LES PLÉNIÈRES 2025
Sciences et techniques du Génie Civil
JOURNÉES de GÉOTECHNIQUE du RST
en ligne, 5-6/11/2025

Imagerie et monitoring du proche sous-sol par mesure DAS sur fibre optique

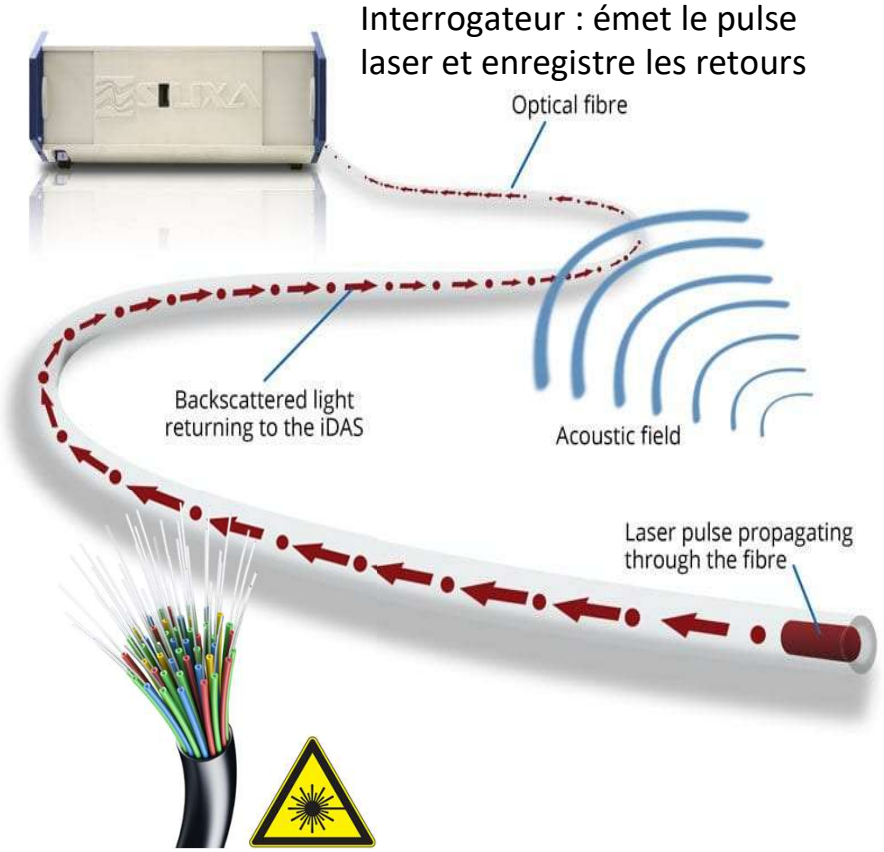
Etienne BERTRAND
Université Gustave Eiffel / GERS / SRO

Éléonore Stutzmann – IPGP
Jean-Philippe Métaxian – IPGP
Fabian Bonilla – Univ. Eiffel
Le Tang – Univ. Eiffel
Ianis Gaudot – BRGM
Céline Gélis – ASNR
Sébastien Hok – ASNR
Shoaib Mohammed - ASNR
Donatienne Leparoux – Univ. Eiffel
Mathieu Lehujeur – Univ. Eiffel

Base du DAS (Distributed accoustic sensing)

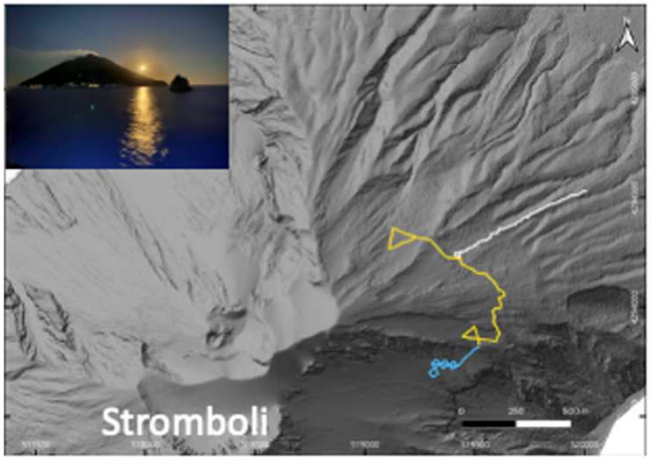
- Système de detection acoustique distribuée -

- Propagation d'un pulse laser dans une fibre optique
- Retour d'une partie de l'énergie par réflexion sur les impuretés de la fibre
- Mesure de la déformation le long de la fibre par mesure de la différence au court du temps de déphasage entre le signal émis et le signal reçu

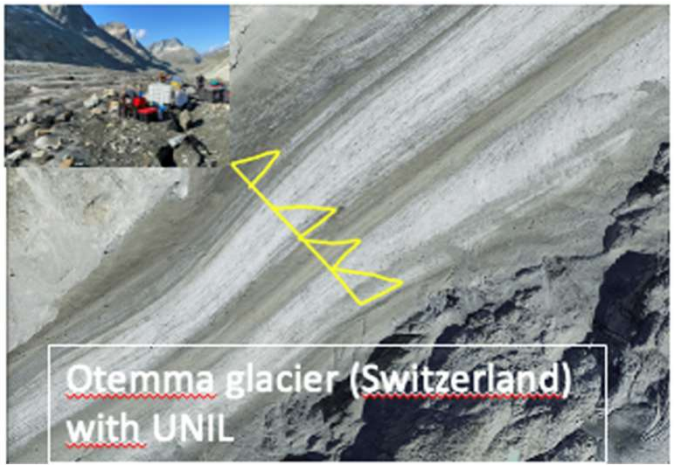


Stromboli

Localisation des sources sismiques, surveillance des risques volcaniques.



Biagioli et al., 2024



Glacier Otemma (Suisse)

Sismologie environnementale
Caractérisation de la rivière sous le glacier

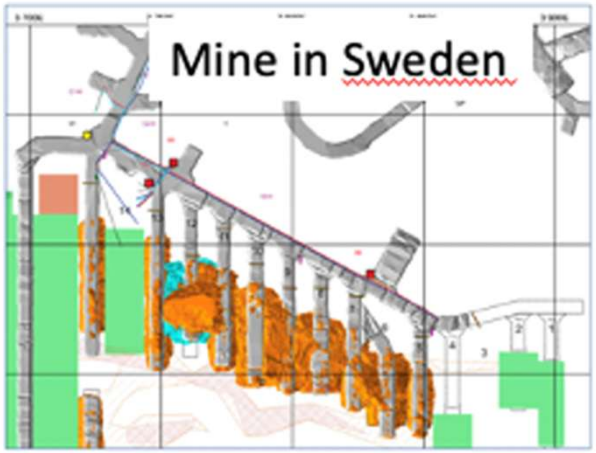
Stutzmann, 2024

Chemin de fer

Reconnaissance et surveillance du ballaste ferroviaire.



Stutzmann, 2024



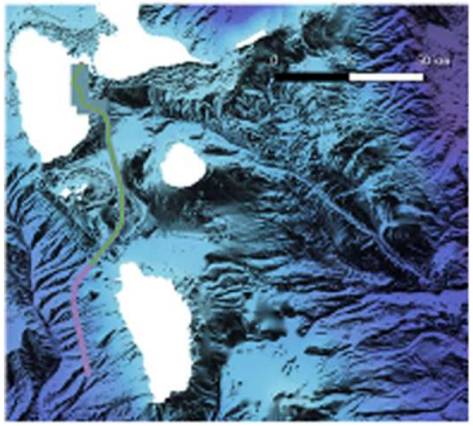
Bernard, 2023

Mine en Suède

Localisation de la microsismicité

DAS sous-marin (Antilles, Mayotte)

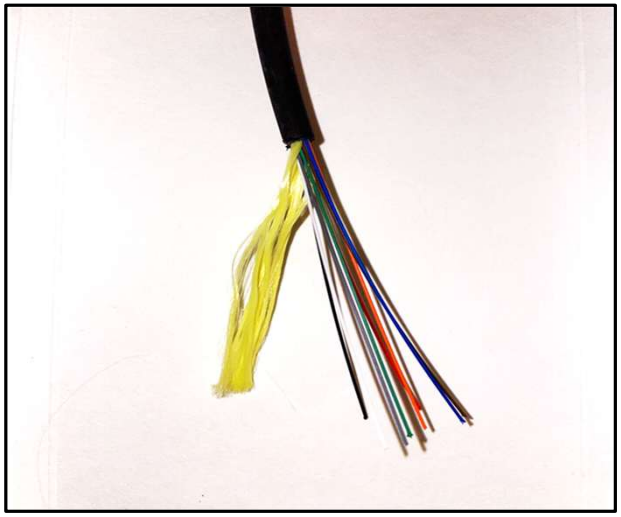
Surveillance sismique, localisation des séismes.



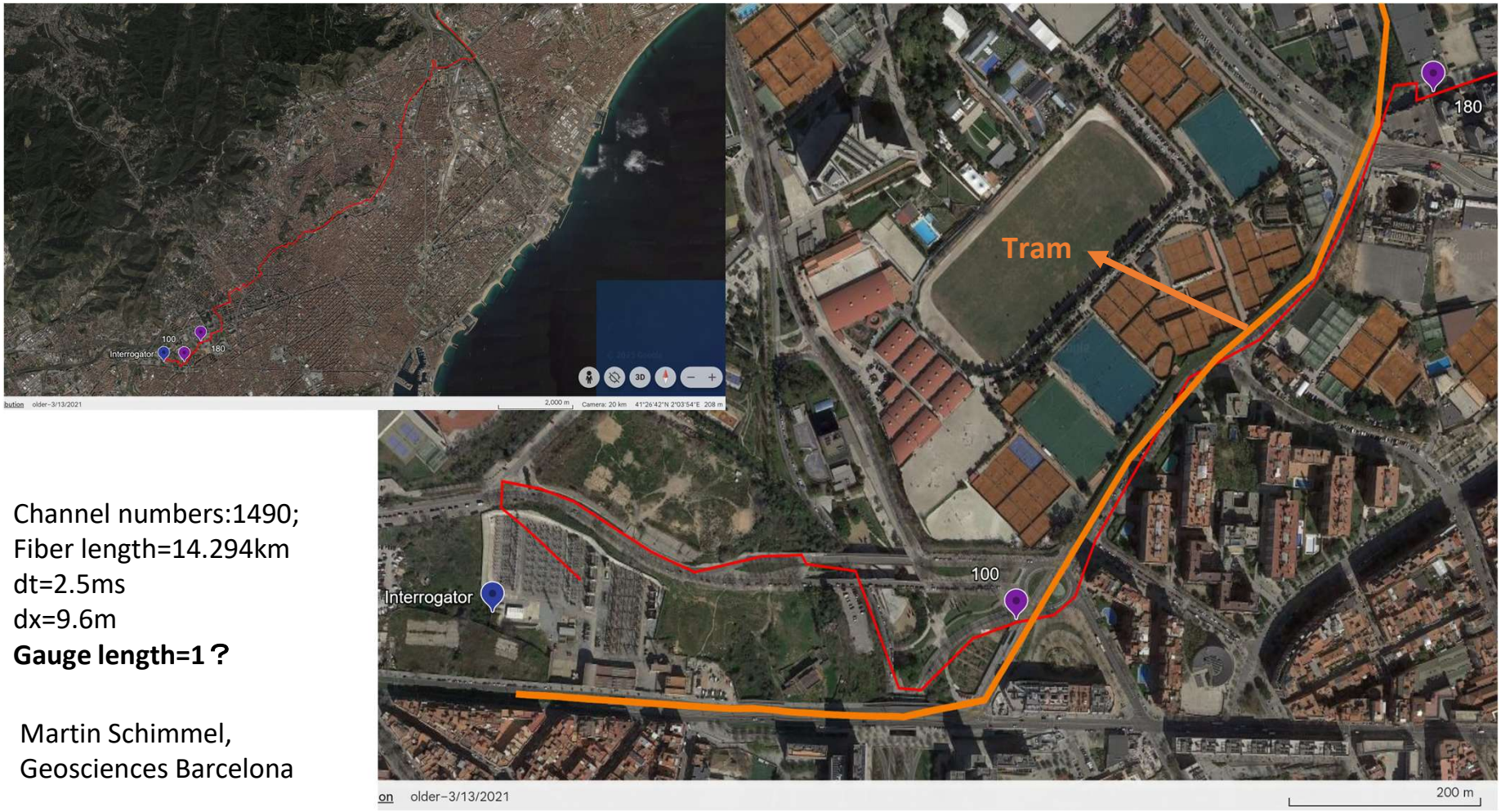
Bernard, 2022

Promesses de la fibre :

- nombre de capteurs élevé
- capteurs totalement inertes
- possibilité d'avoir une instrumentation en milieu hostile (fond de mer, mine, volcan, …)





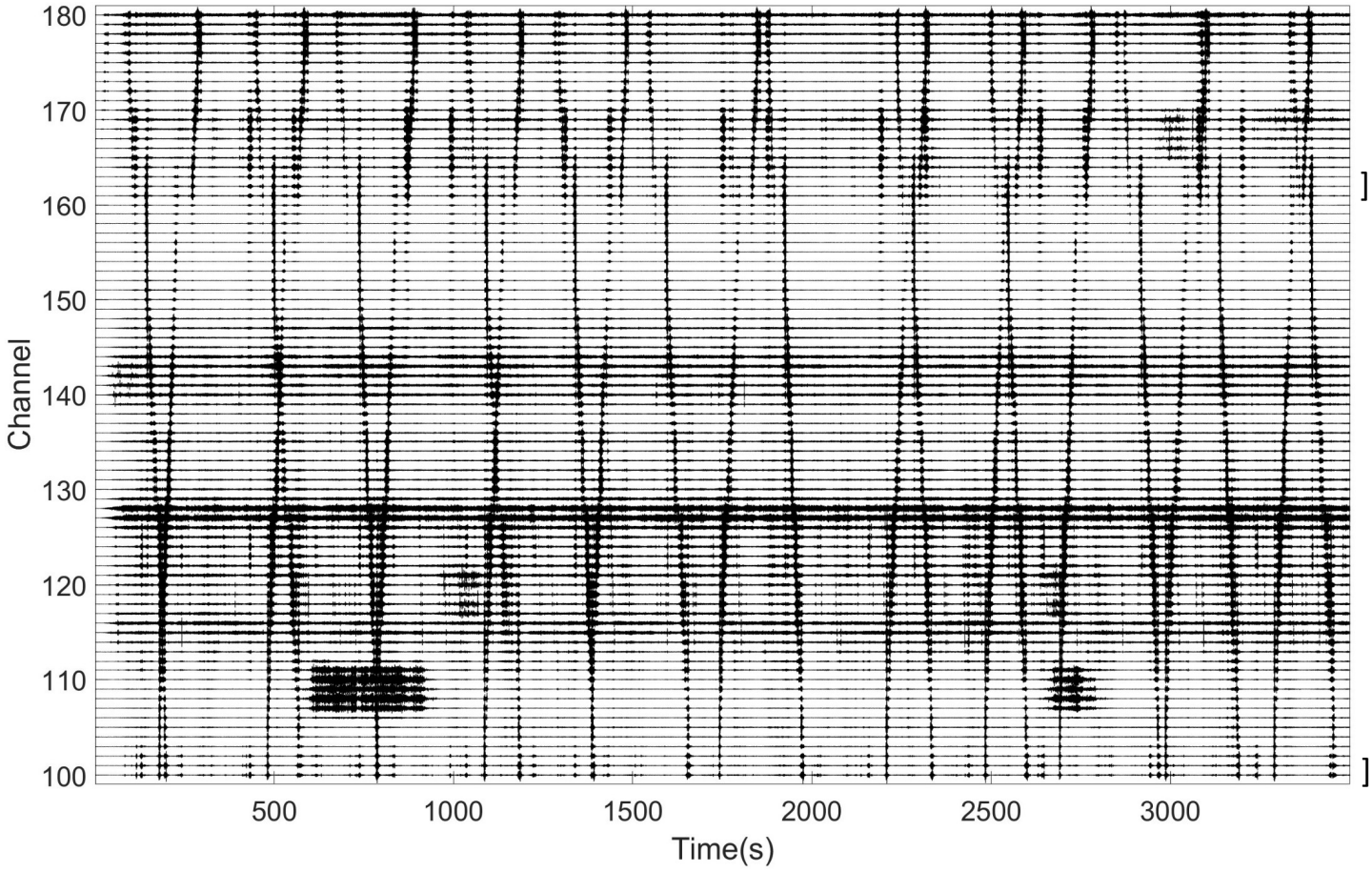


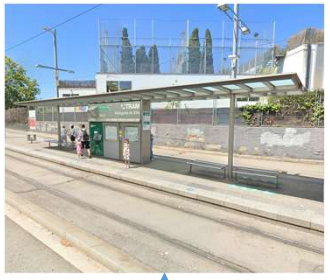
Channel numbers:1490;
Fiber length=14.294km
dt=2.5ms
dx=9.6m
Gauge length=1？

Martin Schimmel,
Geosciences Barcelona

Fibre noire à Barcelone, Espagne

Filtre 10-50Hz, normalisation trace par trace :





] Station de tram

Que nous apprend ces enregistrements sur les caractéristiques mécaniques du sous-sol?

Post-doc de Le TANG

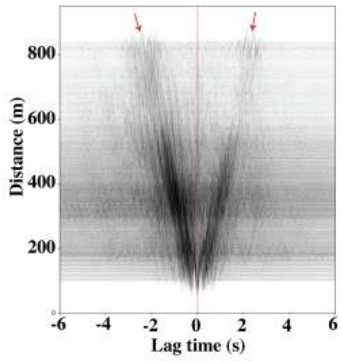
] Station de tram



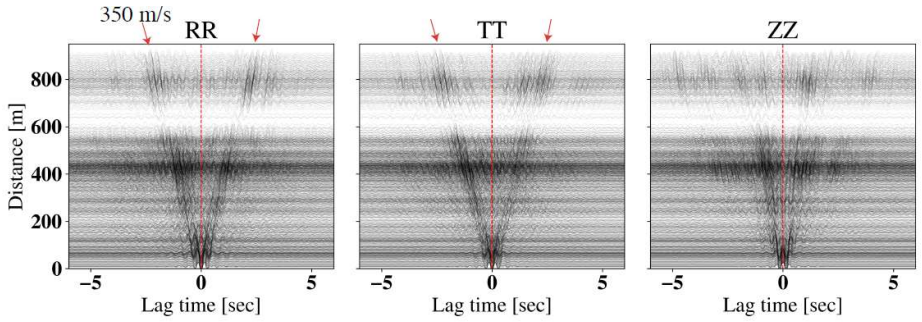
On enregistre la déformation dans la direction axiale de la fibre

→

- Peut biaiser l'identification des différents types d'onde et donc les images du sous-sol
- Rend les mesures sensibles à des hétérogénéités à petite échelle à proximité de la fibre, présentes naturellement et qui peuvent masquer la signature des signaux d'intérêt

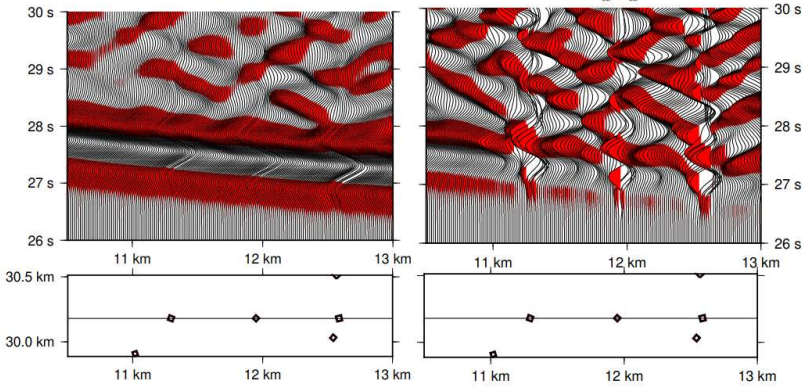






Nziengui Ba et al., 2022

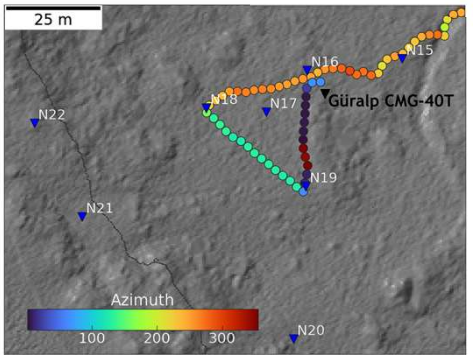
Déplacement u_x Déformation $\Delta_x u_x$



Capdeville et Sladen, 2024

Comparaison quantitative DAS-Node (taux de déformation)

Biagioli et al. 2024

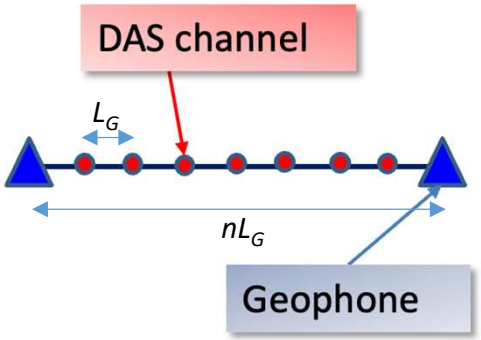


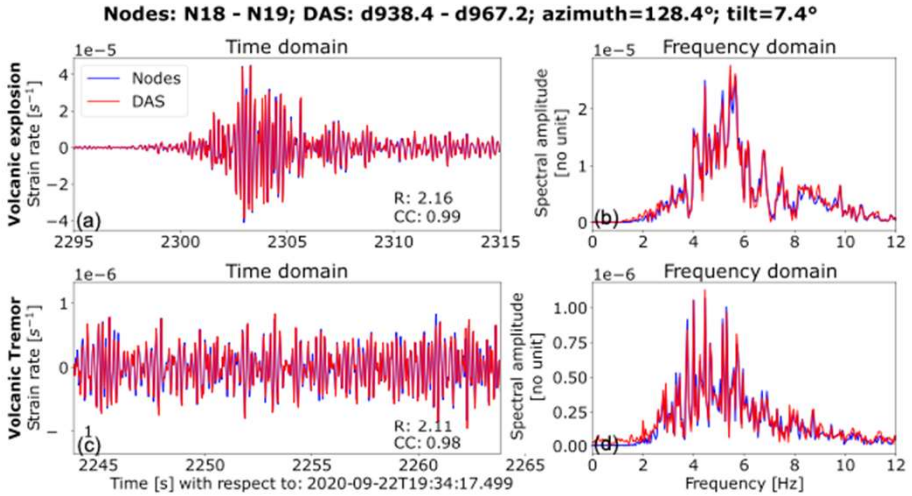
Moyenne du taux de déformation le long d'une portion de câble
= dérivation spatiale de la vitesse dans la direction du câble

$$\dot{\varepsilon}\left[-\frac{(n-1)L_G}{2}\right]+\cdots+\dot{\varepsilon}[0]+\cdots+\dot{\varepsilon}\left[+\frac{(n-1)L_G}{2}\right]=$$
$$=\frac{\dot{u}\left(\frac{nL_G}{2}\right)-\dot{u}\left(-\frac{nL_G}{2}\right)}{2},$$

Wang et al., 2018

n : Nbr de L_G
L_G : Long. de gauge





Les phases coïncident parfaitement mais pas l'amplitude : le DAS montre des amplitudes de taux de déformation plus faible que celle dérivée des nodes.

Sur une heure de donnée on retrouve un rapport d'amplitude proche de 2.7

POURQUOI ?

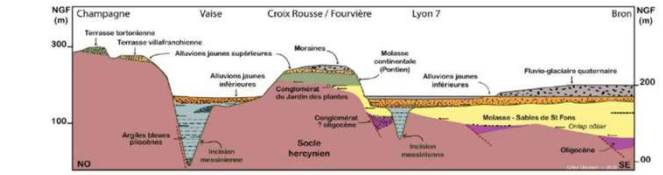
Exemple :
Données enregistrées sur le Stromboli

- **Des besoins dans le génie civil**

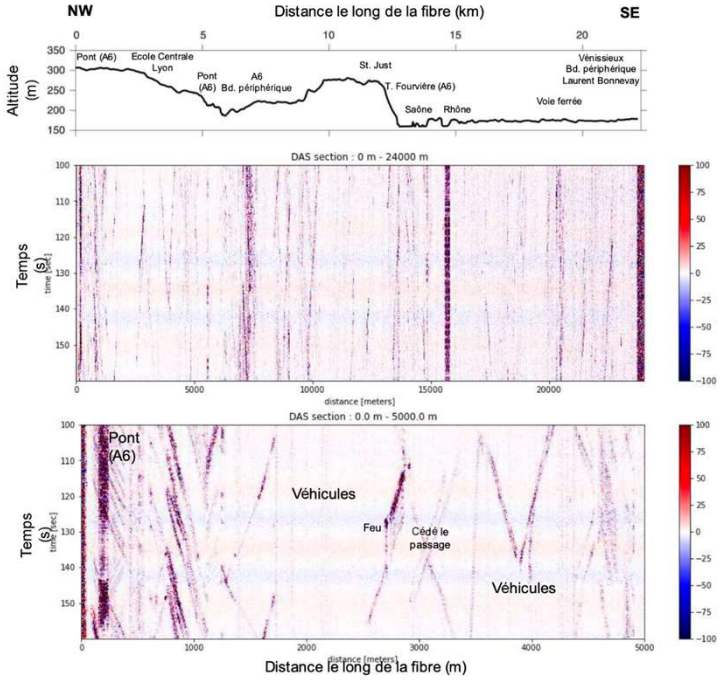
  Imagerie et monitoring du proche sous-sol : Vs, Vs30, effets de site, ….

  Suivi des ouvrages

- **Des questions en suspends**



- Quelle résolution ?
- Influence du couplage des câbles à fibre optique avec le sol ?
- Influence du couplage des fibres avec le câble ?
- Impact de l'enregistrement de la déformation dans une seule direction (longueur du câble)
- Passage taux de déformation à vitesse de mouvement particulaire ?
- Gestion des gros volumes de données (monitoring)



Rodet et al., JNGG (2022) : réseau de télécommunication du Grand Lyon

Projets de recherche en cours :

URBIDAS : PEPR Sous-sol, bien commun – PC S-PASS

IMADAS : MITI CNRS - ASNR

Objectifs :

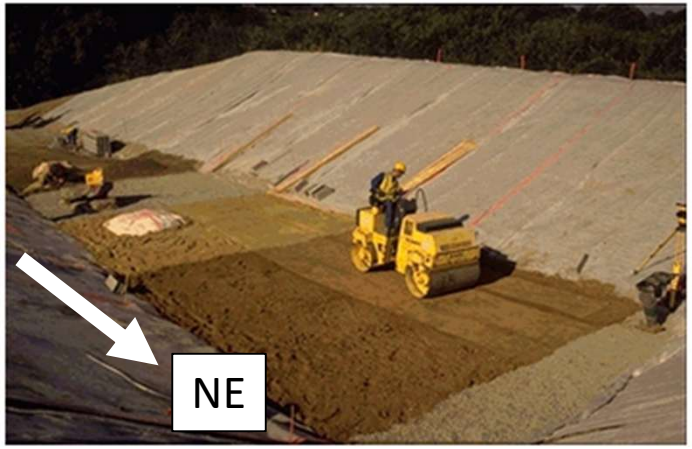
- Développer / adapter des techniques d'auscultation du proche sous-sol à partir des enregistrements DAS
- Tester les méthodes dans un environnement urbain
- Évaluer les possibilités d'utilisation de la fibre noire en ville

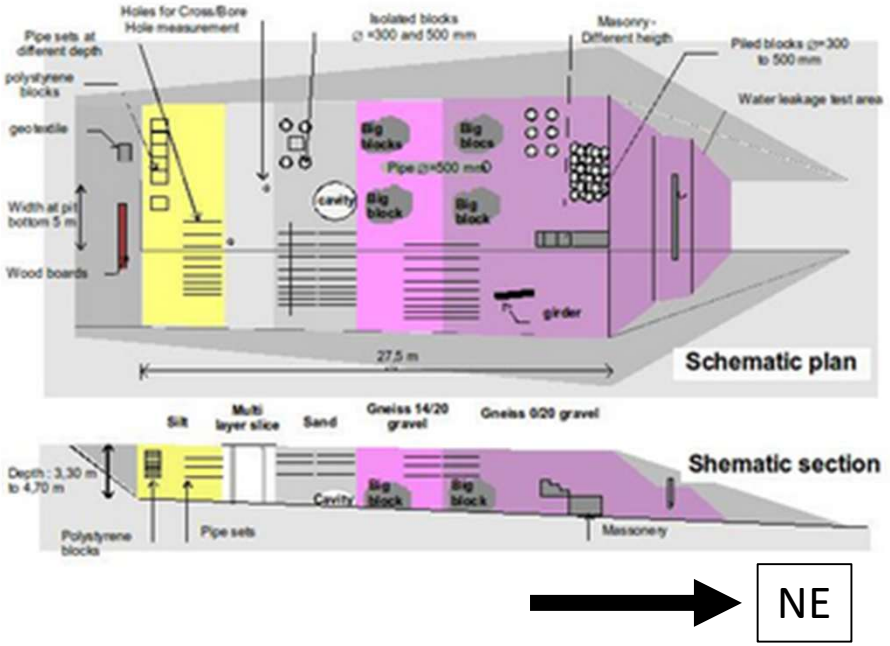
Plusieurs sites tests :

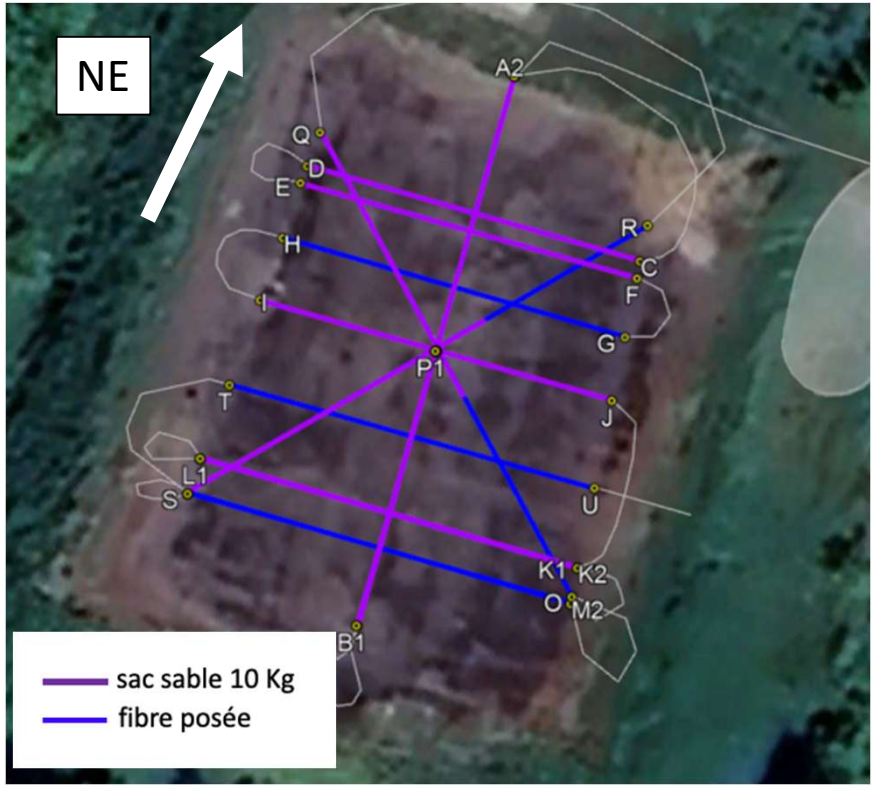
- Plateforme de test géophysique de Nantes (Univ. Eiffel)
- Marais d'Audubon (Nantes)
- Digue de La Riche (Tours)

Site géophysique test Université Gustave Eiffel, Nantes (labo GeoEND)

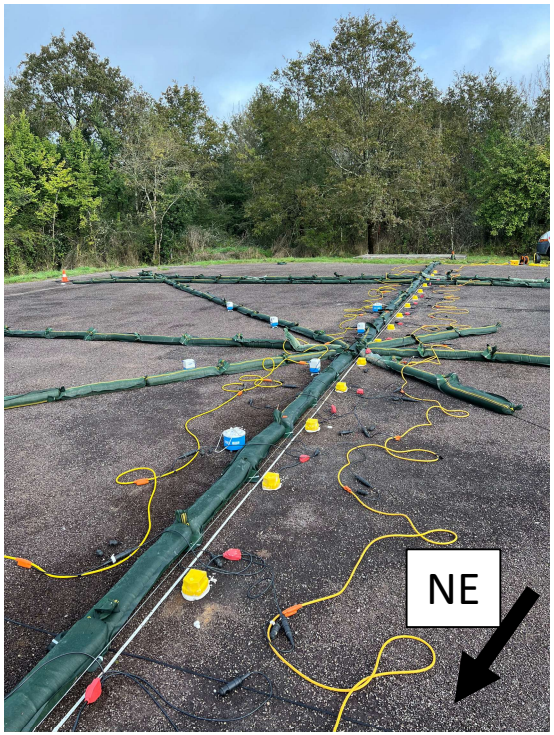
Site ~20 m x 30 m x 6 m





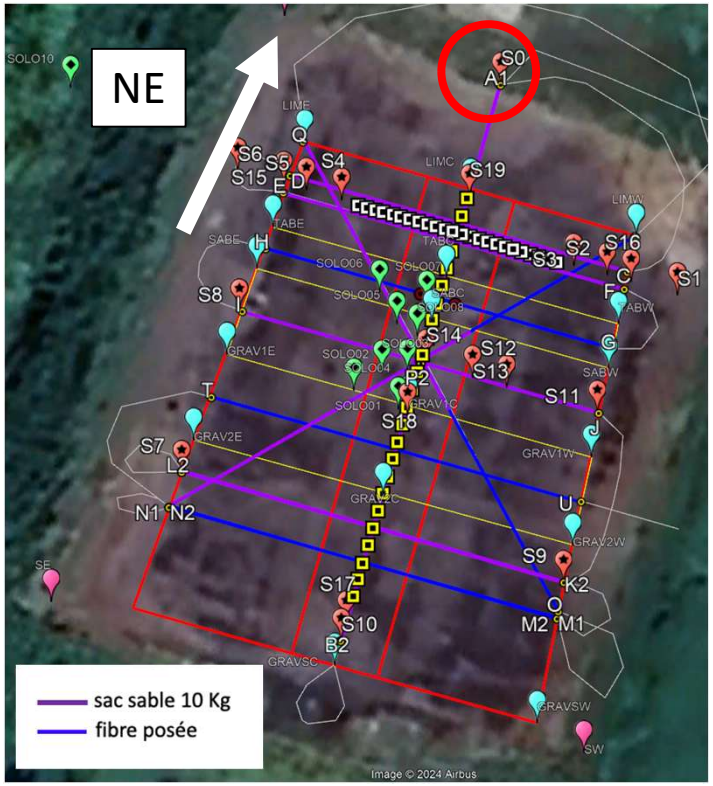


- Environ 600 mètres de fibre optique déployés
- 2 couplages : sac de sable et libre
- Géométrie calée sur la fibre à partir de test de frappe ponctuel aux points A, B, C, ….
- Sismique active et bruit de fond sismique

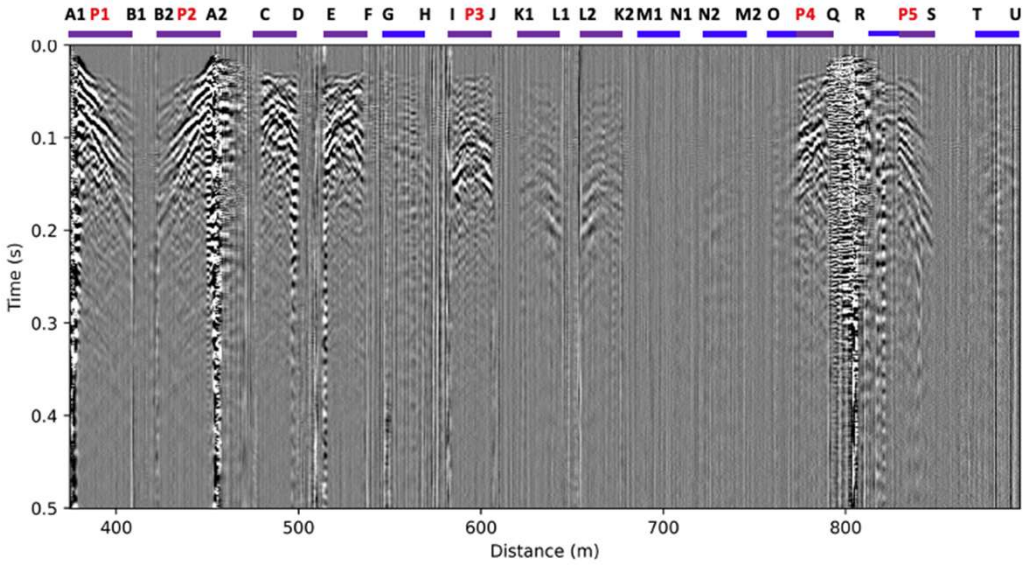


Capteurs sismiques :

- Flûte de géophones (Z,L)
- Nodes 5Hz
- Nodes 0,2Hz

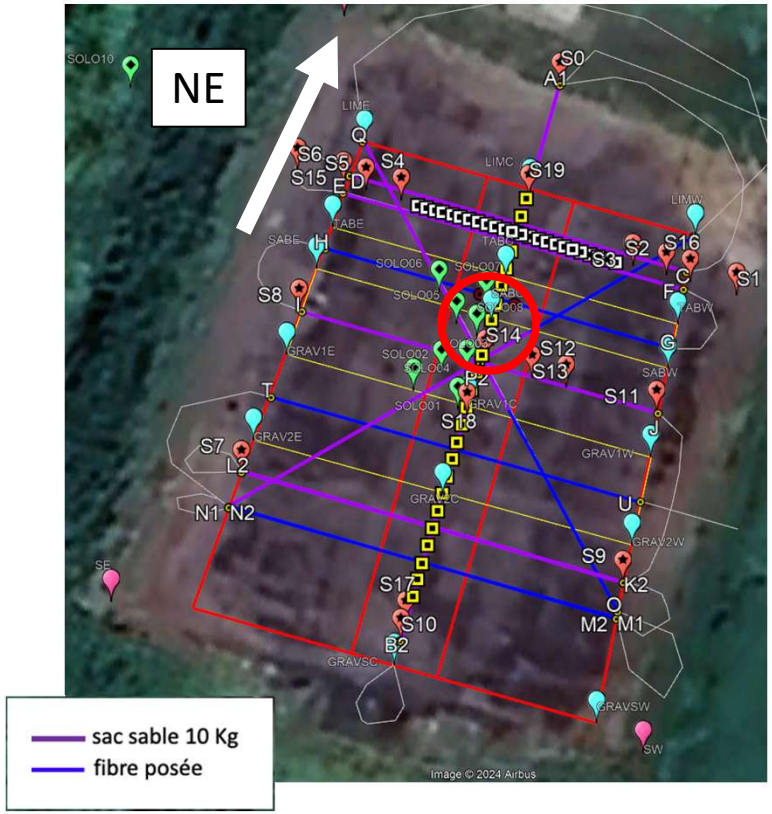


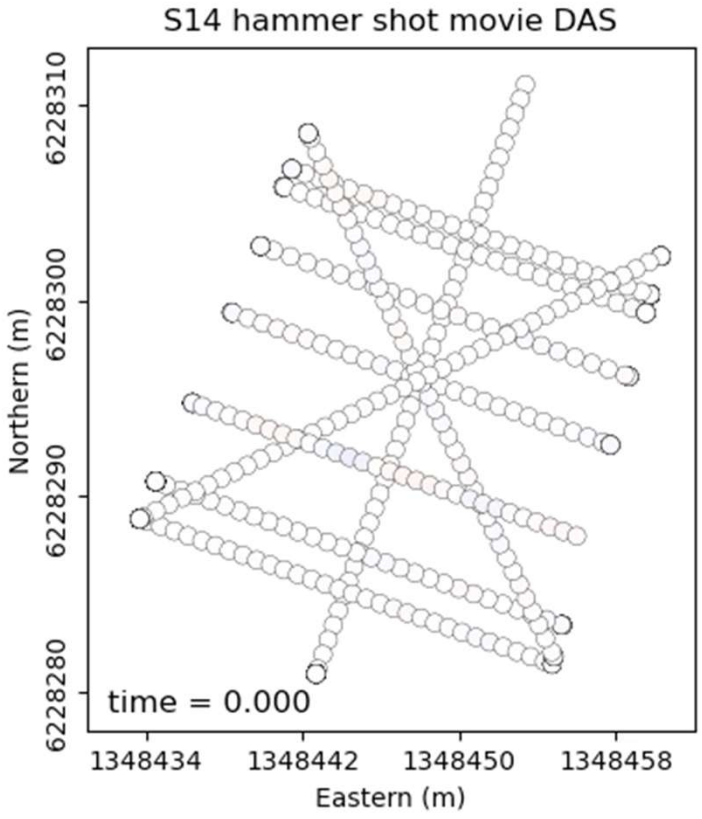
Coup de marteau en S0 (DAS Treble+)



Ianis Gaudot, 2024

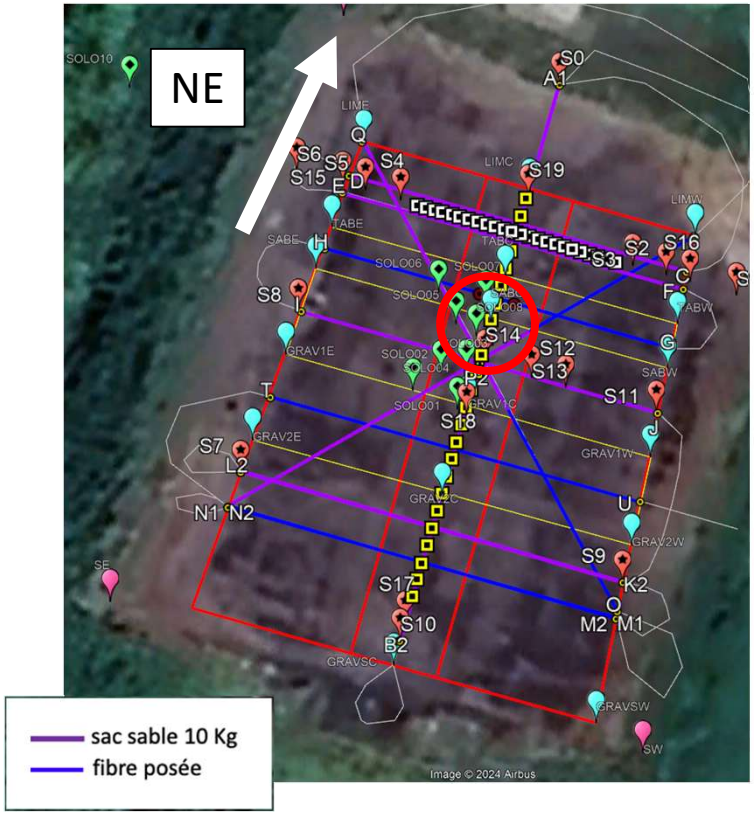
sac sable 10 Kg
fibre posée

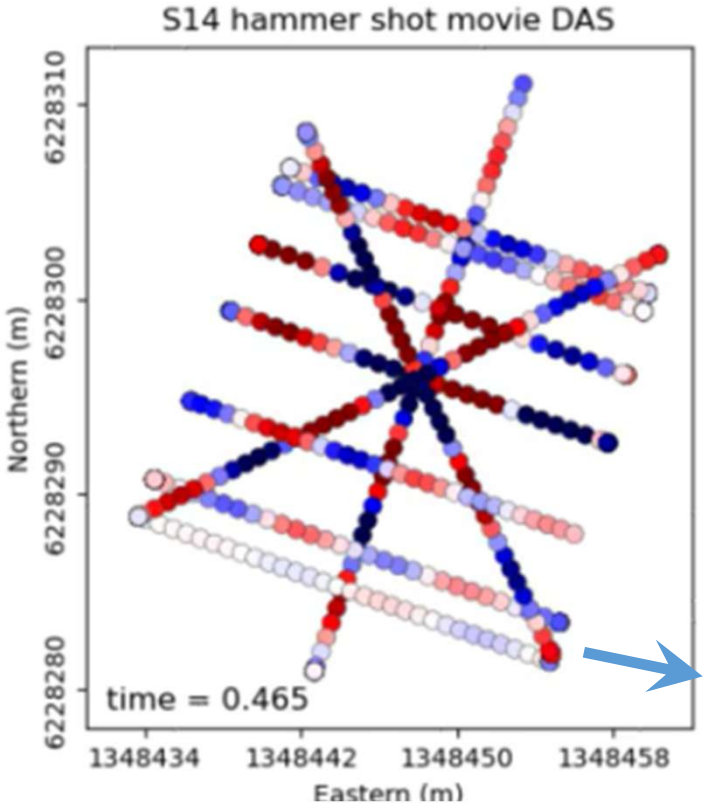




Ianis Gaudot, 2024

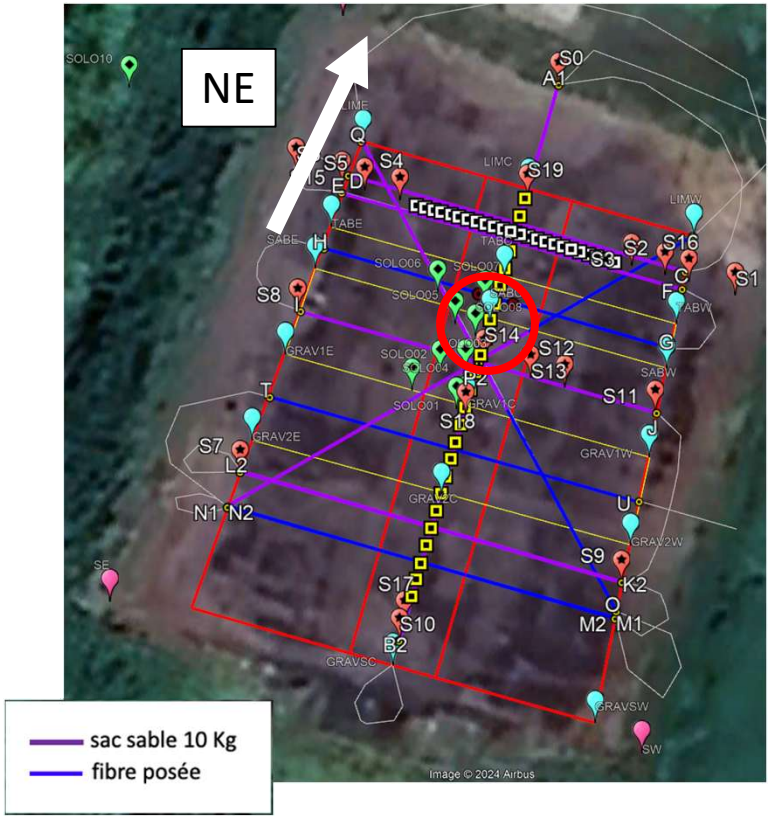
Données filtrées 35-50 Hz

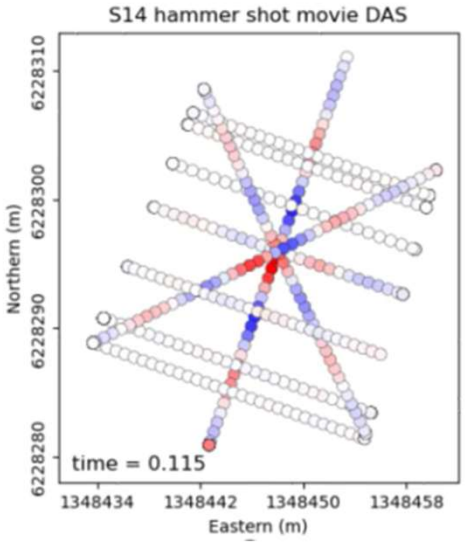


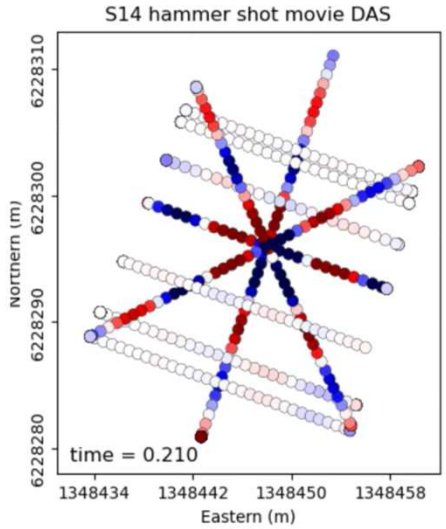


Effet du couplage avec le sol ?

Ianis Gaudot, 2024







Effet de la propagation / réverbération sur les coté du bassin

Ianis Gaudot, 2024

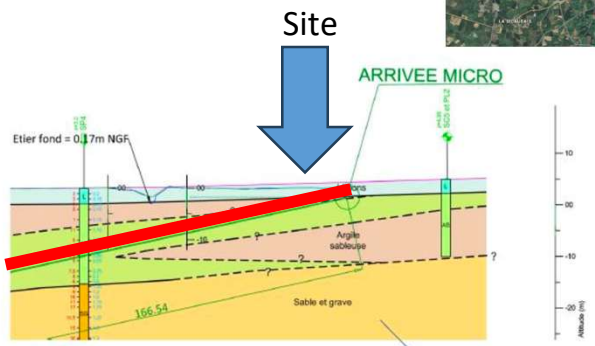
Données filtrées 35-50 Hz

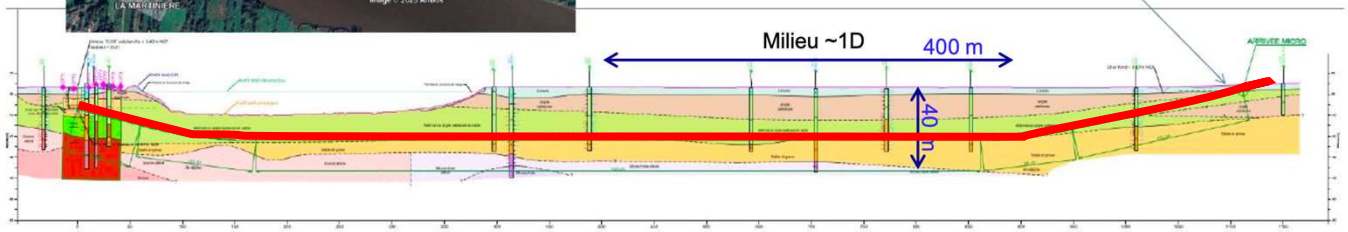
Site du marais d'Audubon, Nantes





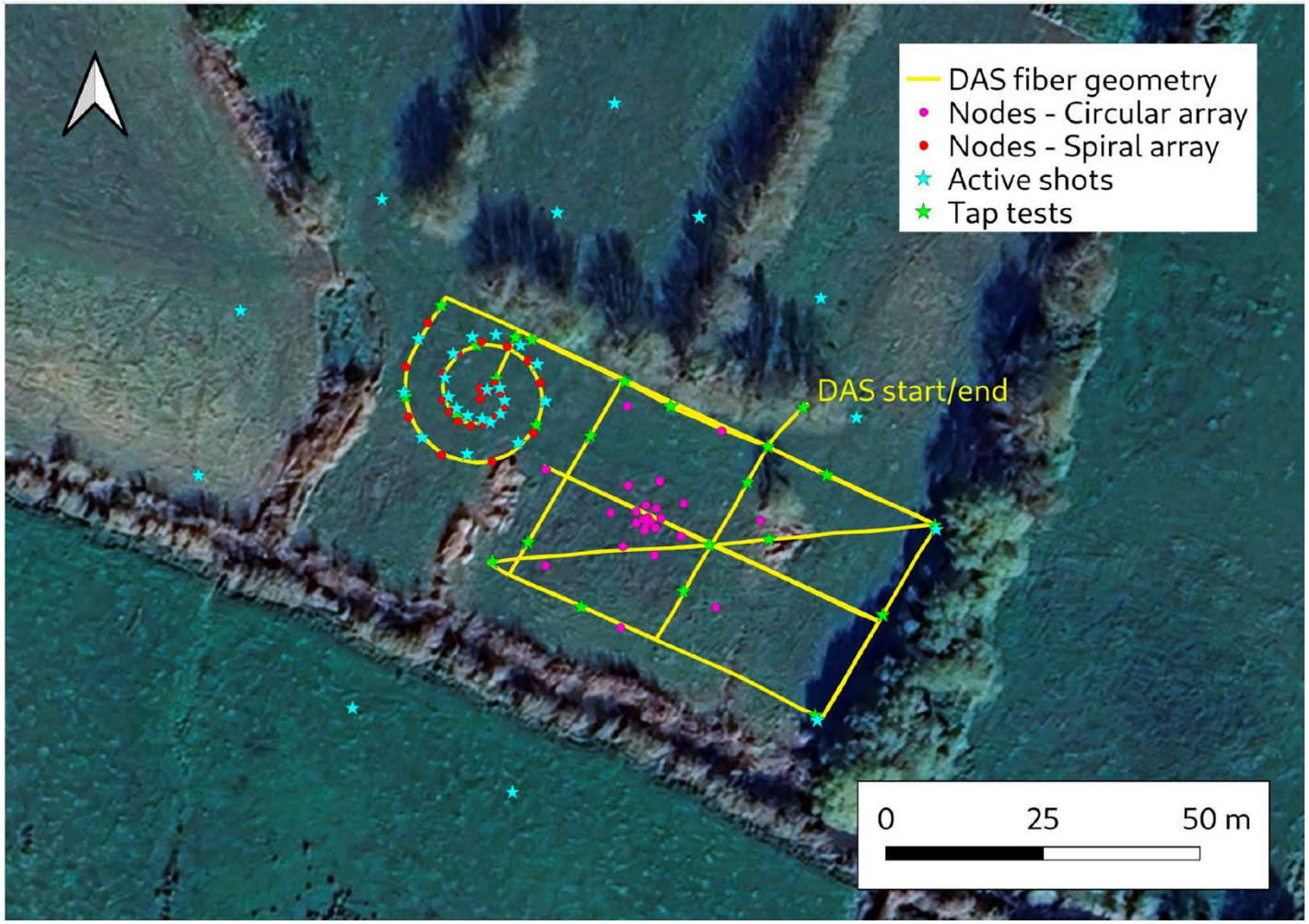
Lithologie et profondeur estimée





Objet :
- Canalisation enterrée
- Variabilité saturation des terrains en eau : impact sur Vs ?

Lehujeur, 2024

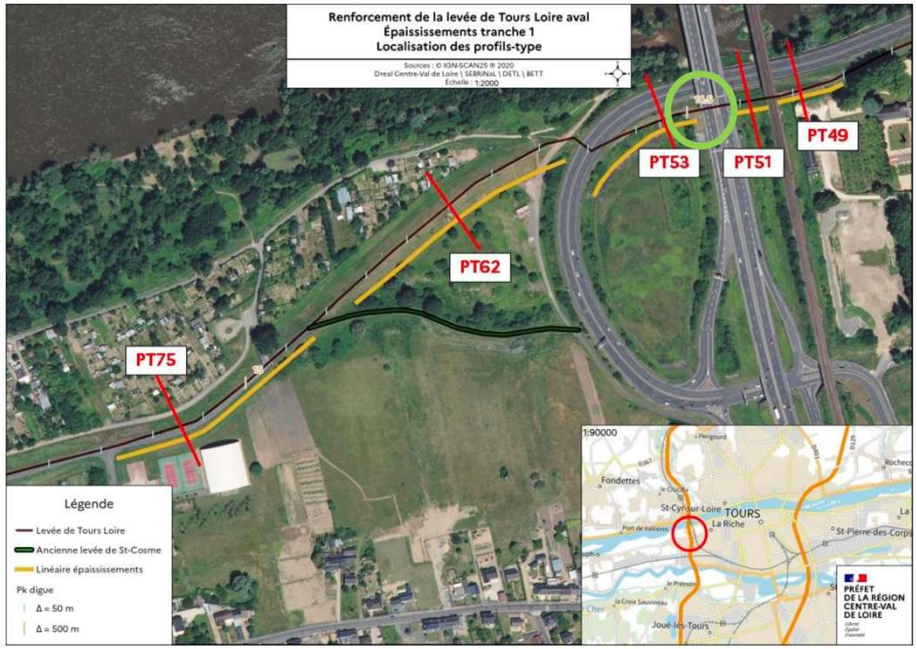


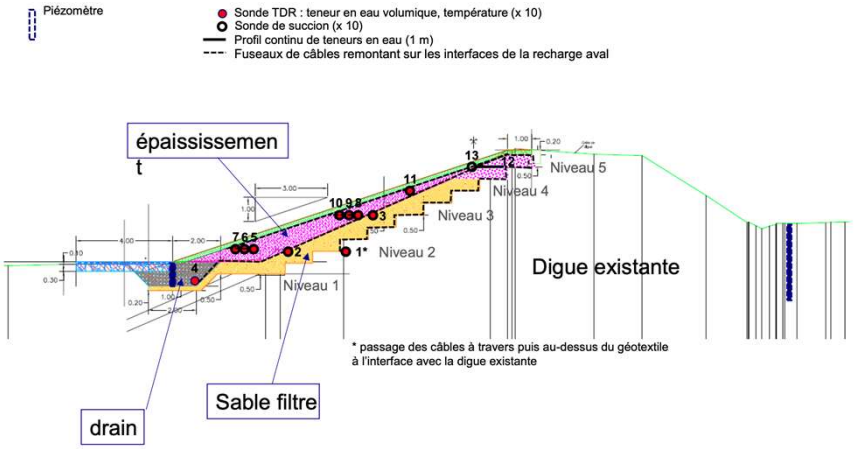
+ sismique active (MASW)

Campagnes :
- Juin 2025
- Septembre 2025

Site de la digue de La Riche, Tours





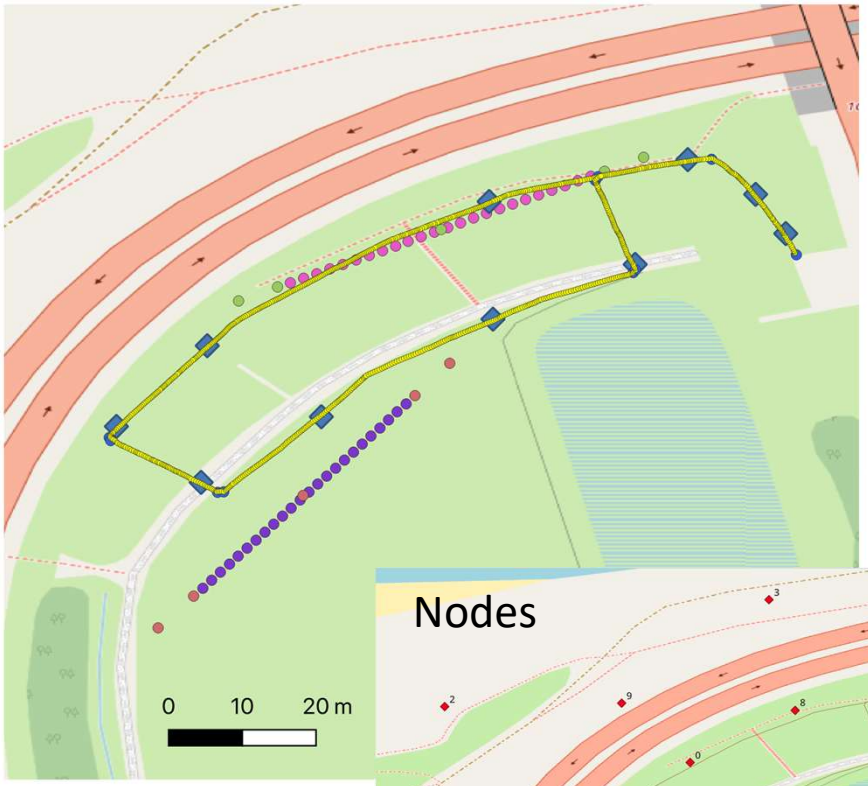


Boussafir et al. (2024) : « Instrumentation de la digue de La Riche : première étape vers un observatoire des interactions sols-climat »

CETU Cerema CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN Université Gustave Eiffel







Campagnes :

- Juillet 2025
- Octobre 2025

points-geostix-final-190725
- Coins
- Fibre
- MASW-Bas
- MASW-Bas-tirs
- MASW-digue
- MASW-digue-tirs
- Tap-Test

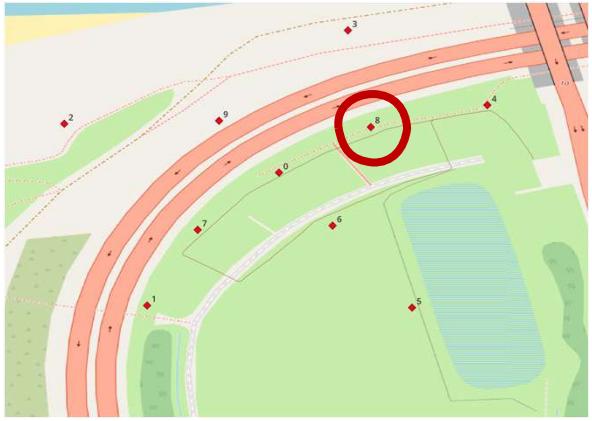
OpenStreetMap



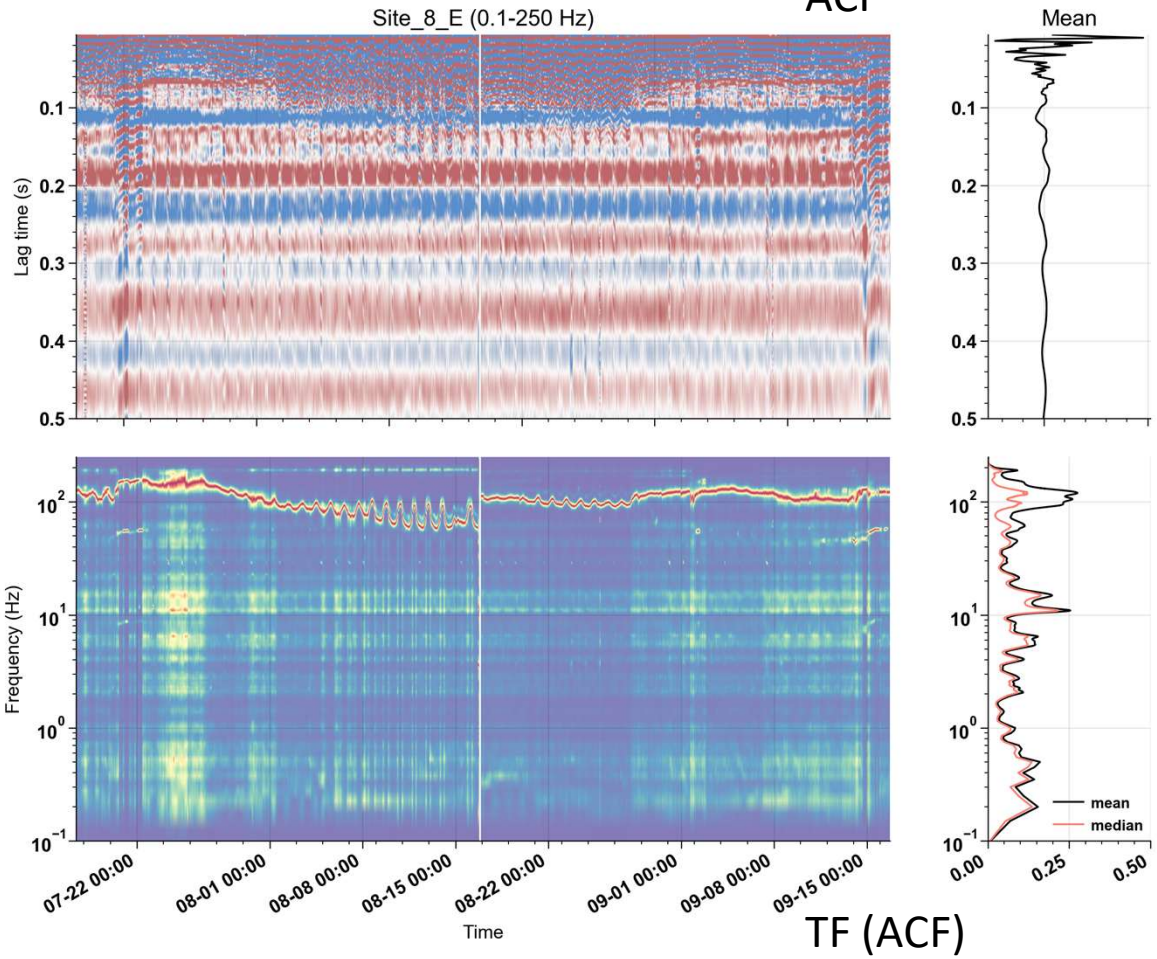


Objectif : imagerie et suivi du milieu

Exemple : variation temporelle du contenu fréquentiel du bruit ambiant.

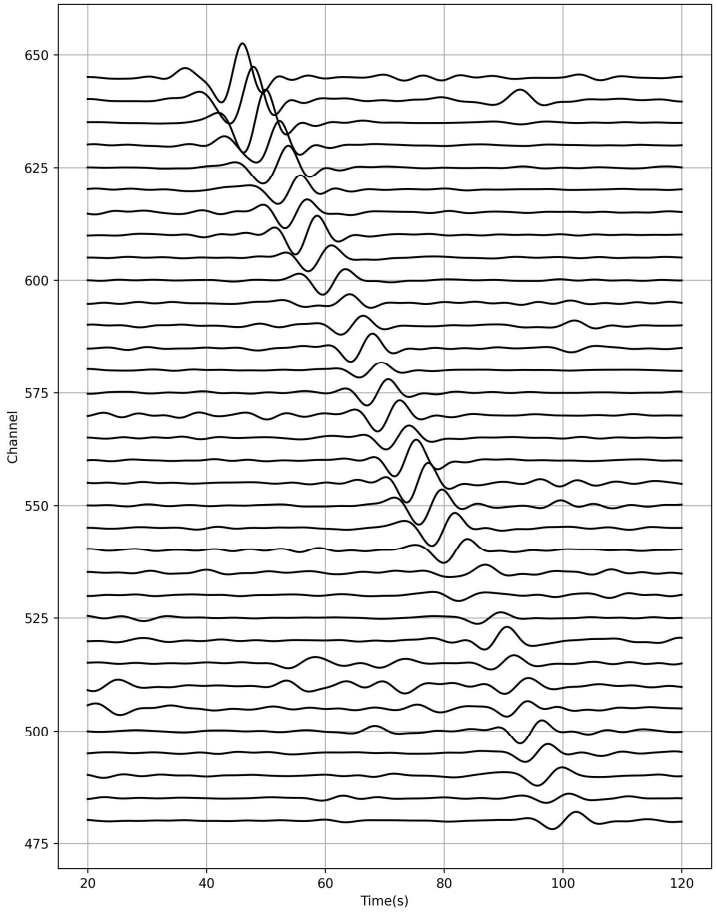


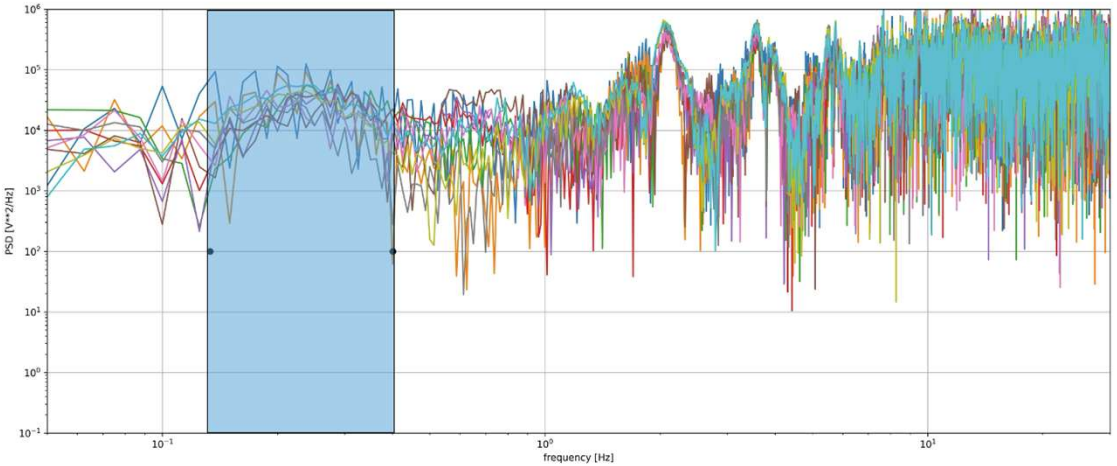
ACF



TF (ACF)

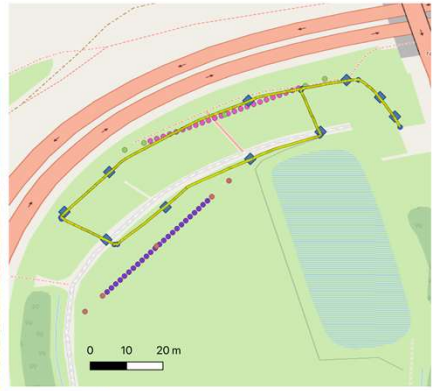
Filtre BP 0.13Hz à 0.4 Hz





Enregistrement du passage d'un véhicule le long de la fibre

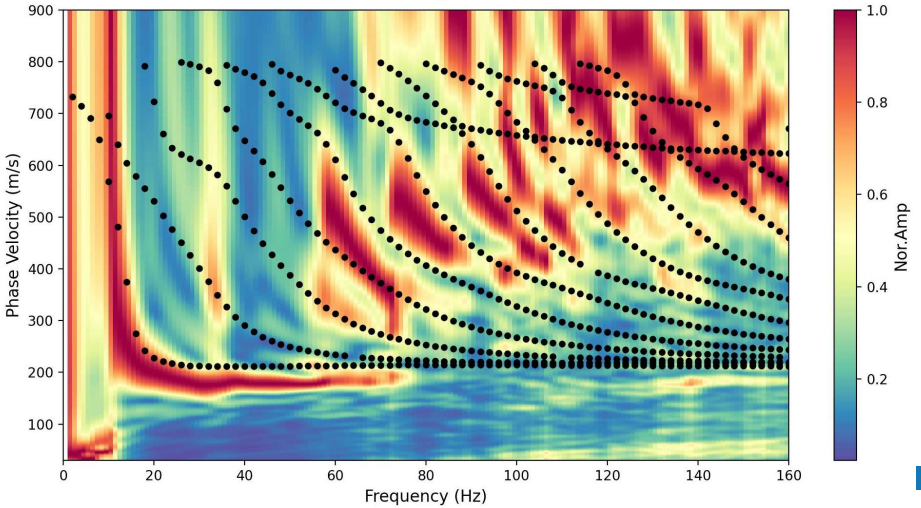


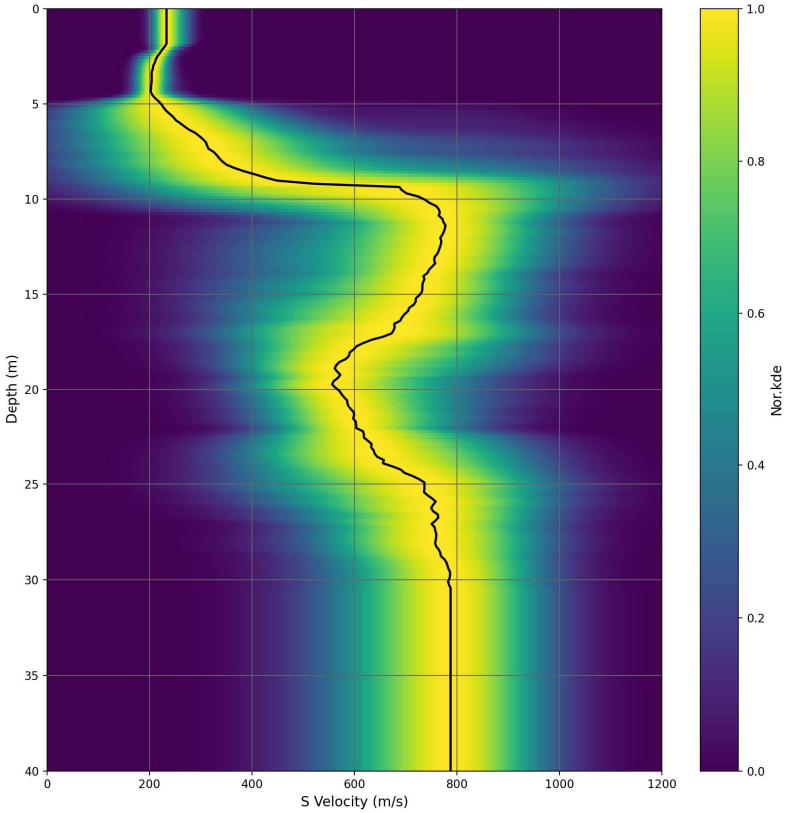


Résultat de l'inversion de la forme d'onde (déformation)

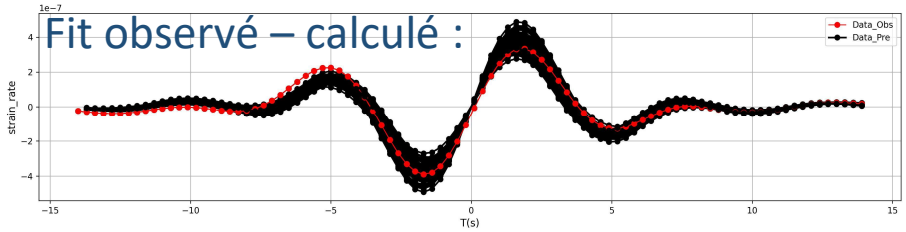
Formulation directe basée sur l'équation de Boussinesq.
Inversion par algorithme MCMC (100 models initiaux, 800 itérations par modèle, 9 couches)

Comparaison avec courbe de dispersion
- MASW -





Fit observé – calculé :



Le rôle de la fibre dans la sismologie urbaine :



- L'auscultation du sous-sol urbain présente plusieurs difficultés liées aux conditions d'expérimentation intrinsèques au milieu urbain.
- Les techniques géophysiques classiques sont limitées dans ce contexte fortement bruité et un sous-sol très hétérogène et fortement anthropisé.
- Le DAS peut détecter et récupérer simultanément de multiples vibrations sur une longue distance, et le taux d'échantillonnage élevé fournit des informations abondantes sur l'environnement permettant d'une auscultation à haute résolution du milieu géologique.
- Une infrastructure de fibre optique installée de façon permanente (fibre noire) devrait permettre une surveillance géophysique non intrusive à faible coût.



Les différents projets en cours permettront de :

- Adapter et d'optimiser les techniques d'imagerie du sous-sol aux données DAS.
- Analyser la résolution pouvant être atteinte.
- Définir l'influence du couplage de la fibre avec le sol et de celui du brin de fibre dans le câble sur les résultats d'imagerie.
- Investiguer les capacités des fibres noires pour l'auscultation du sous-sol urbain.

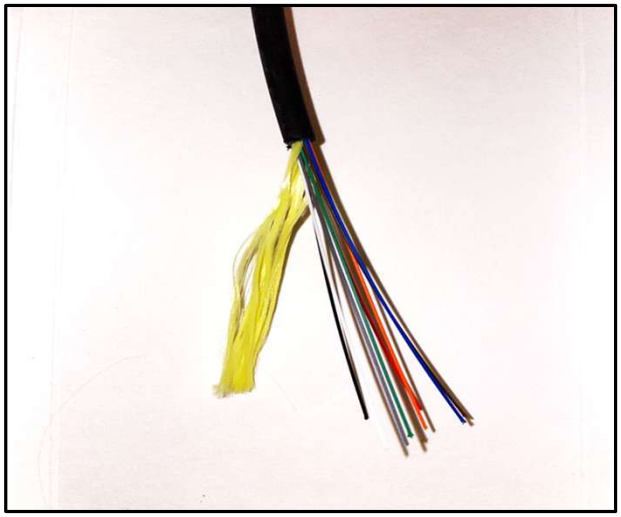
MERCI POUR VOTRE ATTENTION

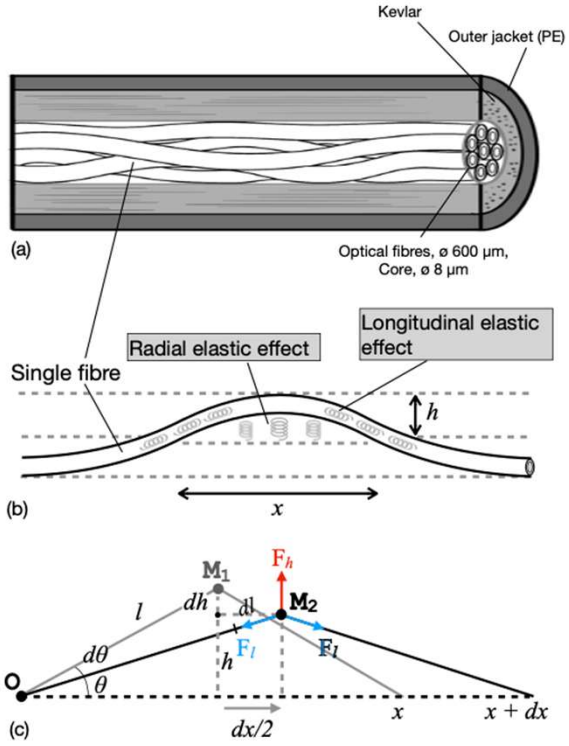
Comparaison quantitative DAS-Node (taux de déformation)

Biagioli et al. 2024

Pourquoi de telles différences entre DAS et Node ?

- Couplage entre la fibre et le sol
- Perte de sensibilité d'un brin de fibre libre dans un câble





Comparaison quantitative DAS-Node (taux de déformation)

Biagioli et al. 2024

Pourquoi de telles différences entre DAS et Node ?

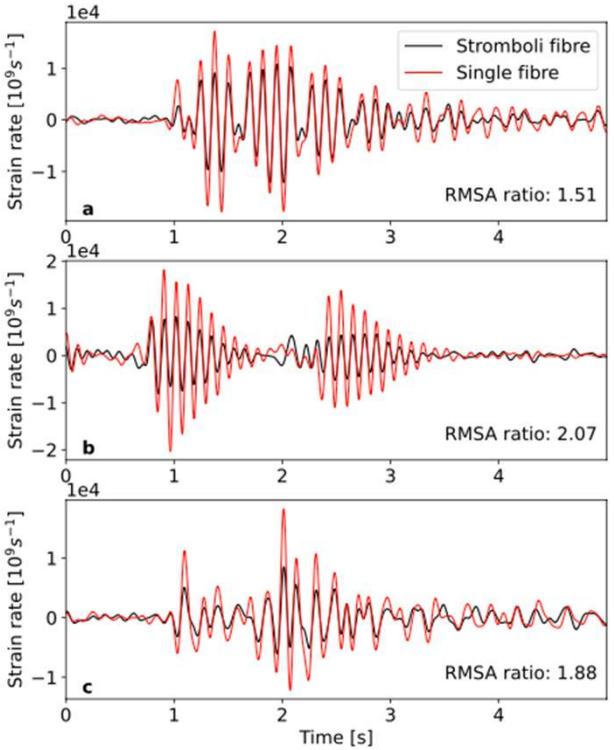
Noir : Fibre dans un cable souple multi-brin (Stromboli)
Rouge : Fibre libre



Coup proche des fibres

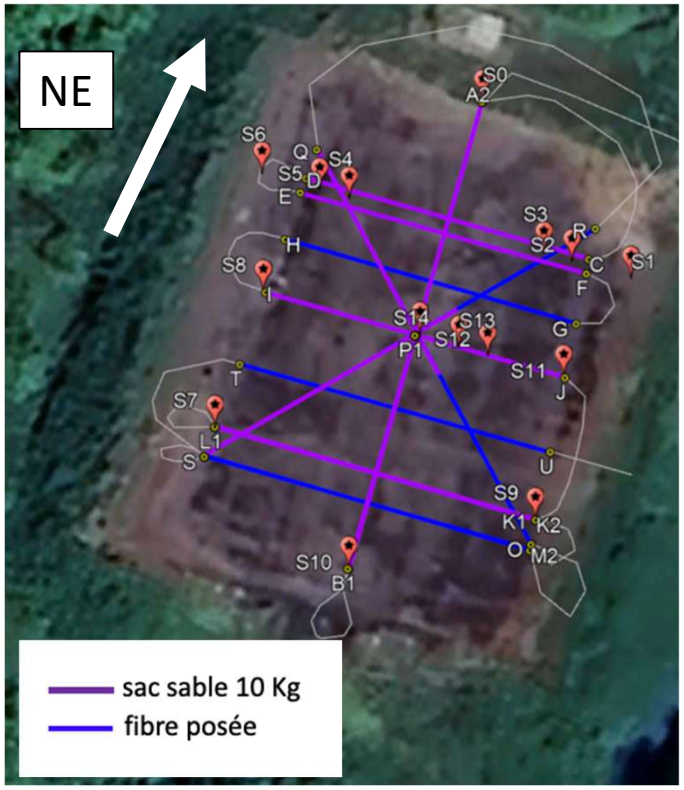
Coup sur le câble

Coup sur le câble suspendu

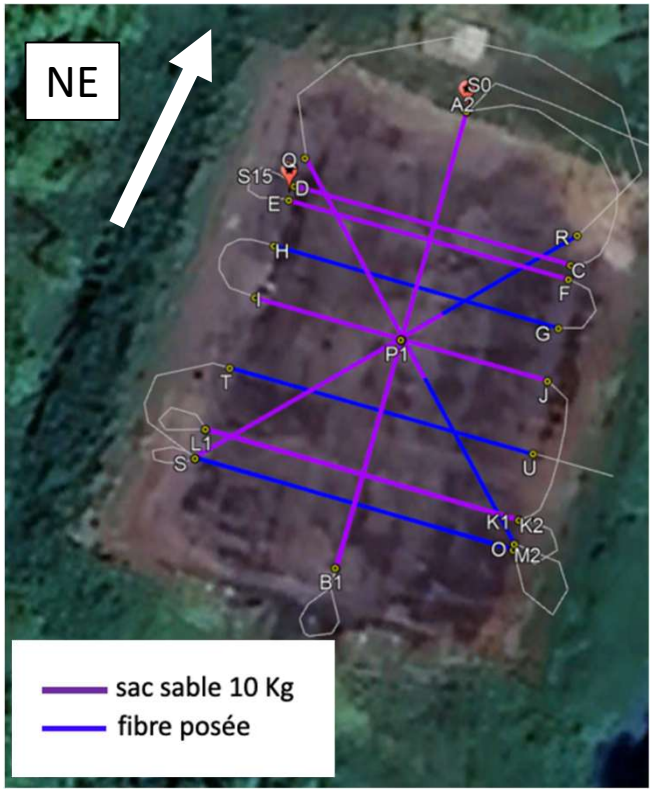


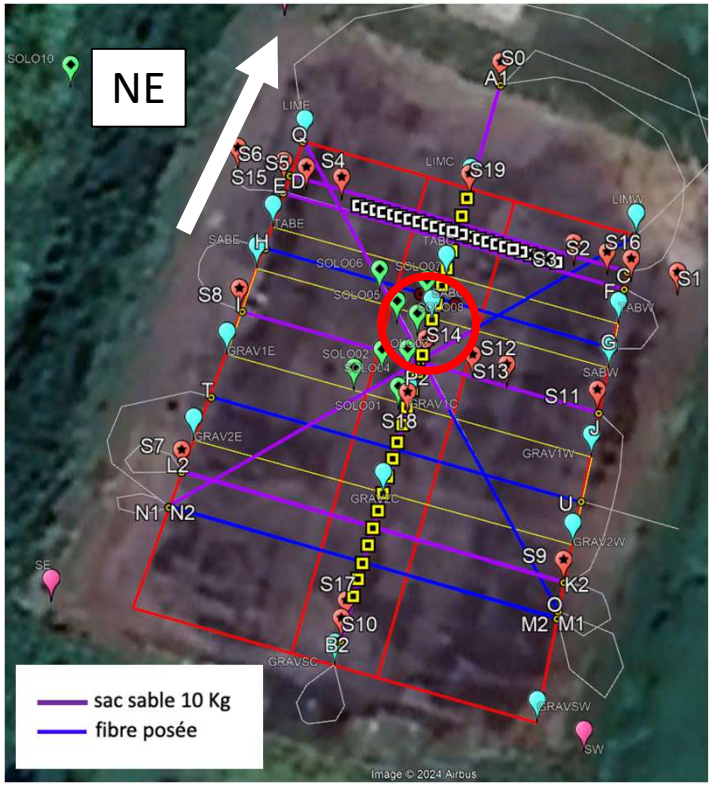
→ Selon le type de dispositif, le facteur entre les enregistrements des deux types de fibre est différent.
→ Marque l'effet de la disposition des brins de fibre à l'intérieur du câble, le couplage.

Marteau (S0 to S14 positions)

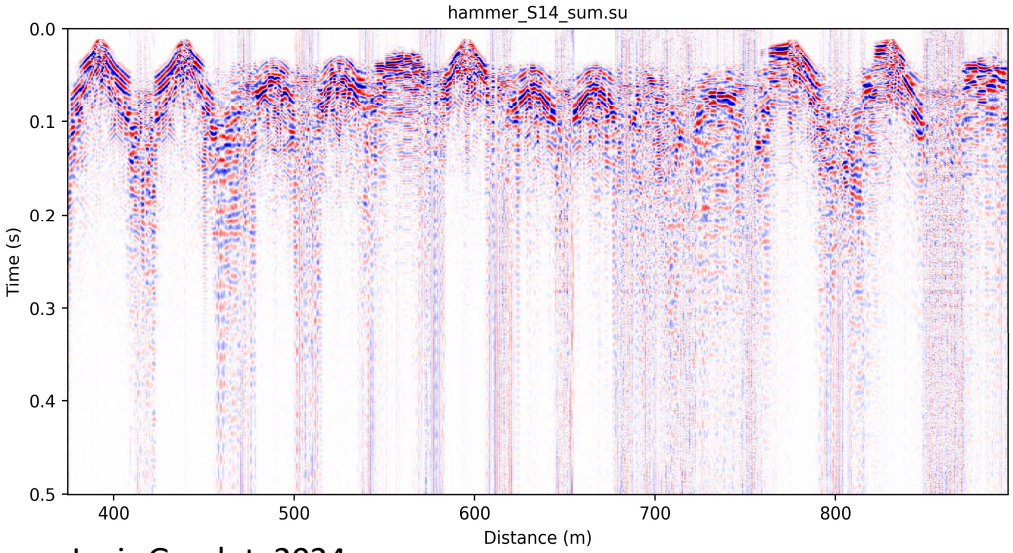


Pot vibrant UGE (S0 and S15 positions)



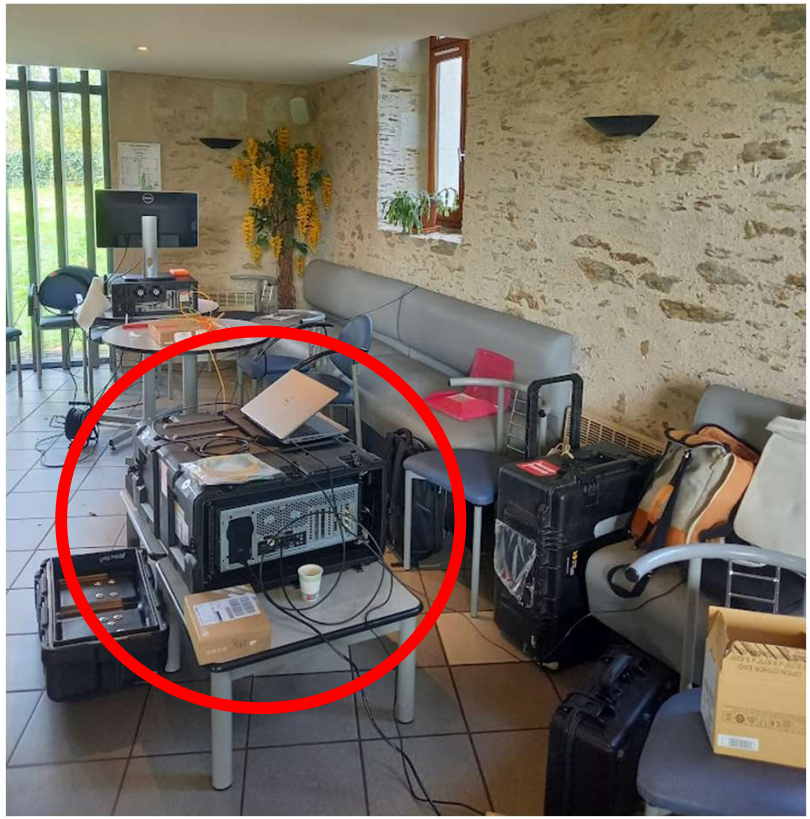


Coup de marteau en S14 (DAS Treble+)



Ianis Gaudot, 2024

WP1 : Expérimentation en milieu contrôlé et continu



2 interrogateurs DAS

Acquisition unit: Treble+

0.82 cm pulse width

2 000 Hz time sampling rate

82 cm spatial sampling

Velocity data product

Sensing range : 300 – 1000 m

Triggered recording

WP1 : Expérimentation en milieu contrôlé et continu



2 interrogateurs DAS

Acquisition unit: Febus Optics

1 m pulse width

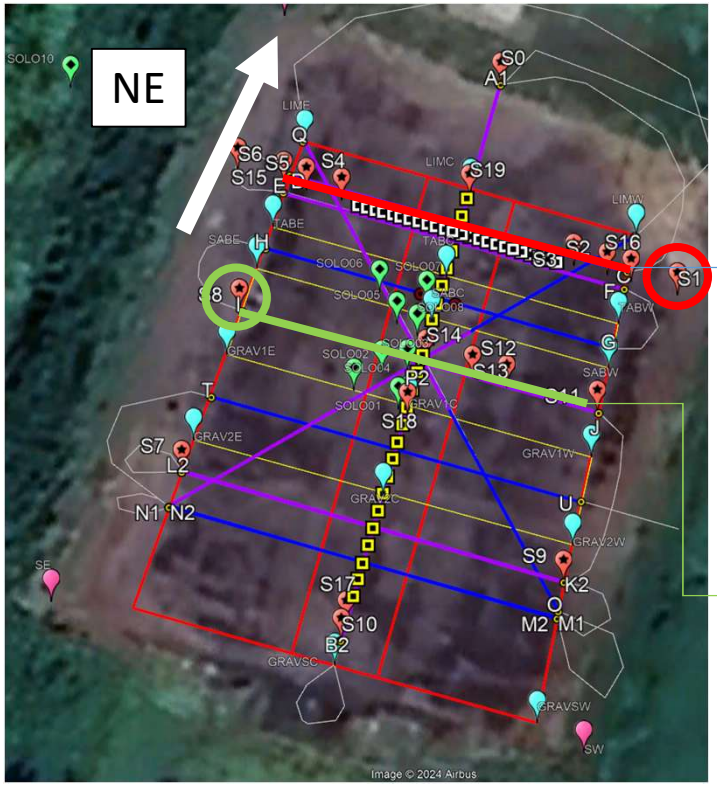
500 Hz & 1000 Hz time sampling rate

40 cm spatial sampling

Strain rate

Sensing range : 0 – 1000 m

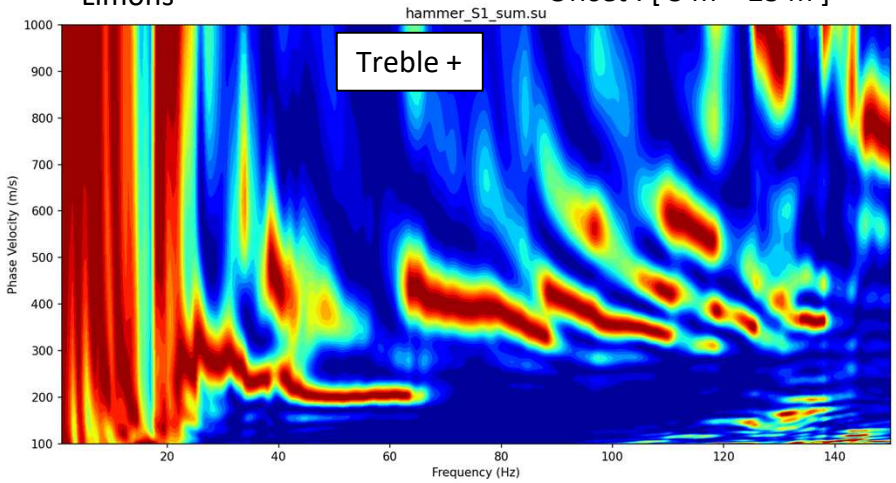
Continuous recording



Ianis Gaudot, 2024

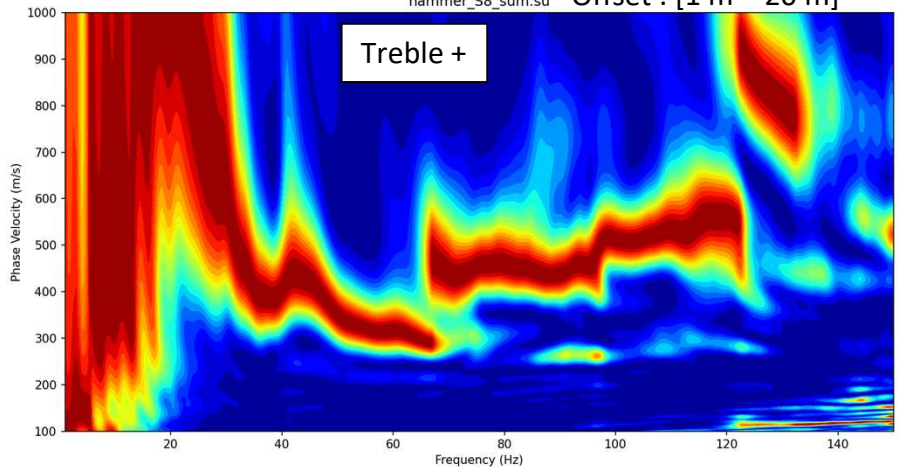
Limons

Offset : [3 m – 23 m]



Sables

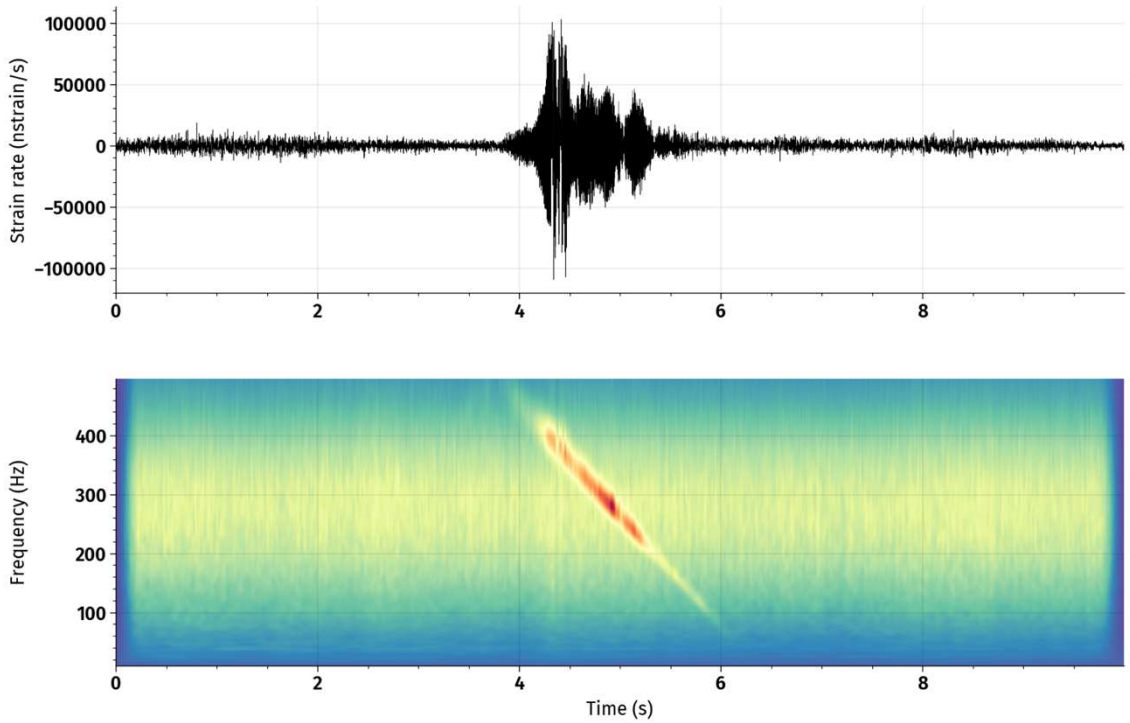
Offset : [1 m – 20 m]



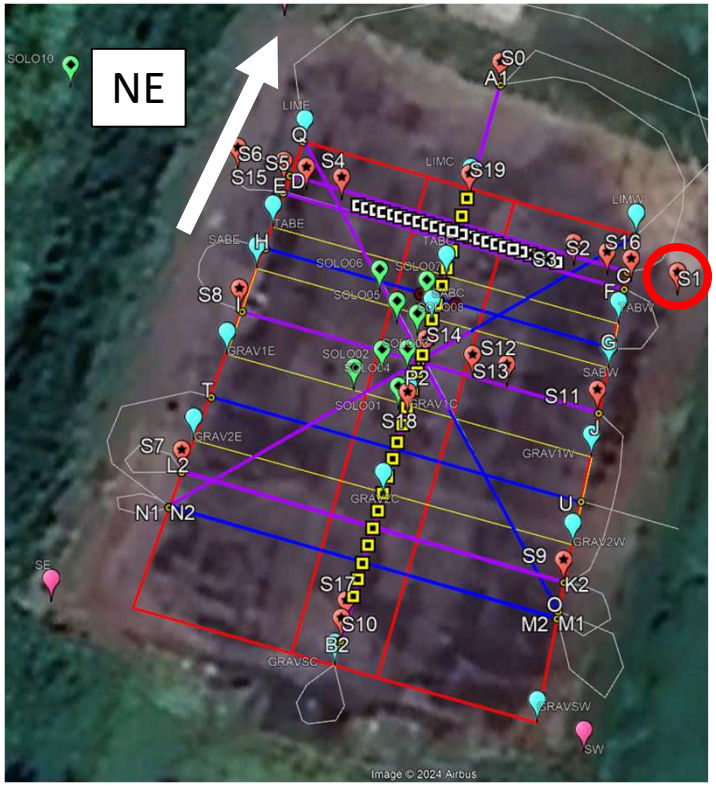
Caractérisation de la source vibratoire (400Hz-20Hz)

Enregistrement sur DAS Febus.

Enregistrement proche de la source

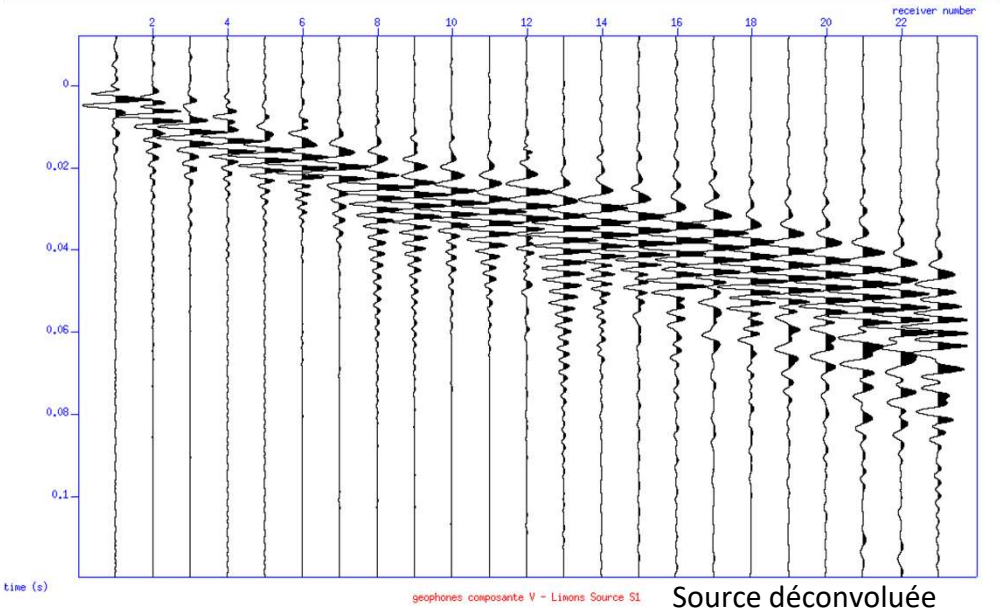


Ianis Gaudot, 2024



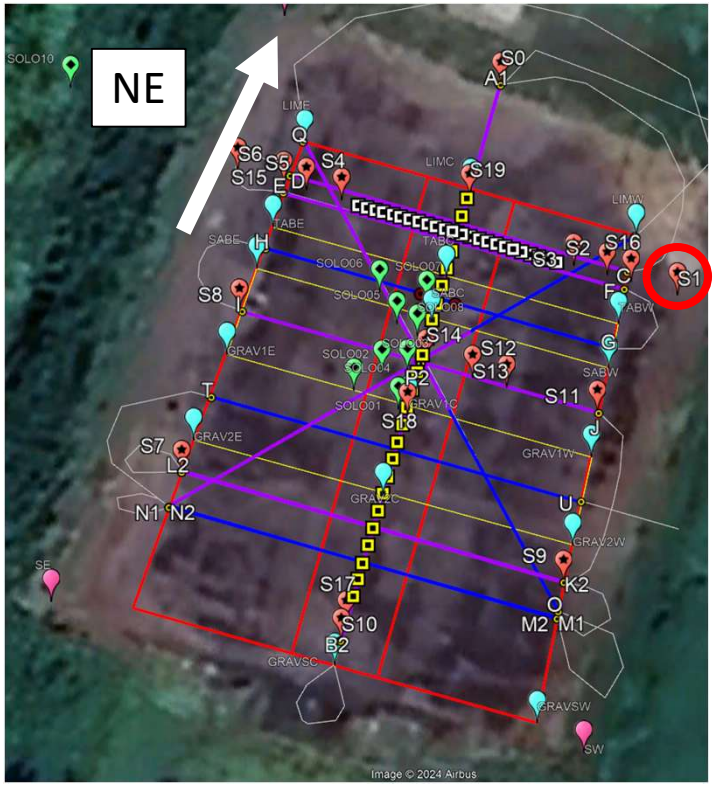
Enregistrement sur les géophones
- Composante verticale -

Limons



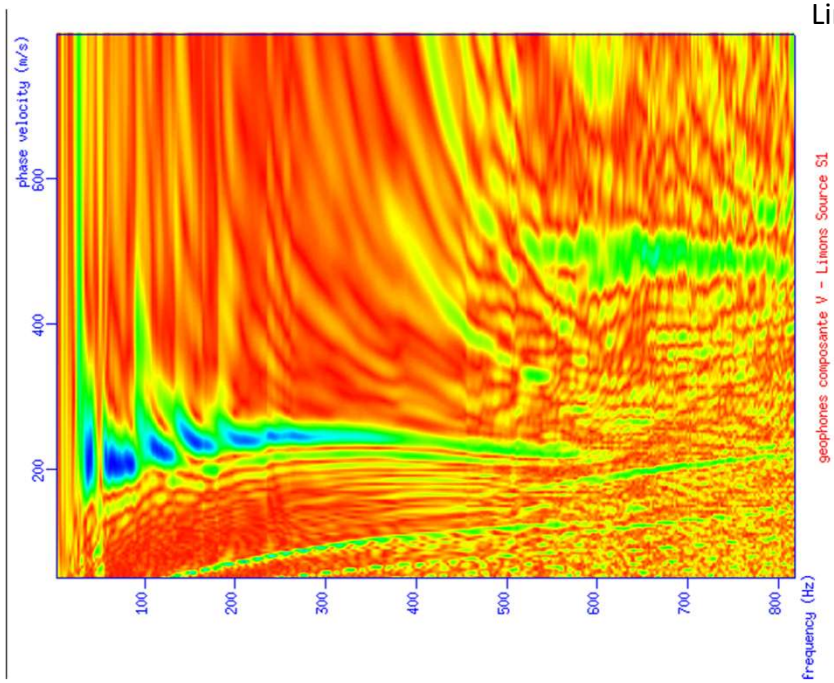
Source déconvoluée
Amplitude normalisée

Donatienne Leparoux, 2024



Enregistrement sur les géophones
- Composante verticale -

Limons

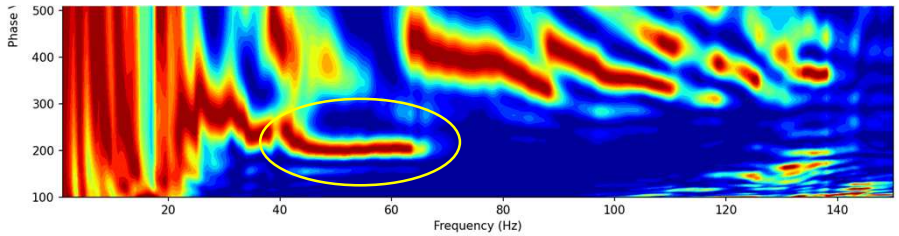


Donatienne Leparoux, 2024

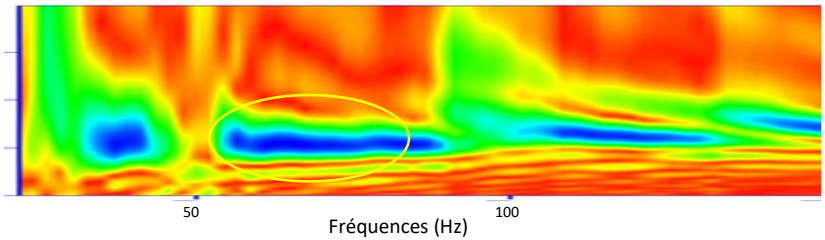
Source : Marteau
Fibre – Treble+

Source : vibreur
Géophones – comp. verticale

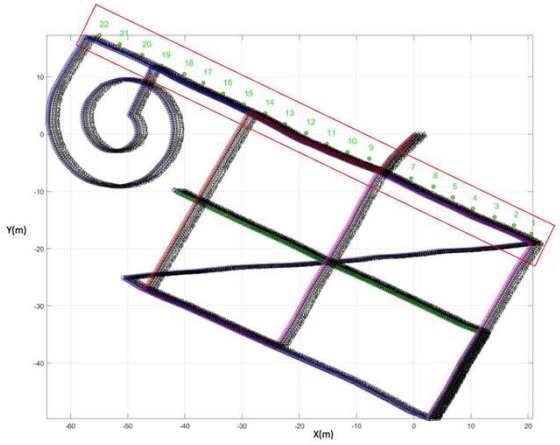
Limons

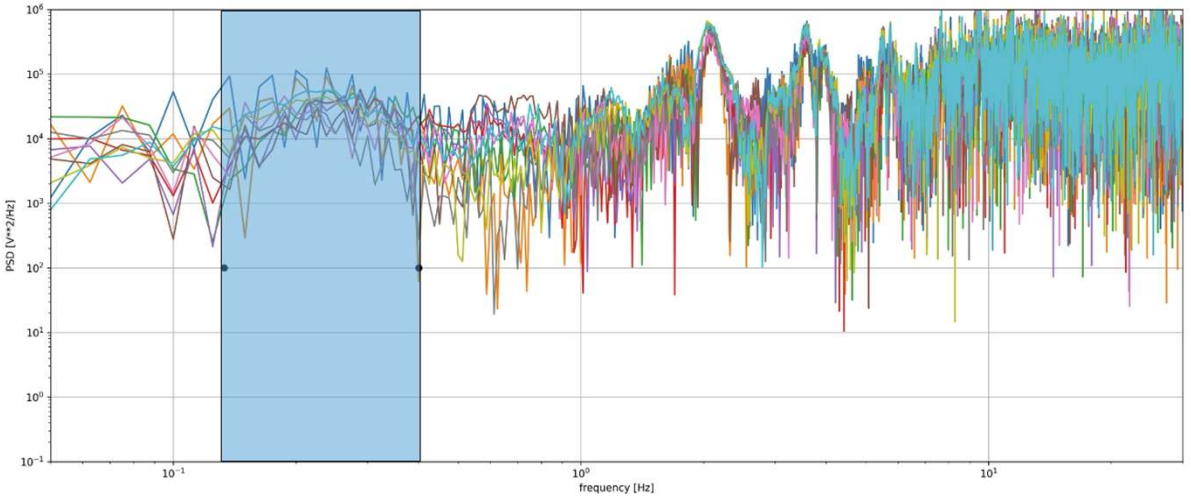


VS

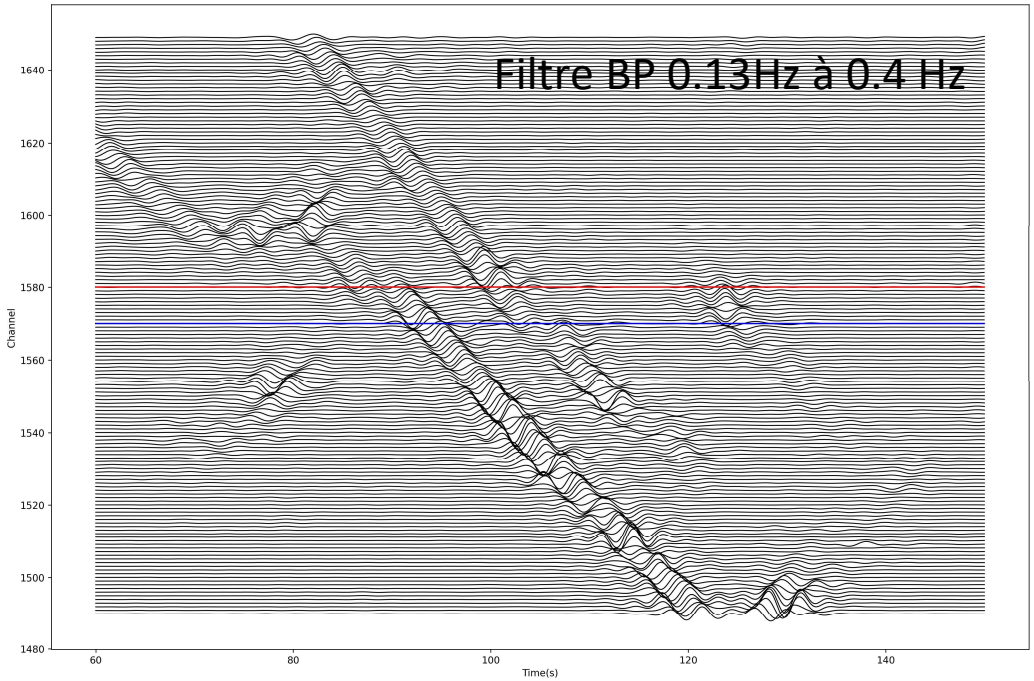


CETU Cerema CLIMAT & TERRITOIRES DE DEMAIN Université Gustave Eiffel



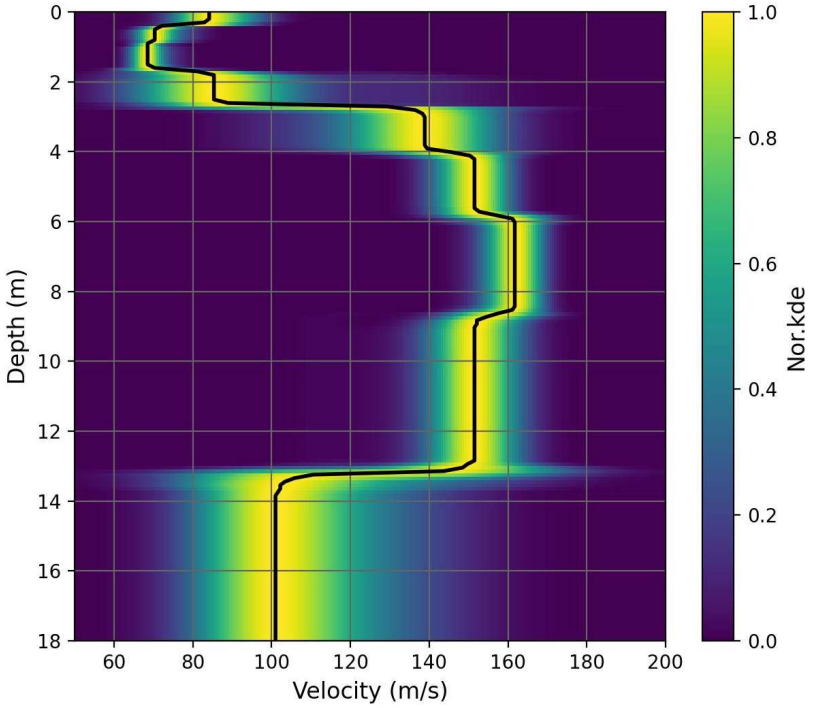


Enregistrement du passage d'un véhicule

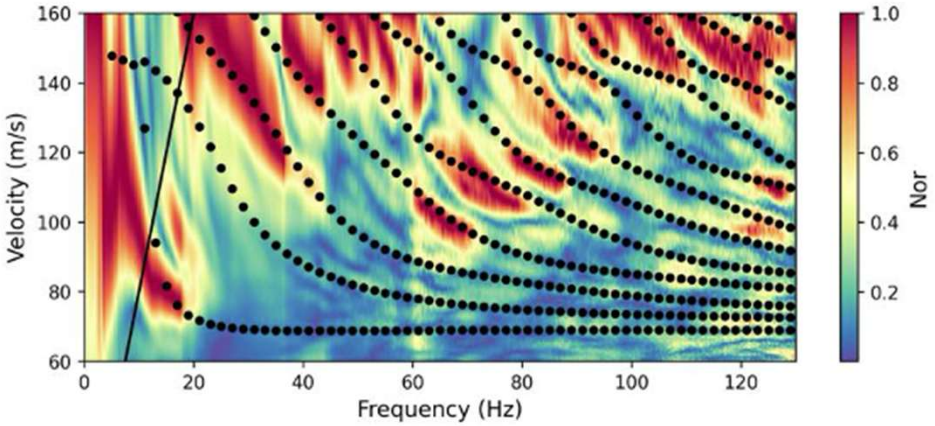


Résultat de l'inversion de la forme d'onde (déformation)

Formulation directe basée sur l'équation de Boussinesq.
Inversion par algorithme



Comparaison avec courbe de dispersion
- MASW -



Fit observé – calculé :

