

Nouveau Concept de mesure de contrainte sur fibre pour la caractérisation des fonds marins

Etienne Samain¹, Anthony Sladen², Ha Phung Duy²,
Clément Courde²

¹SigmaWorks - ²Université Côte d'Azur UCA

etienne.samain@sigmaworks.fr



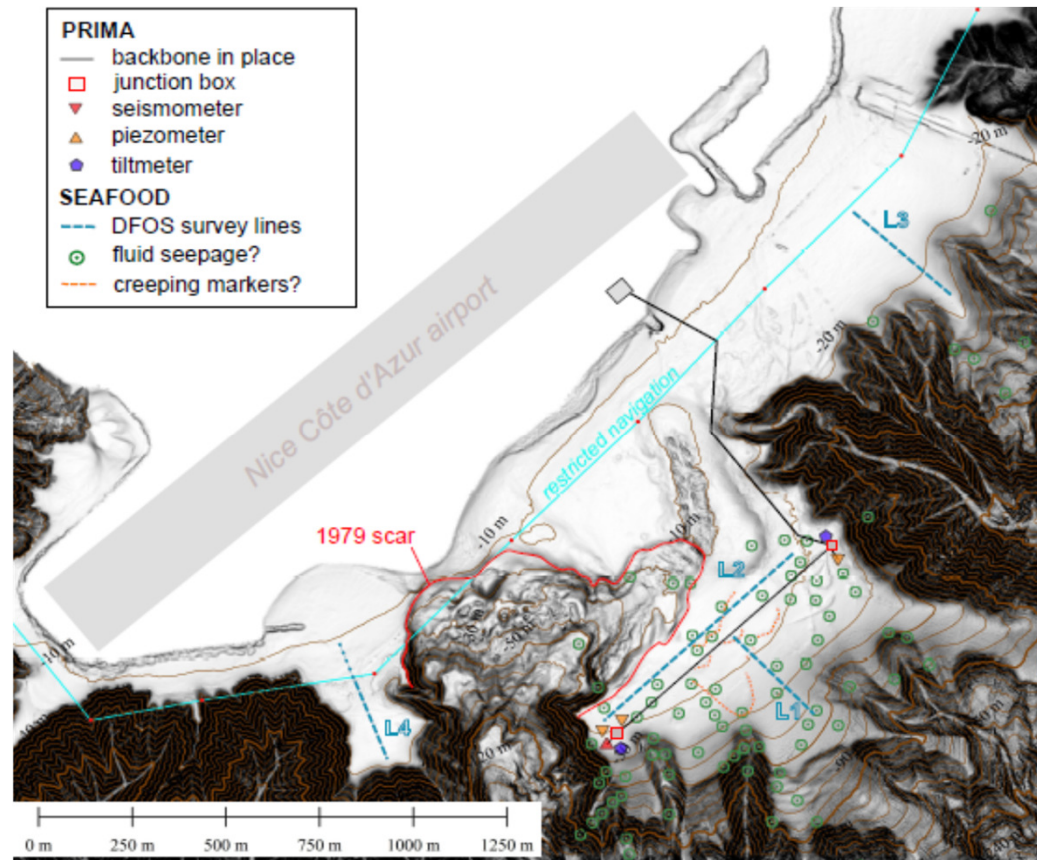
Projet

- Dans le domaine de la Géophysique, la dynamique des fonds marins est très mal connue à ce jour.
- Une équipe de Géoazur a engagé l'ambitieux projet « SeaFood », qui prévoit de développer un dispositif à base de capteurs à fibre optique ensouillés dans les sédiments marins pour la caractérisation des déformations sur de grandes distances (30 km).
- Le projet SeaFood s'appuie sur des systèmes de mesure de contrainte sur étagère Brillouin et Raman :
 - Incertitude en élongation 10^{-5} à 10^{-6}
 - Système répartis : résolution métrique
- L'objectif du projet est de développer de nouveaux systèmes de mesures en s'appuyant sur des systèmes de chronométrie laser sub-picoseconde. Il est envisagé d'atteindre des incertitudes relatives d'élongation de 10^{-9} à haute fréquence (du Hz aux dizaines de kHz) et 10^{-7} sur des longues périodes.

Seafood

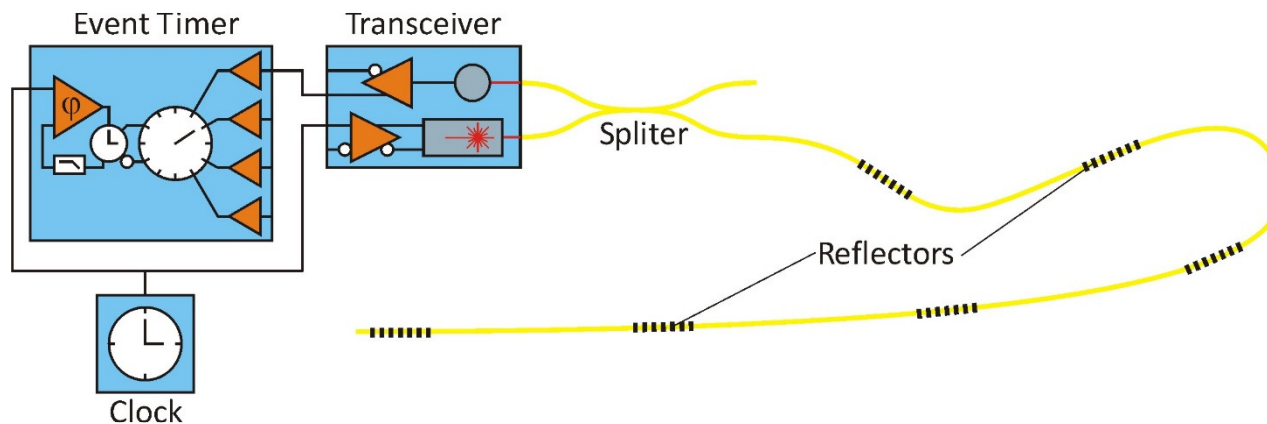
Test grandeur Réel

- Le projet SeaFood prévoit des tests sur le site de l'aéroport de Nice Côte d'Azur



Principe

- Le principe est basé sur la mesure du temps propagation d'impulsions générées par un laser réfléchies par des réflecteurs discrets répartis le long de la fibre.



- Les réflecteurs sont matérialisés soit par des réseaux de Bragg imprimés sur une fibre optique soit par des réflecteurs diélectriques.
 - L'élongation de la fibre entre tous les réflecteurs est mesurée pour chaque impulsion laser par les différences des dates
-

Instrumentation

Datation ultra stable

- Les systèmes de datation développés dans le cadre du projet de transfert de temps T2L2 permettent de mesurer des intervalles de temps avec une incertitude de quelques dizaines de femto-secondes
 - Incertitude : < 0.55 ps RMS
 - Temps mort : 130 ns
 - Cadence de mesure continue : 50 kHz
 - Stabilité @ 1000 s (TDev) : < 20 fs
 - Linéarité : < 300 fs
 - Bande passante entrée : 8 GHz



Instrumentation Télécom

- Une option crédible pour la génération-détection des signaux optiques est d'utiliser des transceivers télécom pour la transposition électrique-optique et des FPGA pour la génération des signaux à dater.
 - Longueur d'onde 850, 1300, 1550 nm
 - Débit : 10 ou 25 Gbps
 - Modulation laser : Direct ou électro absorption
 - Détection InGaAs (PIN ou APD)
 - Bande passante > 10 GHz
- Réflecteur de Bragg
- Amplificateur EDFA
- Multiplexage en longueur d'onde DWDM pour discriminer les différents retours de chaque réflecteur.
- Fibres optiques monomodes télécoms standard type G652D



Sensibilité thermique des fibres optiques

- L'indice de réfraction des fibres et leur longueur sont dépendants de la température : Une fibre optique mono mode télécom standard présente une sensibilité thermique de l'ordre de 35 ps/km.K
- La sensibilité à l'élongation d'une fibre optique est typiquement de 3.75 ps/mm
- Sans compensation des phénomènes thermiques ou sans connaissance de la température de la fibre, la limite de mesure peut être imposée par l'incertitude sur la température réelle tout le long de la fibre.
- 3 options
 - Mesure en parallèle sur 1 fibre sous contrainte et une fibre libre
 - Mesure sur une seule fibre thermiquement stable (fibre enfouie) -> Mesure limitée à des périodes de qqs mHz au MHz
 - Mesure avec système de compensation thermique

Compensation Thermique 1

Mesure de la température

- Mesure externe de la température avec un interrogateur du type Raman
 - Mesure répartie à 0.1 K



+ Simple

- Limité à des mesure d'élongation relative à 10^{-6}

Compensation Thermique 2

Fibre optique compensée

- Mesure de chronométrie standard sur fibres optiques compensée en température
 - Sensibilité thermique 10 ou 20 fois plus faible



- Fibre onéreuse (> qqs 10 € /m) donc pas réaliste sur de grandes longueurs
- + Simple à mettre en oeuvre

Compensation Thermique 3

Mesure chromatique

- Mesure différentielle à deux longueurs d'ondes sur fibre télécom standard
 - basée sur la sensibilité thermique de la dispersion chromatique des fibres

$$\delta x_1 = \gamma_1 \cdot l \cdot \delta T + \beta_1 \cdot \delta l$$

$$\delta x_2 = \gamma_2 \cdot l \cdot \delta T + \beta_2 \cdot \delta l$$

$$\delta l = \frac{1}{\left(\frac{\beta_2}{\gamma_2} - \frac{\beta_1}{\gamma_1}\right)} \cdot \left(\frac{\delta x_2}{\gamma_2} - \frac{\delta x_1}{\gamma_1}\right) = C_\lambda \cdot \left(\frac{\delta x_2}{\gamma_2} - \frac{\delta x_1}{\gamma_1}\right)$$

- Sensibilité chromatique relativement faible



- Nécessite des mesures différentielles très haute résolution
 - + Utilisation de fibres standard
-
-

Compensation Thermique 4

Mesure en polarisation

- Mesure différentielle à deux polarisations croisées sur fibre optique à maintien de polarisation
 - Fibres PM donc onéreuses (> 10 € /m)
 - basée sur la sensibilité thermique de la biréfringence

$$\delta x_e = \gamma_e \cdot l \cdot \delta T + \beta_e \cdot \delta l$$

$$\delta x_o = \gamma_o \cdot l \cdot \delta T + \beta_o \cdot \delta l$$

$$\delta l = \frac{1}{\left(\frac{\beta_o}{\gamma_o} - \frac{\beta_e}{\gamma_e}\right)} \cdot \left(\frac{\delta x_o}{\gamma_o} - \frac{\delta x_e}{\gamma_e}\right) = C_p \cdot \left(\frac{\delta x_o}{\gamma_o} - \frac{\delta x_e}{\gamma_e}\right)$$

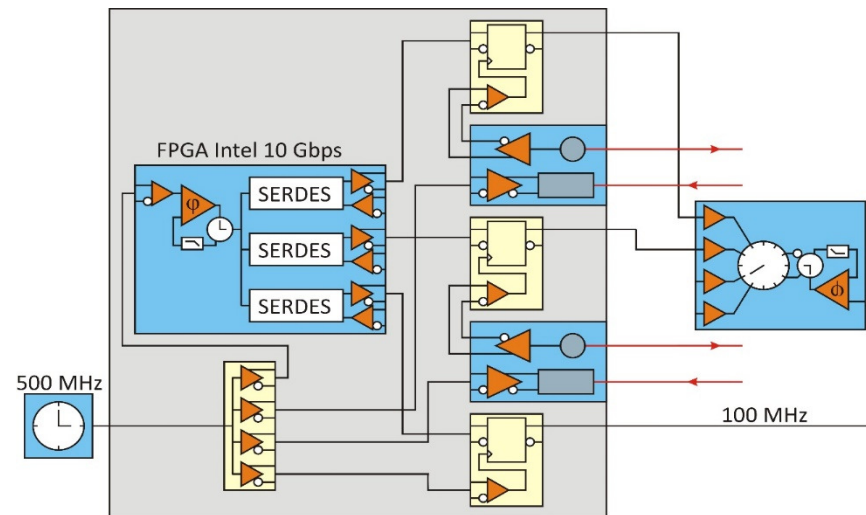
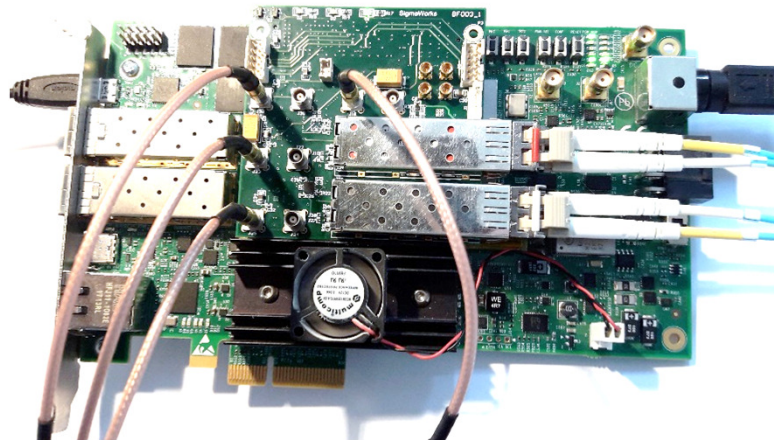
- Sensibilité chromatique relativement importante et mesure différentielle interférométrique



- + Très bonne discrimination température contrainte
 - Pas réaliste sur de très grandes longueurs
-
-

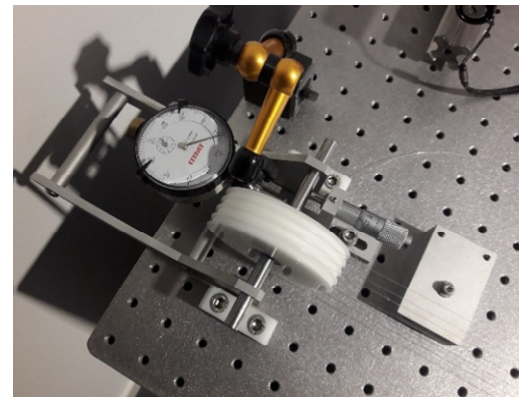
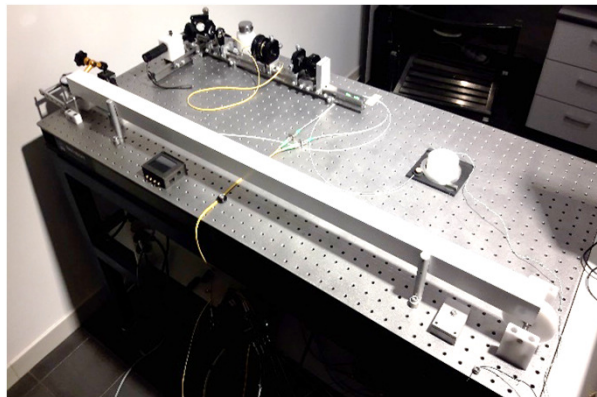
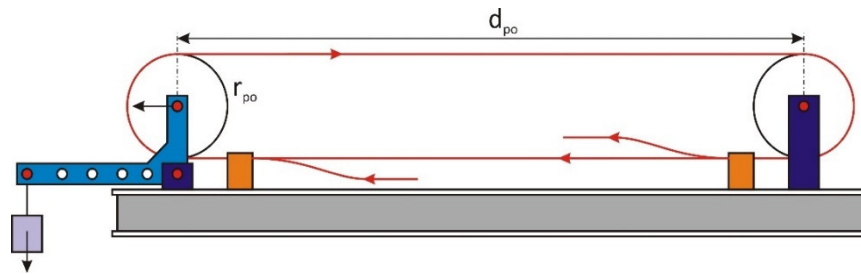
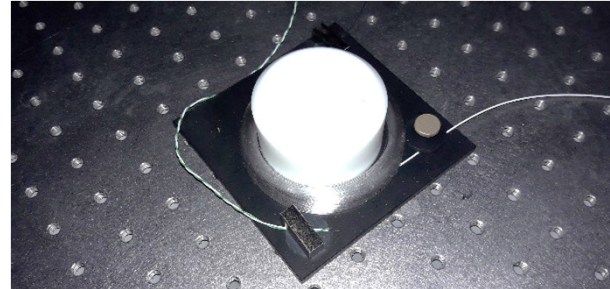
Banc de tests Chronométrie - Signaux

- Chronométrie : Dateur Sub-picoseconde STX301
- Système de génération de signaux – détection télécom
 - FPGA télécom (12 lignes SERDES 12.5 GBps)
 - Carte dédiée double Transceiver SFP+



Banc de tests Thermique et Contrainte Fibre

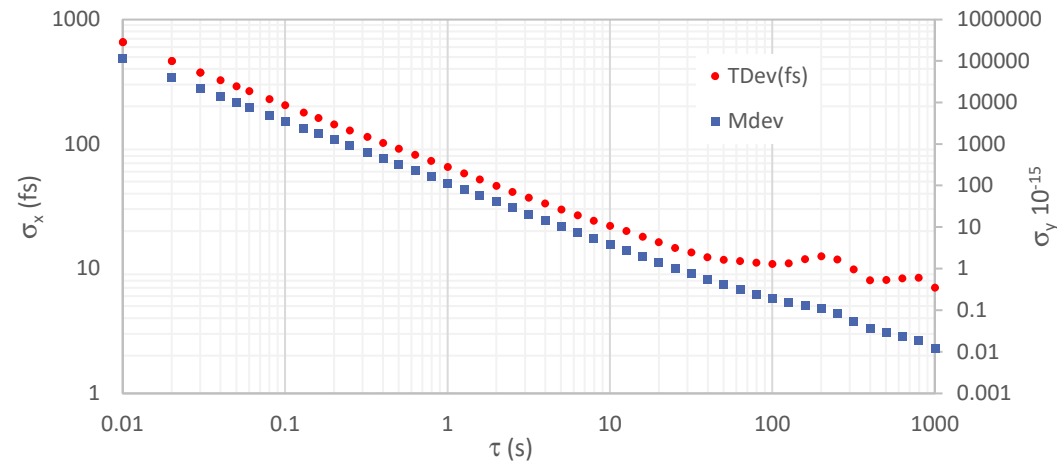
- Thermique
 - Etuve régulée
 - Toron de fibre libre
- Contrainte mécanique fibre
 - 2 x 3 poulies mobiles
 - Longueur totale : 8 m
 - Elongation max : 60 mm



Banc de test

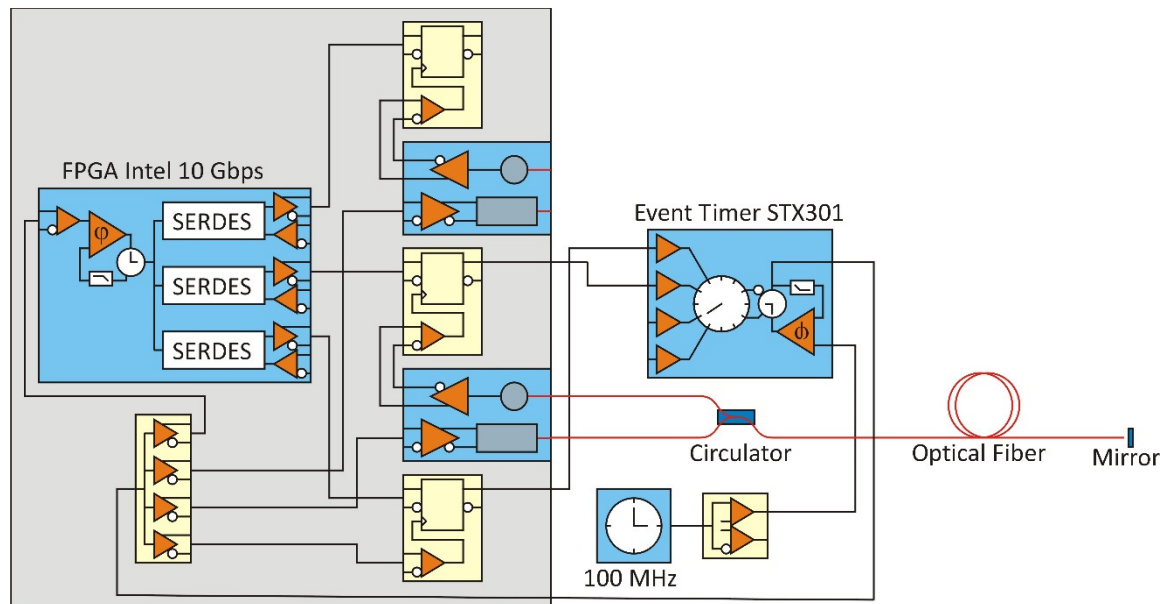
Performances

- Performance du banc de mesure sur signaux de référence
 - Incertitude : 700 fs RMS
 - Tdev @ $\tau_0 = 0.01$ s et $\tau < 100$ s : $70 \cdot 10^{-15} \tau^{-1/2}$
 - Tdev @ $\tau = 1000$ s : $10 \cdot 10^{-15} \tau^0$



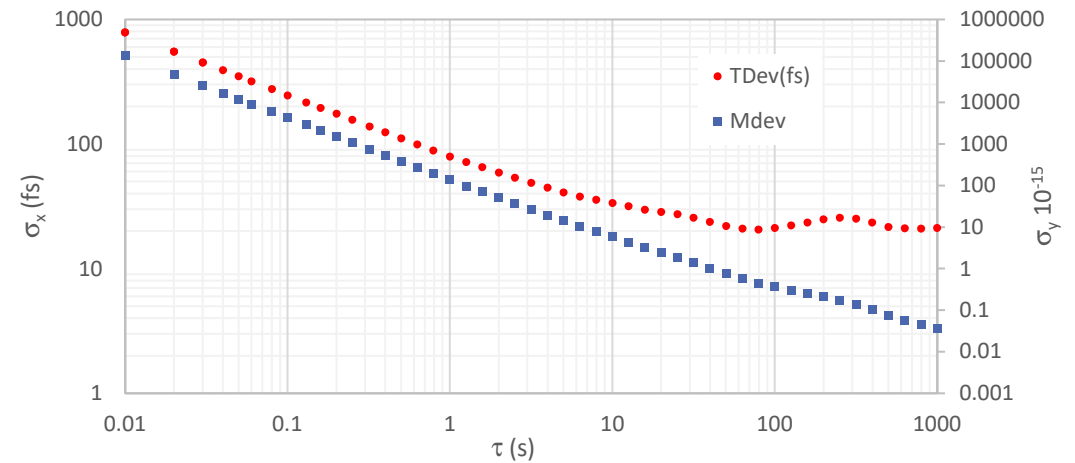
Mesure synchrone en propagation aller retour Sans compensation thermique

- Configuration mono chromatique
 - Transceiver DWDM 10 Gbps @ 1545 nm
 - Puissance optique en réception – 5 dBm
 - Mono réflecteur : Miroir métallique

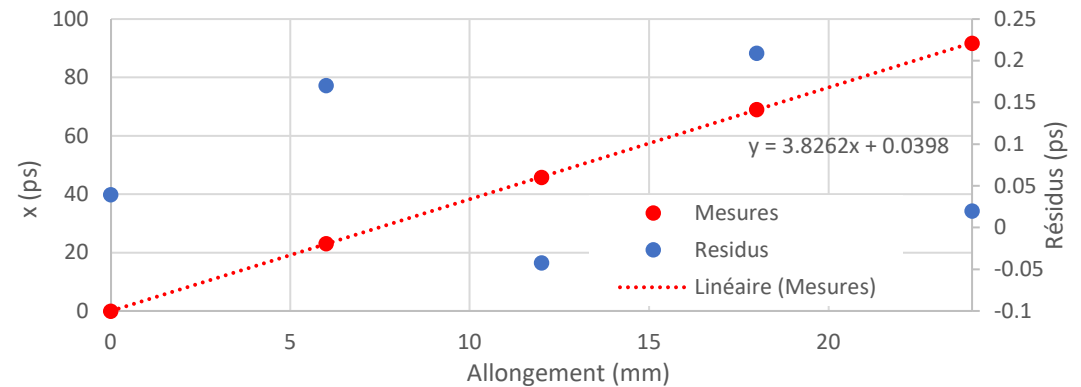


Mesure synchrone en propagation aller retour Sans compensation 1 m

- Performance
 - Incertitude : 800 fs RMS
 - Tdev @ $\tau_0 = 0.01$ s et $\tau < 100$ s : $90 \cdot 10^{-15} \tau^{-1/2}$
 - Tdev @ $\tau = 1000$ s : $20 \cdot 10^{-15} \tau^0$

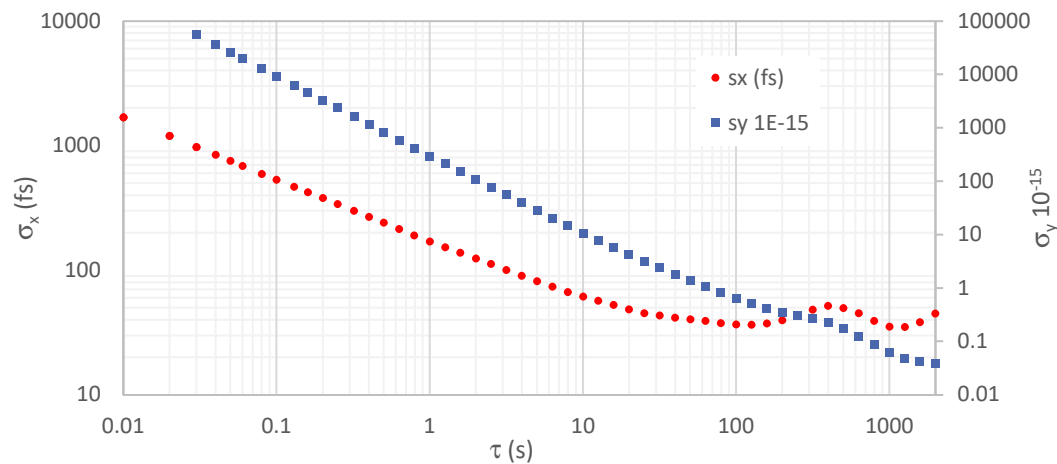


- Linéarité élongation



Mesure synchrone en propagation aller simple

Sans compensation : 1 km



- Incertitude relative @: $u(\varepsilon) = \frac{\delta l}{l} = \frac{\delta \tau}{\tau} = 10^{-8}$
- Extrapolé @ 10 km : 10^{-9}

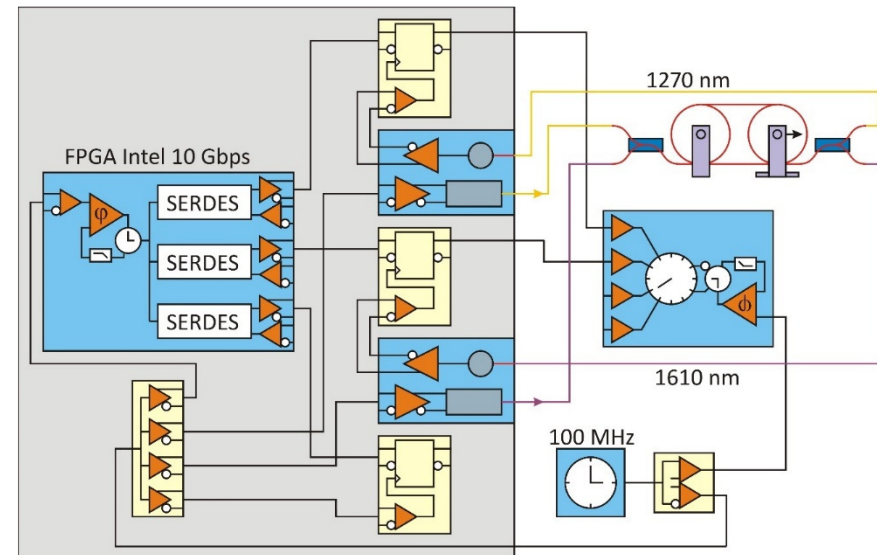
Mesure synchrone en propagation aller simple Avec compensation thermique chromatique

- Configuration bi chromatique
 - Transceiver DWDM 10 Gbps @ 1270 nm et 1610 nm
 - Puissance optique en réception – 5 dBm
 - Mono réflecteur : Miroir métallique

- On obtient numériquement (en ps et mm)

$$\delta l = 0.53 \cdot \left(\frac{\delta x_2}{0.0397} - \frac{\delta x_1}{0.03945} \right)$$

- Soit une sensibilité différentielle de 0.055 ps/mm
- A comparer à 3.75 ps/mm pour une mesure directe



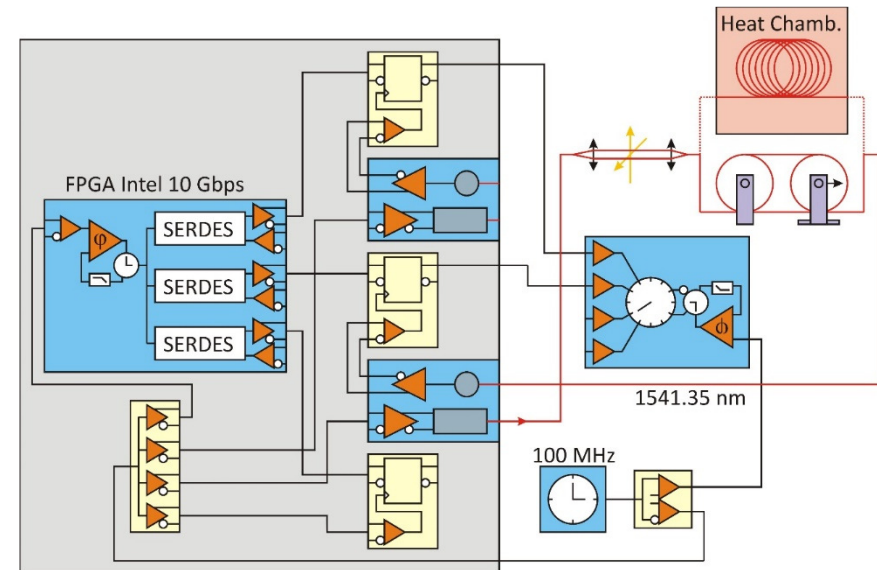
Mesure synchrone en propagation aller simple Avec compensation thermique Polarimétrique

- Configuration sur fibre PM
 - Transceiver DWDM 10 Gbps @ 1541 nm
 - Puissance optique en réception – 5 dBm
 - Mono réflecteur : Miroir métallique

- On obtient numériquement (en ps et mm)

$$\delta l = 0.16 \cdot \left(\frac{\delta x_o}{0.0358} - \frac{\delta x_e}{0.0375} \right)$$

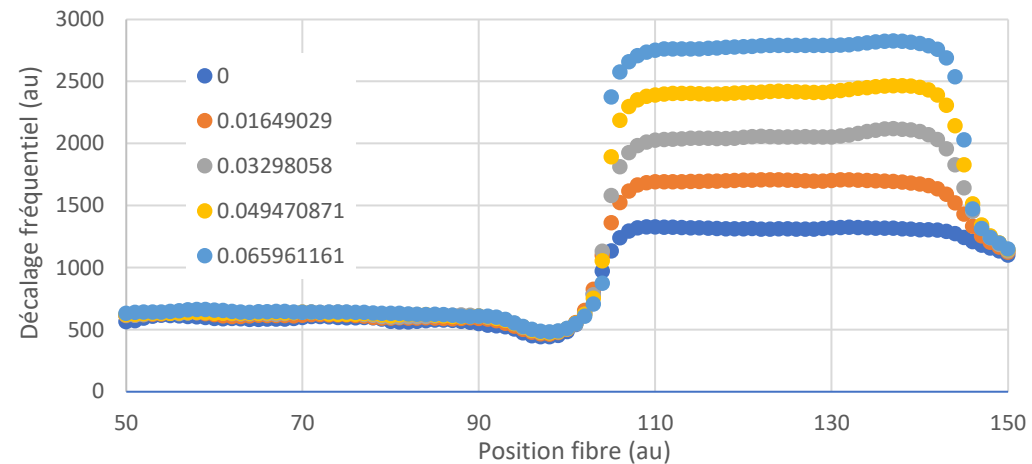
- Soit une sensibilité différentielle de 0.15 ps/mm



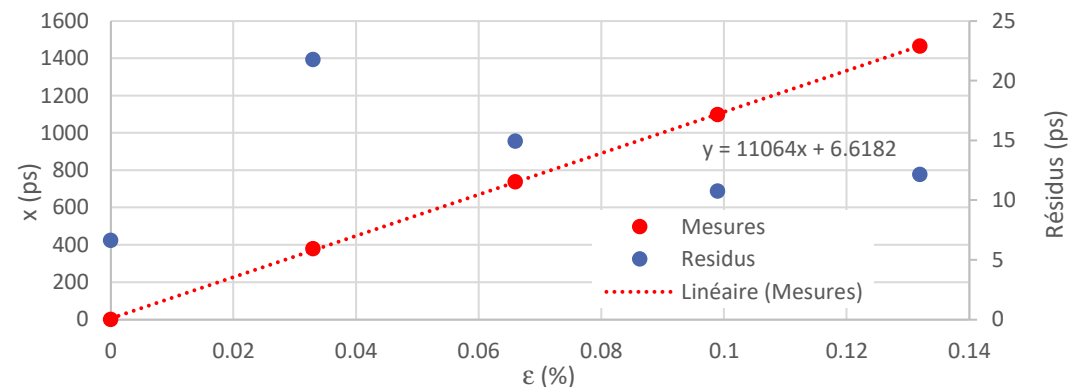
Comparaison Brillouin Instrument : Febus Optics G1C



- Comparaison
 - mesures de contraintes par décalage fréquentiel Brillouin (Febus G1C – Géoazur)
 - Mesure par chronométrie
- Mesure brute Brillouin



- Linéarité



Prospectives Conclusions

- Développement d'une nouvelle génération de dateur
 - Incertitude : < 300 fs RMS
 - Cadence de mesure : 10 MHz
 - Temps mort : 10 ns
 - Stabilité @ 1000 s : < 10 fs
- Développement d'un capteur sur fibre monomode télécom à compensation thermique chromatique
 - Chronométrie différentielle haute performance @ 1270 et 1610 nm
 - Objectif visé < 10^{-7}
- Développement d'un capteur très haute performance à compensation en polarisation : Fibre PM
 - Couplage chronométrie différentiel
 - Objectif visé < 10^{-8} @ qqs centaines de mètres

