

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

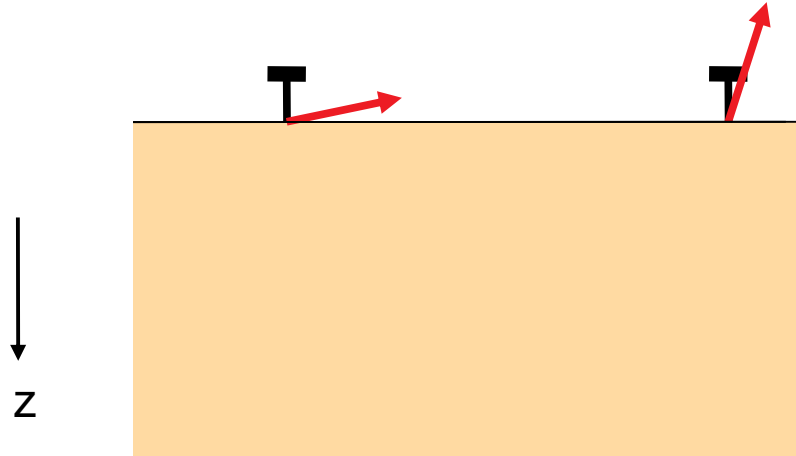


GNSS:

déplacement relatif X

/référence

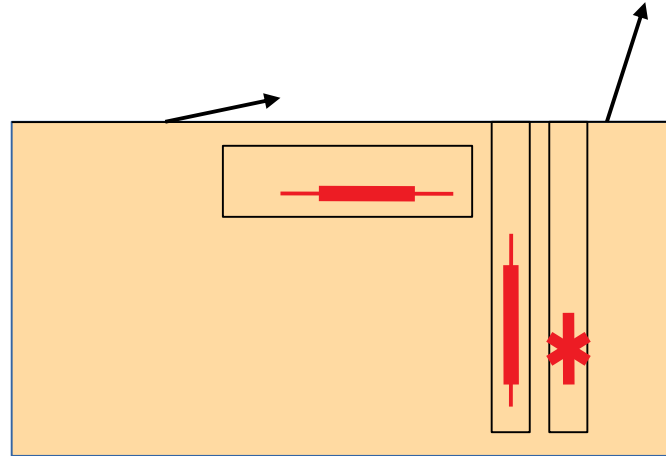
→ déformation sur 10 km



bruit **position** qq 10^{-3} m
bruit déformation = qq 10^{-7}

Extensomètre:

→ déformation 1D,3D
sur longueur 10 m



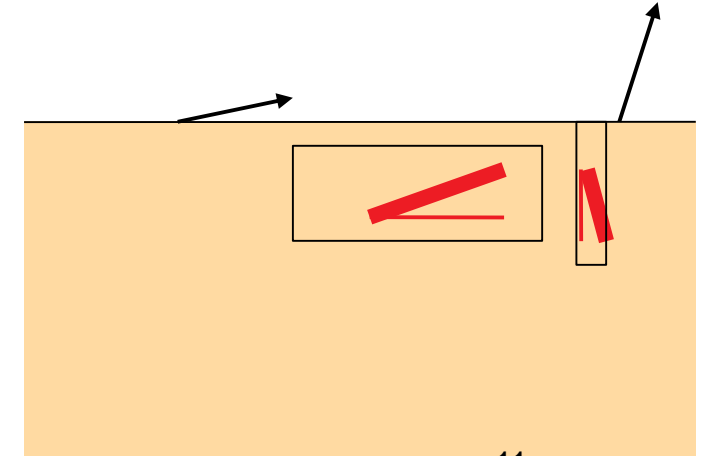
bruit déformation = 10^{-11}

Inclinomètre:

rotation

/ axe horizontal

Longueur 1-100 m



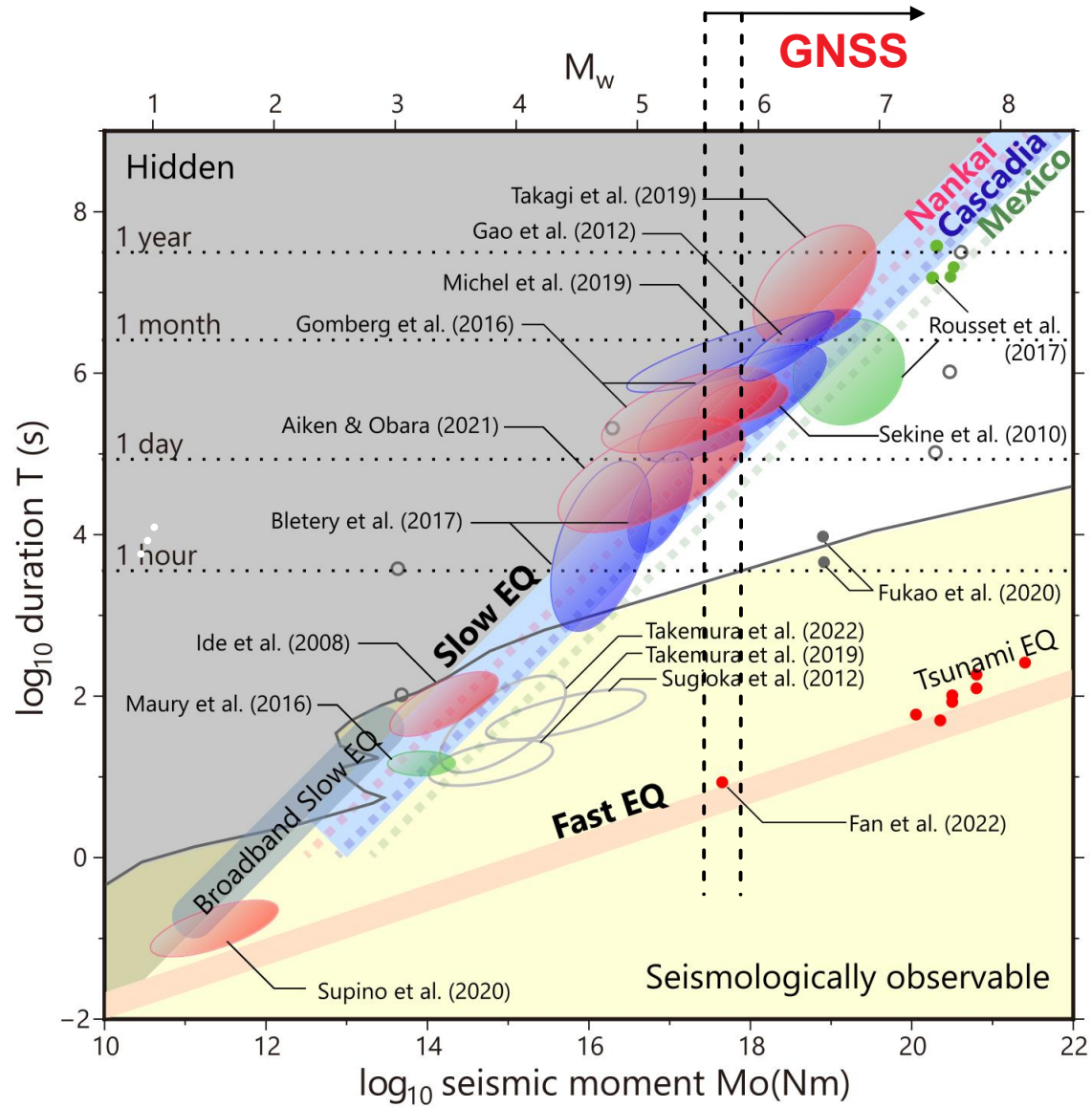
bruit rotation = qq 10^{-11} radians

- 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:

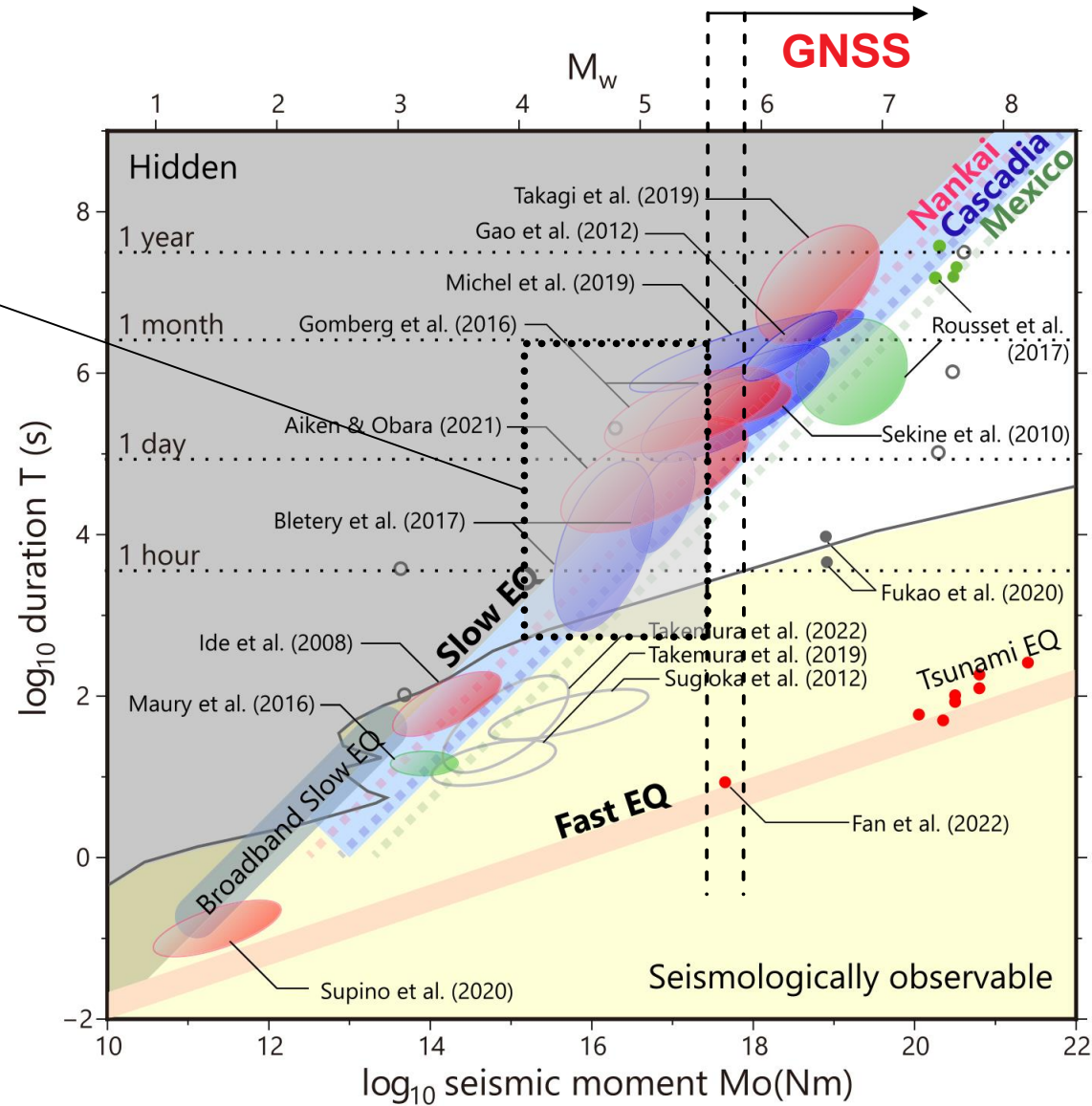
- séismes lents
- diffusion de pression de pore

SLOW EARTHQUAKE SCALING



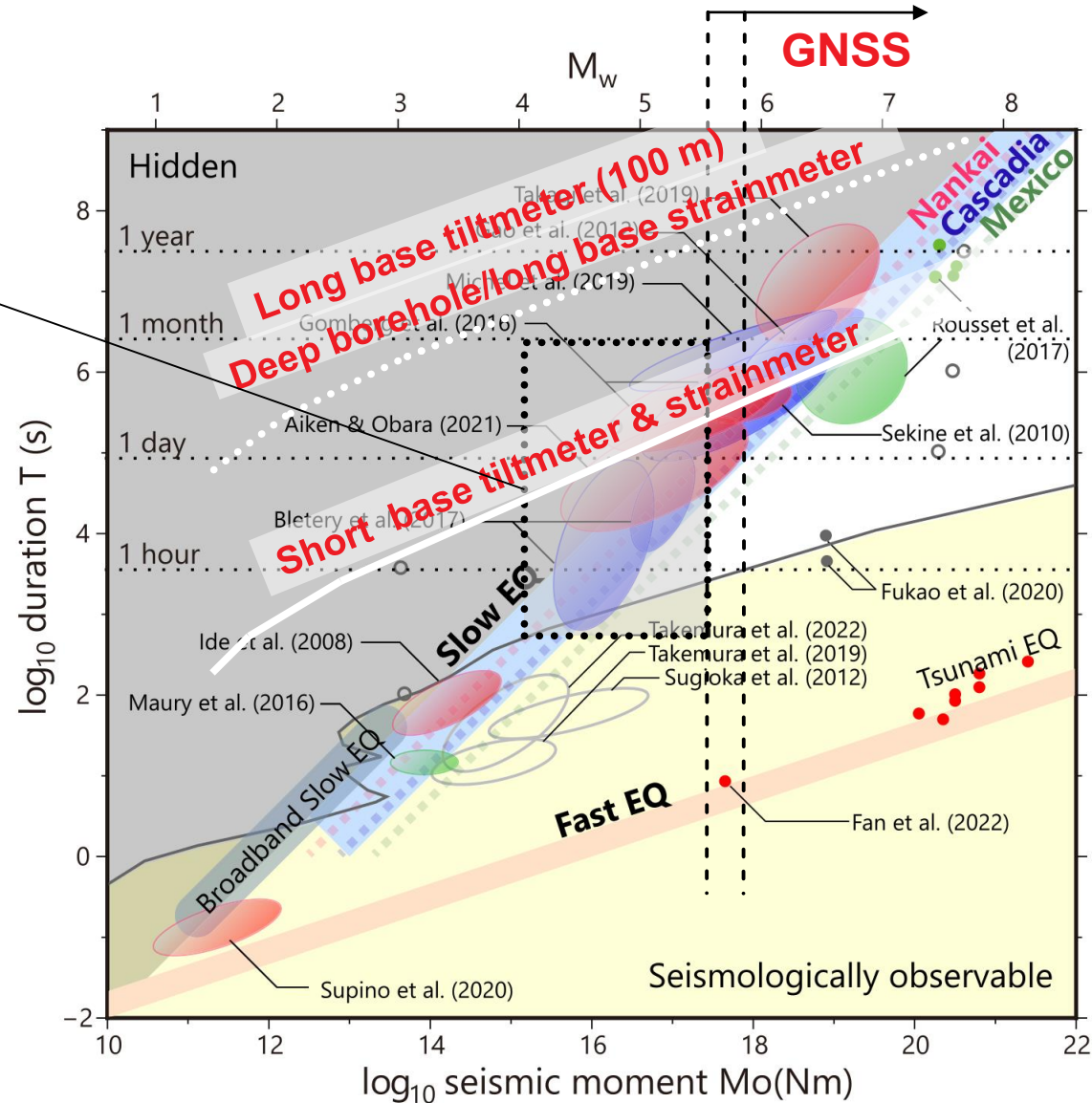
SLOW EARTHQUAKE SCALING

mesure Mo
indirecte



SLOW EARTHQUAKE SCALING

measure M_0
indirectly



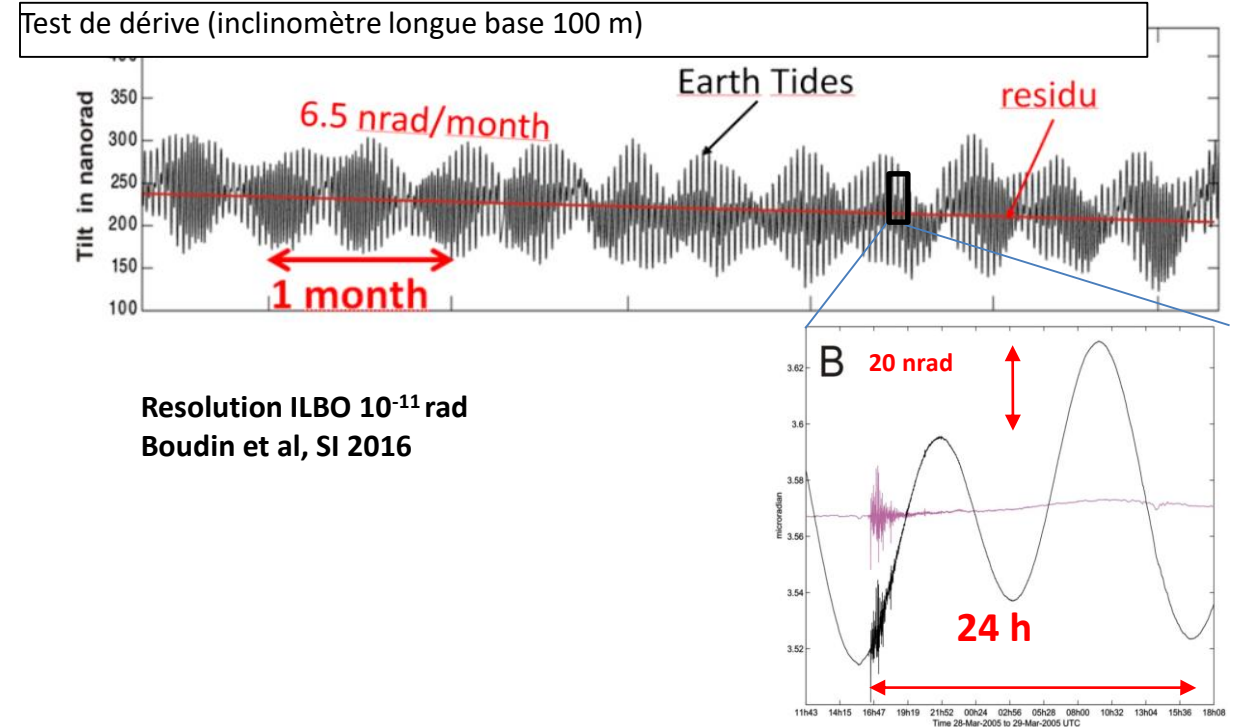
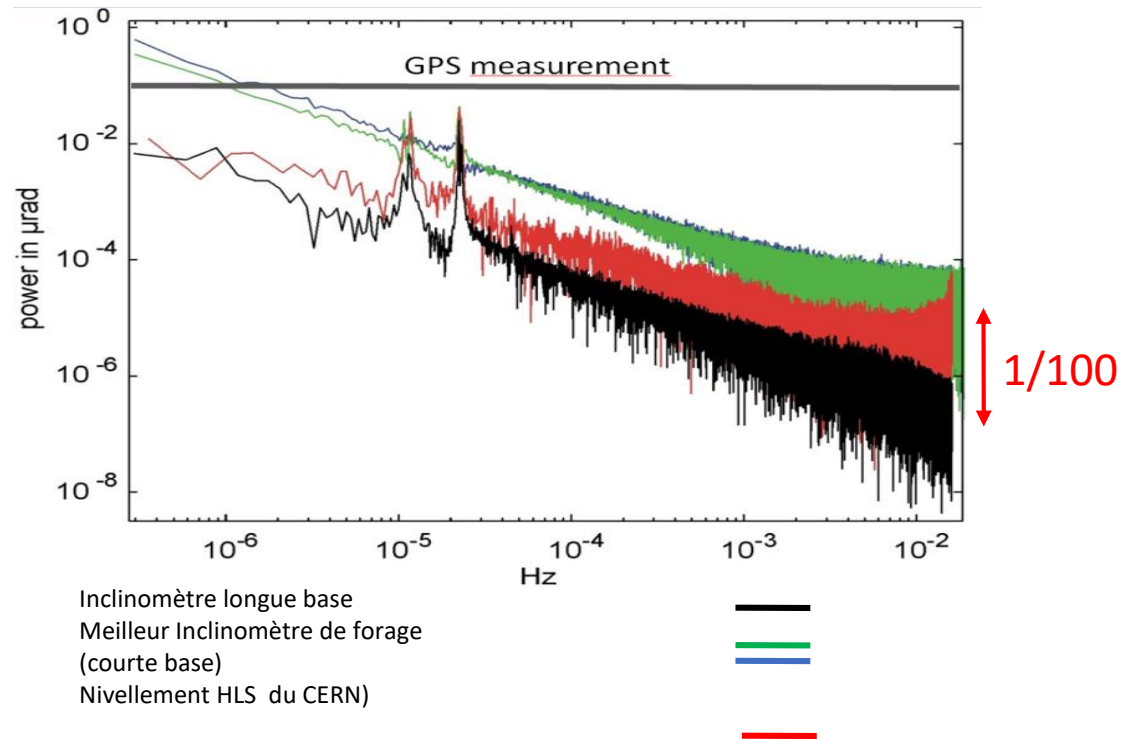
glissements asismiques de forte magnitude (**Mw>6**) détectés par GNSS/GPS => **précision ~1 mm**

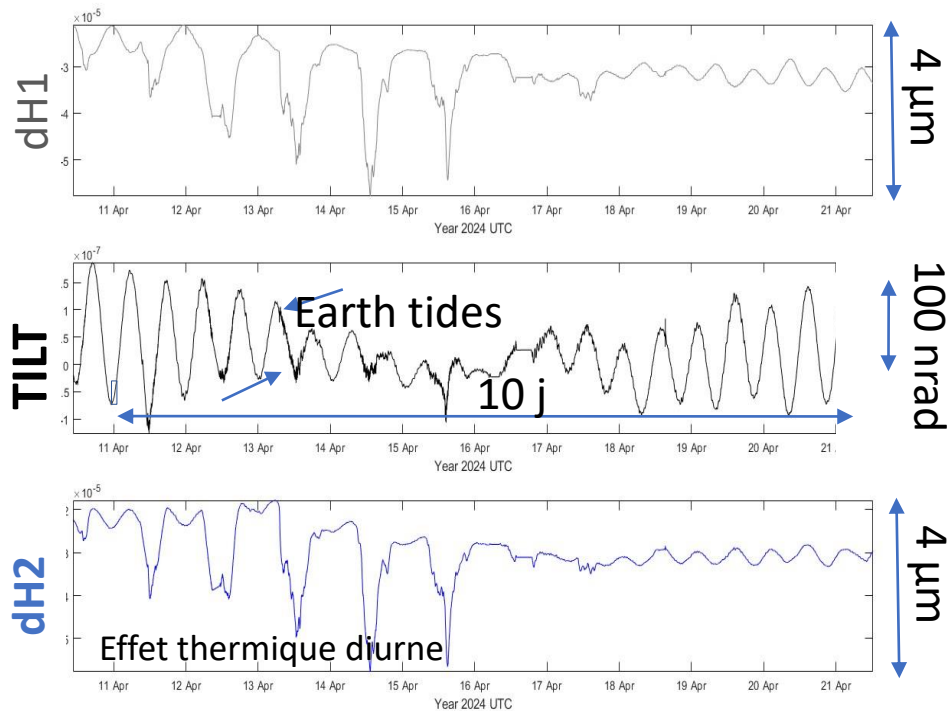
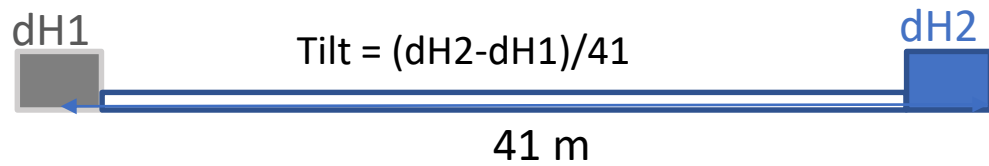
Challenge:

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**

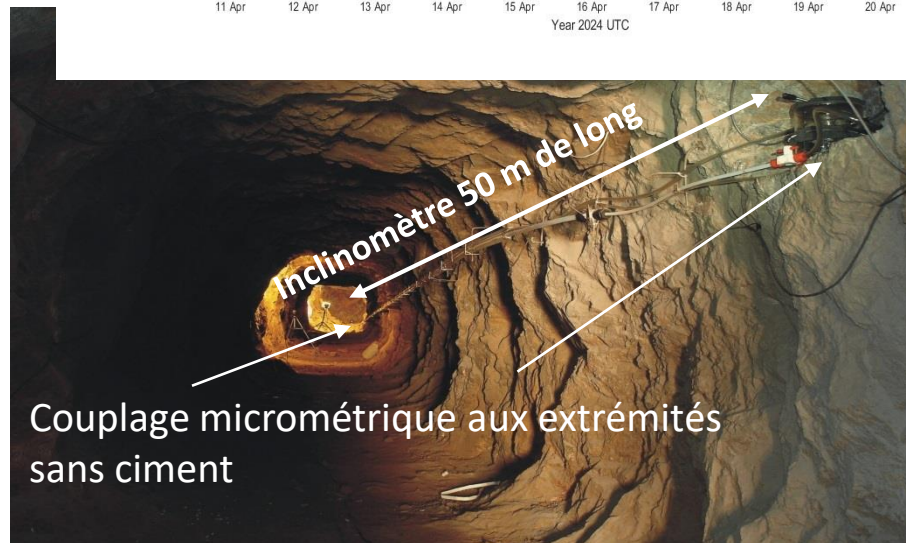
Sensibilité thermique via la déformation de la roche

Thermostress

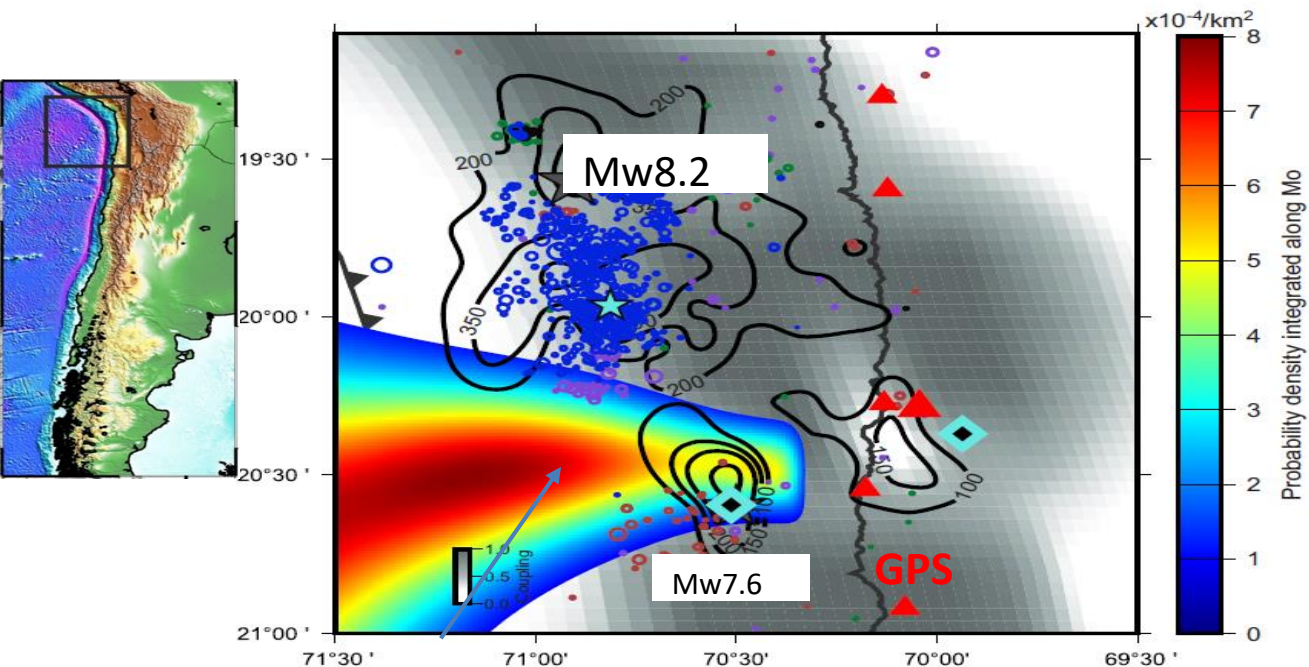
→ sites profonds et stables en température

couplage parfait avec la roche

pour éviter les dérives non linéaires

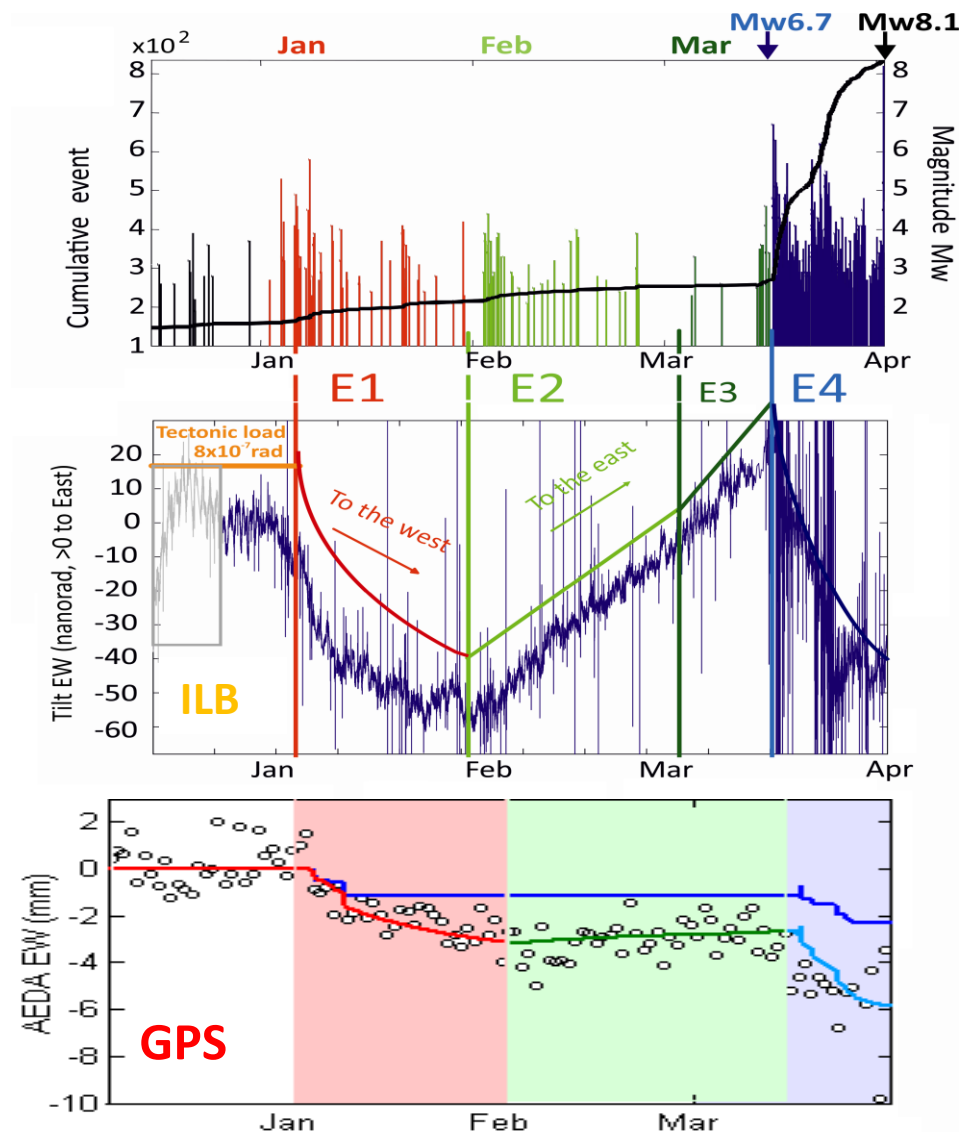


Séisme d'Iquique 2014, $M=8.0$: localisation/quantification des SSE précurseurs avec GNSS

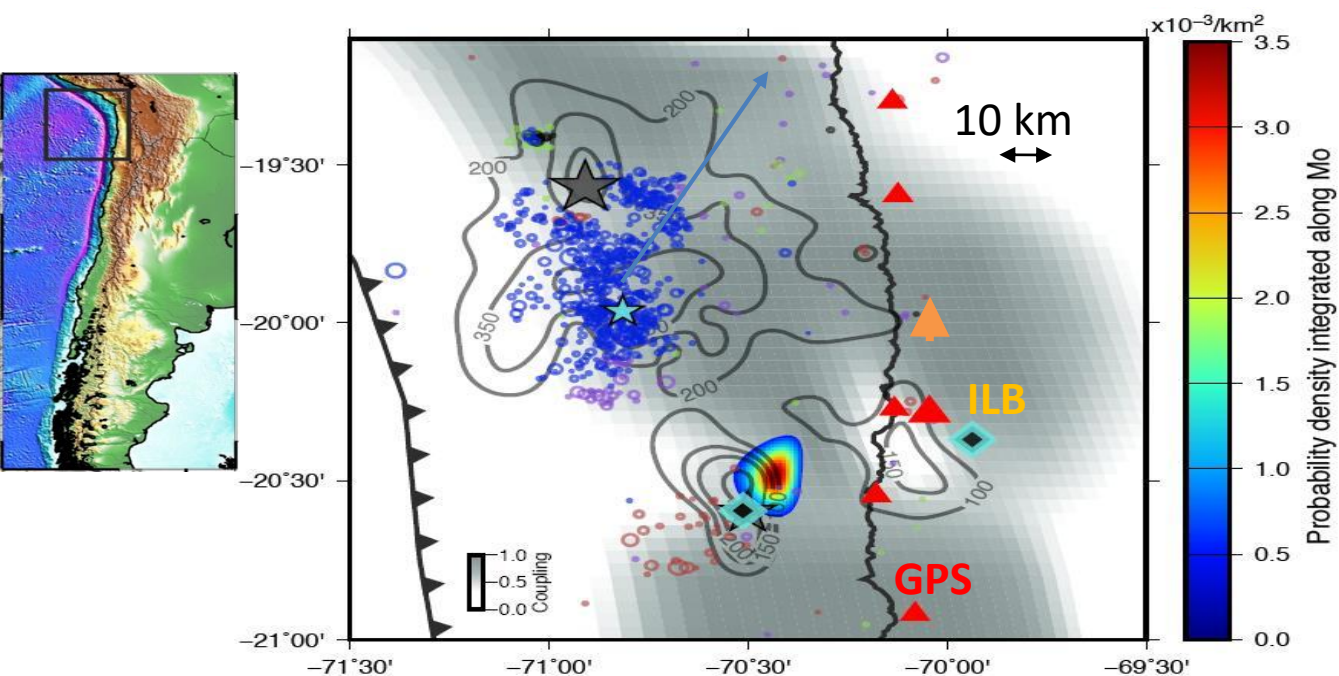


Localisation GPS seul

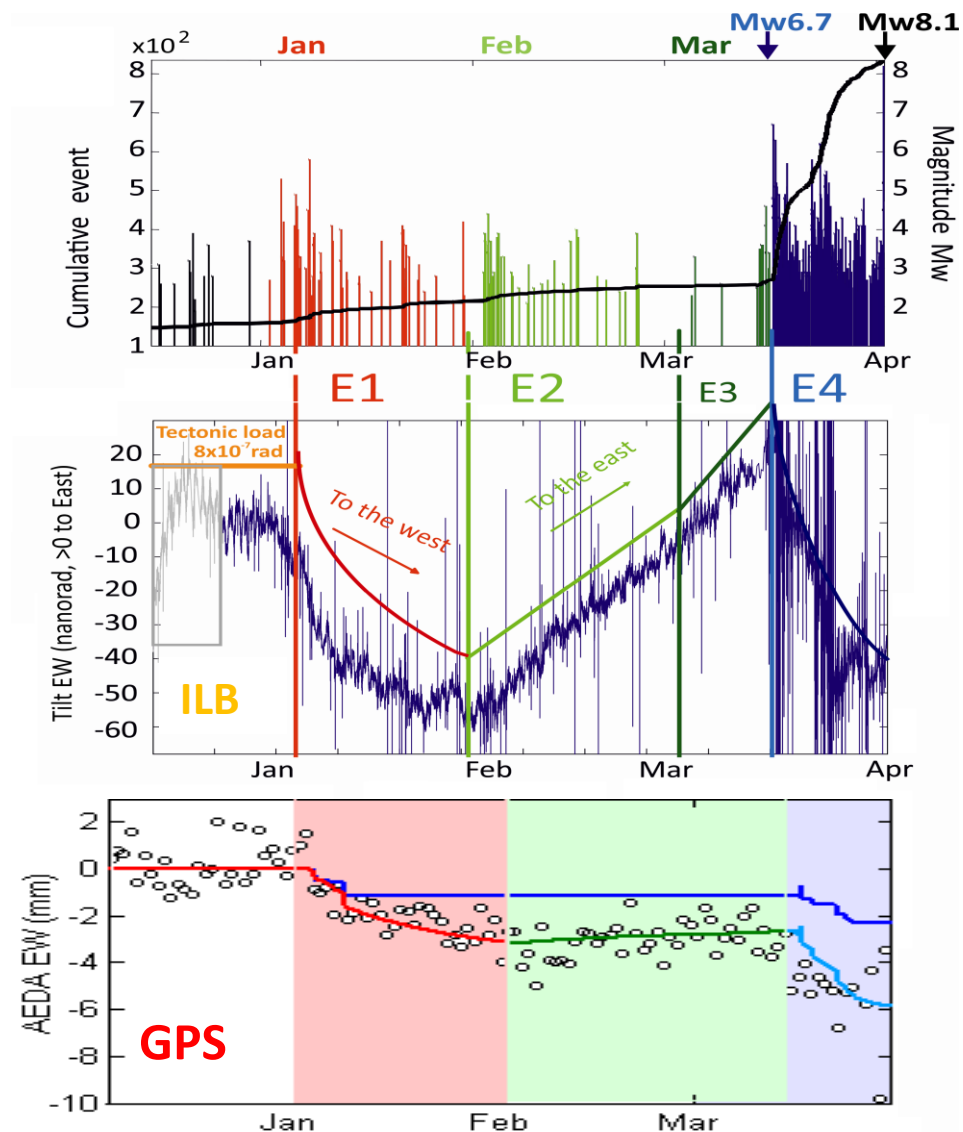
(Boudin et al, GJI, 2022)

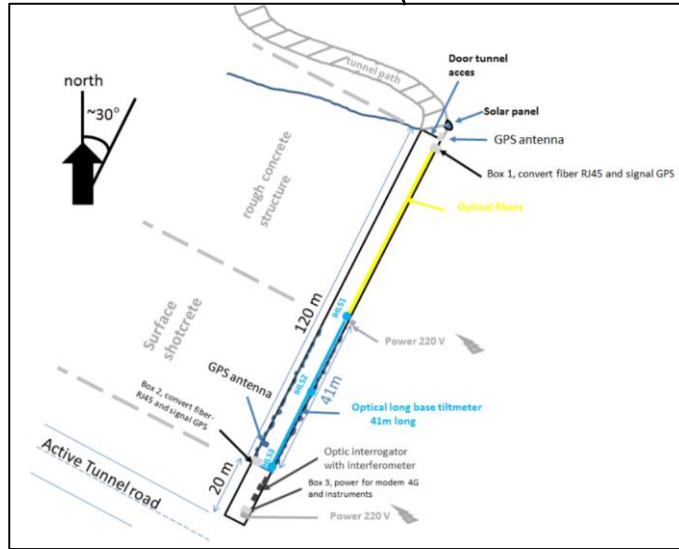
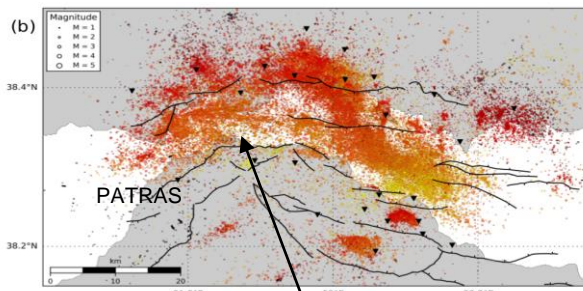


Séisme d'Iquique 2014, $M=8.0$: localisation/quantification des SSE précurseurs avec GNSS et inclinomètre longue base

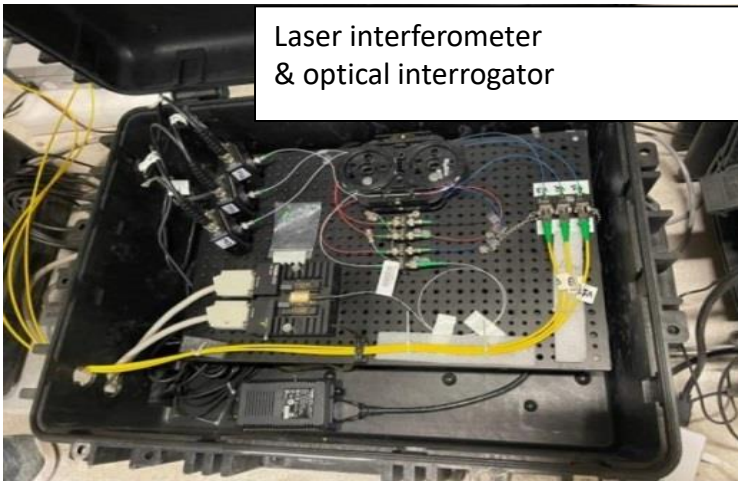


Amélioration significative de la localisation du
 SSE précurseur
 $M_w=6$, $S=10\text{km} \times 10\text{km}$

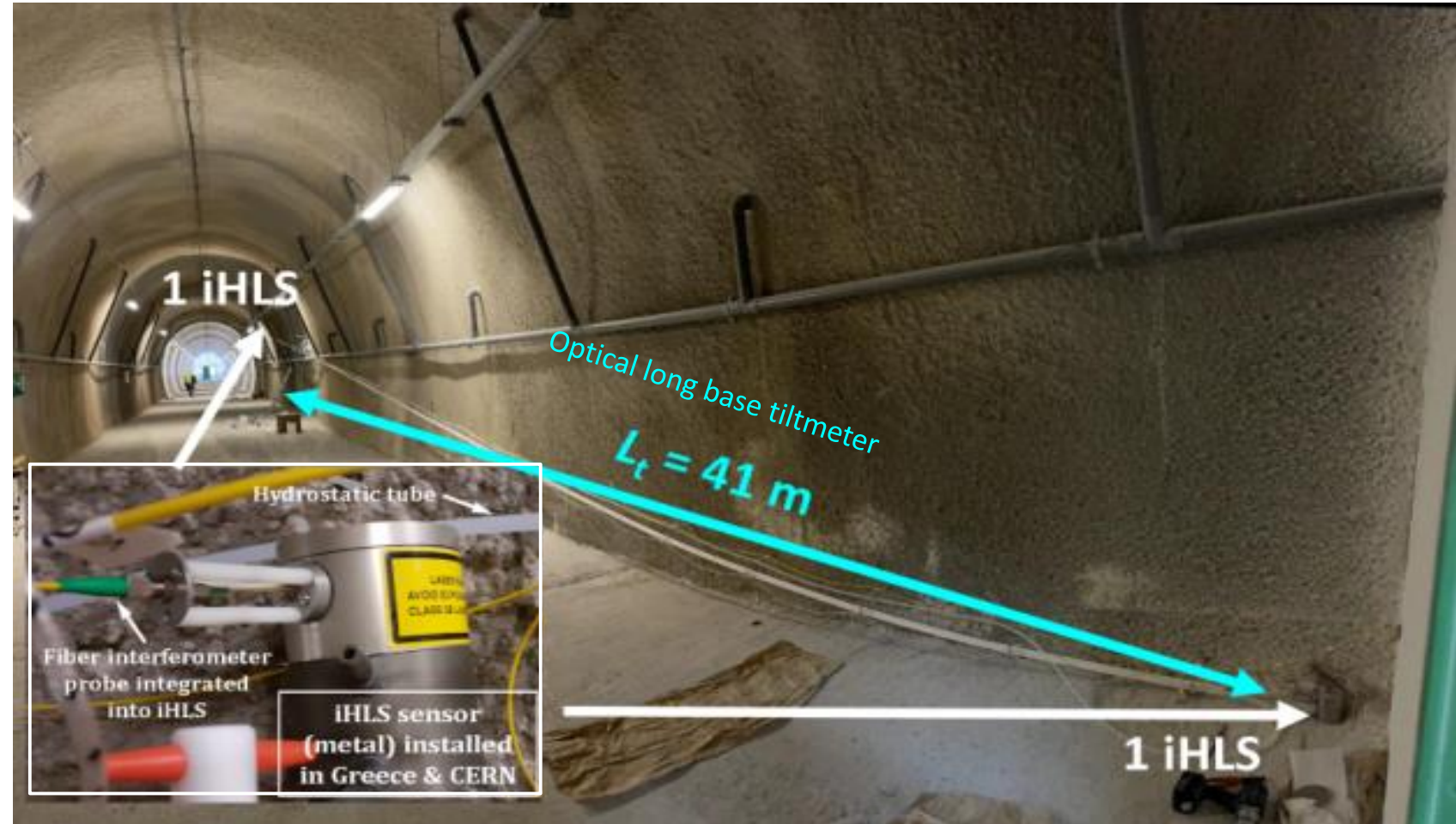




Laser interferometer
& optical interrogator



Installation of a HR optical long base tiltmeter - 2024 150 m deep in the Psathopyrgos fault footwall – Corinh Near Fault Observatory



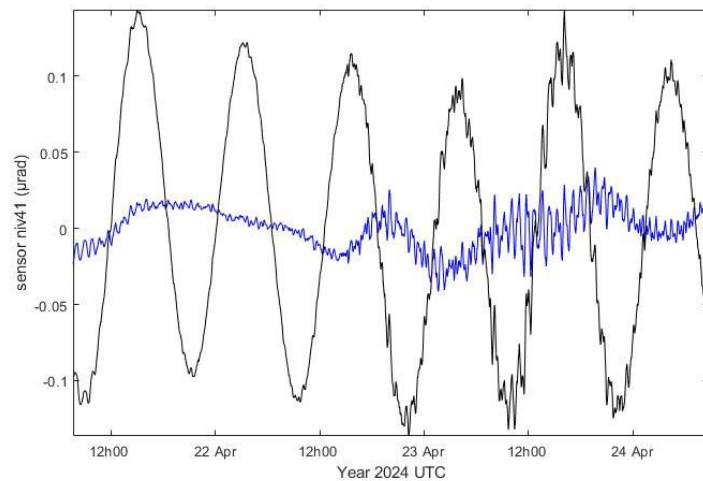
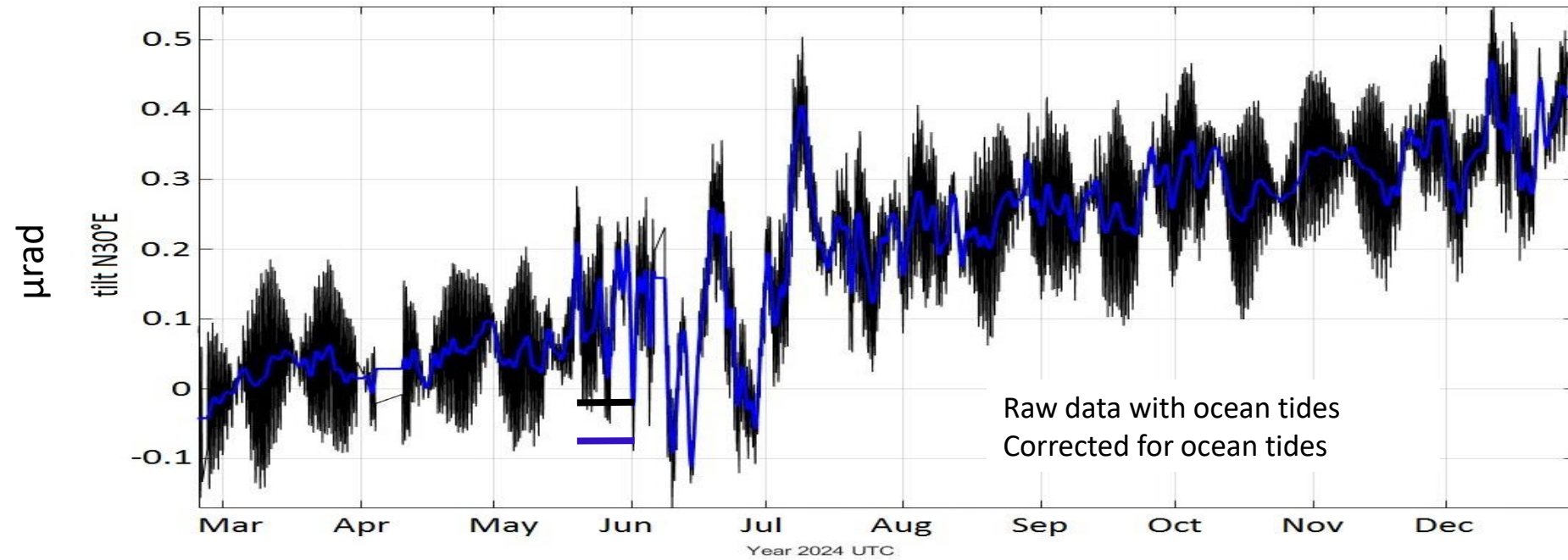
Temps d'installation:

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

Boudin et al., 2025

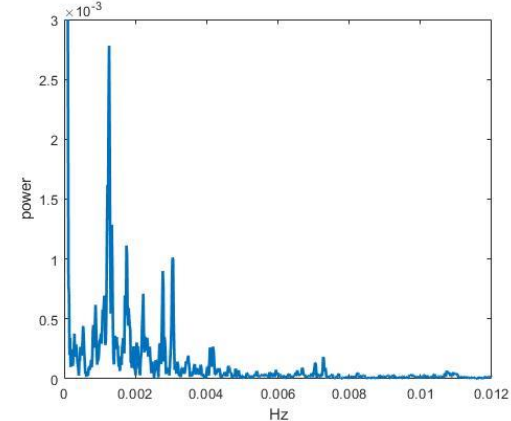
GPS measurement: Horizontal strain rate : $1.5 \text{ cm/year/10km} \Leftrightarrow 1.5 \text{ microstr/year}$

LONG BASE tilt measurement: Vertical relative displacement $\sim 0.6 \text{ microrad/year}$

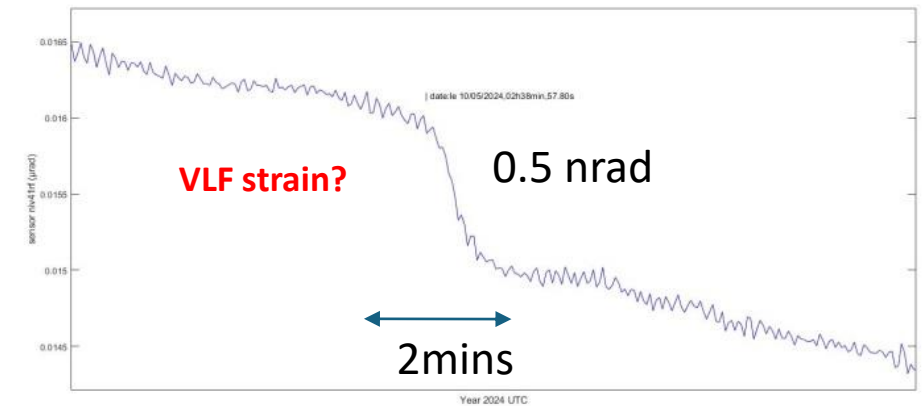


24h

Free oscillation
of the Gulf

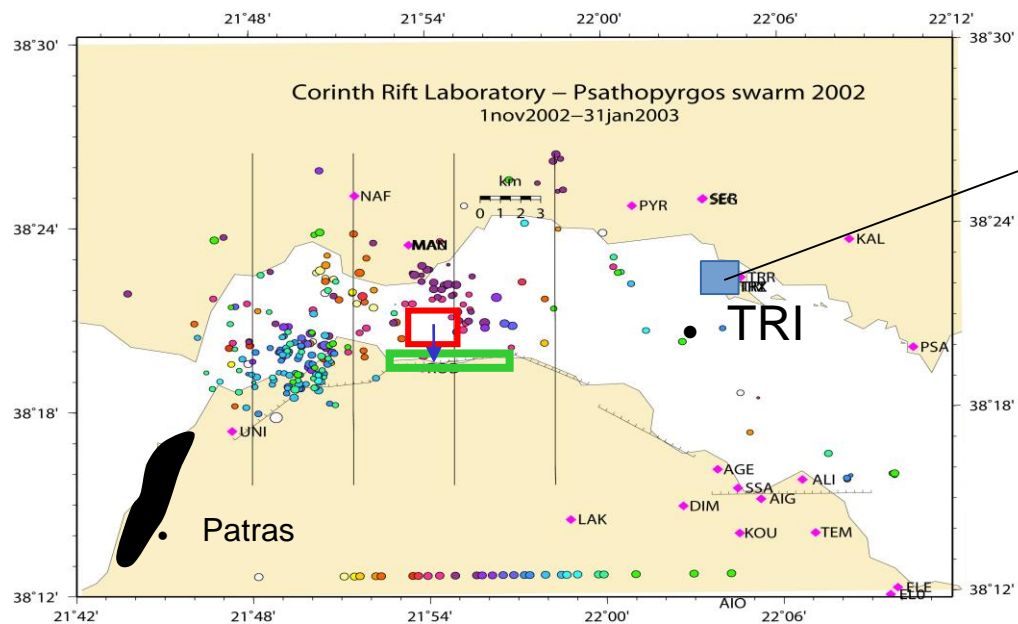


Spectral analysis

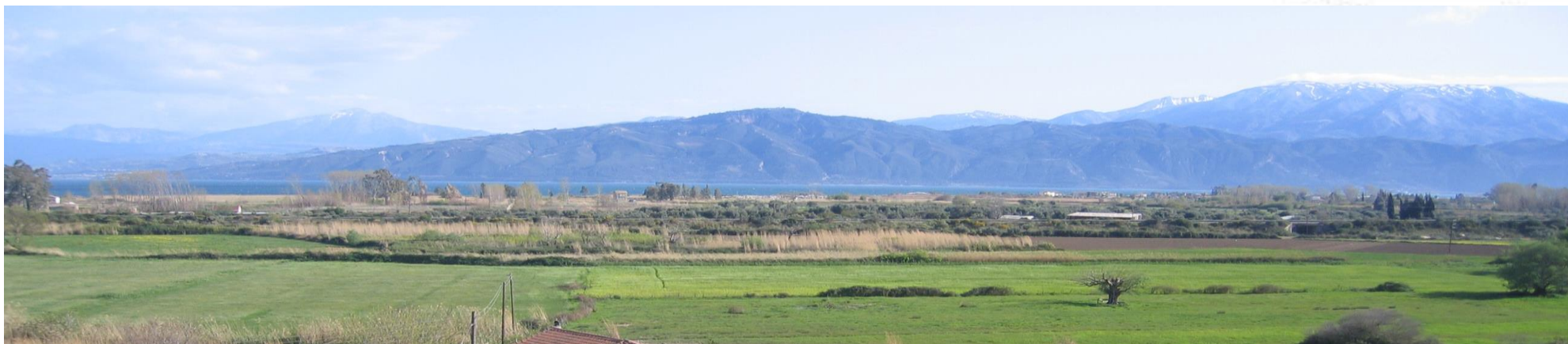
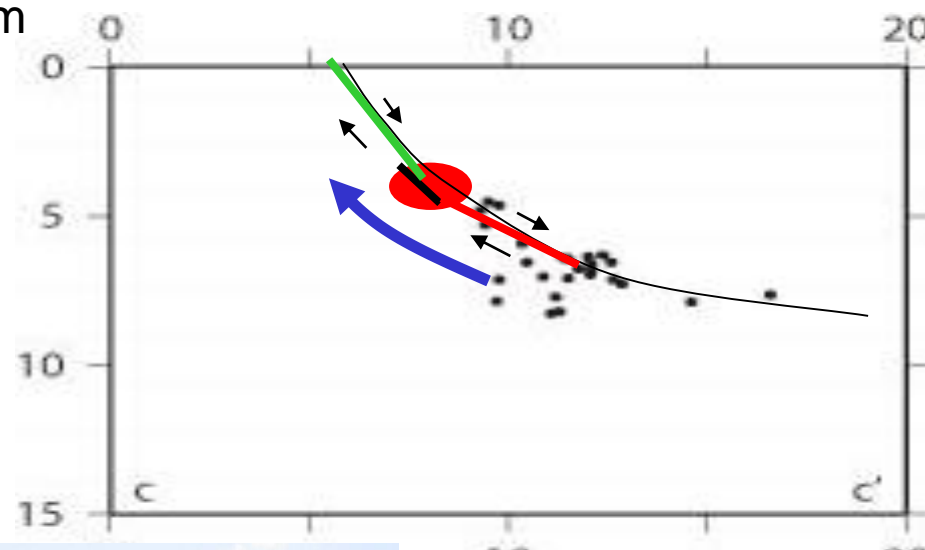
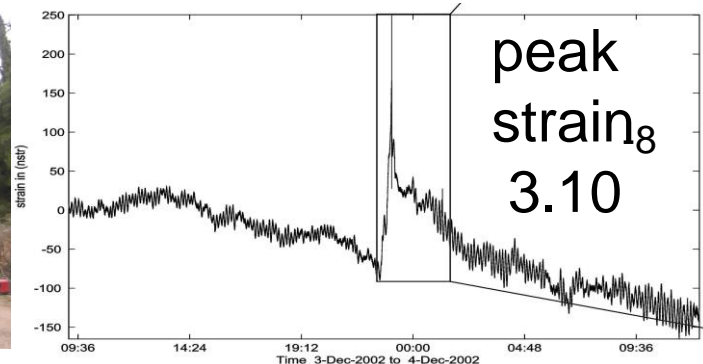


Boudin, 2025

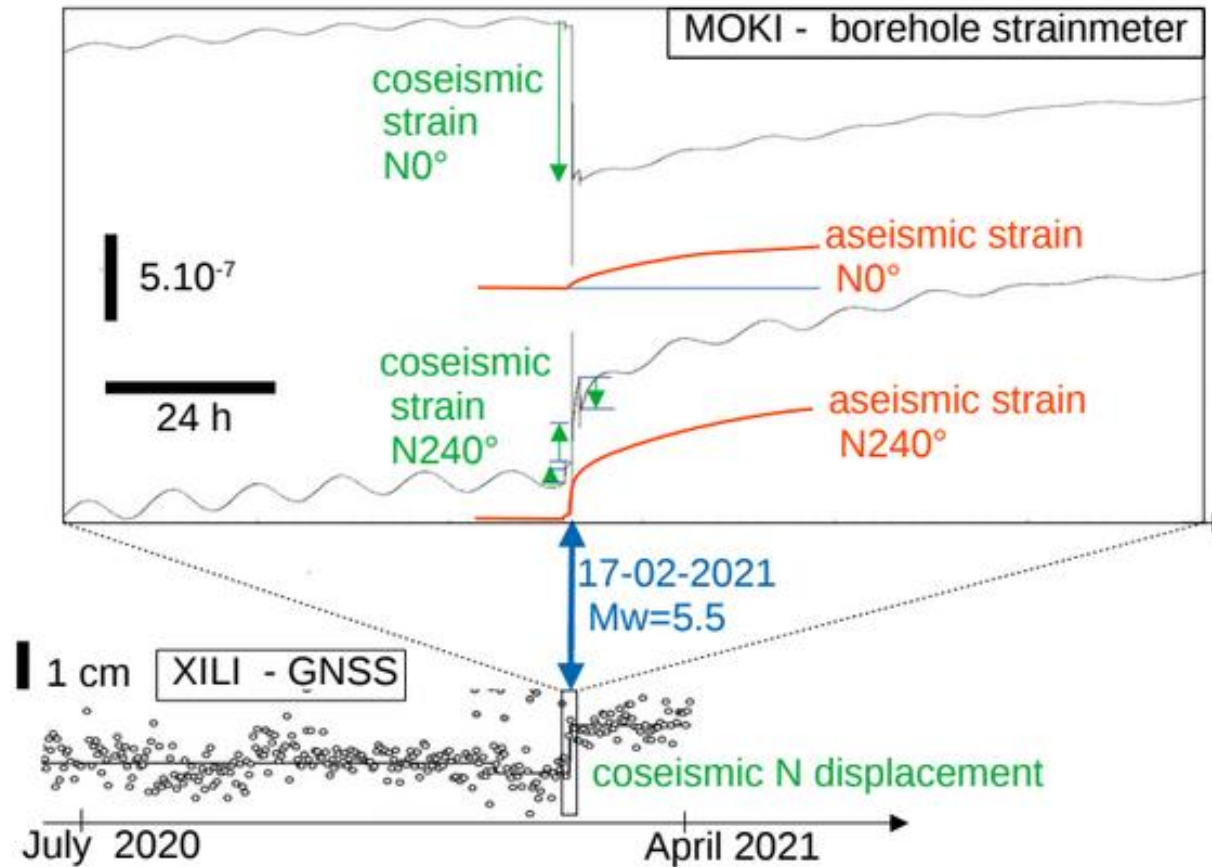
- **Transient creep (30 minutes) - 3 dec. 2002**
- on the Psathopyrgos fault during a strong
- swarm activity (3 months)

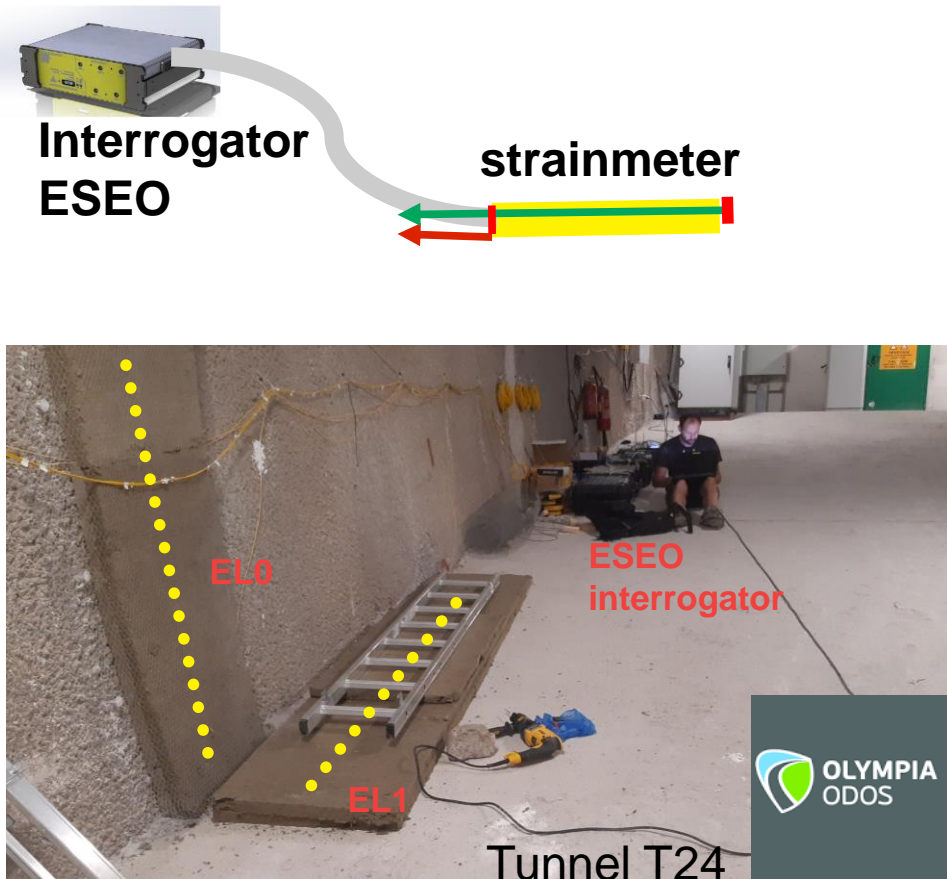


Borehole 150 m



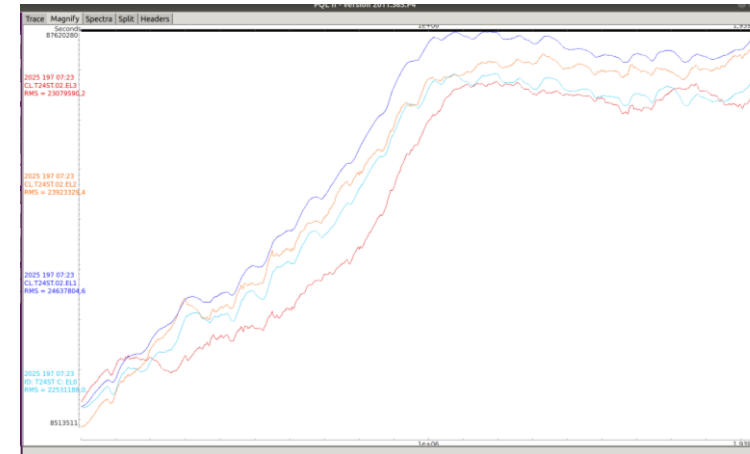
- Afterslip for the $M=5.3$, feb.2021 earthquake, Corinth rift
 - From strainmeter records: aseismic slip $M_w = 5$, same as coseismic
 - No coseismic-postseismic separation on GNSS records



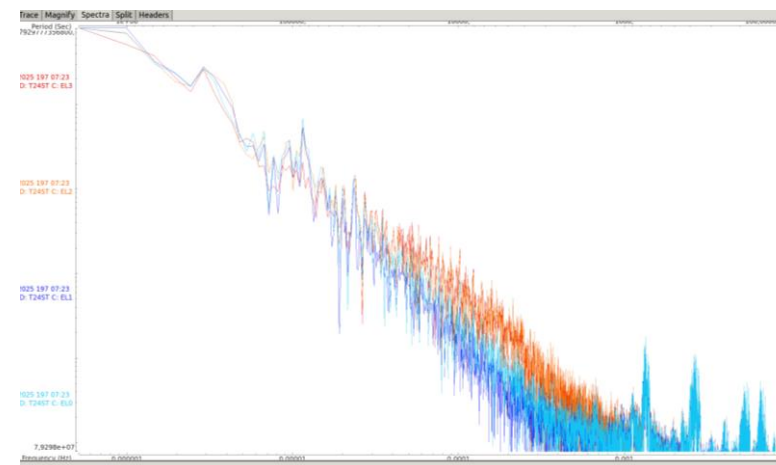
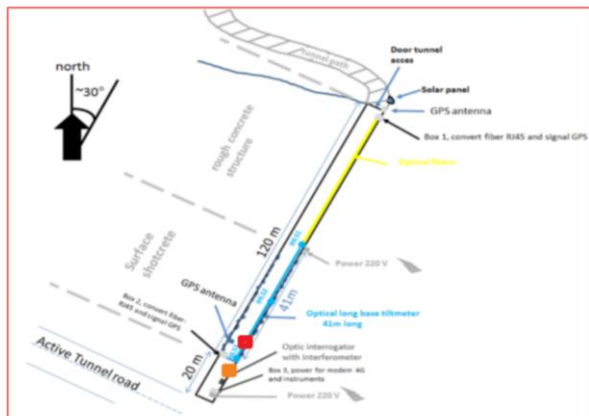


Installation of Fiber strainmeters in the NFO Corinth Olympia Odos Tunnel T24, june 2025

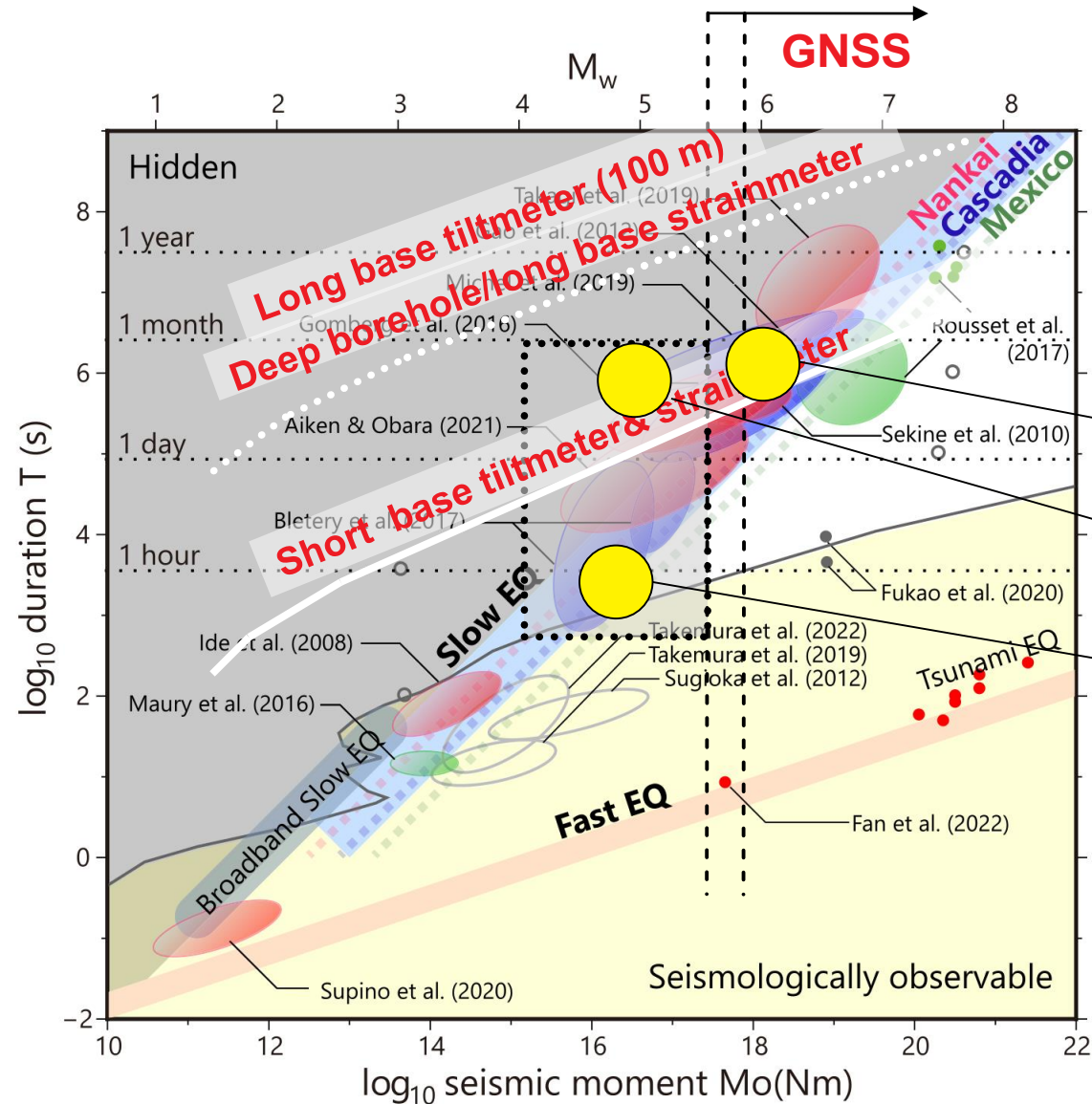
Temps d'installation 4 extensomètres: 2 jours



16 july – 7 August 2025



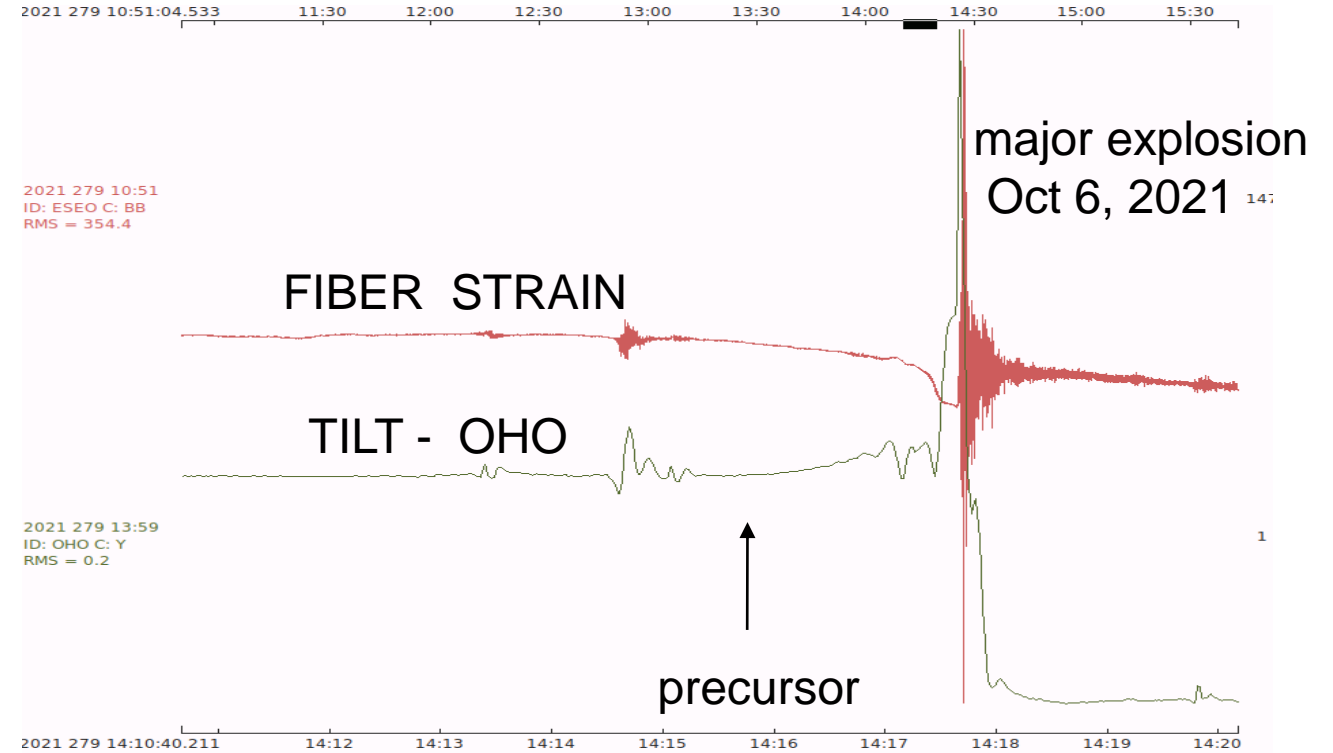
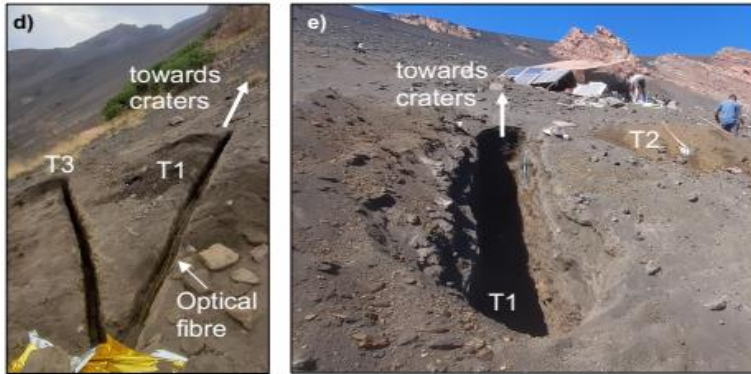
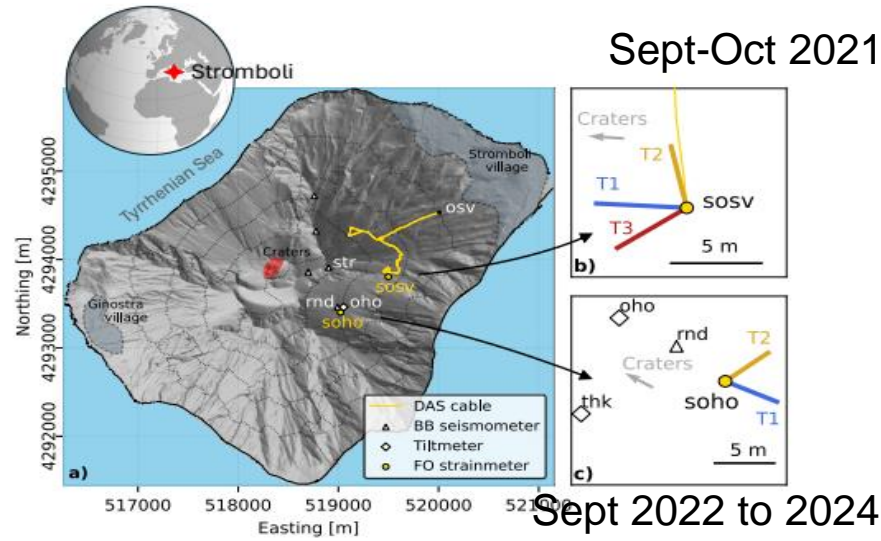
SLOW EARTHQUAKE SCALING



Extensomètres optiques sur le Stromboli

Temps d'installation: 2 jours

Strainmeter



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 fevrier 2025 : alerte par GNSS et crise microsismique

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

commande de fibres sur credit 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"

