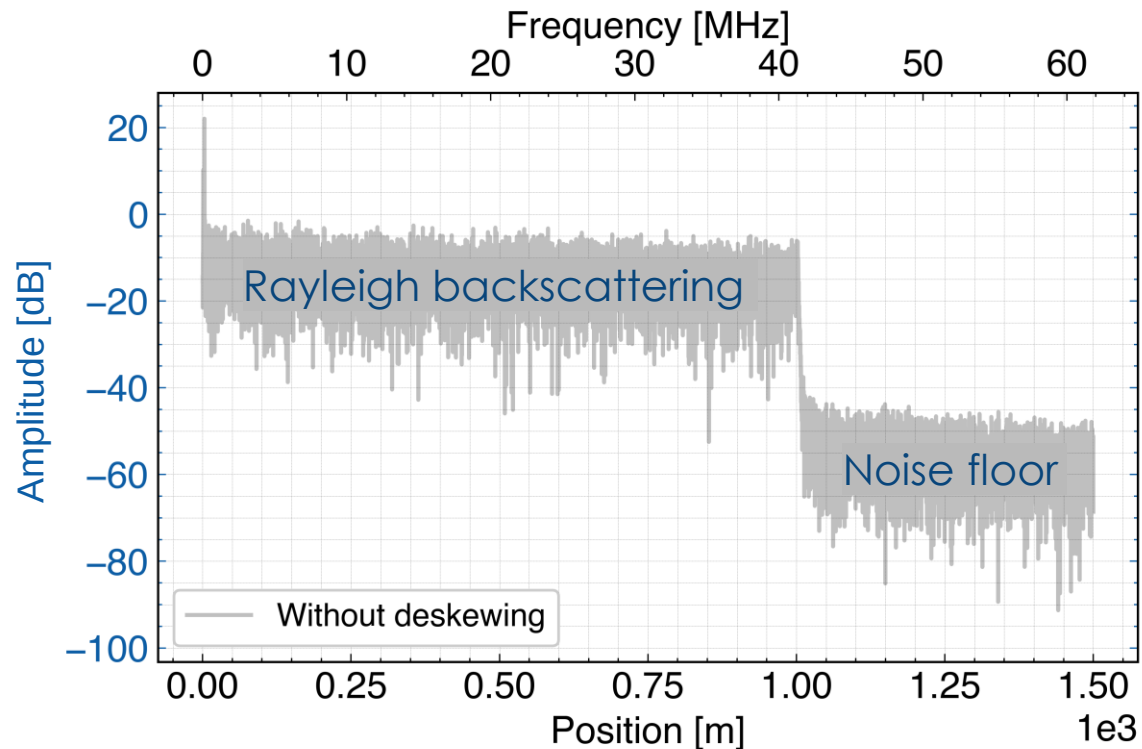


Un exemple

> Profil de rétrodiffusion

▸ Intensité

- Codage fréquence/position
- Trace « épaisse » = variation de l'amplitude de rétrodiffusion
→ **fading en polarisation / interférométrique**
- Fin de fibre?

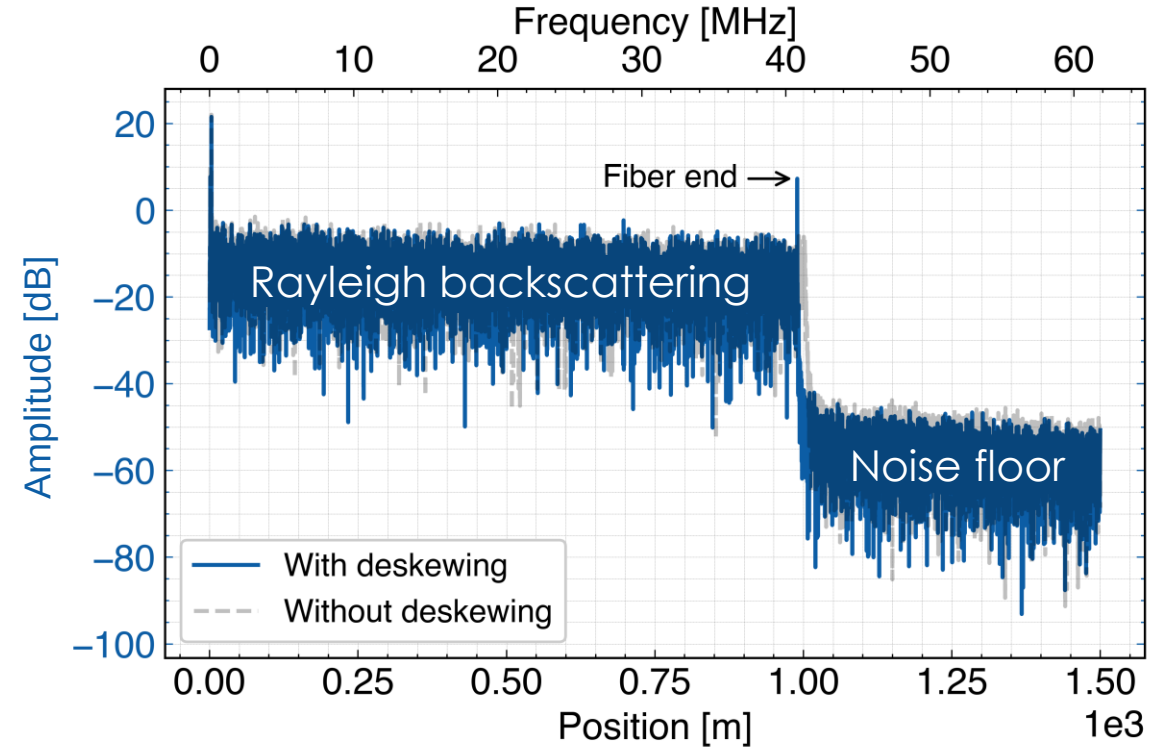
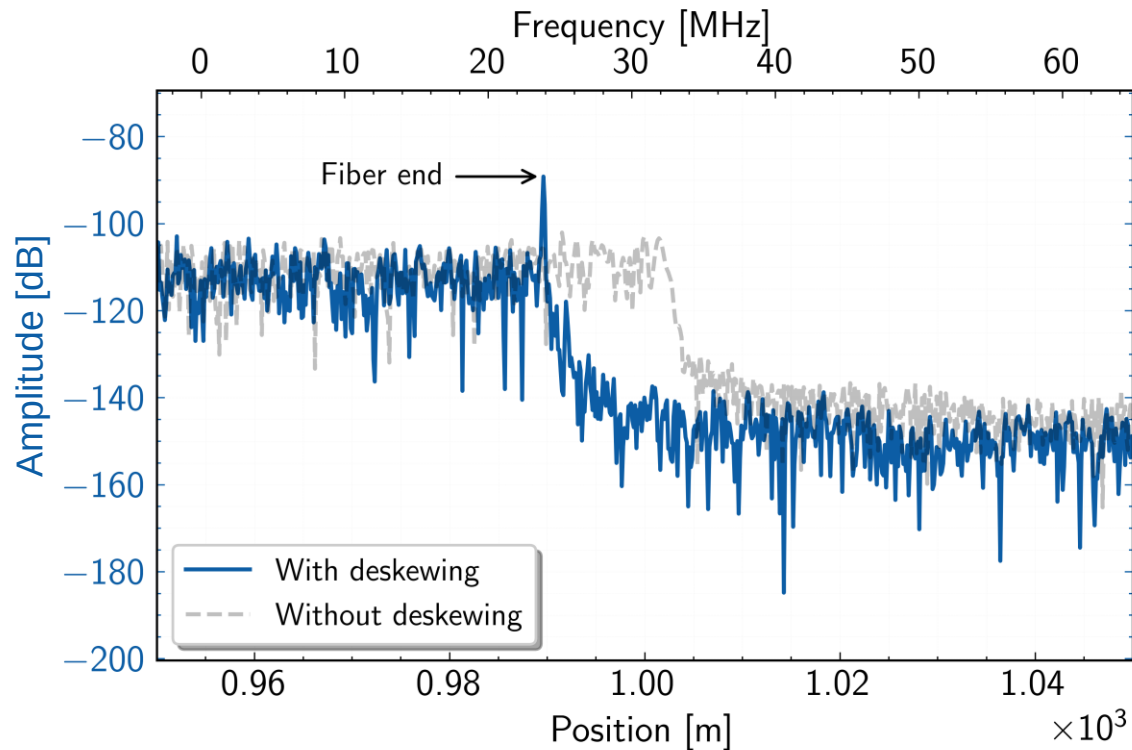


Un exemple

> Profil de rétrodiffusion

▸ Intensité

- Codage fréquence/position
- Trace « épaisse » = variation de l'amplitude de rétrodiffusion
→ **fading en polarisation / interférométrie**
- Fin de fibre? **Vive le « skew » !**

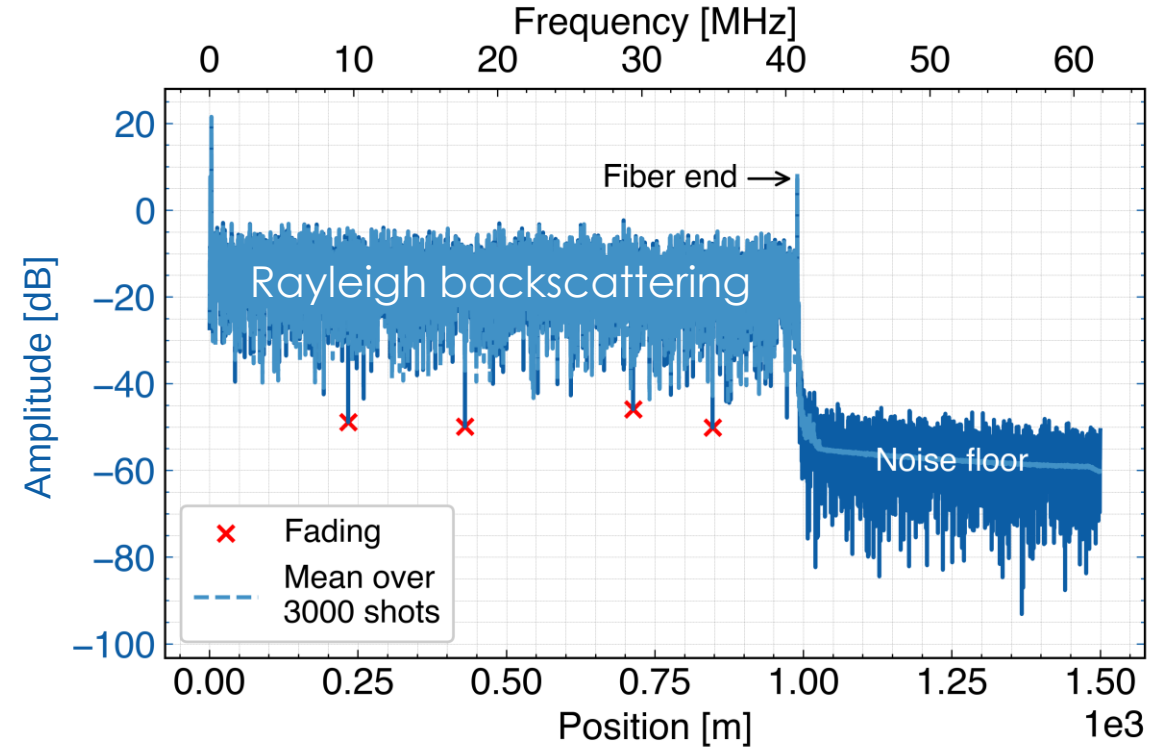


Un exemple

> Profil de rétrodiffusion

▸ Intensité

- Codage fréquence/position
- Trace « épaisse » = variation de l'amplitude de rétrodiffusion
→ **fading en polarisation / interférométrie « stationnaire »**
- Fin de fibre? **Vive le « deskew » !**



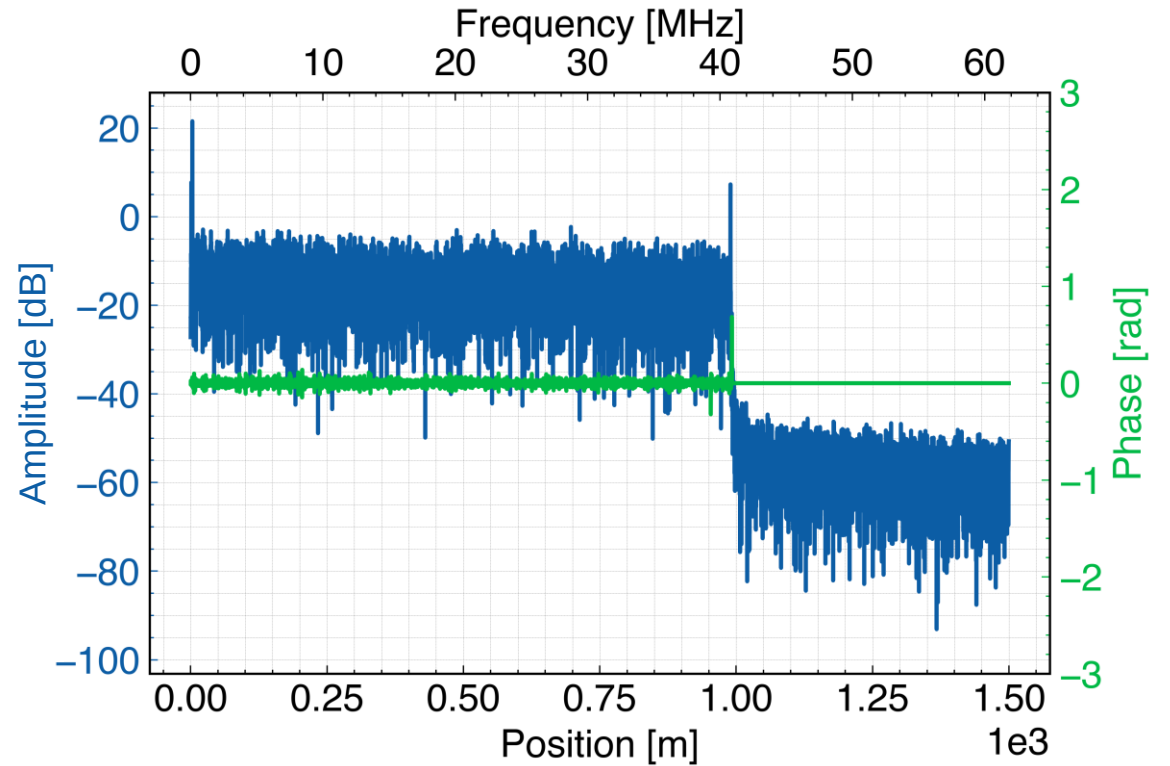
Un exemple

> Profil de rétrodiffusion

▸ Intensité

- Codage fréquence/position
- Trace « épaisse » = variation de l'amplitude de rétrodiffusion
→ **fading en polarisation / interférométrie « stationnaire »**
- Fin de fibre? **Vive le « deskew » !**

▸ Phase



Un exemple

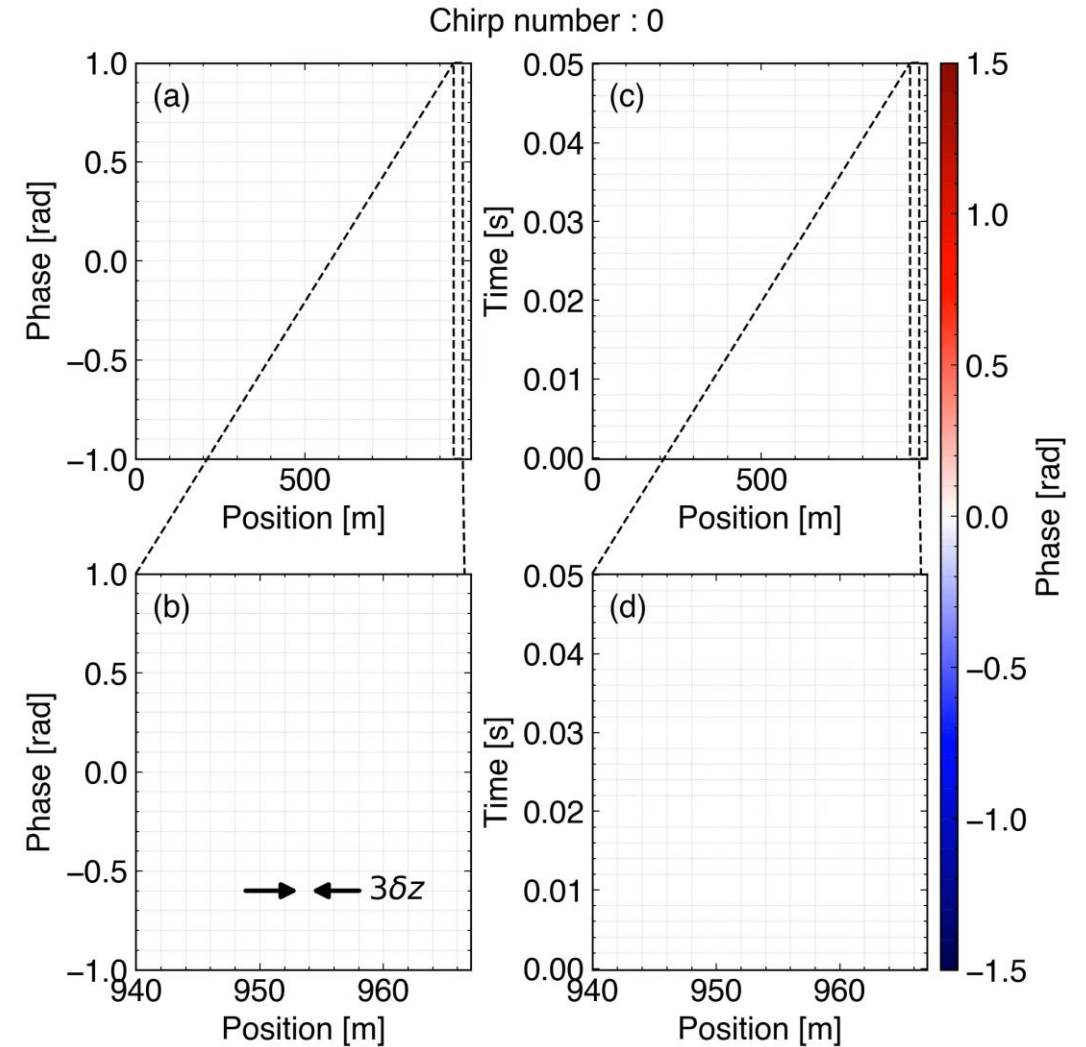
> Profil de rétrodiffusion

▸ Intensité

- Codage fréquence/position
- Trace « épaisse » = variation de l'amplitude de rétrodiffusion
→ **fading en polarisation / interférométrie « stationnaire »**
- Fin de fibre? **Vive le « deskew » !**

▸ Phase

- Acquisitions successives : carte de phase « temps/position »
- Excitation piezoélectrique ponctuelle : sinus à 300 Hz



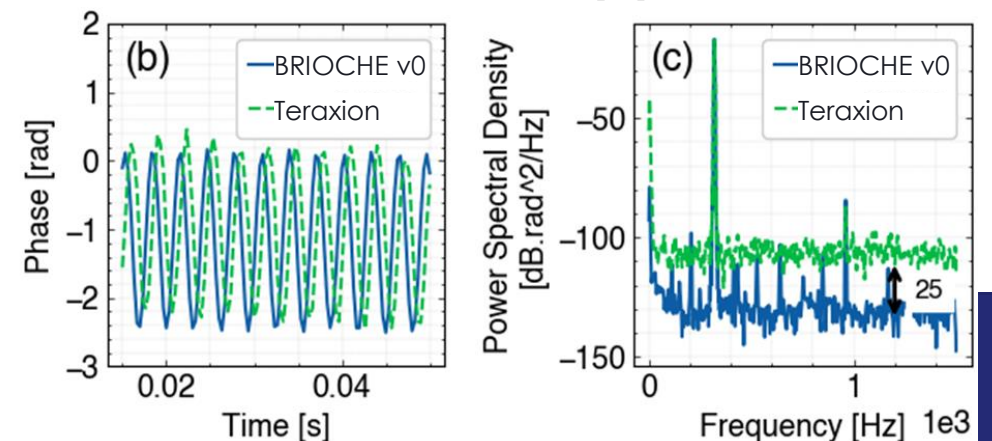
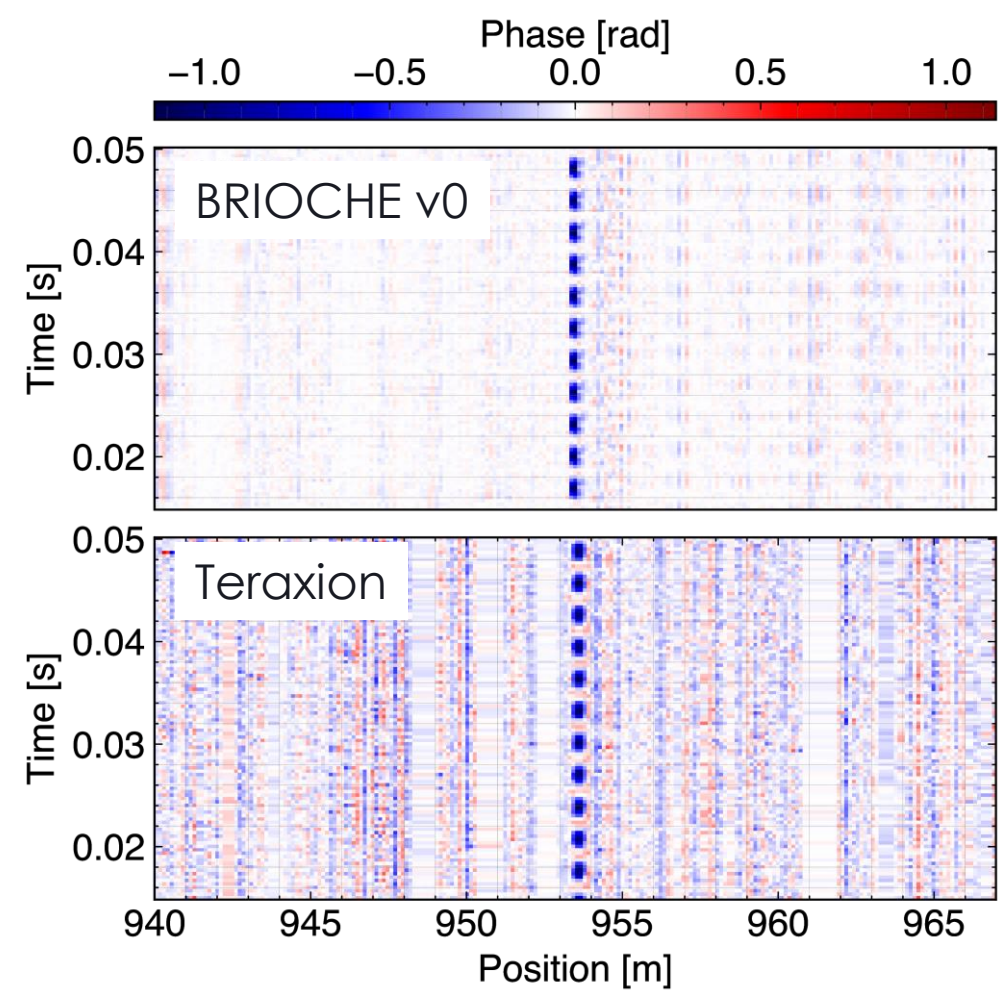
Un exemple

> Profil de rétrodiffusion

- Intensité
 - Codage fréquence/position
 - Trace « épaisse » = variation de l'amplitude de rétrodiffusion
 - **fading en polarisation / interférométrie « stationnaire »**
 - Fin de fibre? **Vive le « deskew » !**
- Phase
 - Acquisitions successives : carte de phase « temps/position »
 - Excitation piezoélectrique ponctuelle : sinus à 300 Hz

> Analyse comparative

- 25 dB de gain entre le laser BRIOCHE v0 et le laser Teraxion !
- Pourquoi?**



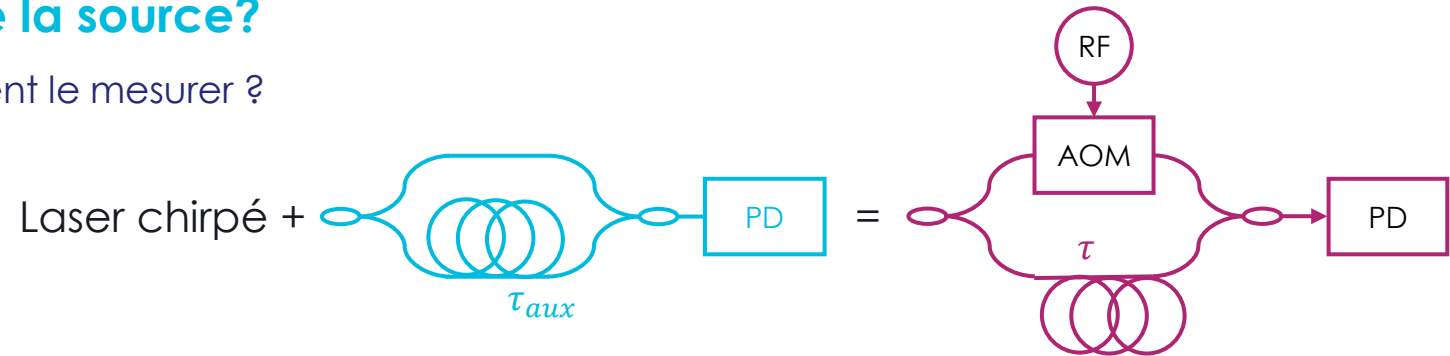
Bruit de phase : quelques pistes, beaucoup de questions

> Détection cohérente + extraction de phase

- › Bruit de phase de l'oscillateur local est une contribution importante à prendre en compte
- › **Moins y en a, mieux c'est**

> Quel est l'impact du bruit de phase de la source?

- › Intrinsèque ? Correction par le deskew ? Comment le mesurer ?
- › **Profiter de la voie de calibration !**
- › Ressemblance à un banc auto-hétérodyne
- › $L_{\phi_{\text{battement}}}(f) = L_{\phi_{\text{opt}}}(f) * 2 \sin(\pi f \tau)$



> Vers une simulation de la réponse ?

Bruit de phase : peut-on simuler la réponse de la fibre ?

> Depuis la voie de calibration...

- Spectre de battement autour de $f_b = \gamma \cdot \tau_{aux} + \text{« bruits »}$
- Application du filtre de redressement = correction des « bruits » (en partie)
- Descente en bande de base
- **Correction de fonction de transfert de la ligne à retard** = $L_{\phi_{battement}}(f) = L_{\phi_{opt}}(f) * 2 \sin(\pi f \tau_{aux})$
- **Extraction de** $L_{\phi_{opt}}(f)$

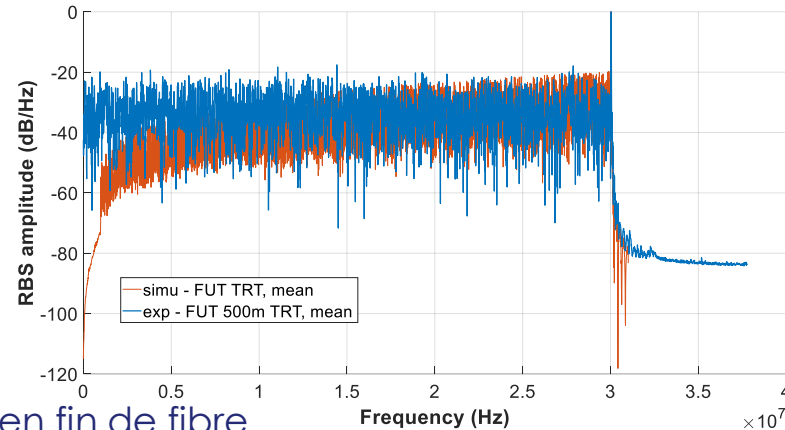
> Vers le signal de rétrodiffusion Rayleigh

- Centres de rétrodiffusion tout au long de la fibre en τ_{RBS_i}
- Application d'une fonction de transfert $2 \sin(\pi f \tau_{RBS_i})$
- Montée en fréquence autour de battement $\gamma \cdot \tau_{RBS_i}$
- Amplitude de rétrodiffusion aléatoire (fading)
- Somme de tous les battements

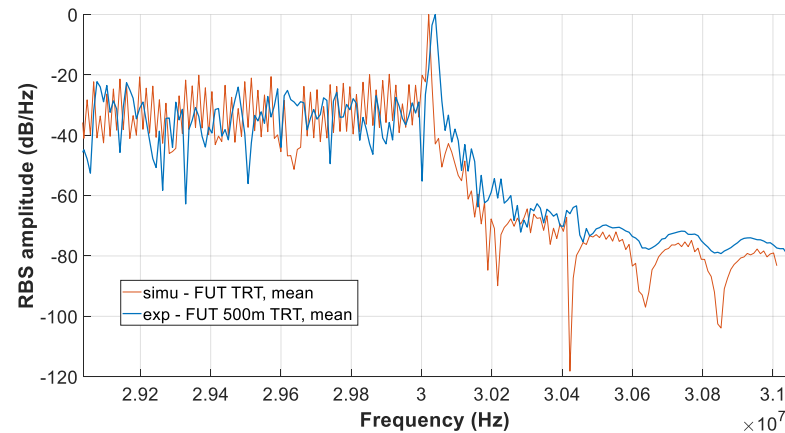
Bruit de phase : peut-on simuler la réponse de la fibre ?

> Avec le laser Brioche v0

- Spectre de rétrodiffusion complet

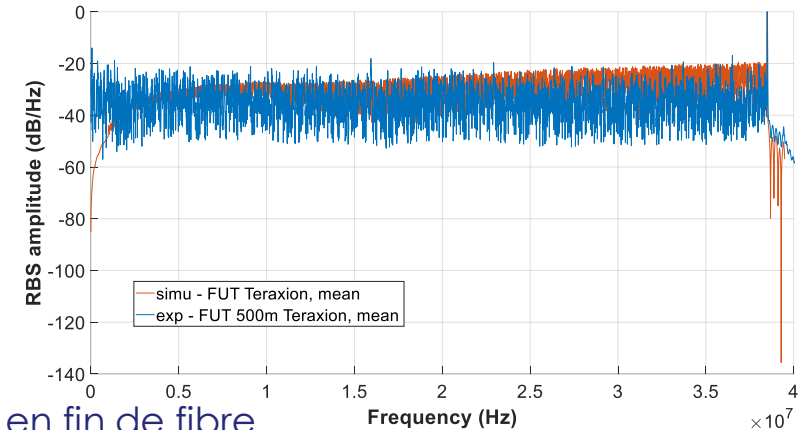


- Zoom en fin de fibre

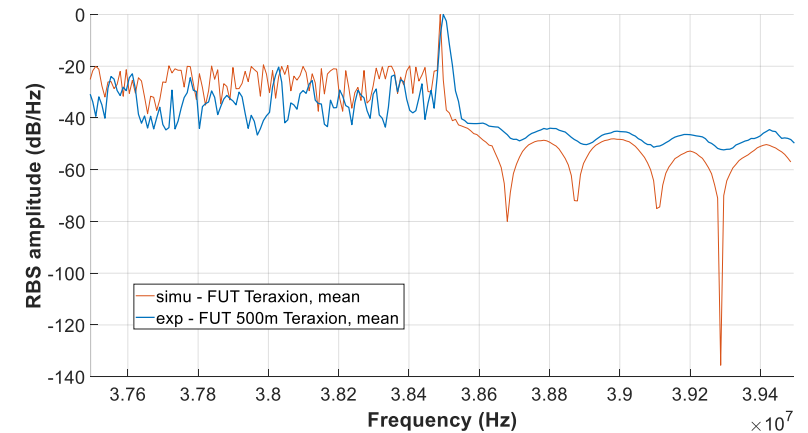


> Avec le laser Teraxion

- Spectre de rétrodiffusion complet



- Zoom en fin de fibre



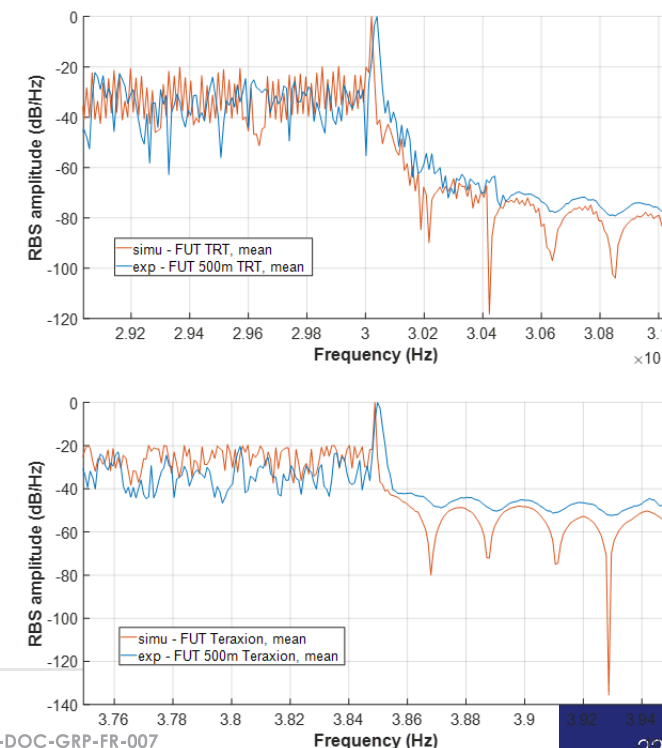
De nouvelles sources, plein de perspectives!

> DAS ϕ -OFDR à la mode deBRIOCHE

- Système d'écoute acoustique sur fibre dynamique de haute résolution spatiale
- Très exigeant sur la qualité de la source laser
 - Capacité de modulation
 - Pureté spectrale
- Applications
 - Barrière acoustique
 - Sécurisation de périmètres/zones critiques

> Métrologie de la source et impact sur la mesure : encore beaucoup à comprendre

- Distribution de fading (exp et simu!) semble dépendre de la source → **crosstalk** ?
- Plancher de bruit = somme incohérente du profil de bruit du laser en chaque point de rétrodiffusion → **extraction du plancher/SNR** ?
- Efficacité du filtre de redressement à optimiser en fonction du profil de bruit du laser ?
- Gestion du fading ?



BRIOCHE : objectif technique #3

> Référence optique ultra-stable transportable

- Laser stabilisé sur raie P(16) de C_2H_2 [1]
- Caractérisations métrologiques
 - Laser : maîtrise de la longueur d'onde centrale → **gestion du fading interférométrique (« stationnarité » ?)**
 - Interféromètre → **mesure/transfert de stabilité**
- A terme : utilisation pour DAS ultra-longue distance?
 - Cohérence + stabilité = **moyennage**



> Objectifs

- Performances
 - Stabilité 10^{-13} à $>1s$ @ 1542 nm
 - Source « accordable » selon $^{12}C_2H_2$ ou $^{13}C_2H_2$ pour ajuster la longueur d'onde d'intérêt
- Source transportable (rack 19'')
- Collaboration LPL/Silentsys
- **TRL4**

[1] Manamanni et al., J. Opt. Soc. Am. B **39**, 438- (2022)

MERCI

Vincent Crozatier, Thales R&T

vincent.crozatier@thalesgroup.com

www.thalesgroup.com

> Aux organisateurs du workshop

> Teem

- Basile Faure, Quentin Berthomé

> Silentsys

- Pierre Brochard, Romain Frénéhard, Patrick o'Donoghue, Pierre Heslon

> LPL

- Vincent Roncin, Frédéric du Burck, Bastien Latorre

> Thales

- Guillaume Arpison, Vincent Kemlin, Clément Charliac, Inès Ghorbel, Nina Kergosien

> AID/DGA

- Sylvie Paolacci-Riera, Dominique Fattaccioli