

# Mesure de déformation à haute résolution en contexte de crise: que peut-on faire faire, et pour quoi?

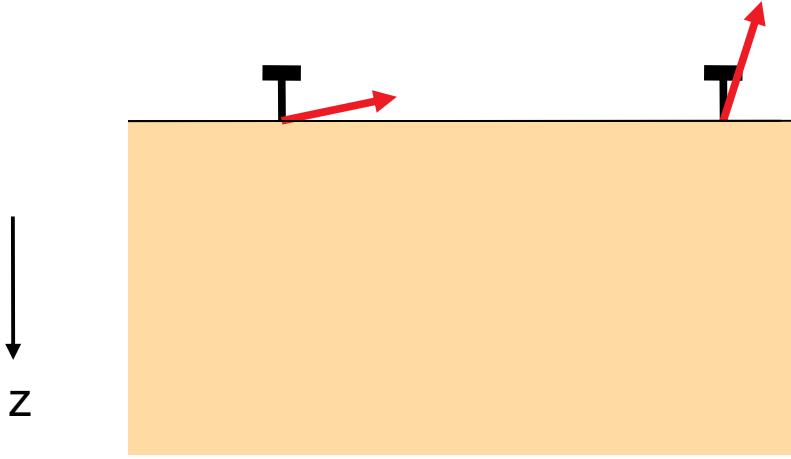
Pascal Bernard (IPGP) et Frederick Boudin (ENS)



Rencontres EPOS-France, Sète  
19-22 novembre 2025

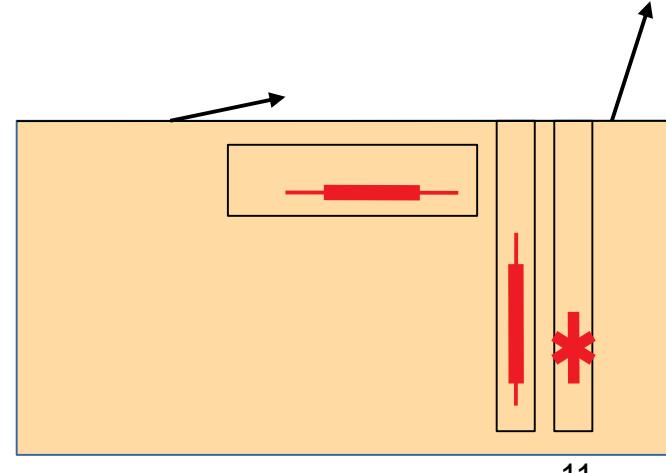


**GNSS:**  
**déplacement** relatif X  
/référence  
→ déformation sur 10 km



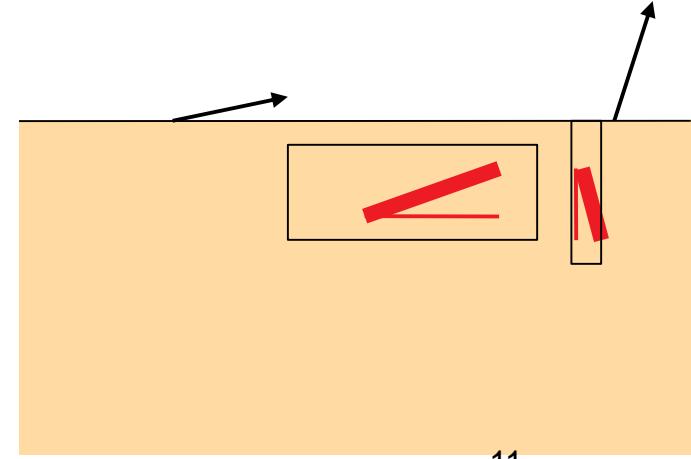
bruit **position** qq  $10^{-3}$  m.<sub>7</sub>  
bruit **déformation** = qq 10

**Extensomètre:**  
→ déformation 1D,3D  
sur longueur 10 m



bruit **déformation** =  $10^{-11}$

**Inclinomètre:**  
rotation  
/ axe horizontal  
Longueur 1-100 m

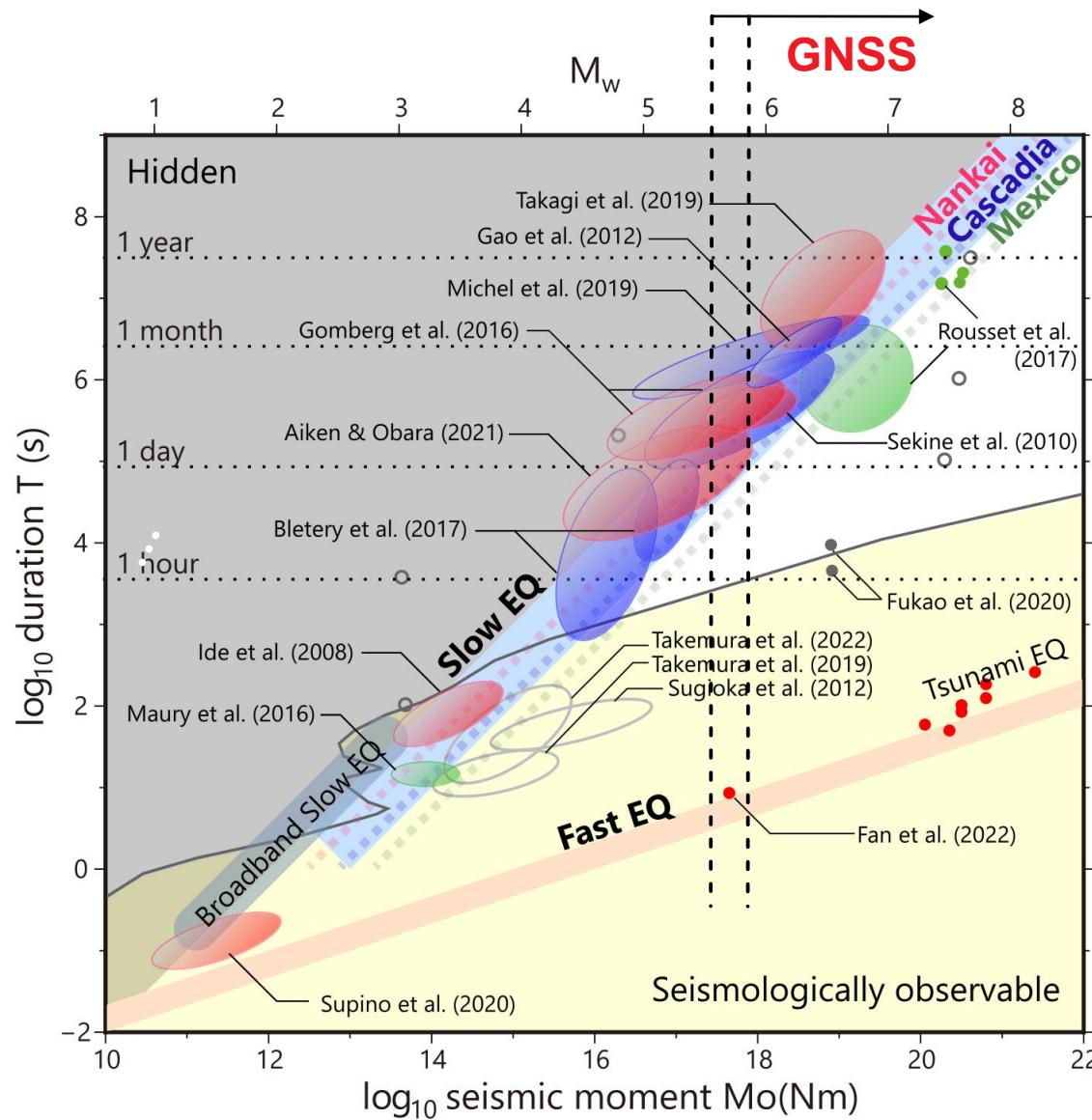


bruit **rotation** = qq  $10^{-11}$  radians

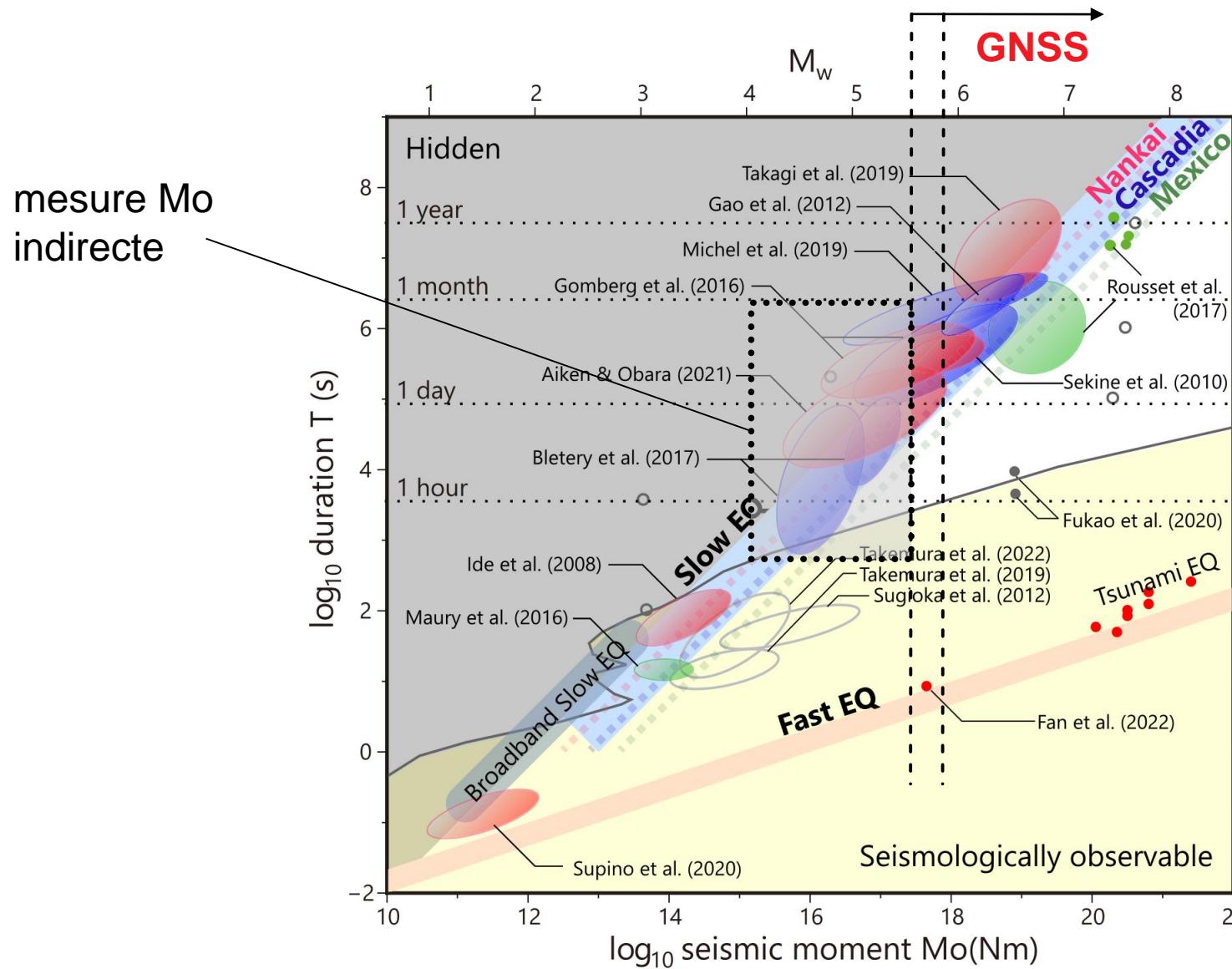
→ haute résolution, mais effets de température  
(instrument et/ou thermostress) à corriger  
→ installation en puits, tunnels ou tranchées

**OBJECTIF:** Detecter – caractériser les éventuelles déformations transitoires:  
→ **séismes** lents  
→ **diffusion de pression de pore**

# SLOW EARTHQUAKE SCALING

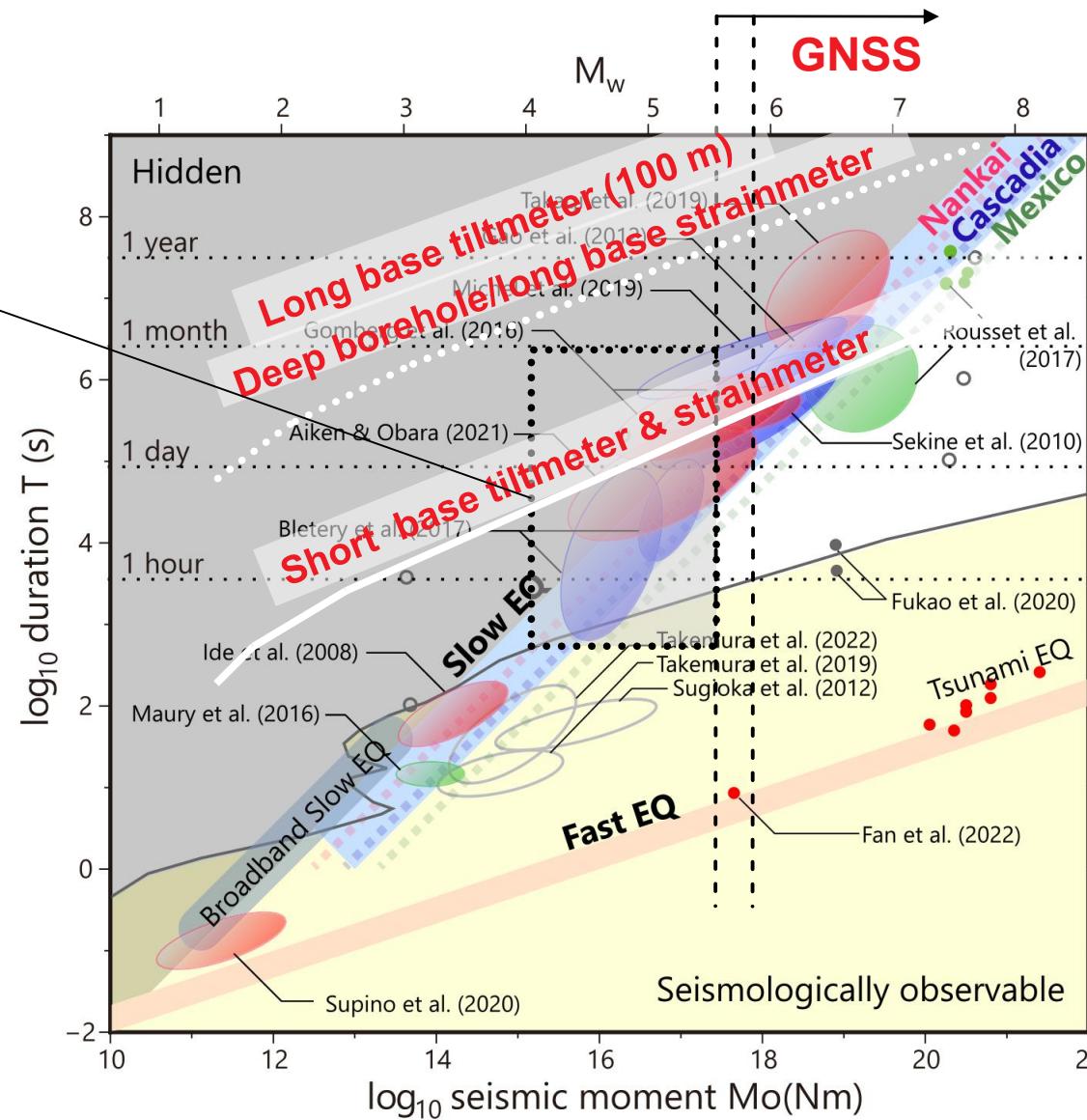


## SLOW EARTHQUAKE SCALING



## SLOW EARTHQUAKE SCALING

## mesure Mo indirecte



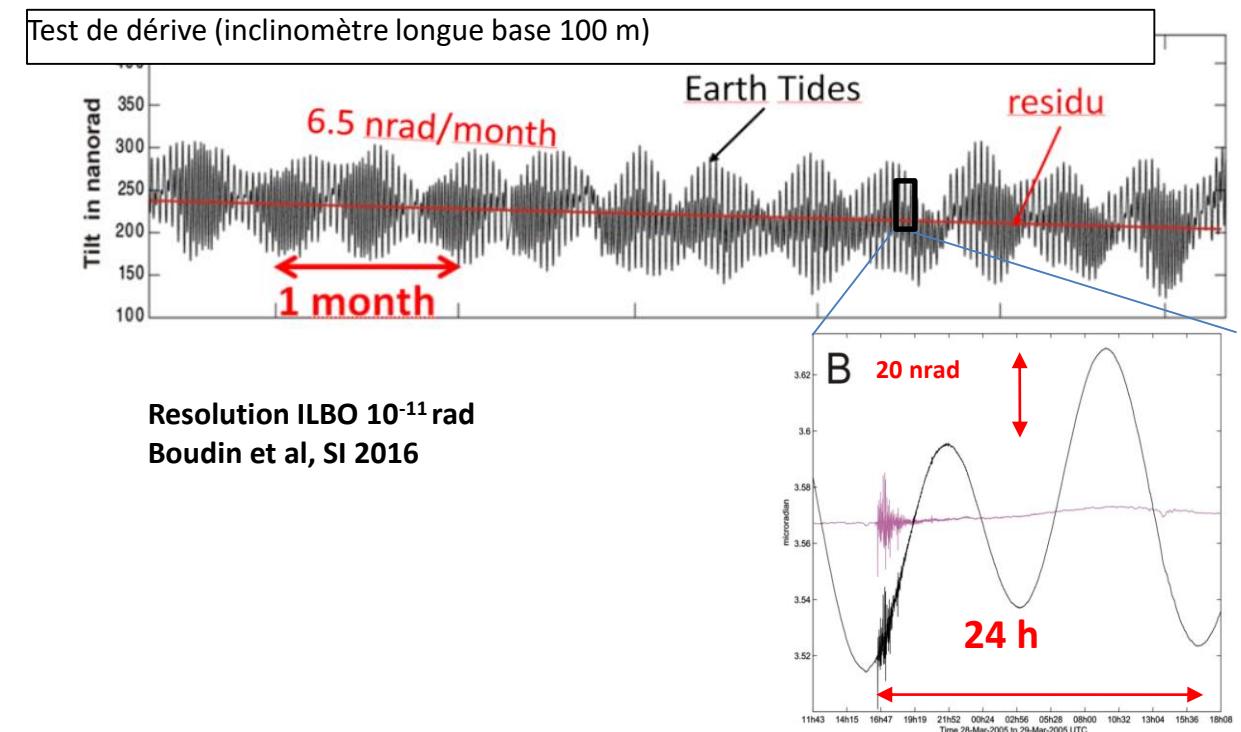
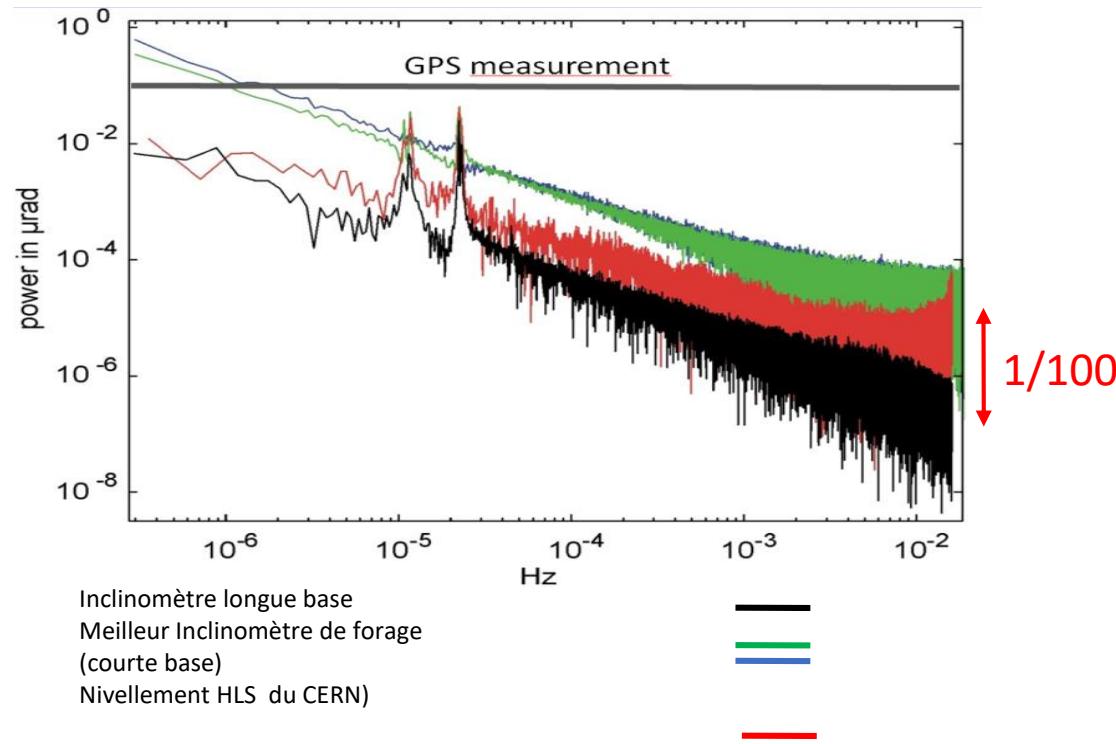
glissements asismiques de forte magnitude (**Mw>6**) détectés par GNSS/GPS => précision ~1 mm

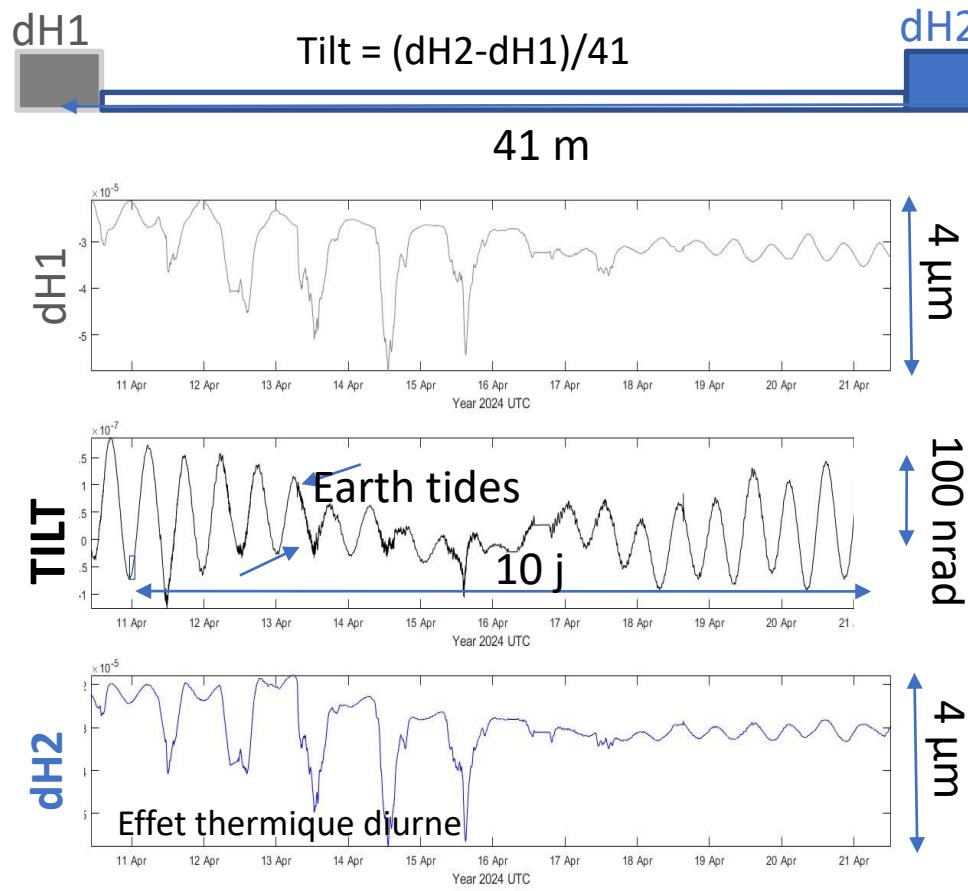
**Challenge:**

Detection des glissements asismiques **Mw<6**, Très faible amplitude:  $10^{-11} - 10^{-9}$  rad  
Très basse fréquence: ~ [jours – mois], Potentiel précurseur des grands séismes.

**Inclinomètre Longue Base Optique, ILBO :**

- Haute résolution  $10^{-11}$  rad et haut pas d'échantillonnage 250 Hz
- Très faible dérive ~ nrad/mois => précision ~ 0.01 mm vu à 10 km





### Sensibilité thermique du niveau hydrostatique:

- mesure des 2 niveaux, sensibles à T

- tilt = différence des niveaux

**compensation lorsque le tube est horizontal**

### Sensibilité thermique via la déformation de la roche

Thermostress

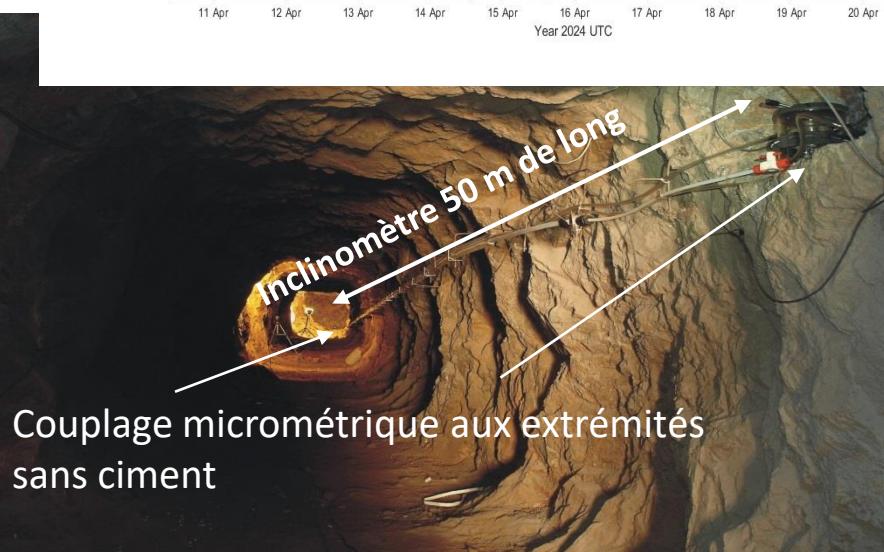
→ sites profonds et stables en température

### couplage parfait avec la roche

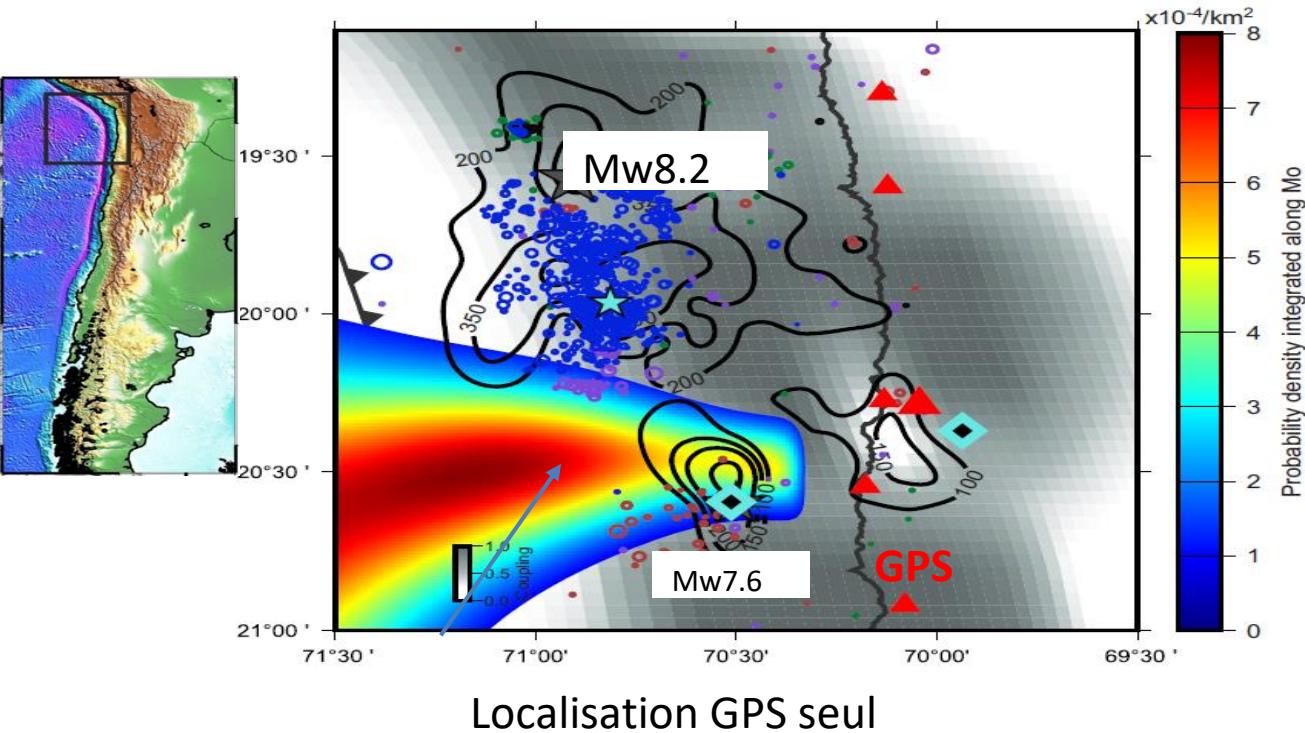
pour éviter les dérives non linéaires

Inclinomètre 50 m de long

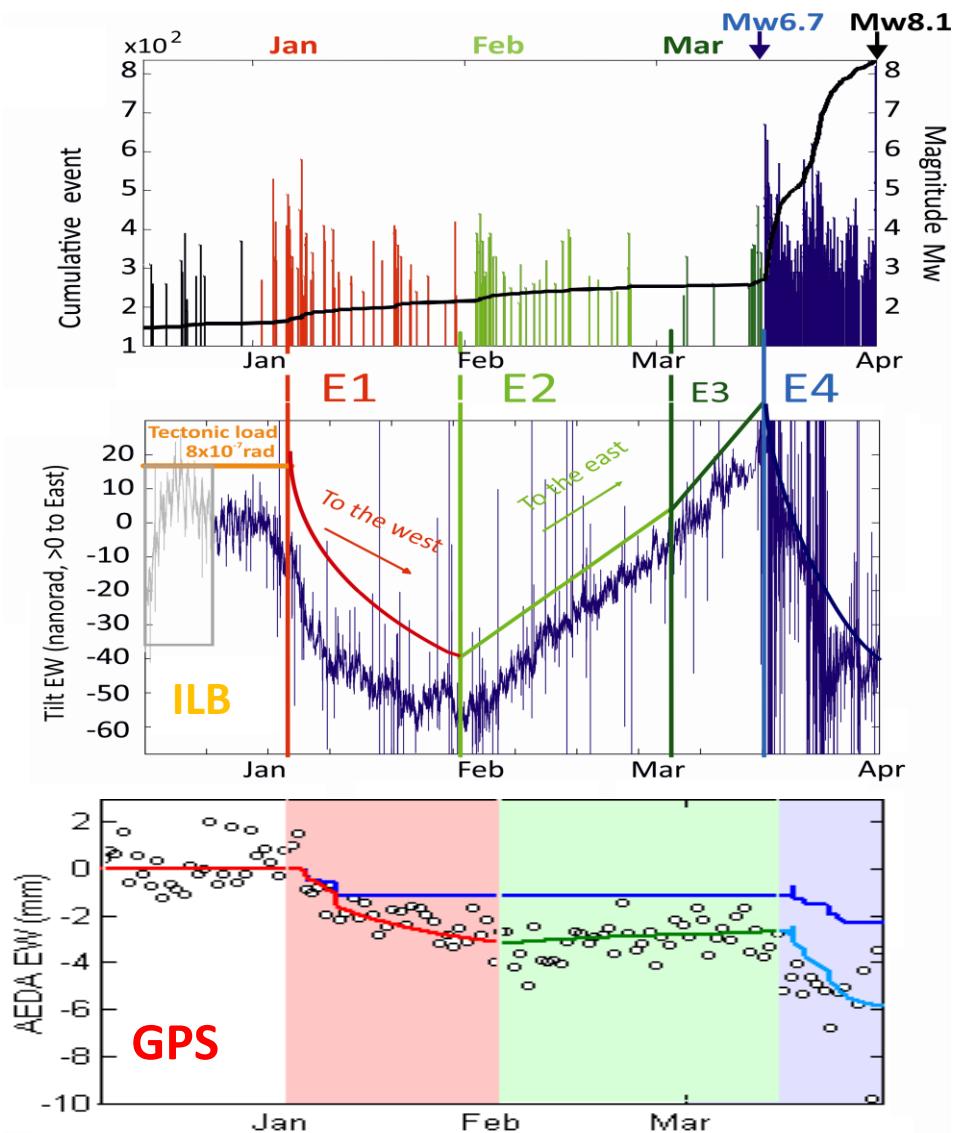
Couplage micrométrique aux extrémités sans ciment



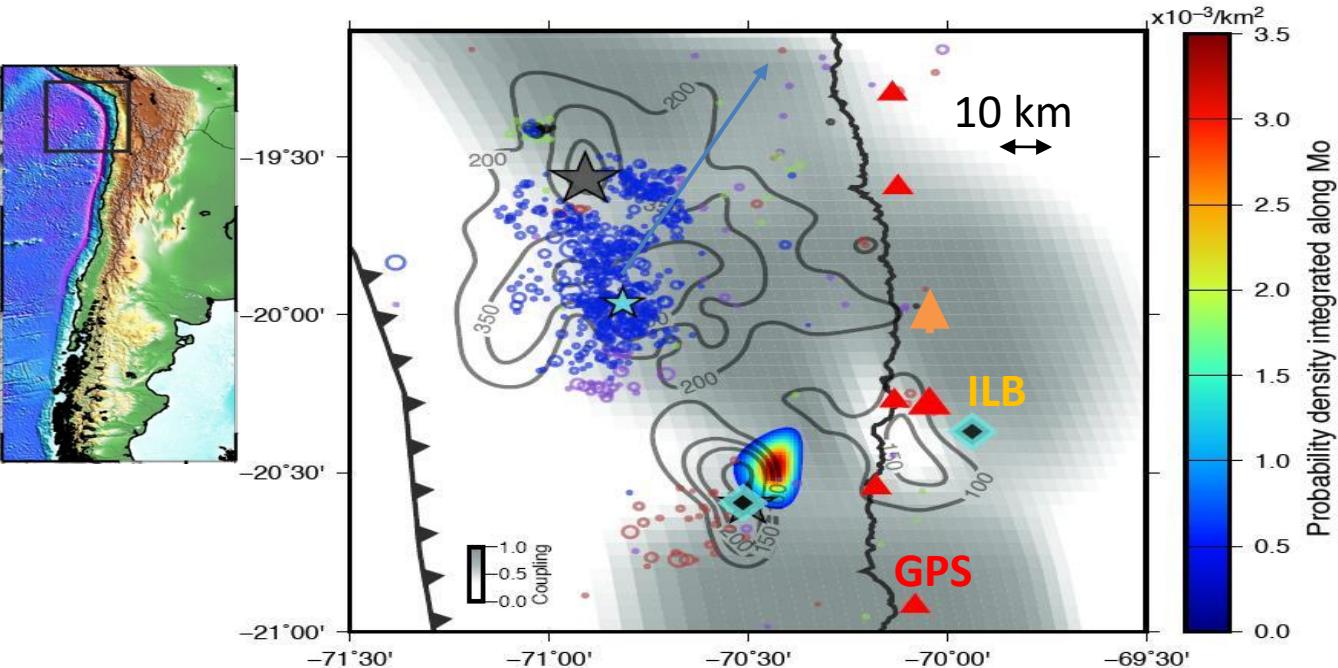
# Séisme d'Iquique 2014, M=8.0 : localisation/quantification des SSE précurseurs avec GNSS



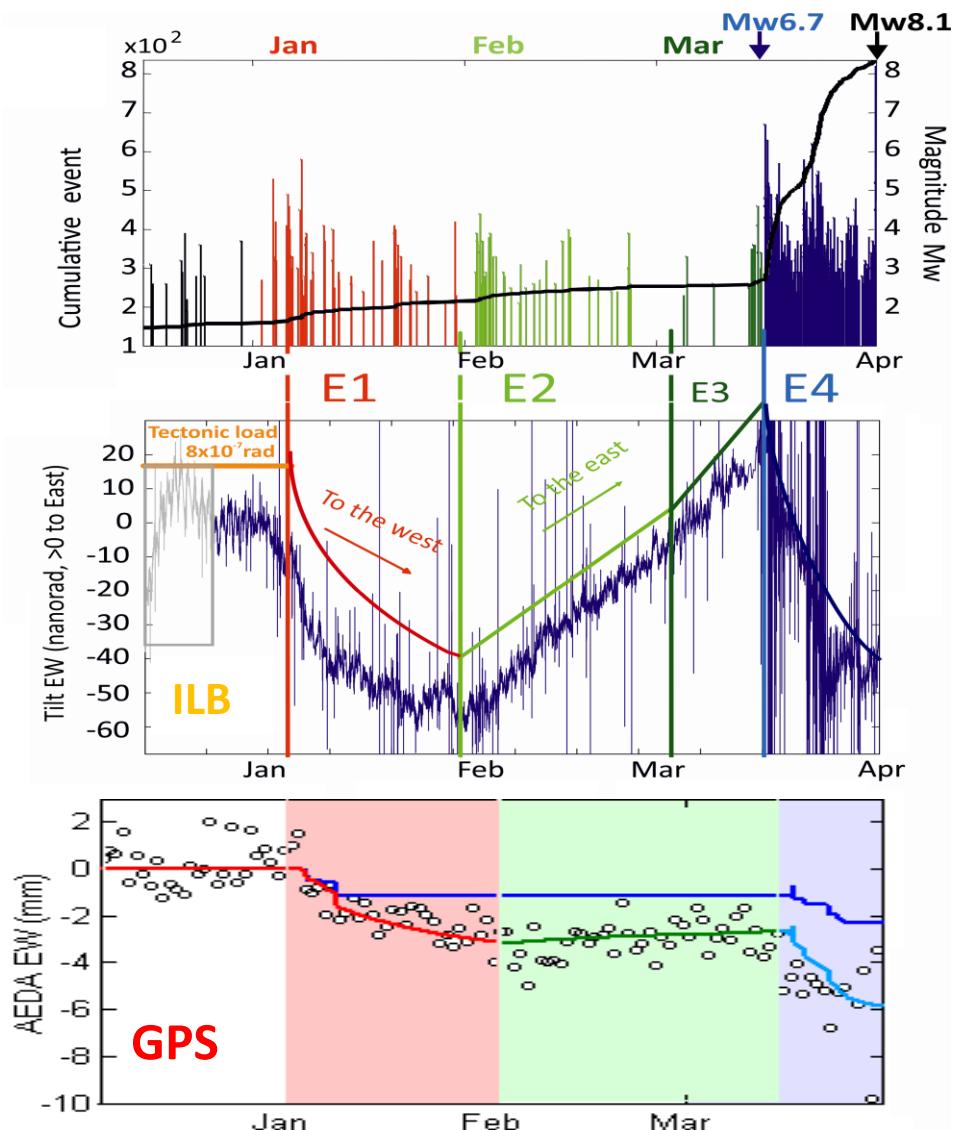
(Boudin *et al*, GJI, 2022)

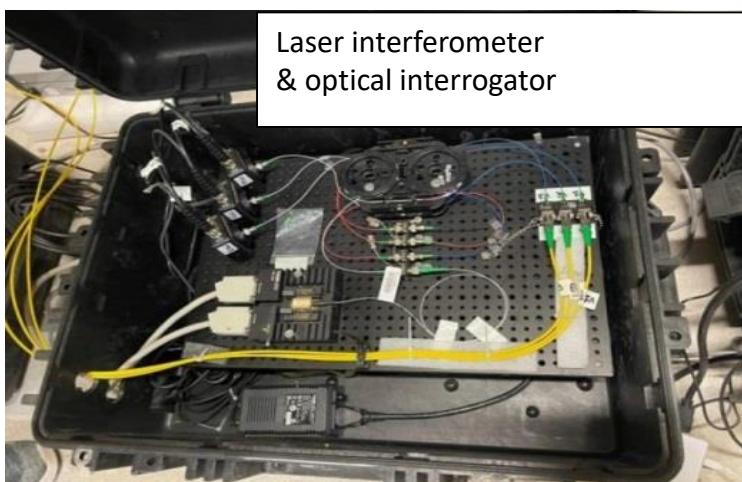
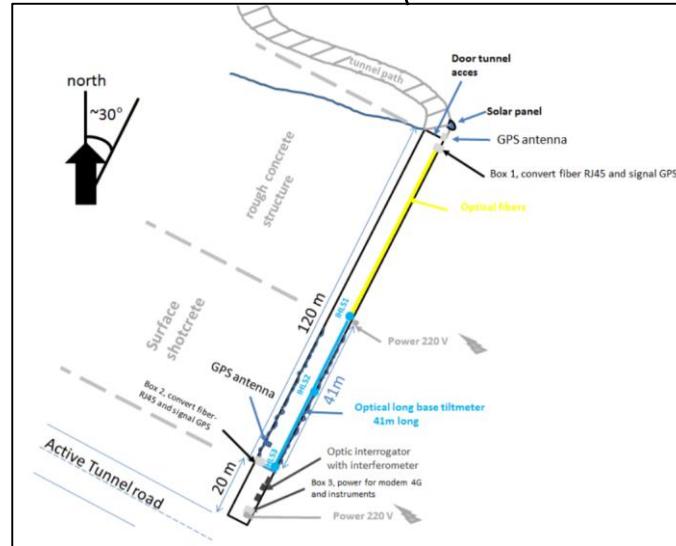
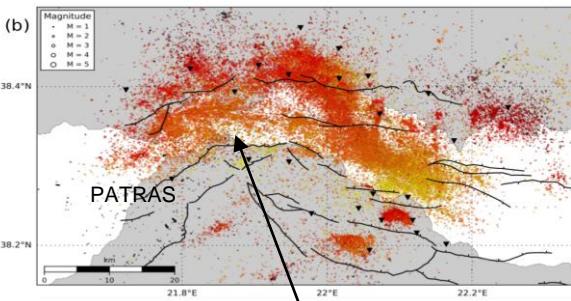


# Séisme d'Iquique 2014, M=8.0 : localisation/quantification des SSE précurseurs avec GNSS et inclinomètre longue base



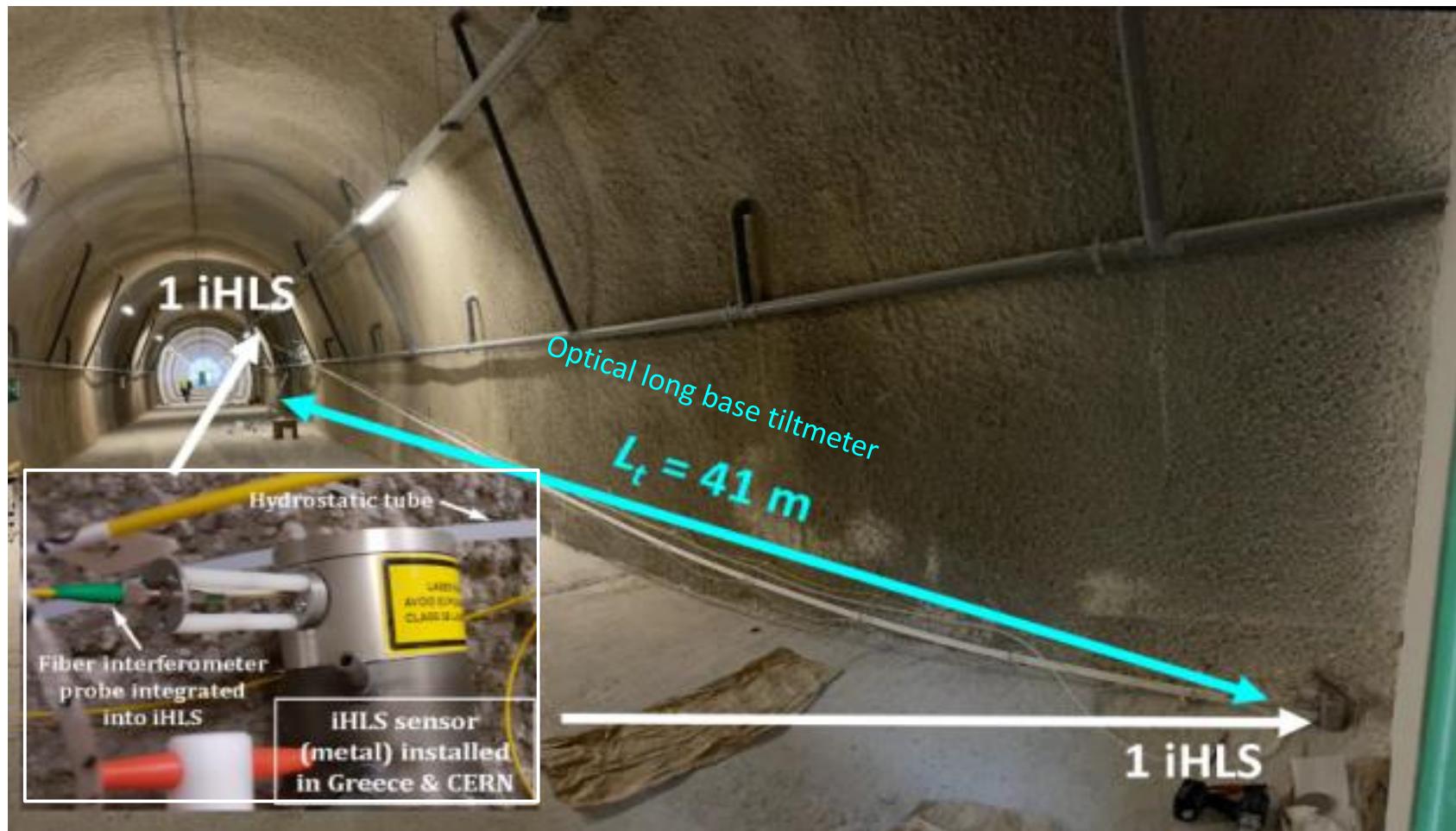
Amélioration significative de la localisation du  
SSE précurseur  
Mw=6, S=10km x 10km





# Installation of a HR optical long base tiltmeter - 2024

## 150 m deep in the Psathopyrgos fault footwall – Corin Near Fault Observatory



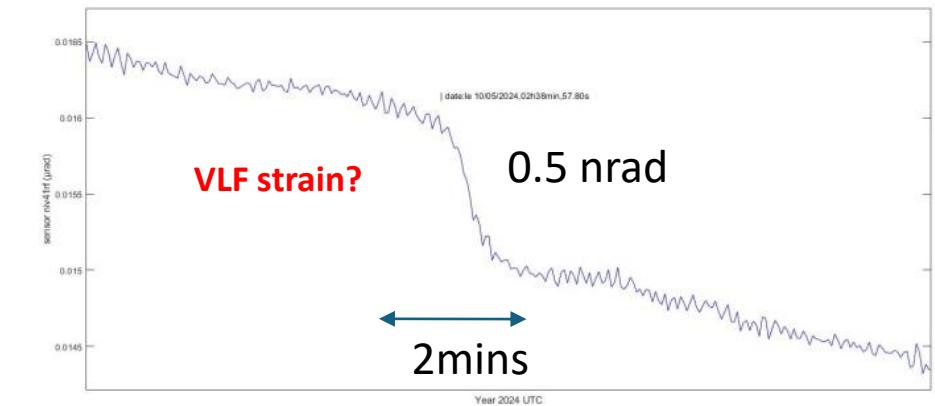
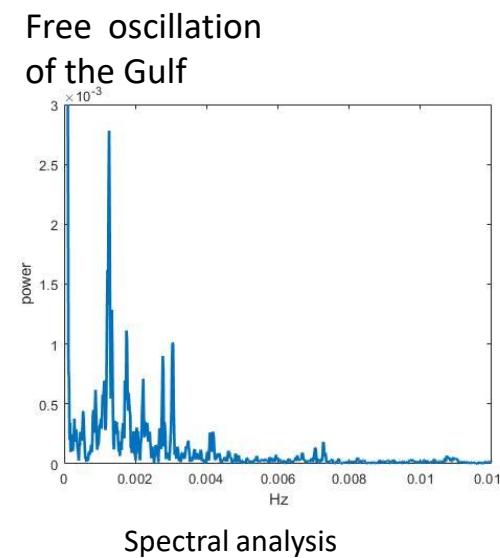
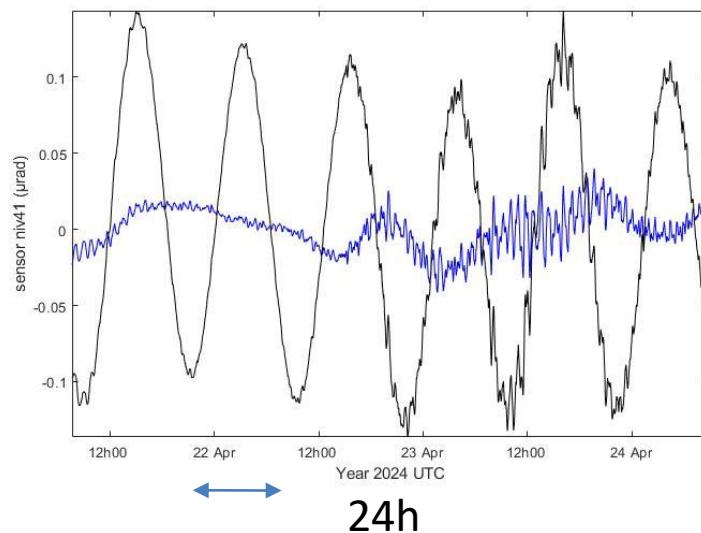
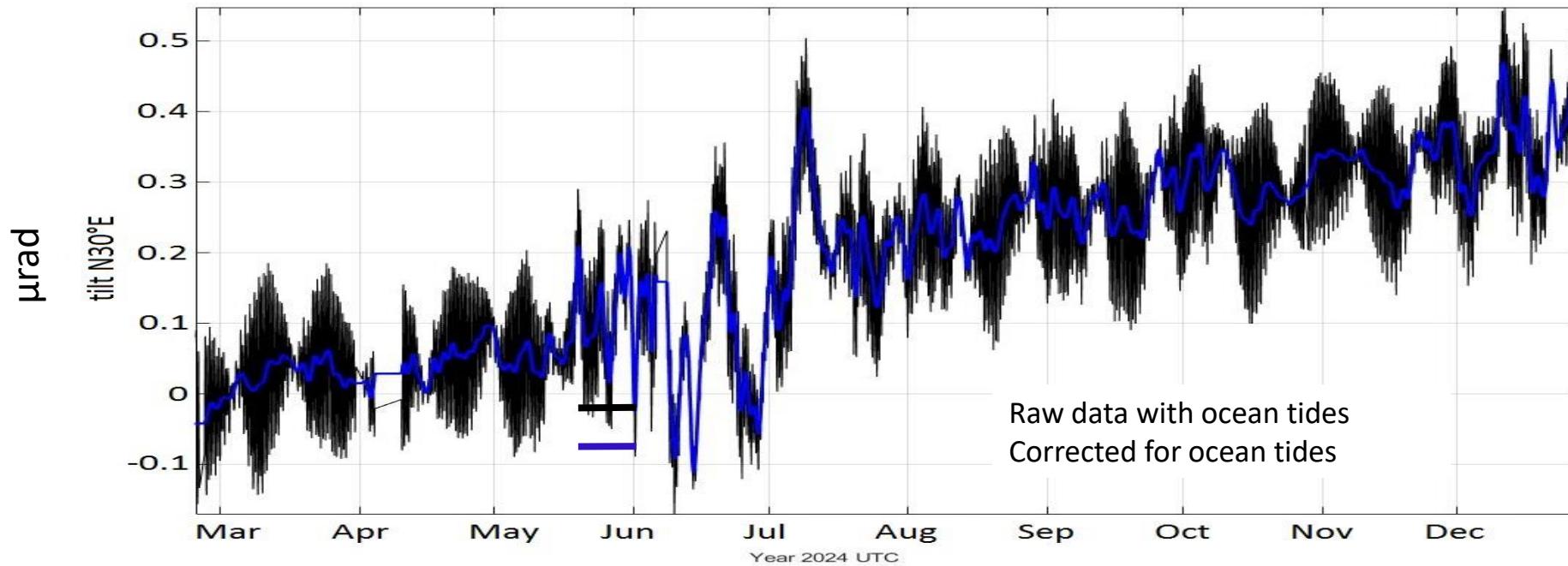
Boudin et al., 2025

Temps d'installation:

- 2 jours pour un inclinomètre de 4m
- 10 jours pour un inclinomètre de 40 m

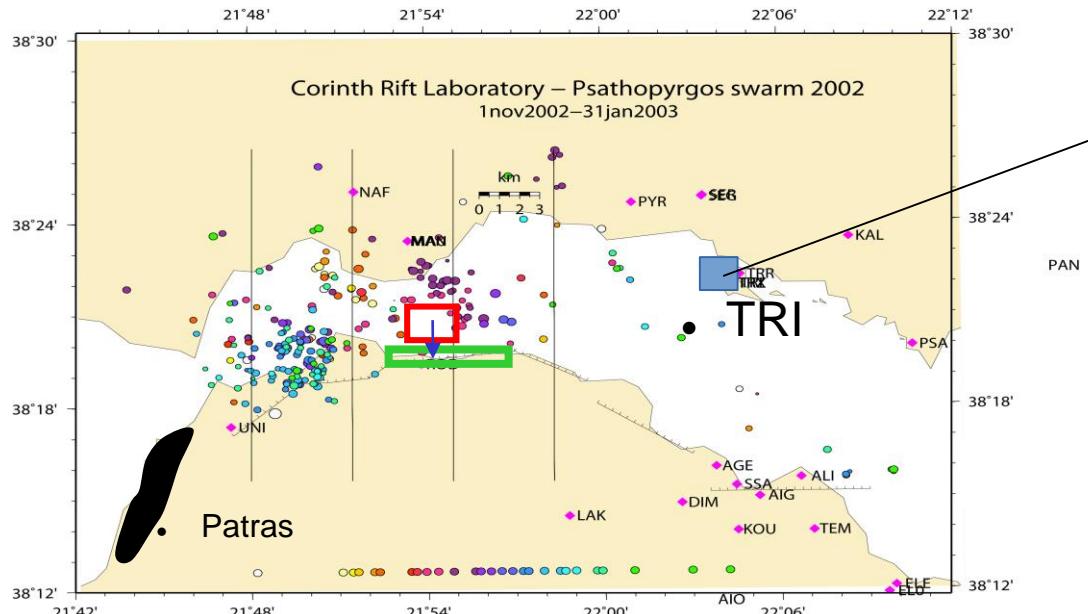
**GPS measurement:** Horizontal strain rate : 1.5 cm/year/10km  $\Leftrightarrow$  1.5 microstr/year

**LONG BASE tilt measurement:** Vertical relative displacement ~0.6 microrad/year

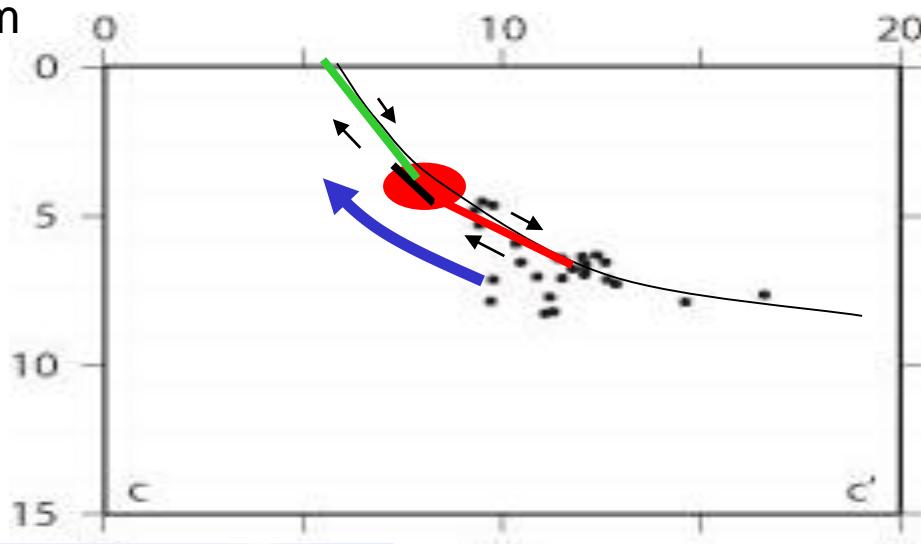
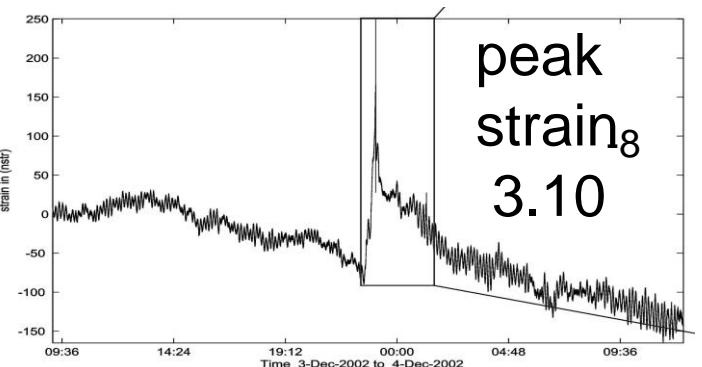


*Boudin, 2025*

- Transient creep (30 minutes) - 3 dec. 2002
- on the Psathopyrgos fault during a strong swarm activity (3 months)

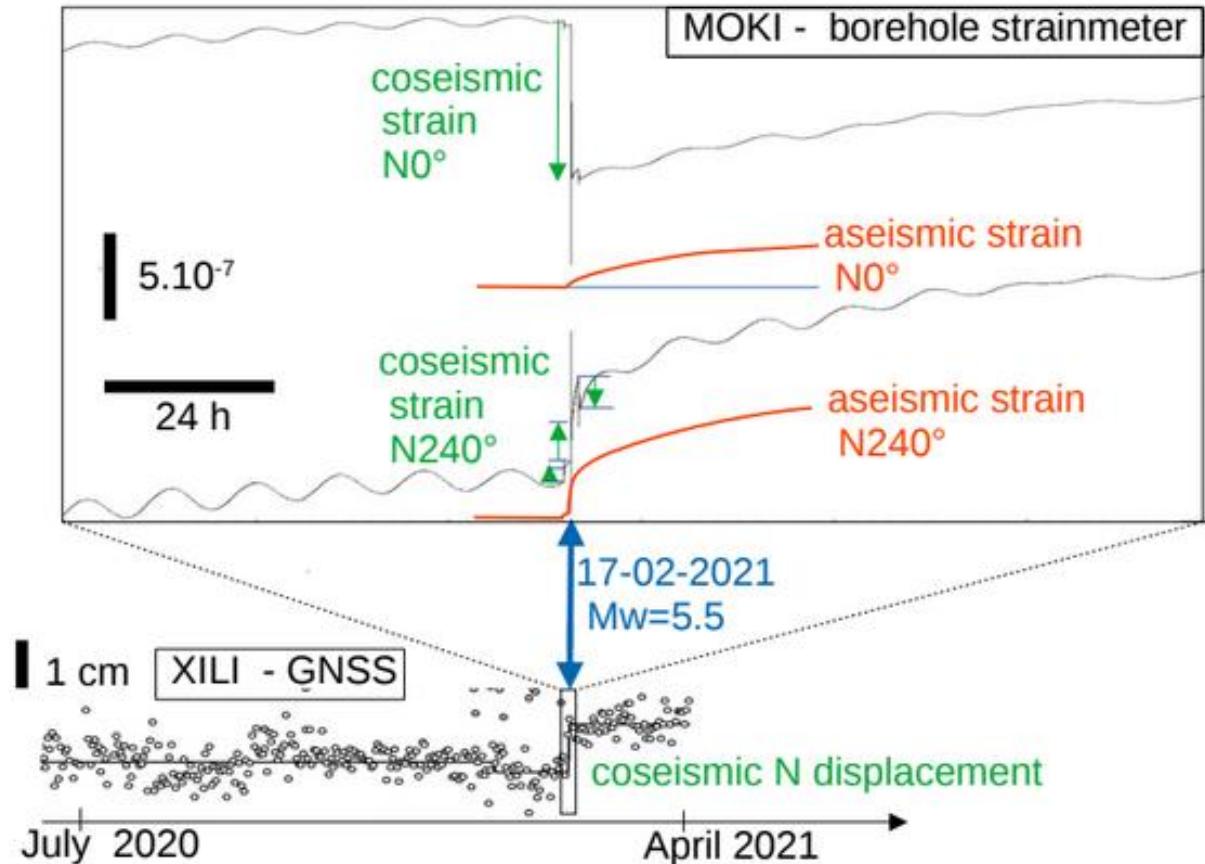


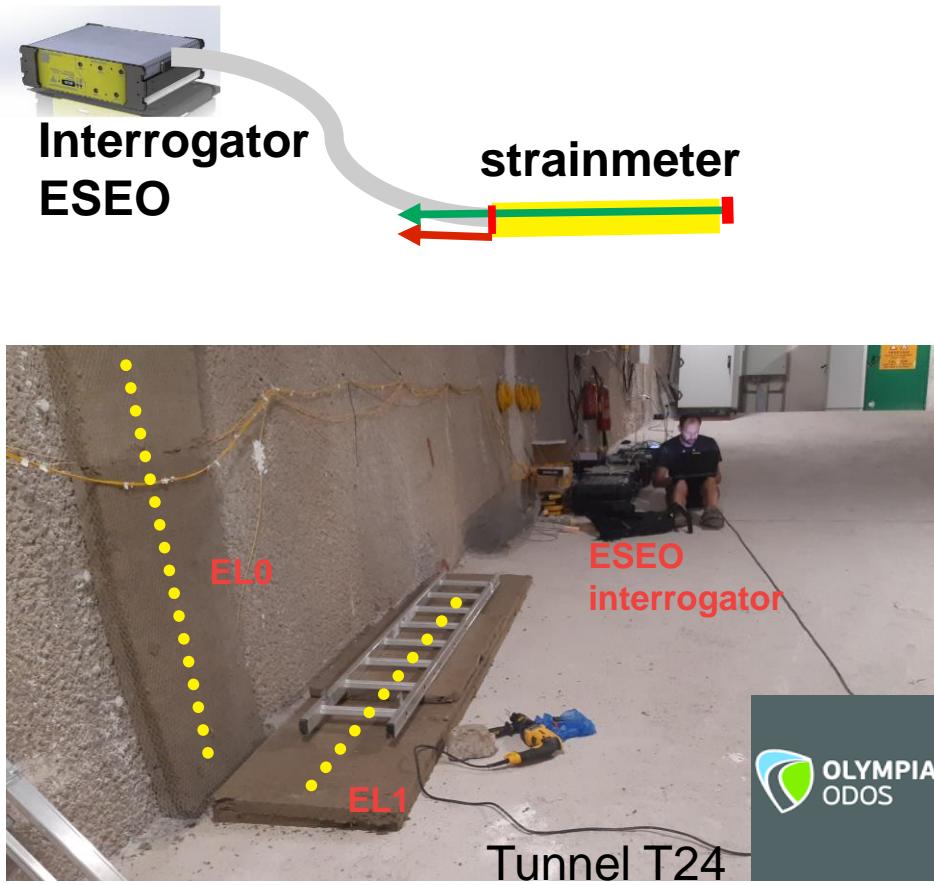
Borehole 150 m



- Afterslip for the M=5.3 , feb.2021 earthquake, Corinth rift

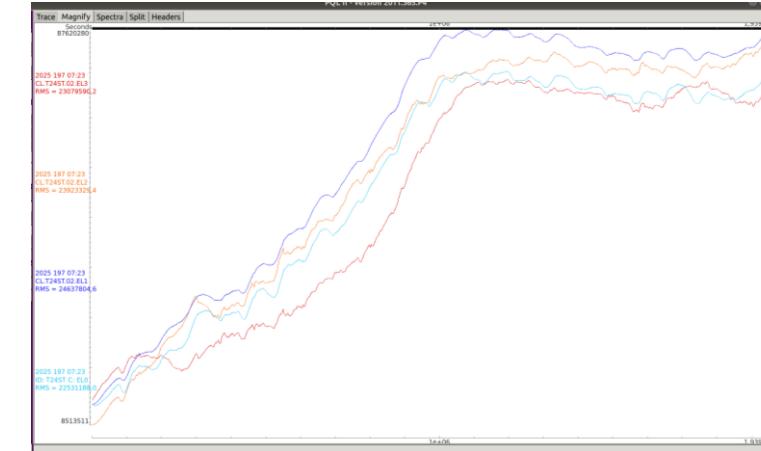
- From strainmeter records: aseismic slip  $M_w = 5$  , same as coseismic
- No coseismic-postseismic separation on GNSS records



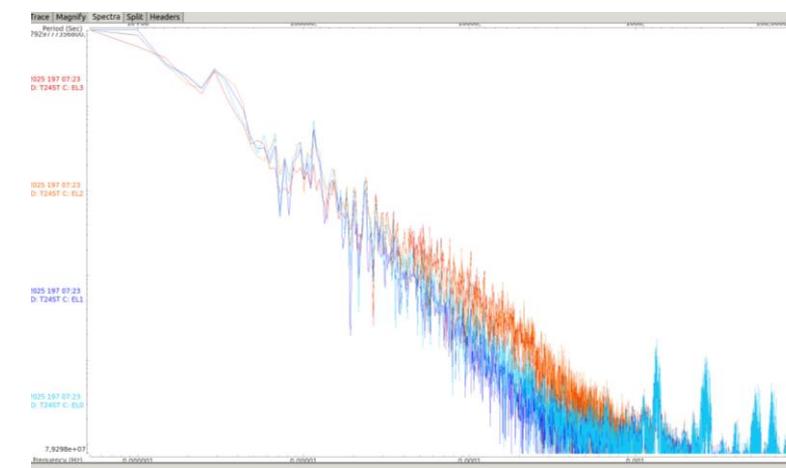


# Installation of Fiber strainmeters in the NFO Corinth Olympia Odos Tunnel T24, june 2025

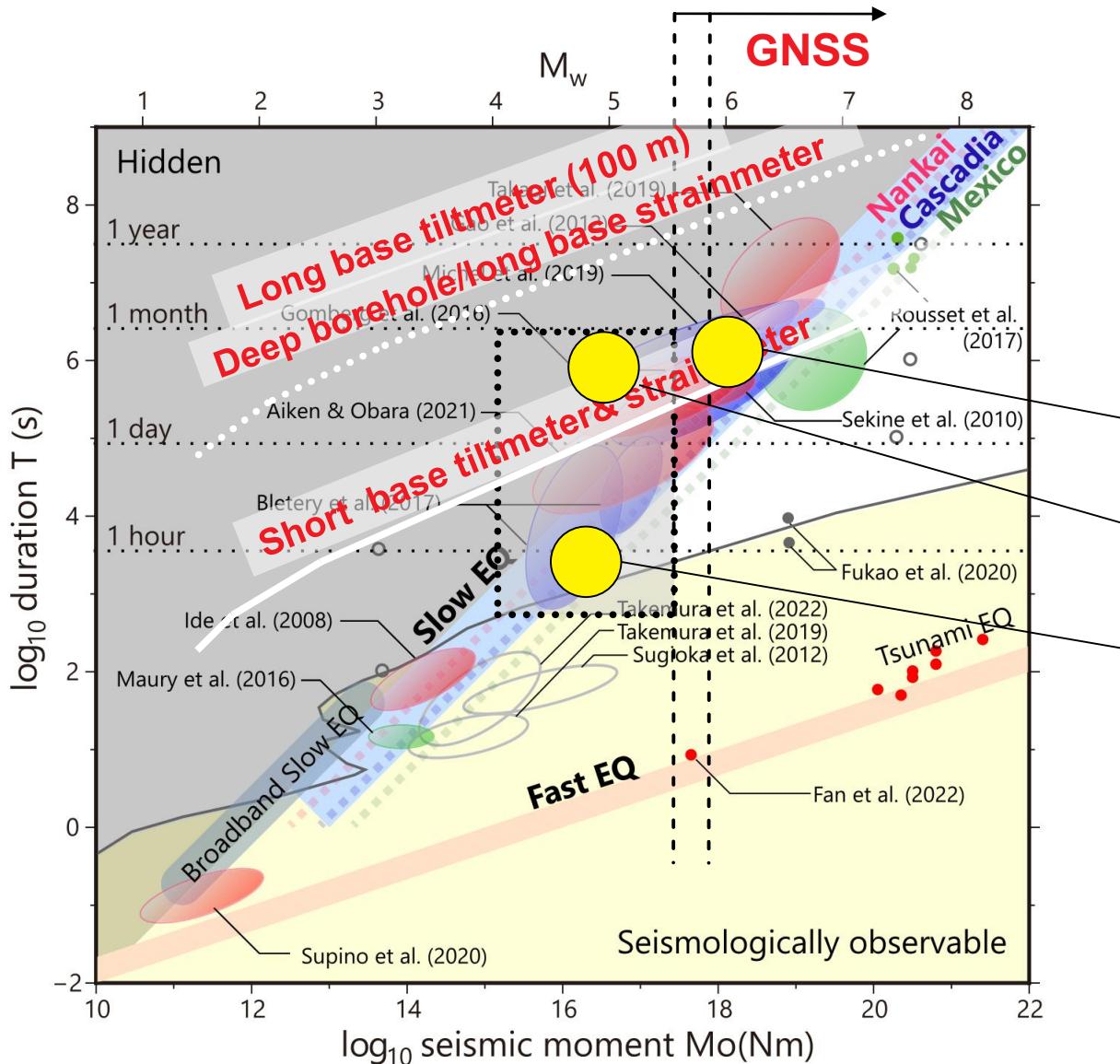
Temps d'installation 4 extensomètres: 2 jours



16 July – 7 August 2025



# SLOW EARTHQUAKE SCALING



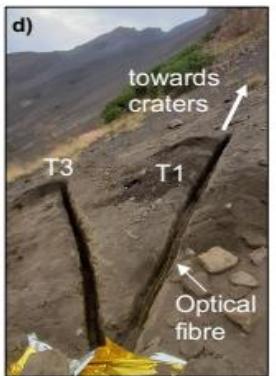
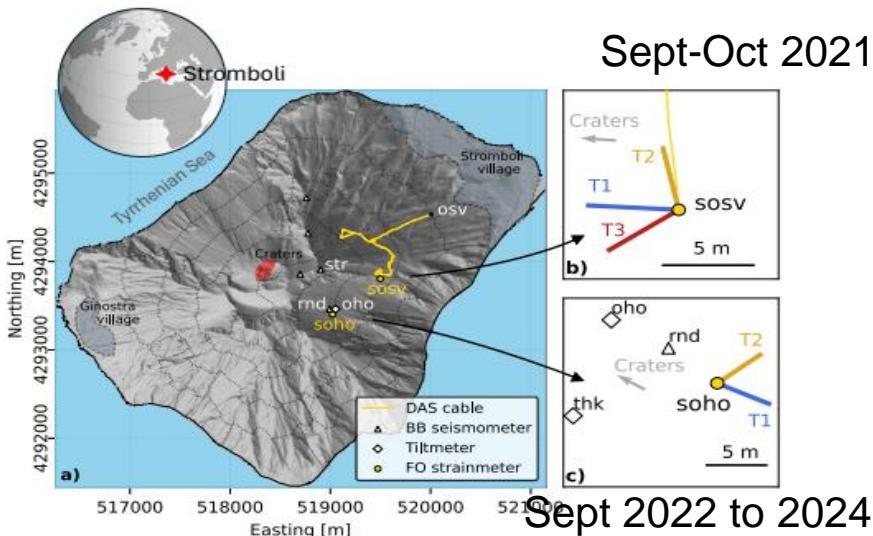
# Extensomètres optiques sur le Stromboli



Strainmeter



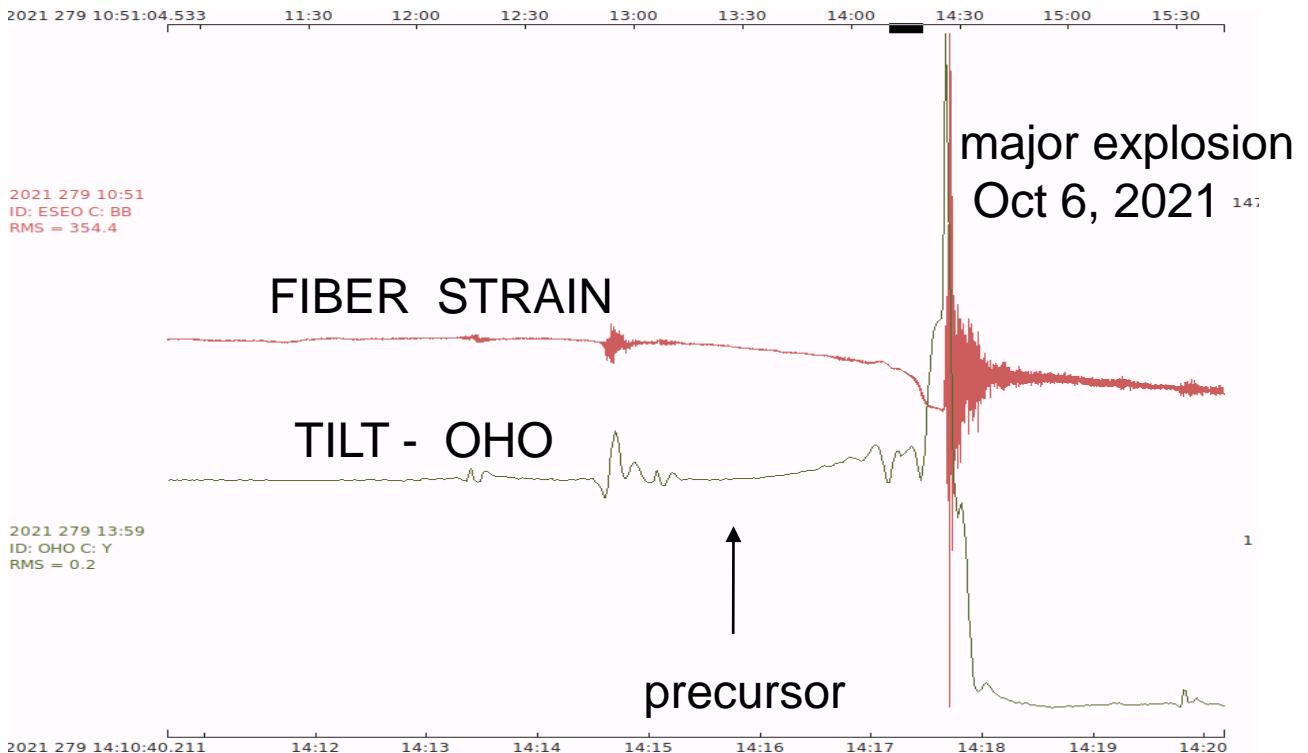
Temps d'installation: 2  
jours



Sept-Oct  
2021



Sept 2022 to  
2024



Needs correction for  
temperature noise from:  
- diode  
- sensing fiber  
- thermostress

# Installations d'inclinomètres et d'extensomètres en temps de crise tellurique

## Plusieurs stratégies possibles:

### 1 - standard: intervention rapide en temps de crise

- recherche de site souterrain
- 2 jours installation extenso (1-10 m) et inclino (4 m) - 10 jours pour inclino 40 m

### 2 - hors crise, rechercher des sites d'installation adaptés sur des zones de fort aléa

#### - sur site volcanique:

Santorin (puits) ; La Soufrière de Guadeloupe (puits, tranchées), La Réunion , Mayotte; ...

#### - sur site sismique:

- sites d'essaims fréquents : La Rochelle/Ré-Oléron, Ubaye, ...
- sites de sismicité induite : géothermie - risque de déclenchement par injection

### 3 - hors crise, instrumenter avec des capteurs seuls quelques sites sélectionnés

en forage, tranchée, tunnel,... , sans interrogateurs

#### Avantages:

- les capteurs sont bien moins coûteux que les interrogateurs.
- installation optimale - équilibre thermique avec le site qui ne sera pas perturbé lors du branchement distant de l'interrogateur.
- nécessite des interrogateurs dispos au labo

## **Le cas de Santorin:**

**crise février 2025 :** alerte par GNSS et crise microsismique

- mais autorisation tardives et décroissance de l'activité après un mois → pas d'installation

**commande de fibres sur crédit 2025 pour la prochaine crise**

**recherche de site début 2026** avec C. Papanikolaou (Dir. Observatoire Santorin):

- cave à vin ou tranchée pour inclino et extenso
- forage pour extenso

**plusieurs sites peuvent être instrumentés par des capteurs**

- un seul serait équipé d'un interrogateur "permanent" (achat observatoire)
- les autres sites seraient en attente d'une crise pour leur branchement sur interrogateurs "d'intervention"

