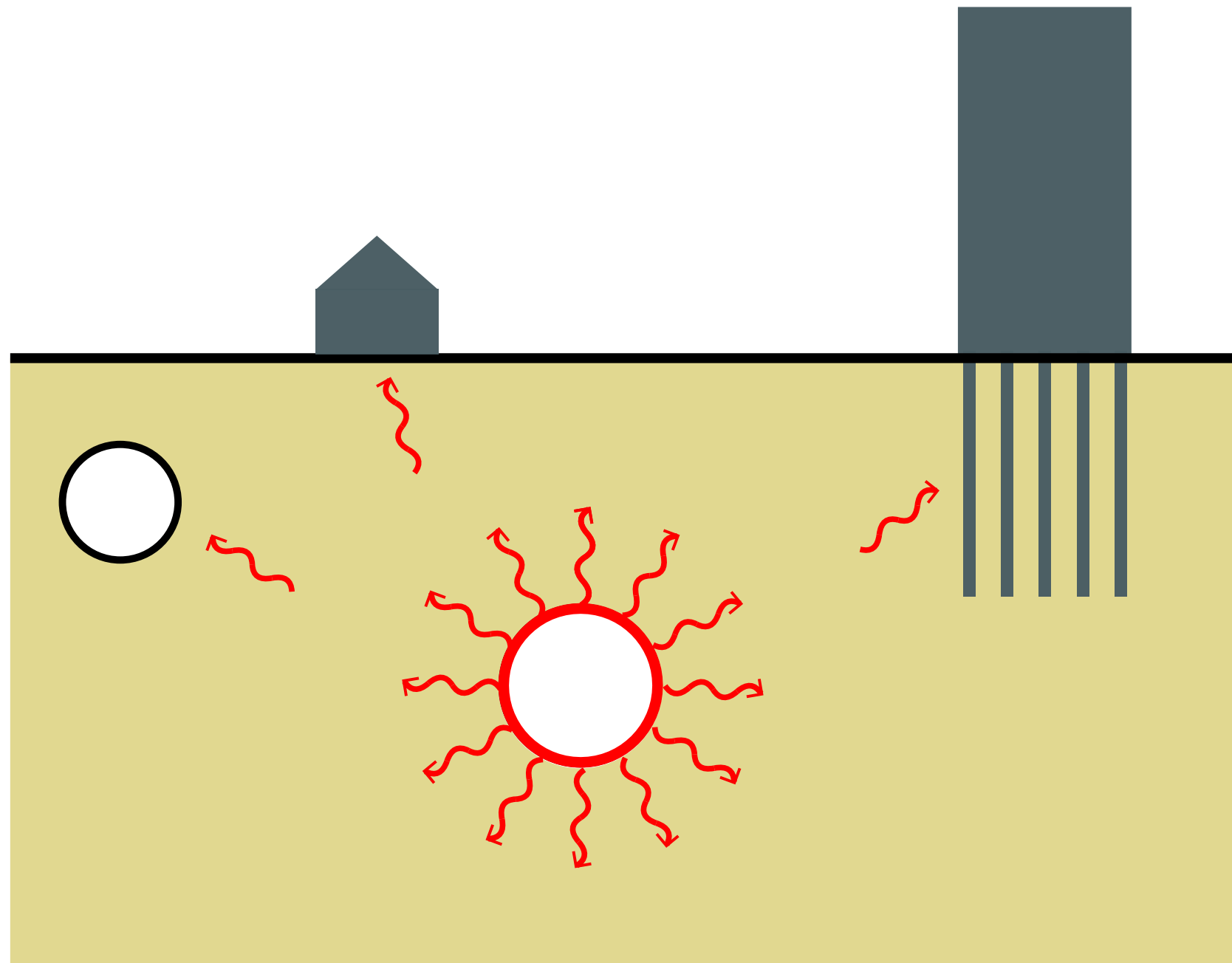


Sociétés Savantes du Sous-Sol (4S)
07 décembre 2023
« Innovation dans le sous-sol »

**Impact vibratoire du creusement au tunnelier
en milieu urbain :
mesures *in-situ* et modélisation numérique**



Phase d'émission : caractérisation de la source vibratoire

Phase de mobilité de transfert : propagation des ondes dans le terrain

Phase d'immission : interaction avec fondations profondes

- 1 – Mesures in-situ (saison 1)
- 2 – Mesures in-situ (saison 2)
- 3 – Modélisation numérique

Peu de données expérimentales dans la littérature

Quels niveaux vibratoires en surface?

Source	Project	TBM	D (m)	C (m)	Dominant excavated ground
Flanagan, 1993	Buffalo subway (USA)	Hard rock TBM	5.6	5–10	Limestones and dolostones
Hiller and Crabb (2000)	London JLE contract 110 (UK)	EPBS	5.1	10.5	London clay
Hiller and Crabb (2000)	London JLE contract 107 (UK)	Slurry Shield	5.1	21.2	Sands and clays
Ferrari et al. (2011)	Lyon subway (France)	Slurry Shield	9.5	15	Granites
Lunardi et al. (2015)	Brescia subway (Italy)	EPBS	8.8	20	Boulders in an alluvial matrix
Bigot and Farotto (2016)	Rennes subway (France)	EPBS	9.5	20	more or less altered shales
Grund et al. (2016)	Karlsruhe subway (Germany)	Slurry Shield	9.3	10	Gravels and sands
Present study	Sorgues (France)	Micro TBM	1.3	10	Gravels and sands
	Lyon subway (France)	Slurry shield	9.8	25	Granites
	TULIP (France)	EPBS	9.9	20 22.5	Gravels and sands Clayey sands

Note: D is the tunnel diameter and C is the overburden thickness.

Tunnelier comme multi-sources vibratoire

- Premiers travaux de reconnaissance à l'avancement [Walter, 2013]
- [Mooney et al., 2014] :
 - Fonction de transfert roue de coupe/ cloison avec chocs
 - Puis caractérisation de la réponse de la cloison in-situ pendant excavation

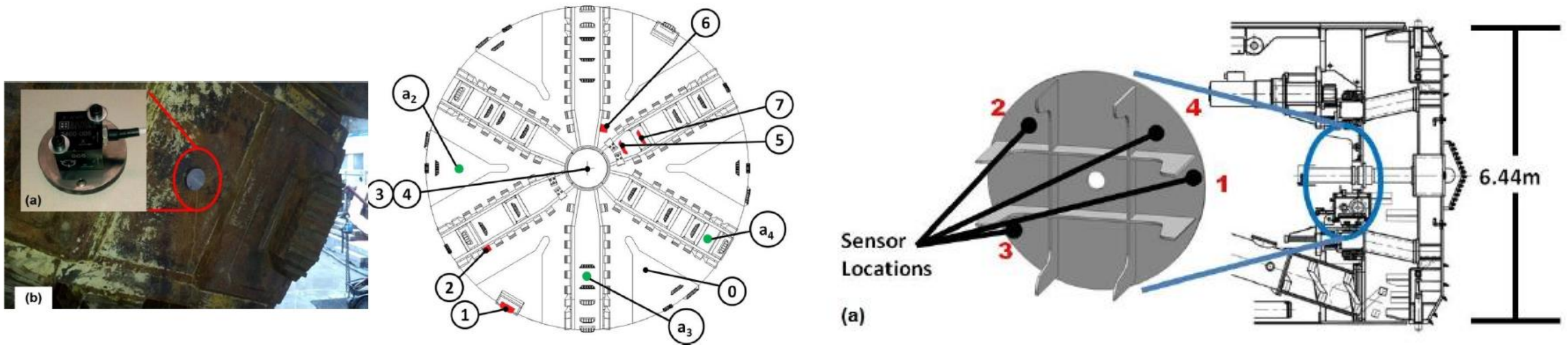


Figure 4. Schematic of Hitachi 6.44 m diameter cutterhead and locations of impacts (0-7) as well as locations of accelerometers (a₂-a₄)

- [Zhan et al, 2010] [Huo et al., 2021] : effet des données de pilotage sur le TBM
⇒ réduire usure des pièces
- Développement d'un outil de surveillance de la roue de coupe [Wu et al., 2021]
- Intelligence artificielle [Liu, 2021]

1.1– Présentation des campagnes de mesures

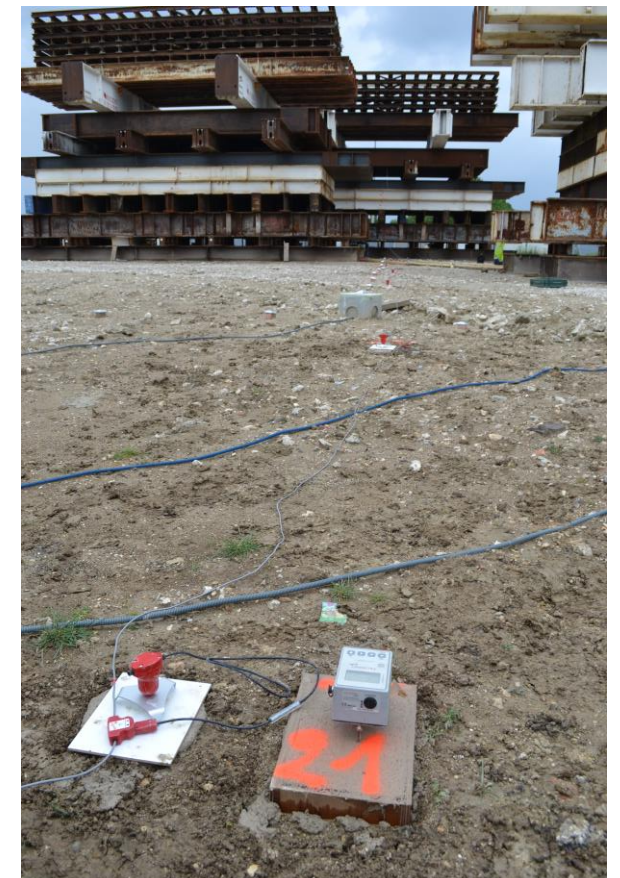
Dispositif expérimental (capteurs Moho) :

- 11 Tromino : géophones 3D synchronisables par GPS
- 18 Rosina : géophones 1D (vertical)

Acquisition @512 Hz

Deux phases de mesures :

1. Mesures en surface sous bruit mécanique ambiant avant excavation (≈ 30 minutes)
2. Mesures synchronisées pendant l'excavation en surface et dans le tunnelier



1.1– Présentation des campagnes de mesures



Les tunneliers en action

Grand Paris express

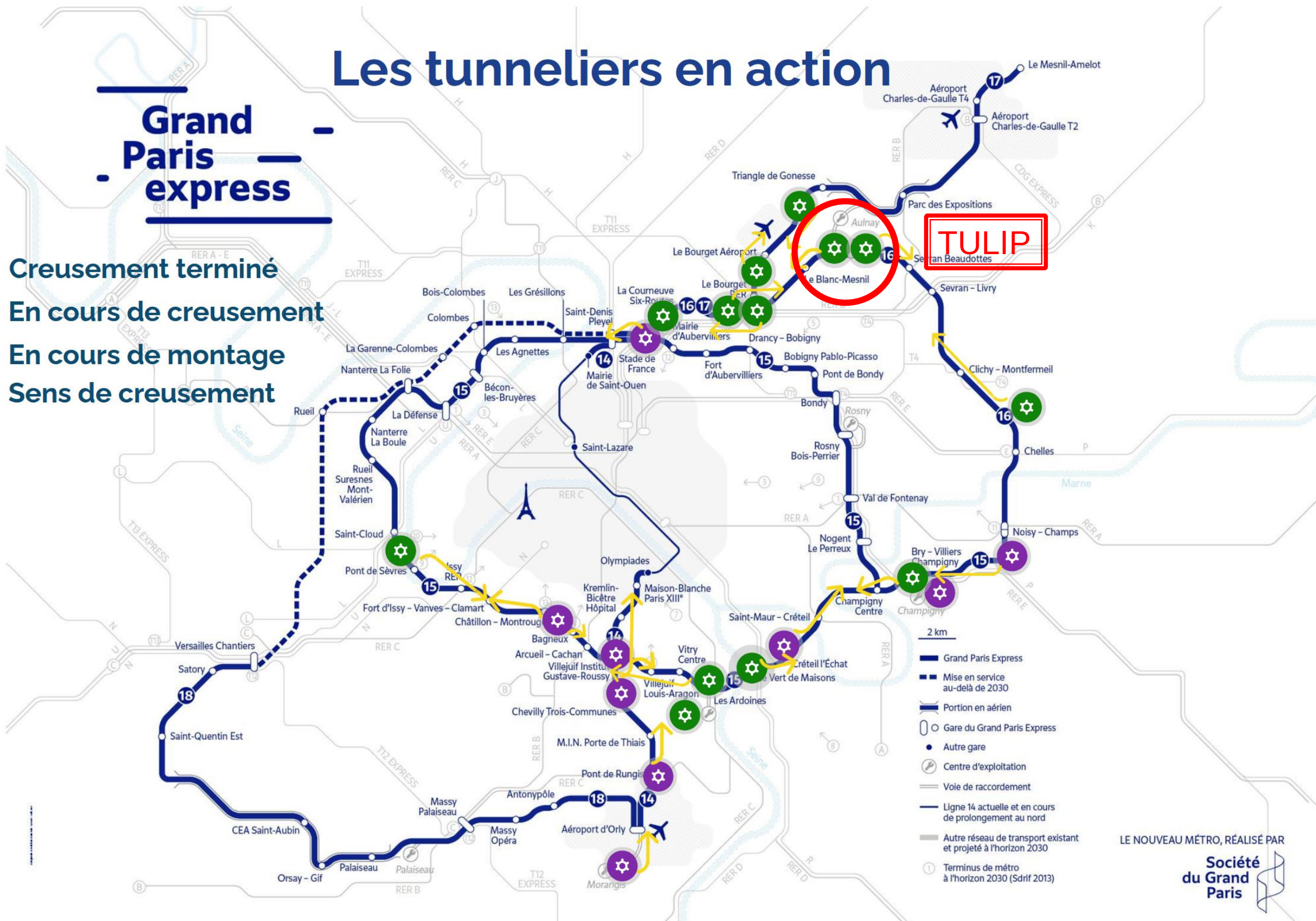


Creusement terminé

En cours de creusement

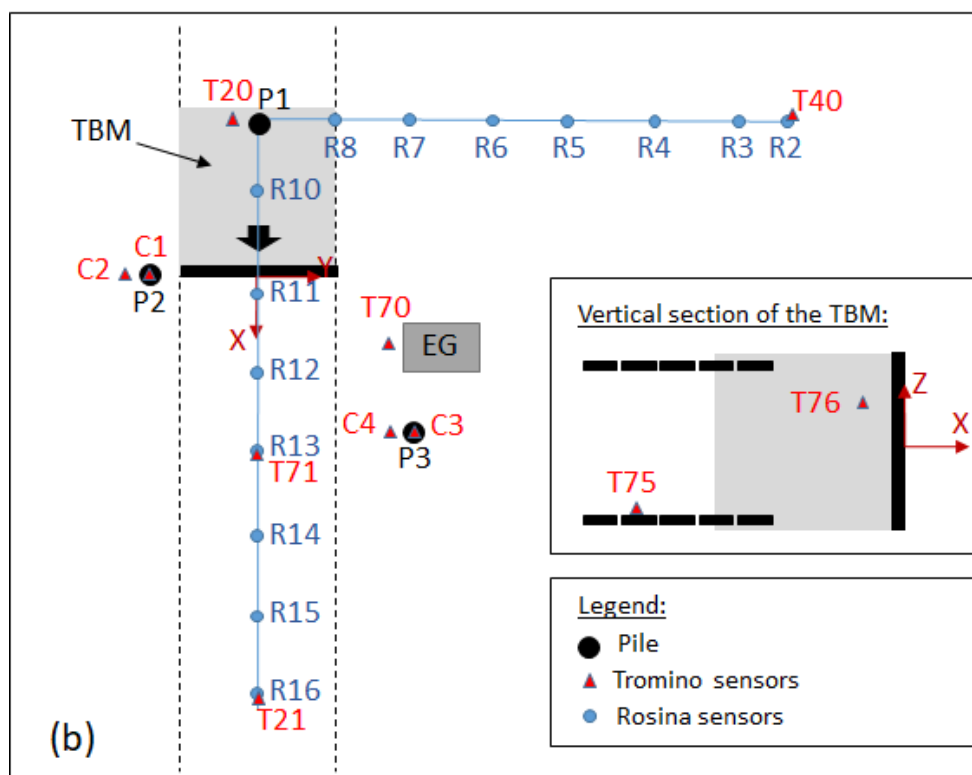
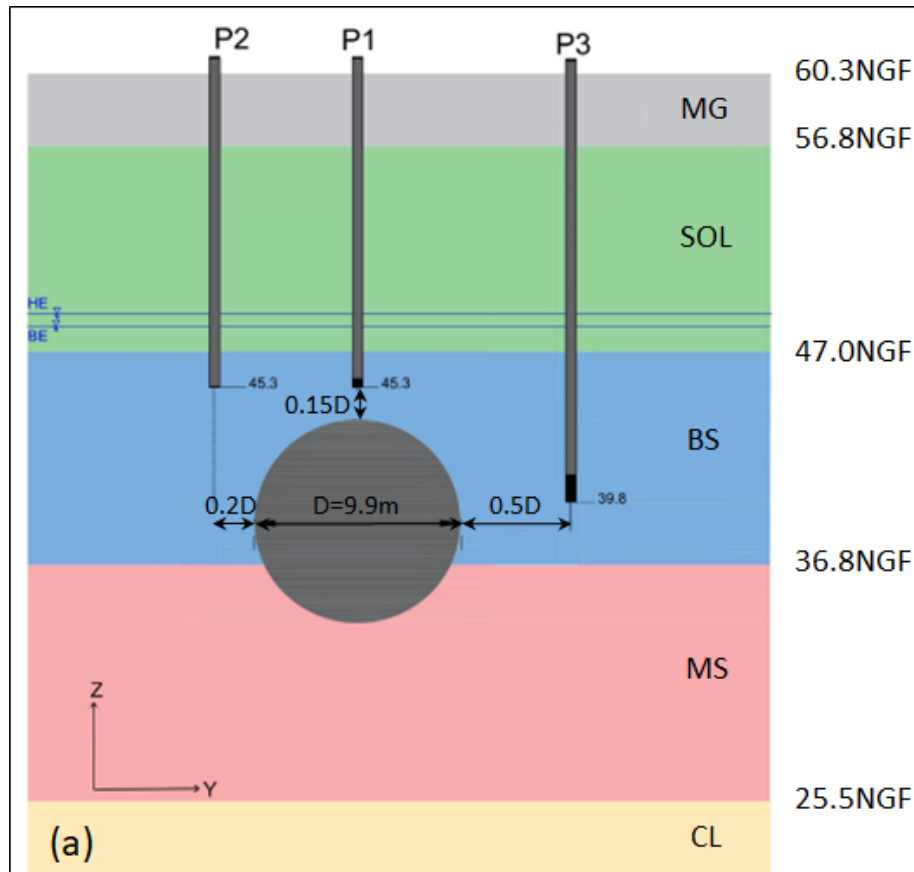
En cours de montage

Sens de creusement



1.1– Présentation des campagnes de mesures

« Grand Paris Express » ligne 16 – projet de recherche TULIP



Tunnelier à pression de terre ($\phi = 9.9$ m)

MG : Marnes et graviers argileux

SOL : calcaires marneux des calcaires de Saint-Ouen ($E_M \approx 60$ MPa)

BS : Sables argileux des sables de Beauchamp ($E_M \approx 90$ MPa)

MS : Calcaires marneux indurés et fragmentés des marnes et caillasses ($E_M \approx 260$ MPa)

CL : Calcaires grossiers

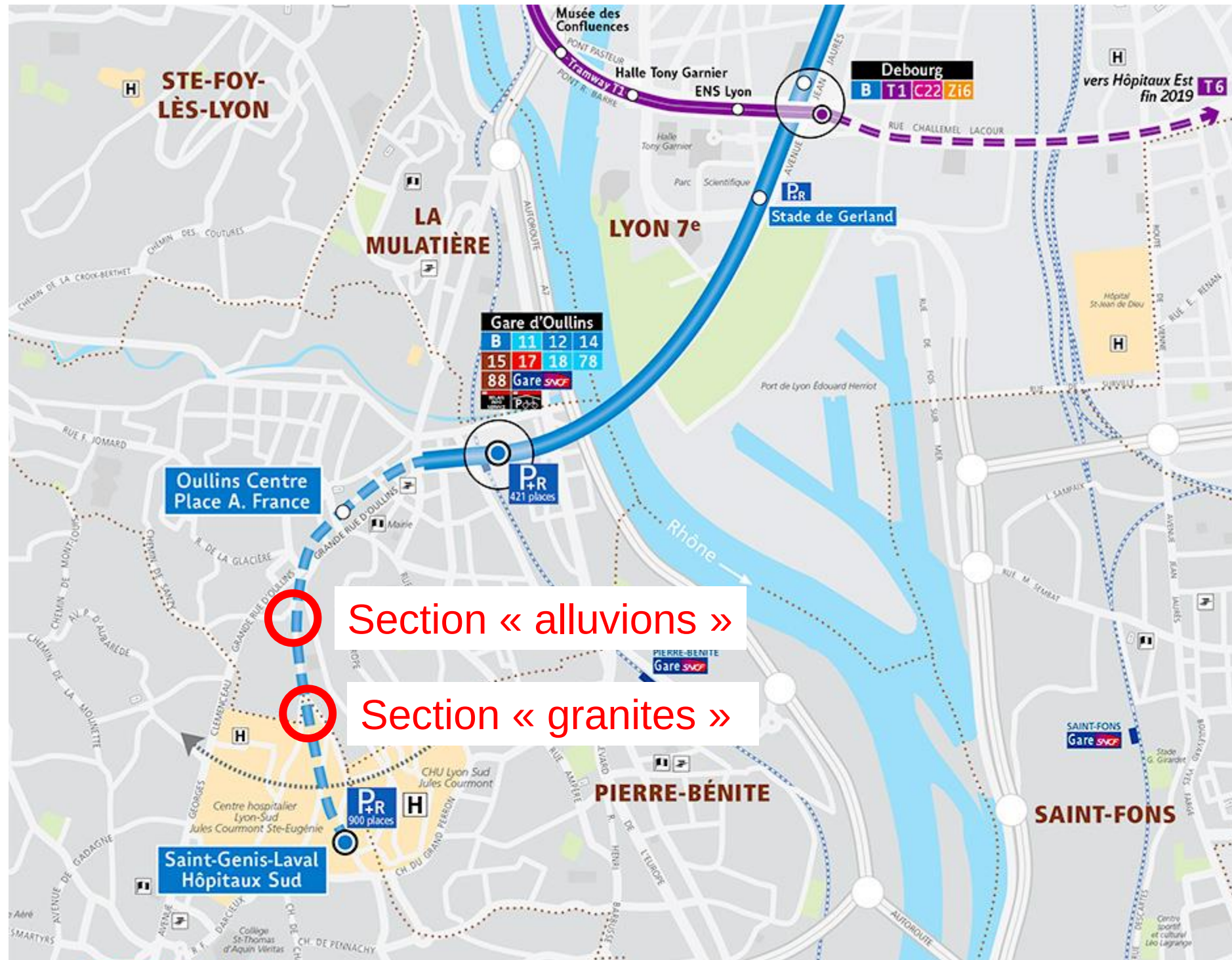


1.1– Présentation des campagnes de mesures



Extension du Metro B à Lyon :

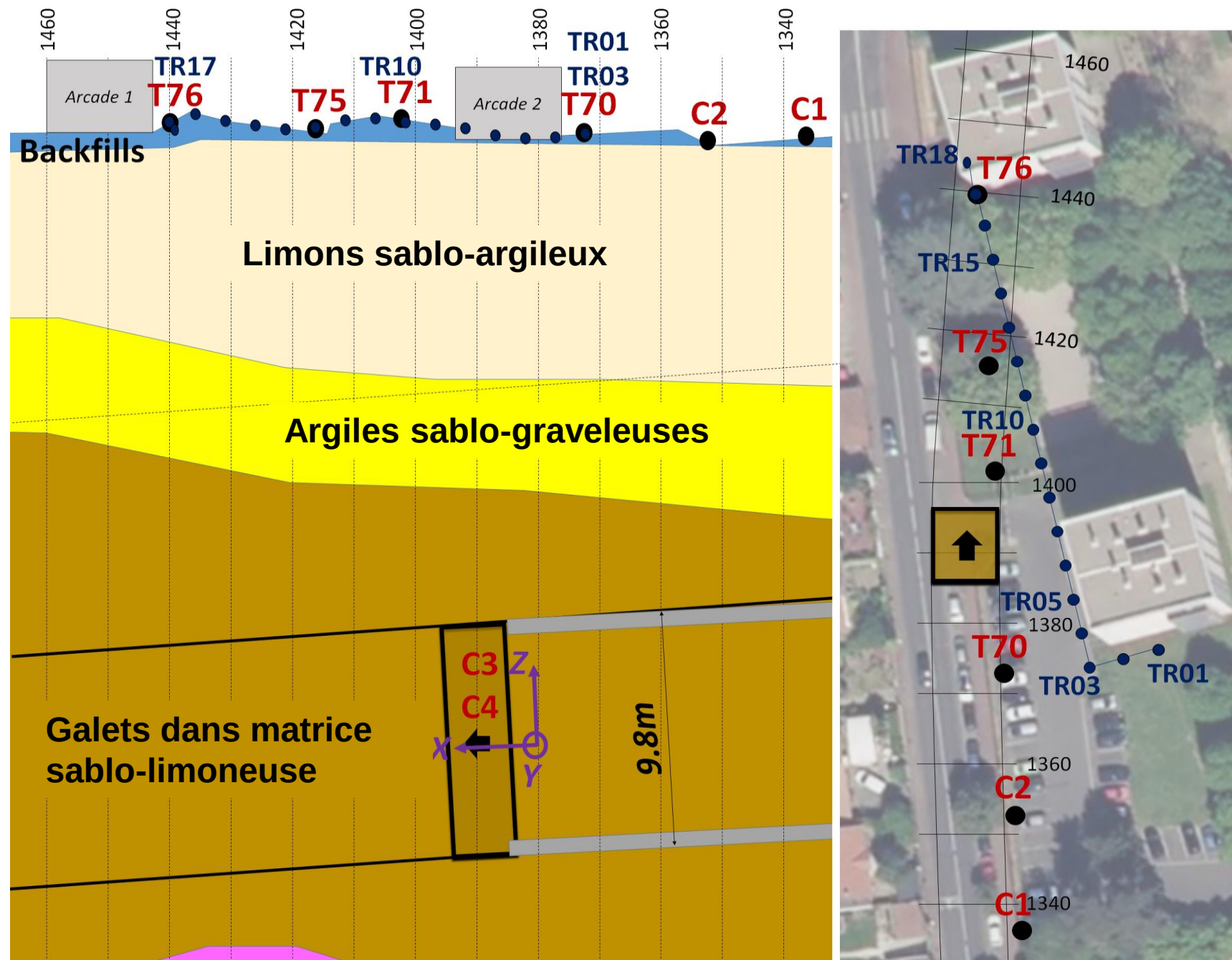
- 2.4 km de tunnel
- 2 nouvelles stations



Tunnelier à densité variable ($\phi=9.8\text{m}$) – chambre pleine de bentonite

1.1– Présentation des campagnes de mesures

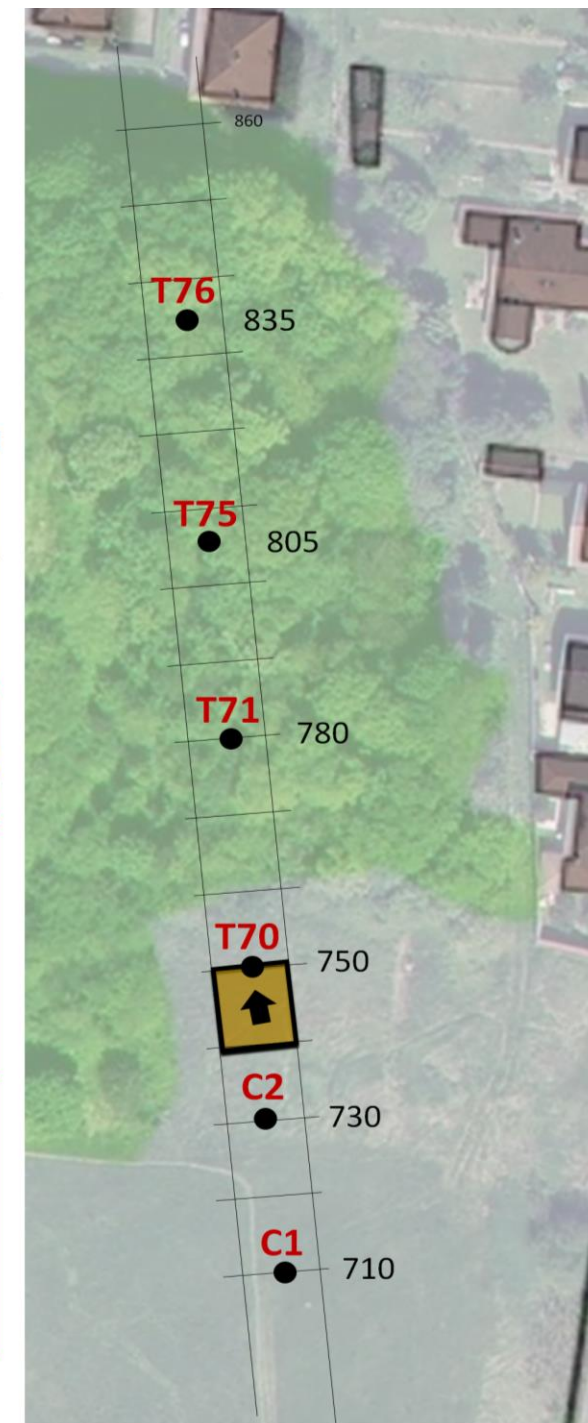
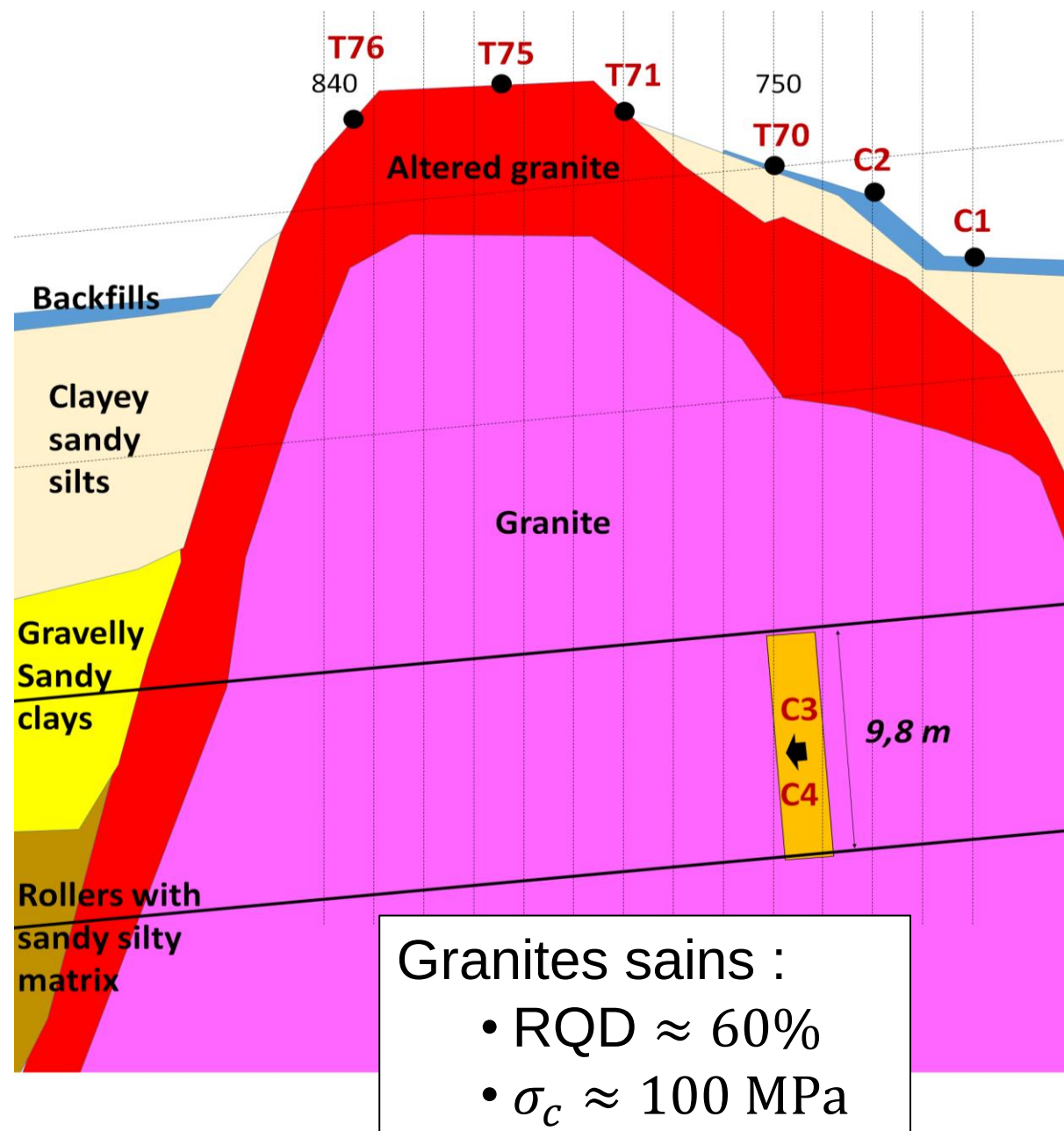
Lyon ligne B – section “alluvions”



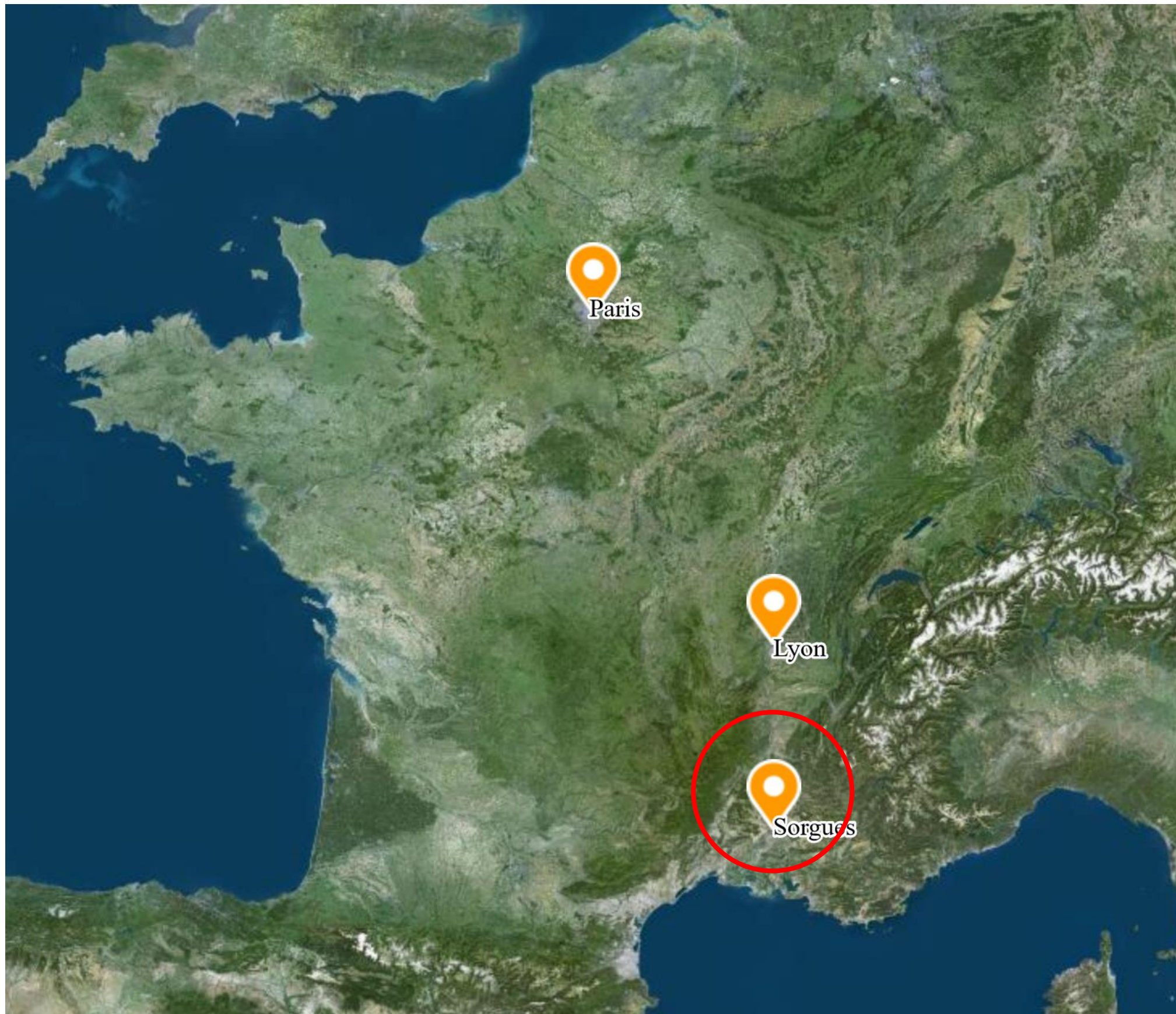
- Alluvions pré-glaciaires constituées de galets dans matrice sablo-limoneuse
- Toit nappe sous le tunnel

1.1– Présentation des campagnes de mesures

Lyon ligne B – section “granites”

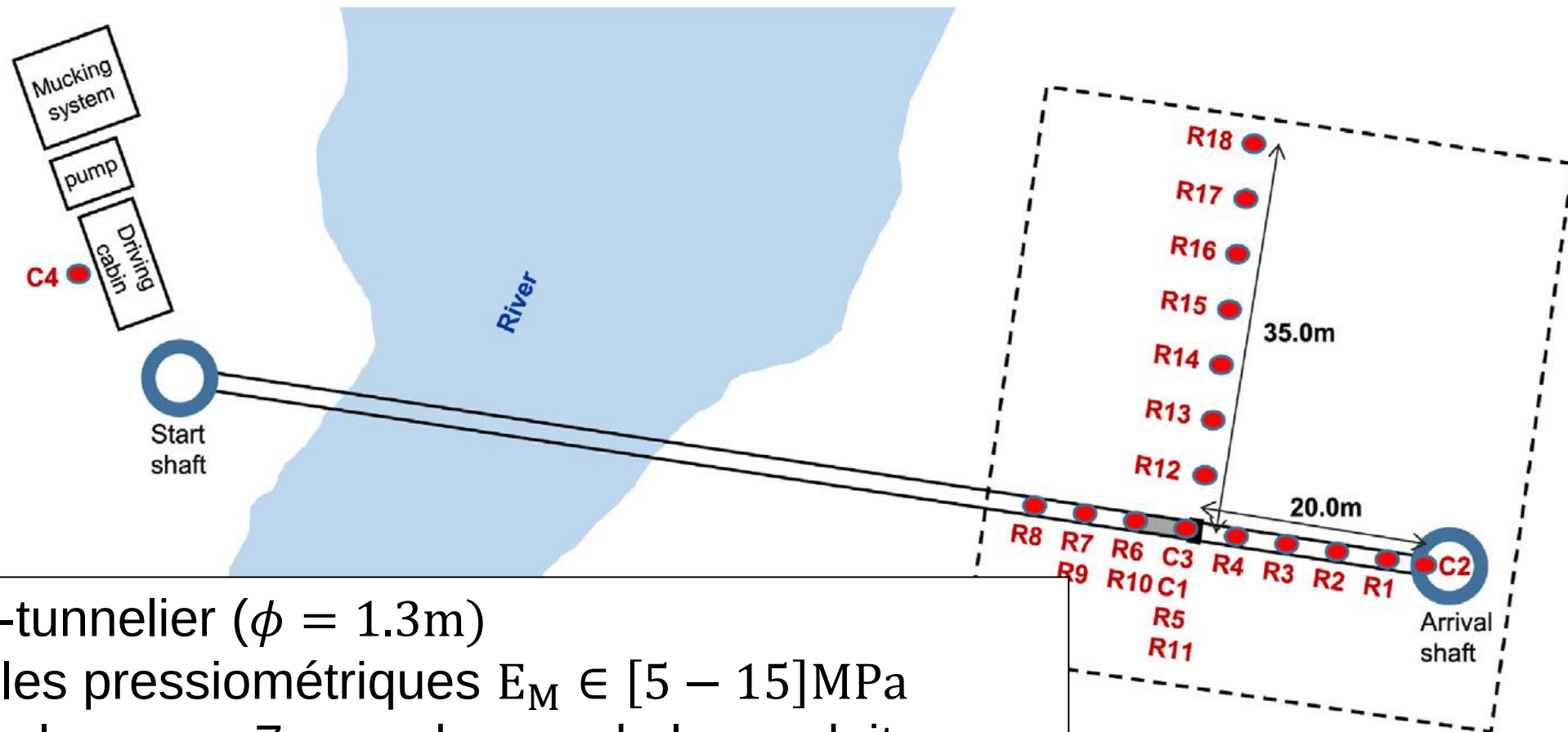


1.1– Présentation des campagnes de mesures

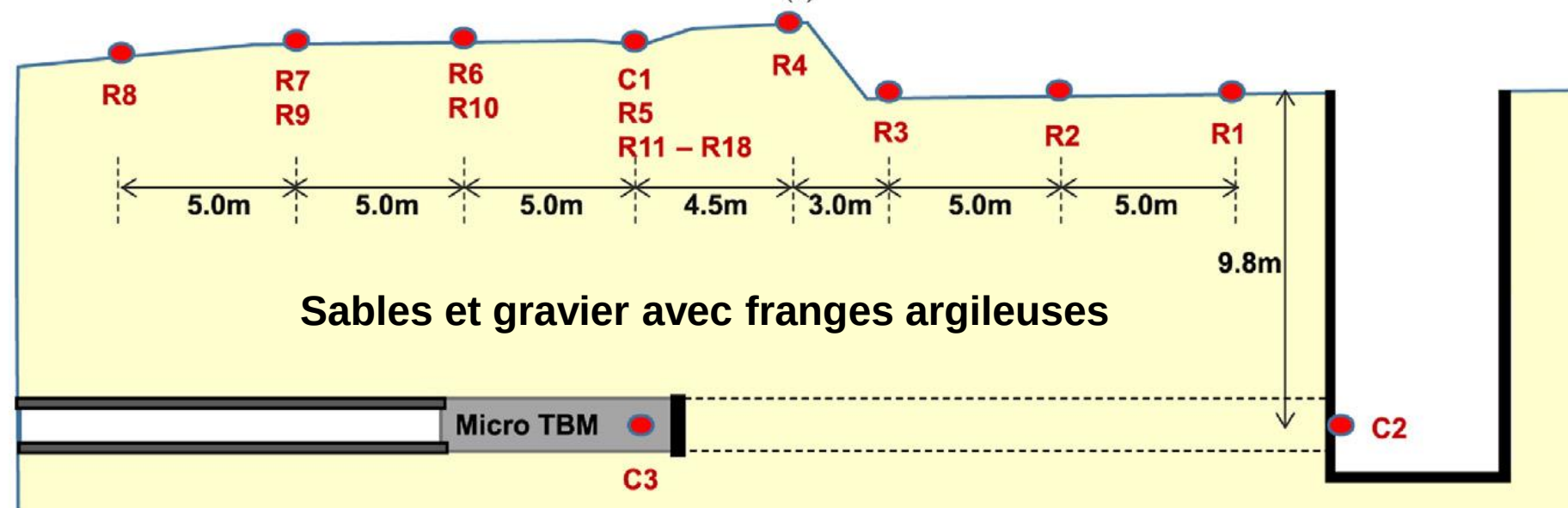


1.1– Présentation des campagnes de mesures

Sorgues microtunnelier



- Micro-tunnelier ($\phi = 1.3\text{m}$)
- Modules pressiométriques $E_M \in [5 - 15]\text{MPa}$
- Toit de la nappe 7m au-dessus de la conduite



1.2 – Analyse en domaine temporel

Prétraitement :

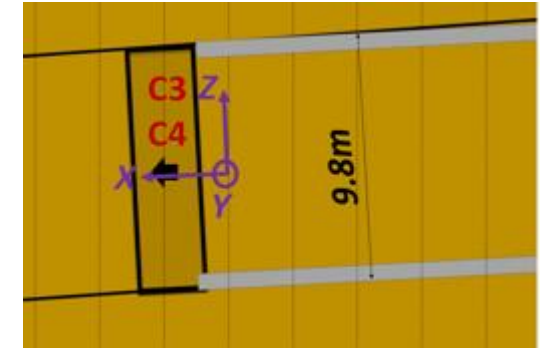
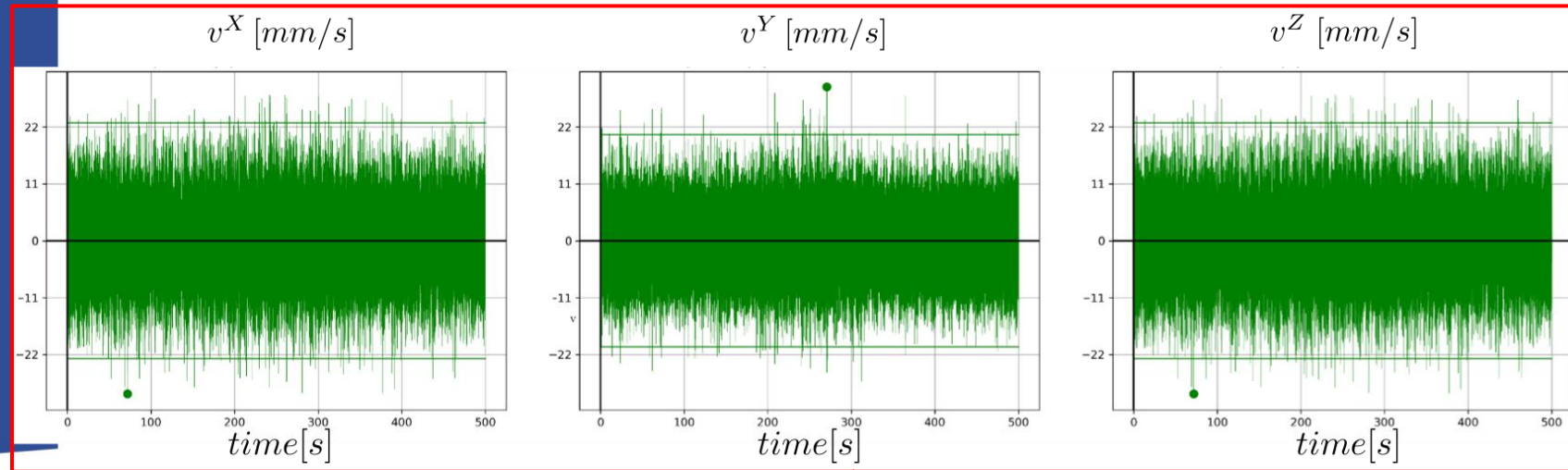
- Restriction des traces temps $\Rightarrow$ signaux quasi stationnaires
- Filtrage dans la gamme $[0.05; 160]$ Hz ($f_s = 512\text{Hz}$)
- Suppression de l'éventuel offset (signal nul en moyenne)

Principe de l'analyse temporelle:

Vitesse caractéristique v_k : qui a une probabilité de 0.5% d'être dépassée

1.2 – Analyse en domaine temporel

Mesures dans le tunnelier



Direction	Sorgues	Lyon - granite	Lyon - alluvium	TULIP
<i>Excavated ground</i>	<i>Gravels and sands</i>	<i>Granite</i>	<i>Gravels and sands</i>	<i>Clayey sands</i>
Sensor 1	C3	C3	C3	T76
v_{Sk}^X [mm/s]	3.32	22.45	1.91	0.20
v_{Sk}^Y [mm/s]	1.64	20.75	1.18	0.17
v_{Sk}^Z [mm/s]	0.89	22.82	1.68	0.15
Sensor 2		C4	C4	T75
v_{Sk}^X [mm/s]		20.66	1.38	0.11
v_{Sk}^Y [mm/s]		21.57	1.14	0.21
v_{Sk}^Z [mm/s]		25.25	1.62	0.01

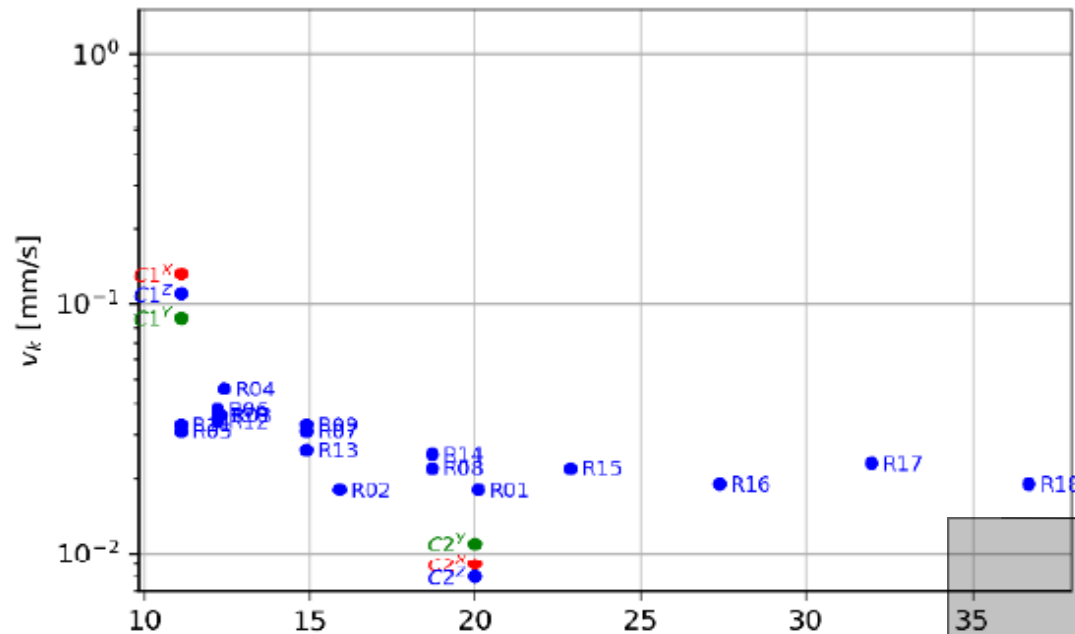
⇒ Influence claire du contexte géotechnique

⇒ Uniformité des vitesses dans les trois directions d'acquisition

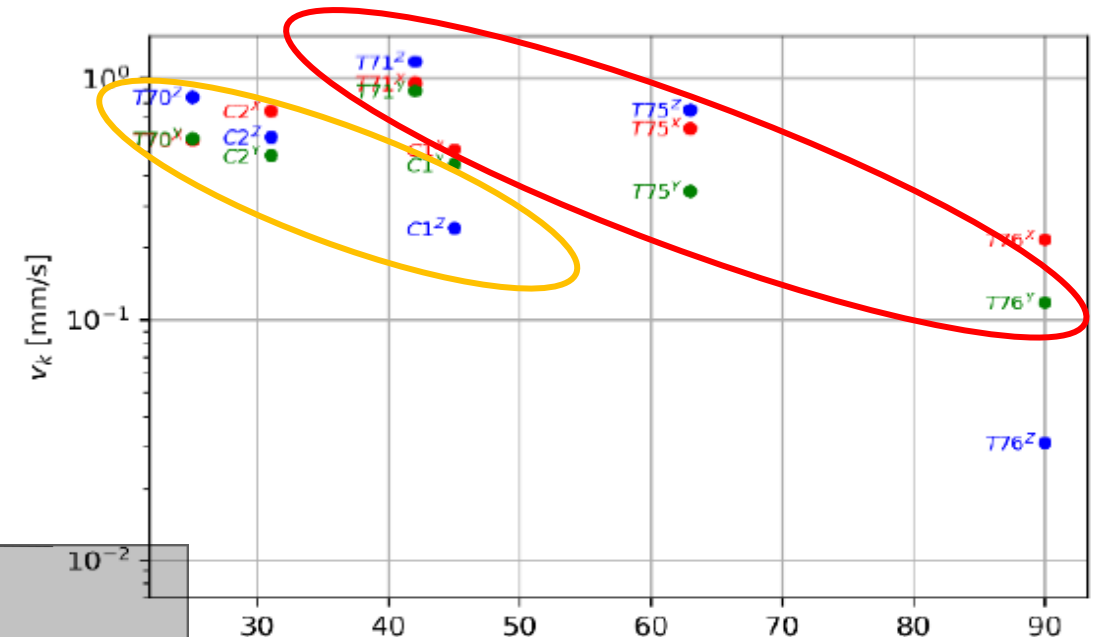
1.2 – Analyse en domaine temporel

Mesures en surface

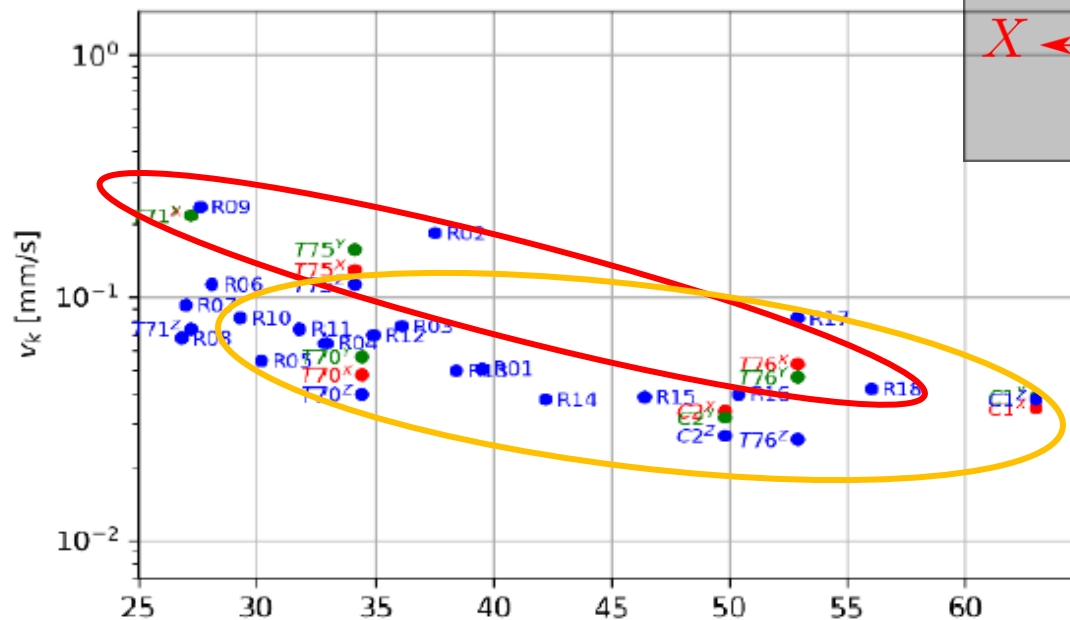
(a) Sorgues



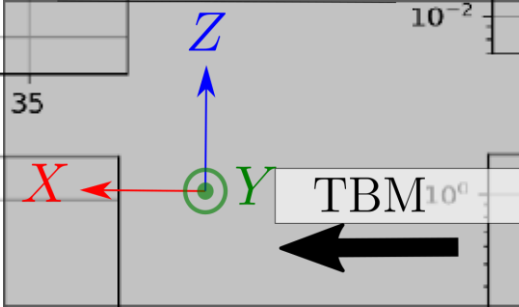
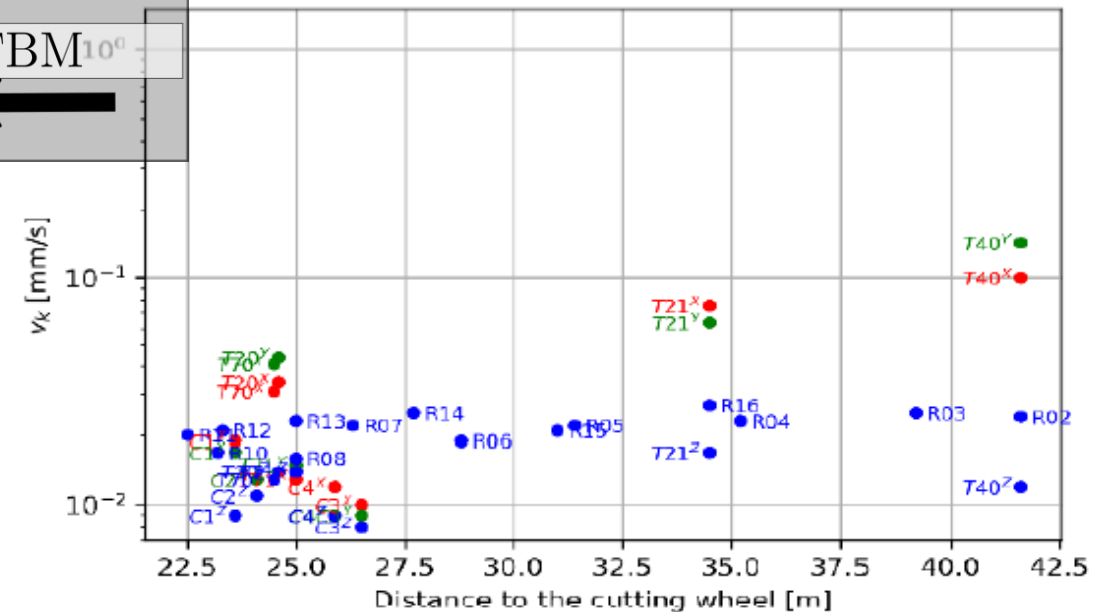
(b) Lyon – granite



(c) Lyon – alluvium

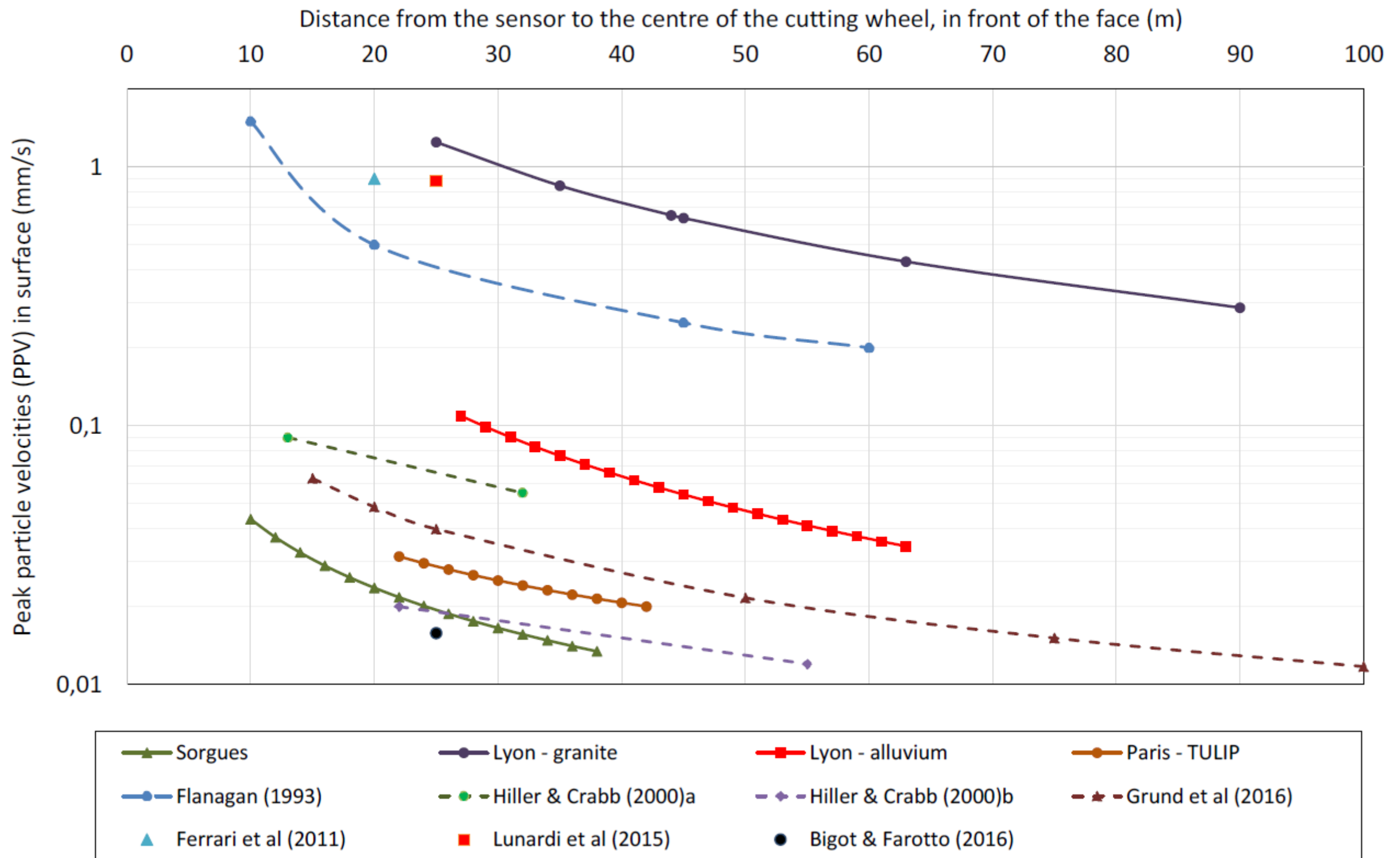


(d) TULIP



- Atténuation géométrique des vibrations avec la distance visible à Lyon
- Pas de symétrie par rapport à la roue de coupe

1.2 – Analyse en domaine temporel



1.3 – Analyse en domaine fréquentiel

Prétraitement (idem temporel):

- Restriction des traces temps $\Rightarrow$ signaux quasi stationnaires
- Filtrage dans la gamme $[0.05; 160]$ Hz ($f_s = 512\text{Hz}$)
- Suppression de l'éventuel offset (signal nul en moyenne)

A l'échelle d'un capteur:

Densité spectrale de puissance (PSD)

Pour une vitesse $t \mapsto x(t)$

Auto-corrélation: $R_{xx}(\tau) = E[x(t)x(t + \tau)]$

PSD: $S_{xx}(f) = \mathcal{F}(R_{xx})(f) = |\mathcal{X}(f)|^2$

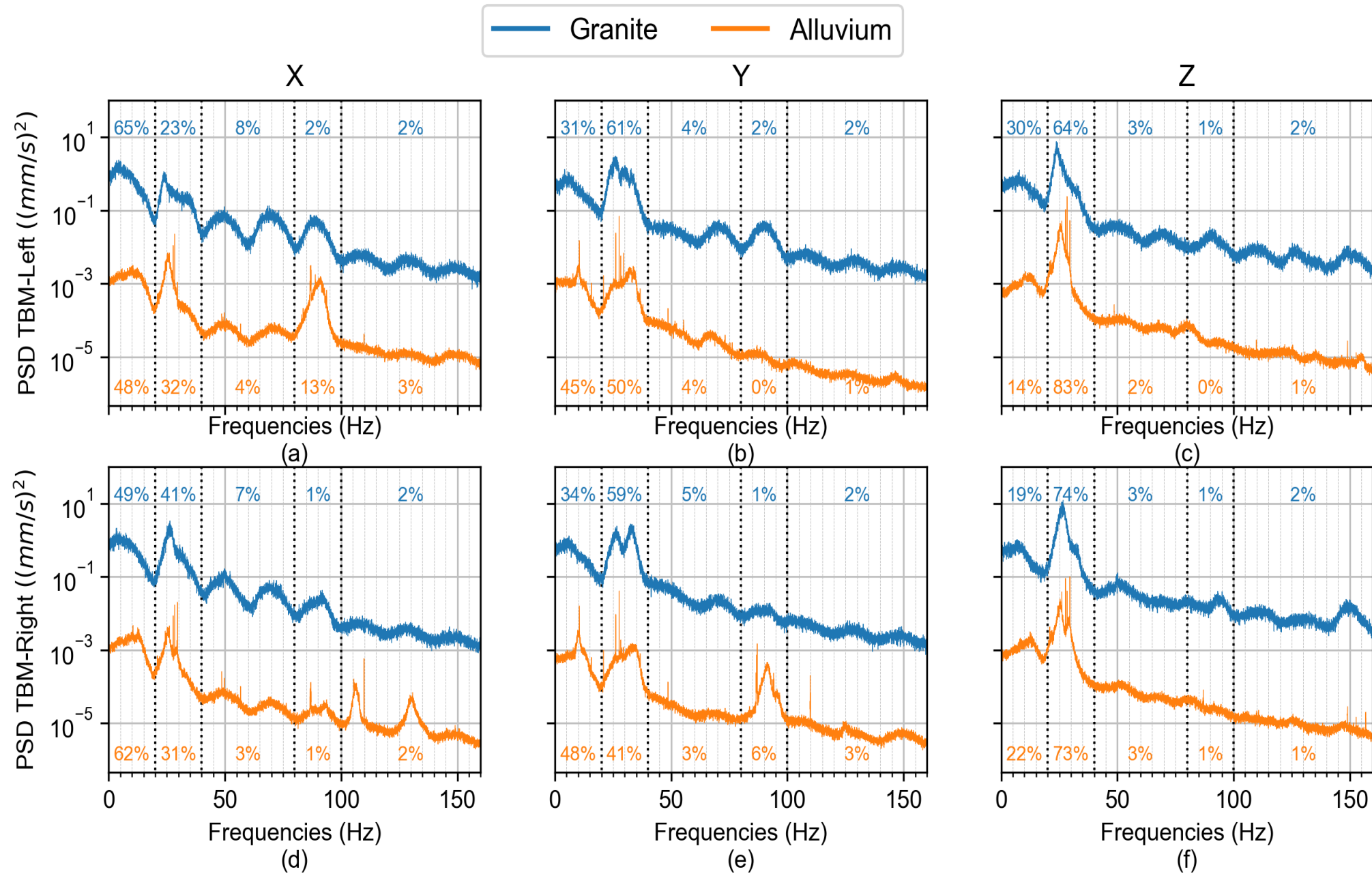
Signal stochastique $\Rightarrow$ PSD brute très bruitée

Méthode de Welch :

1. Fenêtrage (Fenêtre de Hann avec 50% de recouvrement)
2. PSD sur chaque segment
3. Moyennage des PSD

1.3 – Analyse en domaine fréquentiel

Deux sites de Lyon (même TBM)



PSD des capteurs dans le tunnelier dans les trois directions :
⇒ 80% de l'énergie des signaux dans [0,40]Hz

1.3 – Analyse en domaine fréquentiel

Nombreux capteurs = autant de PSD à comparer et à analyser

Représentation à l'échelle du site :

- Méthode basée sur la Frequency Domain Decomposition (FDD). [Brincker et al., 2000]
- Avec des vitesses synchronisées $t \mapsto \underline{\underline{x}}(t)$ (1 ou 3 directions, plusieurs capteurs)

1. Fenêtrage (fenêtre de Hann avec 50% de recouvrement)
2. Sur chaque segment K :

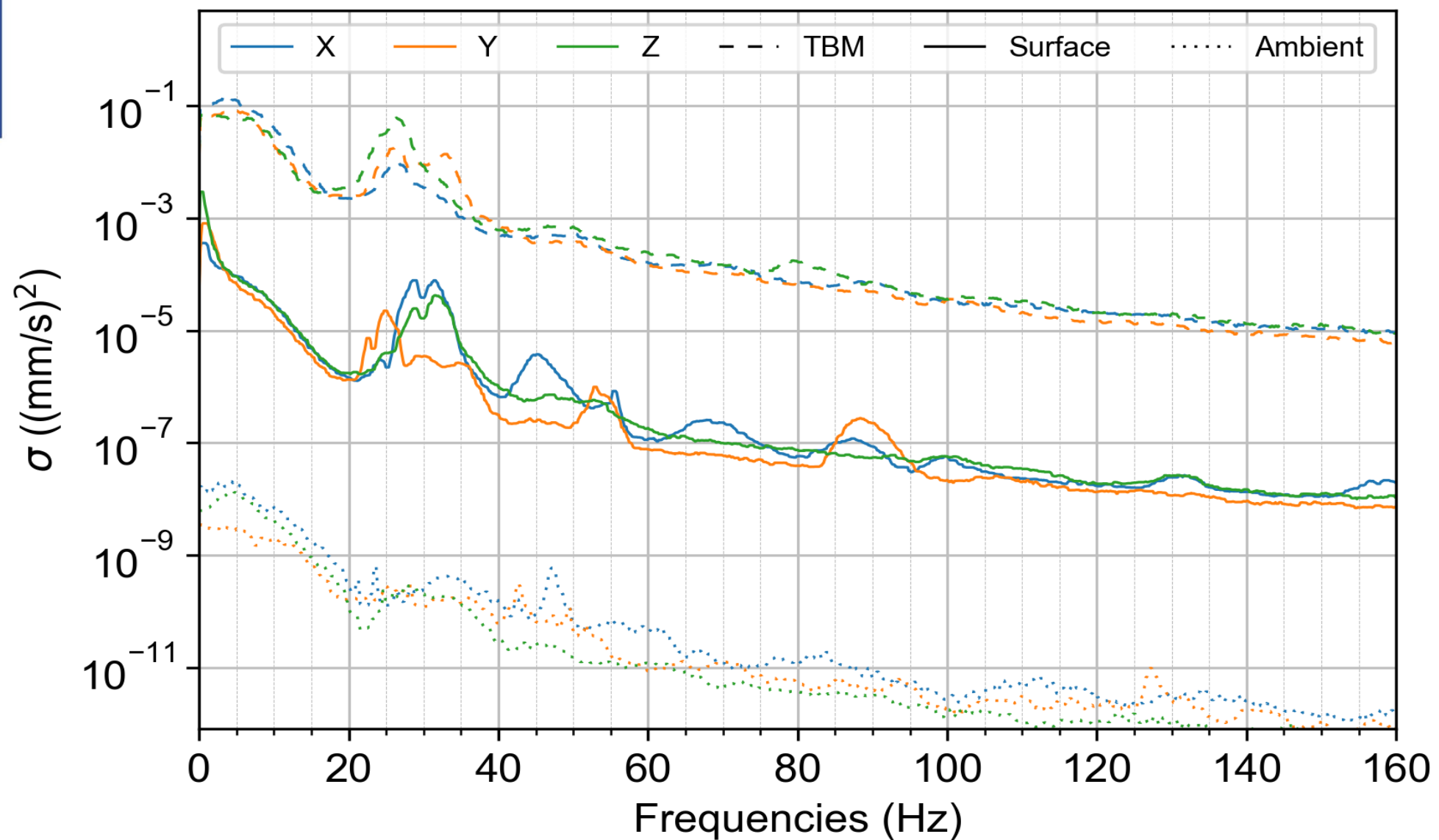
- Matrice de corrélation : $\underline{\underline{R}}_K(\tau) = \frac{1}{t_K} \int_0^{t_K} \underline{\underline{x}}_K(t) \cdot \underline{\underline{x}}_K^T(t + \tau) dt$
- Matrice de densité spectrale : $\underline{\underline{G}}_K(f) = \mathcal{F}(\underline{\underline{R}}_K)(f)$
- Moyennage : $\underline{\underline{G}}(f) = \frac{1}{n_K} \sum_{K=1}^{n_K} \underline{\underline{G}}_K(f)$

3. A chaque fréquence $f_j = j \times \Delta f$:

Décomposition en Valeurs Singulières (SVD) $\underline{\underline{G}}(f_j) = \underline{\underline{U}}_j \cdot \underline{\underline{S}}_j \cdot \underline{\underline{U}}_j^H$

Première SVD $\sigma_j = \left(\underline{\underline{S}}_j \right)_{11}$

« Lyon-granite » spectre de site dans les trois directions d'acquisition.



1.5 – Conclusion saison 1

⇒ Mesures vibratoires in-situ inédites, synchronisées dans le tunnelier et en surface

⇒ **Dans le tunnelier :**

- Intensité des vibrations depend fortement du contexte géotechnique
- 80% de l'énergie des signaux dans $[0,40]Hz$

⇒ **A la surface**

- Vitesses (au-dessus du tunnelier à 10 - 30m) sont 5 à 20 fois plus faibles que celles dans le tunnelier
- Vitesses mesurées en surface:
 - $v_k \in [0.01 - 0.1]mm/s$ dans terrains meubles
 - $v_k \in [0.1 - 1]mm/s$ dans terrains rocheux
- Spectres de site permettent une analyse macrosopique

Références :

A. Rallu, N. Berthoz, S. Charlemagne and D. Branque, (2023). **Vibrations induced by tunnel boring machine in urban areas : In situ measurements and methodology of analysis**, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineerin, Volume 15, Issue 1, [doi:10.1016/j.jrmge.2022.02.014](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2022.02.014)

Antoine Rallu, Nicolas Berthoz, (2022). **Vibrations induced by tunnel boring machines in urban areas: Dataset of synchronized in-situ measurements inside the shield and on the surface**, Data in Brief, Volume 41, [doi:10.1016/j.dib.2022.107826](https://doi.org/10.1016/j.dib.2022.107826)

A. Rallu and N. Berthoz (2023). **In-situ Measurements Frequency Analysis at a Site Scale. Application to Vibrations Induced by Tunnel Boring Machines**. In: Dimitrovová, Z., Biswas, P., Gonçalves, R., Silva, T. (eds) Recent Trends in Wave Mechanics and Vibrations. WMVC 2022. Mechanisms and Machine Science, vol 125. Springer, Cham. [doi:10.1007/978-3-031-15758-5_32](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15758-5_32)

- 1 – Mesures in-situ (saison 1)
- 2 – Mesures in-situ (saison 2)**
- 3 – Modélisation numérique

2.1 – ANR E-PILOT

(Etude de l'impact sur les Pleux LOrs du passage d'un Tunnelier)



<https://e-pilot.univ-gustave-eiffel.fr/>



2.2 – Campagne expérimentale L18 (Orly)

- **Thèse** : Yara Aslan (2022-2025)
- **Sujet** : Propagation des vibrations générées par l'excavation de tunnel : méthodes expérimentales, numériques et analytiques
- **Encadrement** : ENTPE/GDS



L'école de l'aménagement durable des territoires

ENTPE

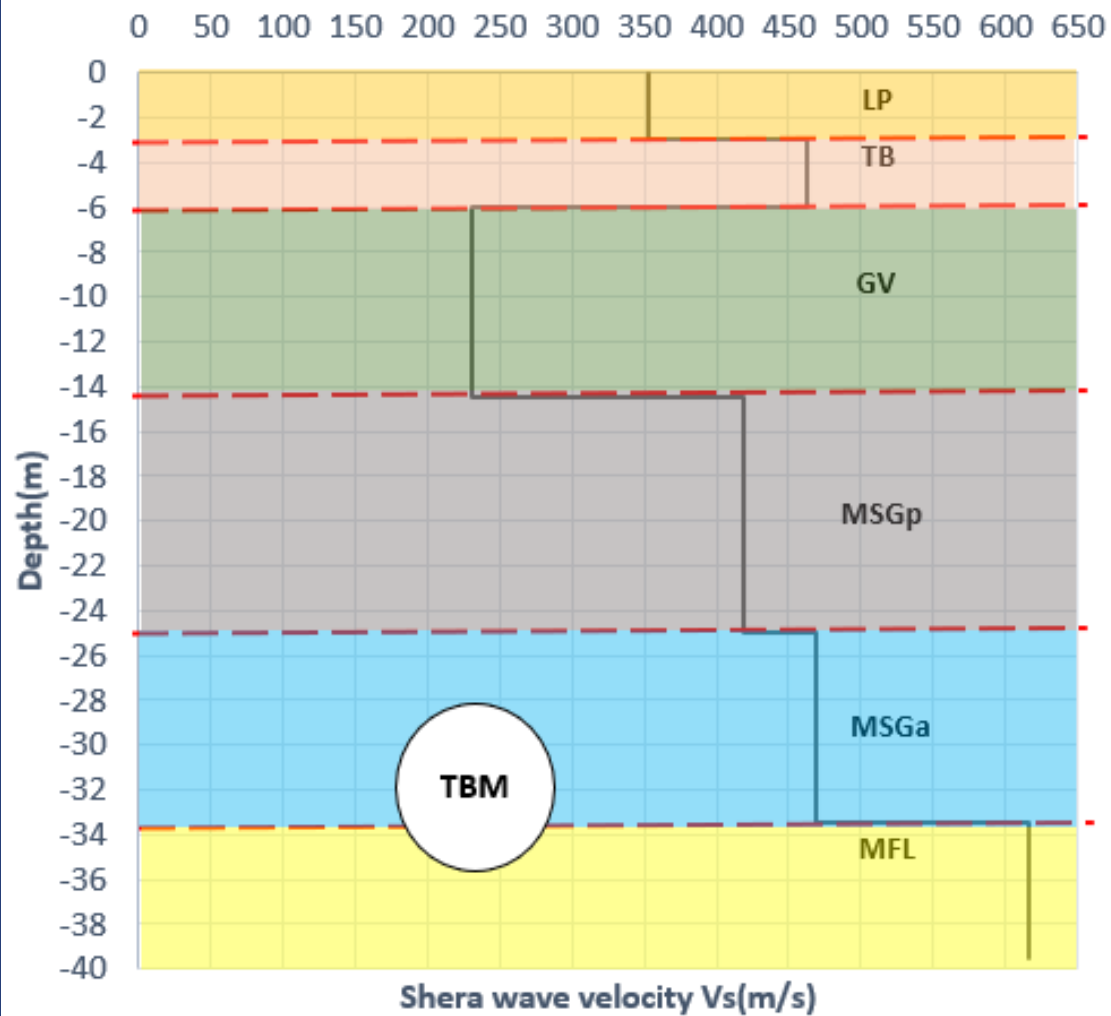


**GÉODYNAMIQUE
& STRUCTURE**



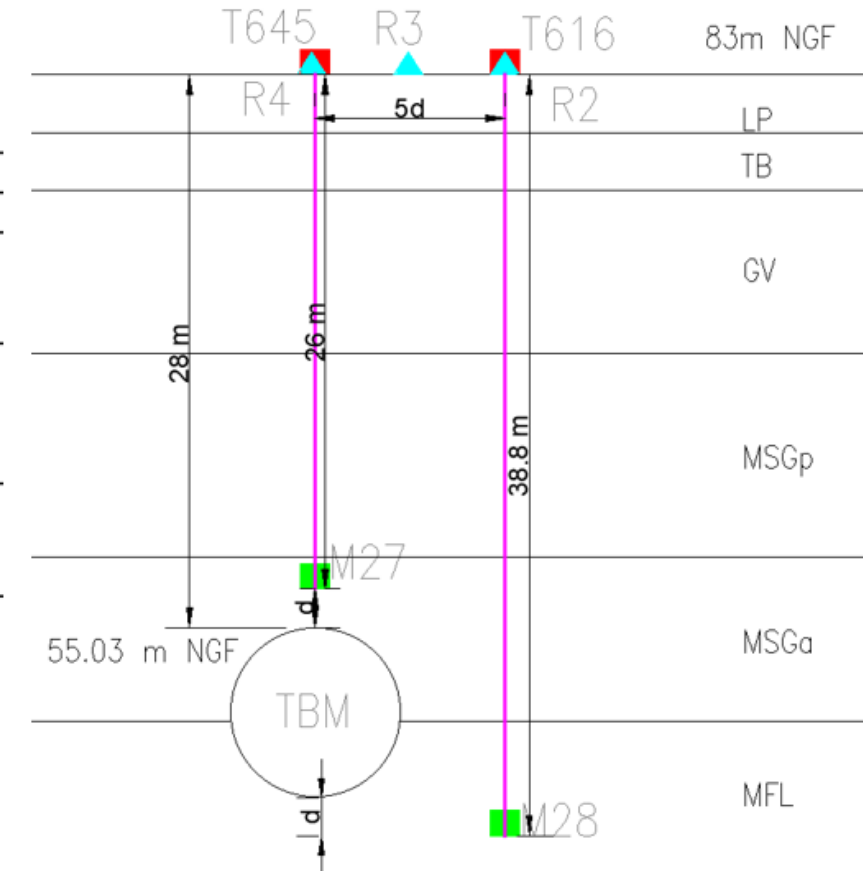
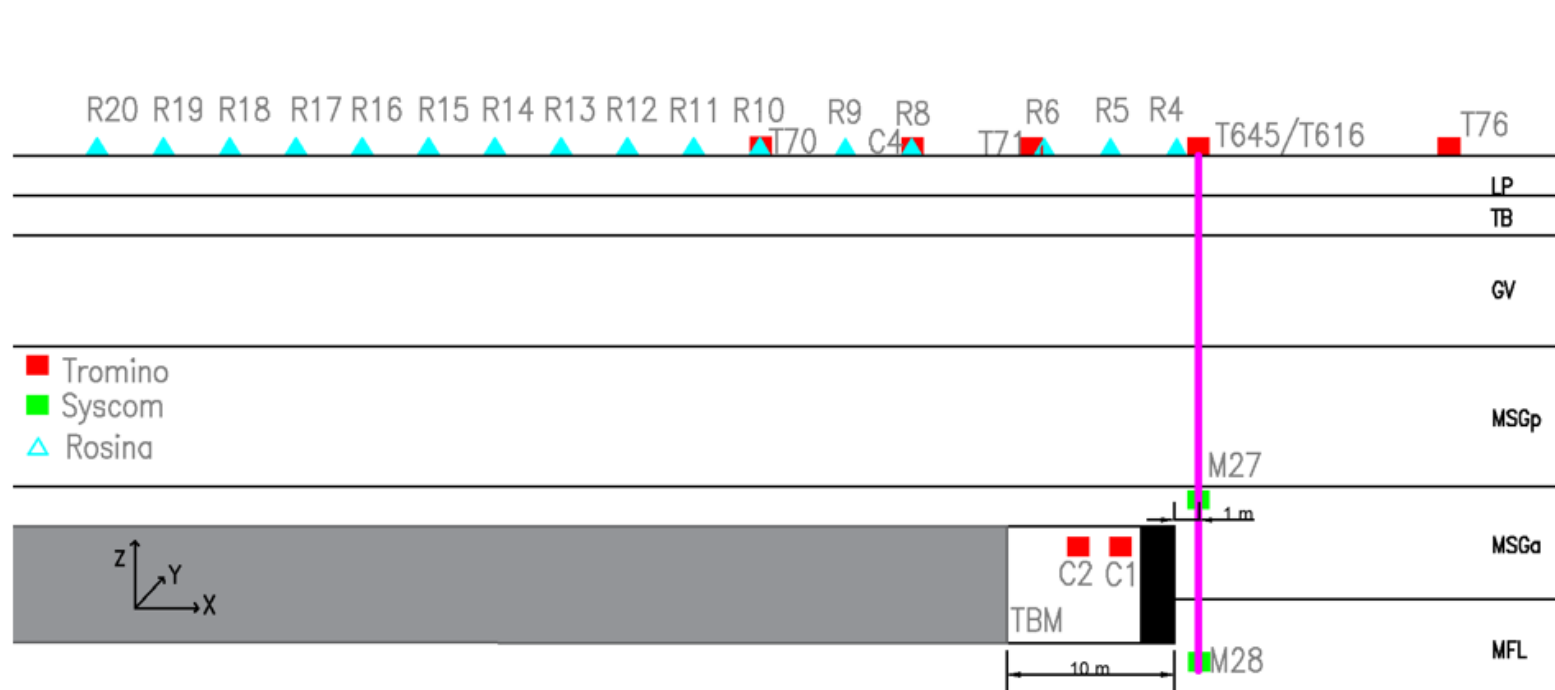
2.2 – Campagne expérimentale L18 (Orly)

Depth interval(m)	Geological Layer	Vs(m/s)
[0 – 3]	LP: plateau silt	353
[3 – 6]	TB: Brie and Sannois limestone	462
[6 – 14.42]	GV: Green clays	230
[14.42 – 25]	MSGp: Supragypsous marls of Pantin	418
[25 – 33.5]	MSGa: Supragypsum marls of Argenteuil	469
[33.5 – 39.5]	MFL: Masses and marls of gypsum	616

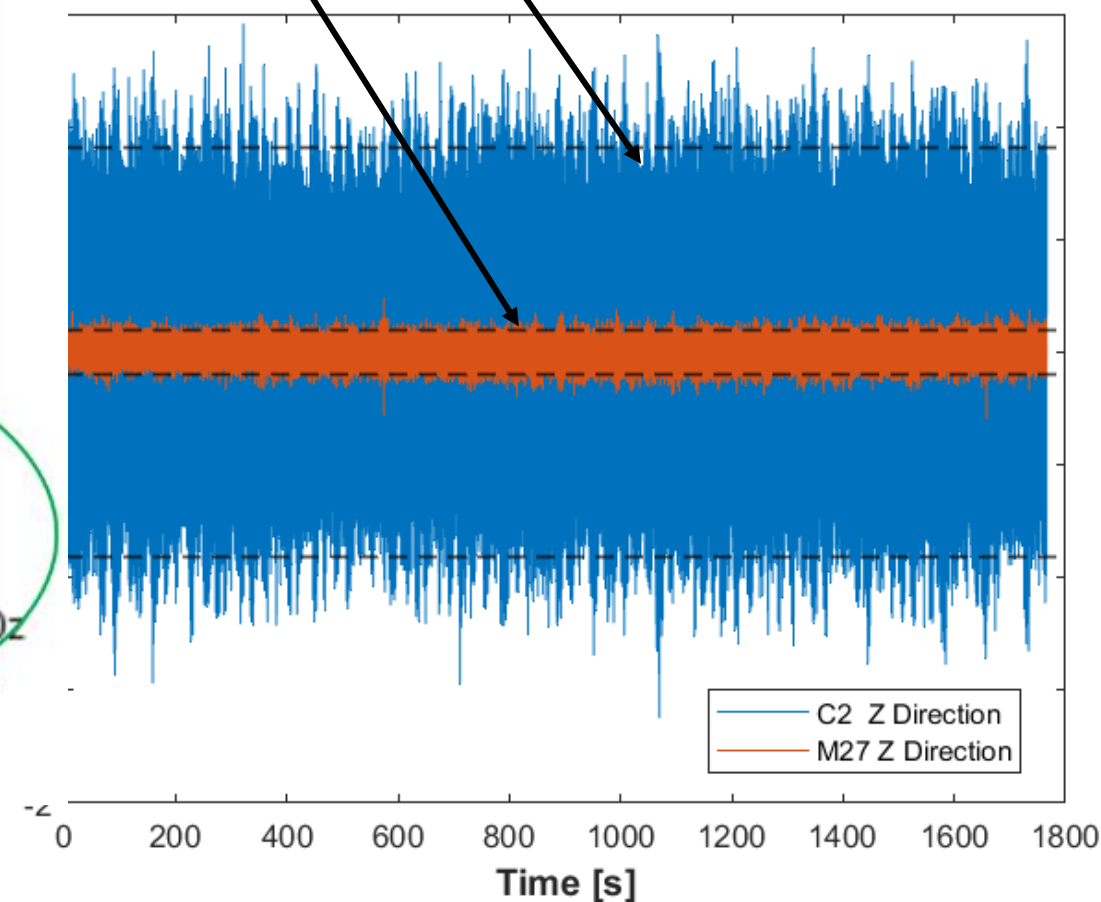
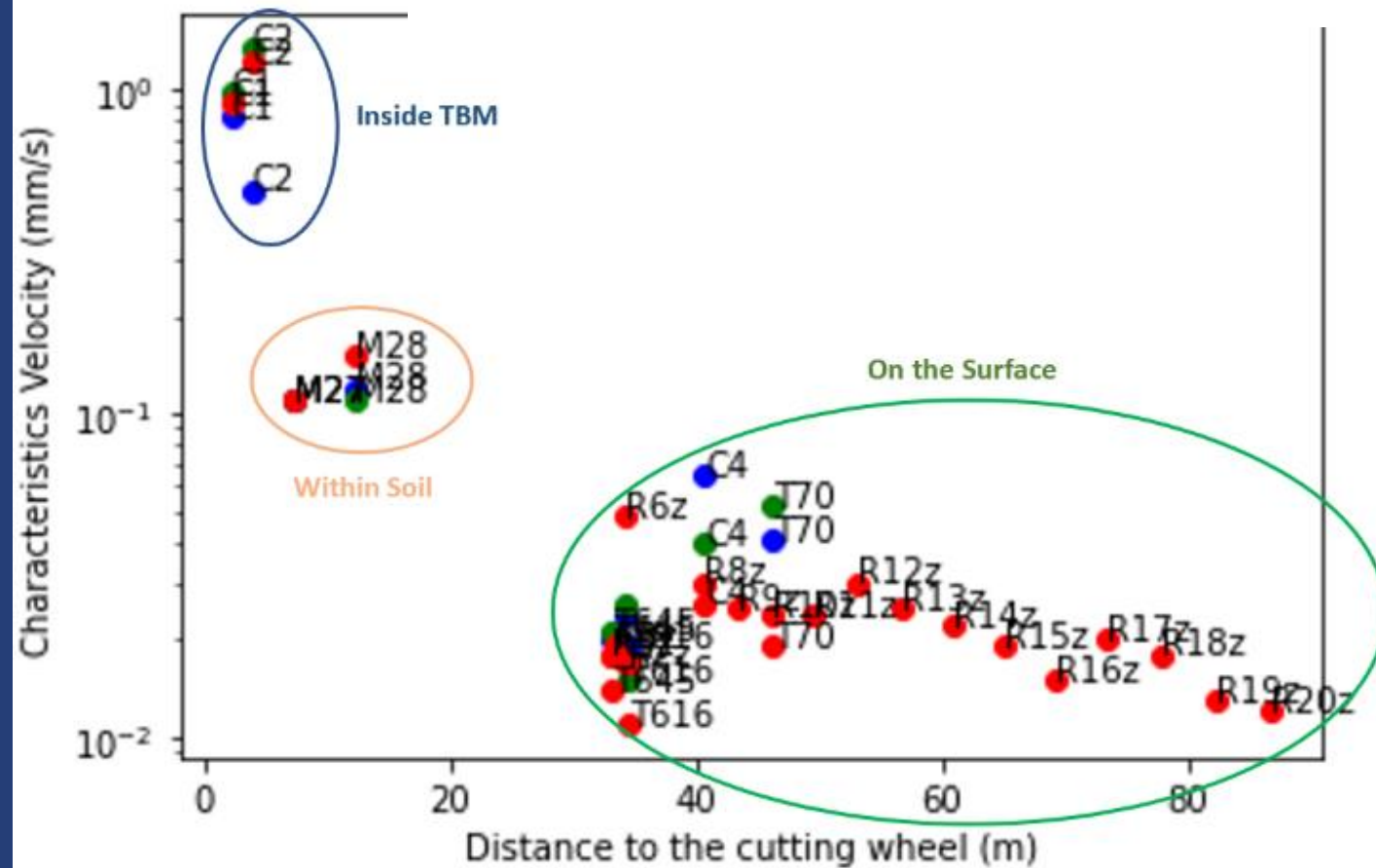
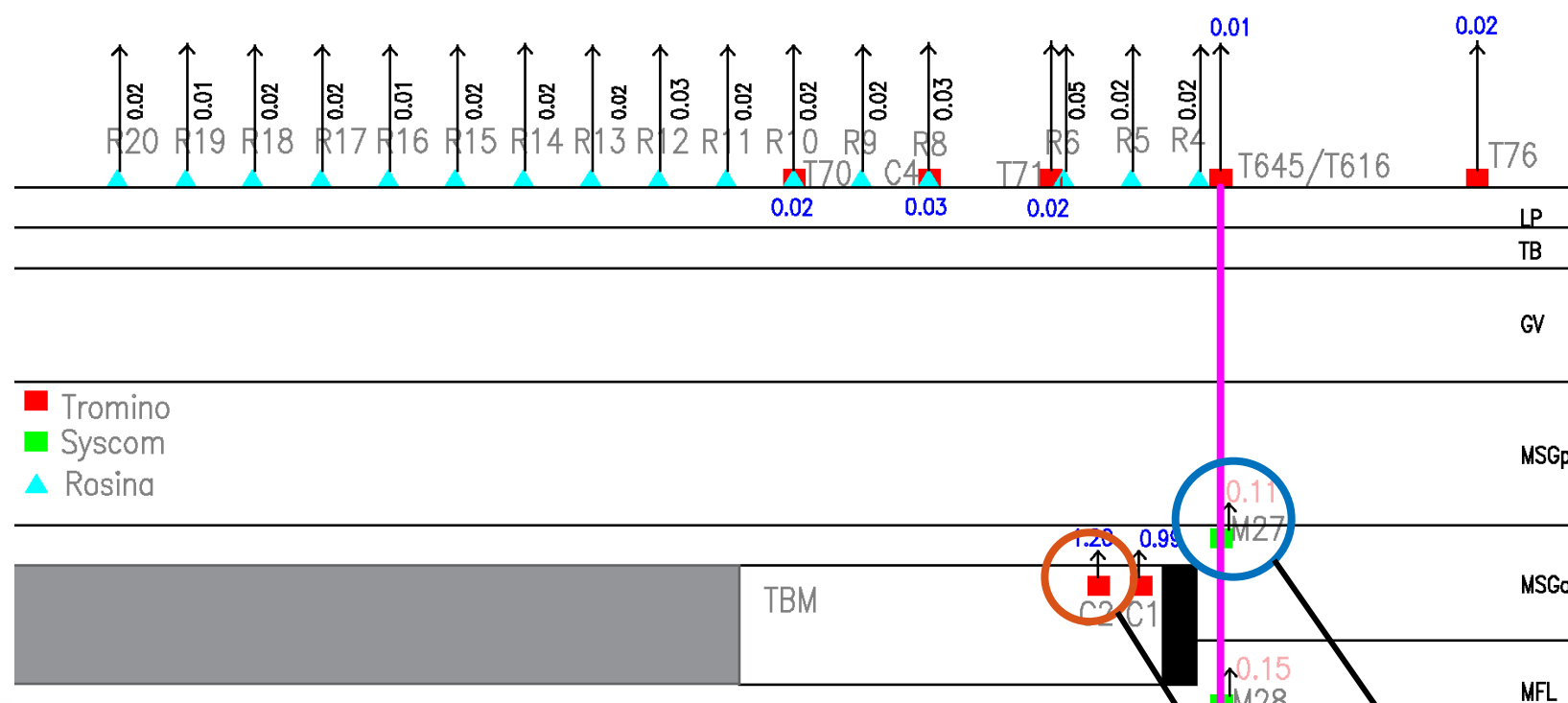


Tunnelier à pression de terre ($\phi = 9.15\text{m}$)

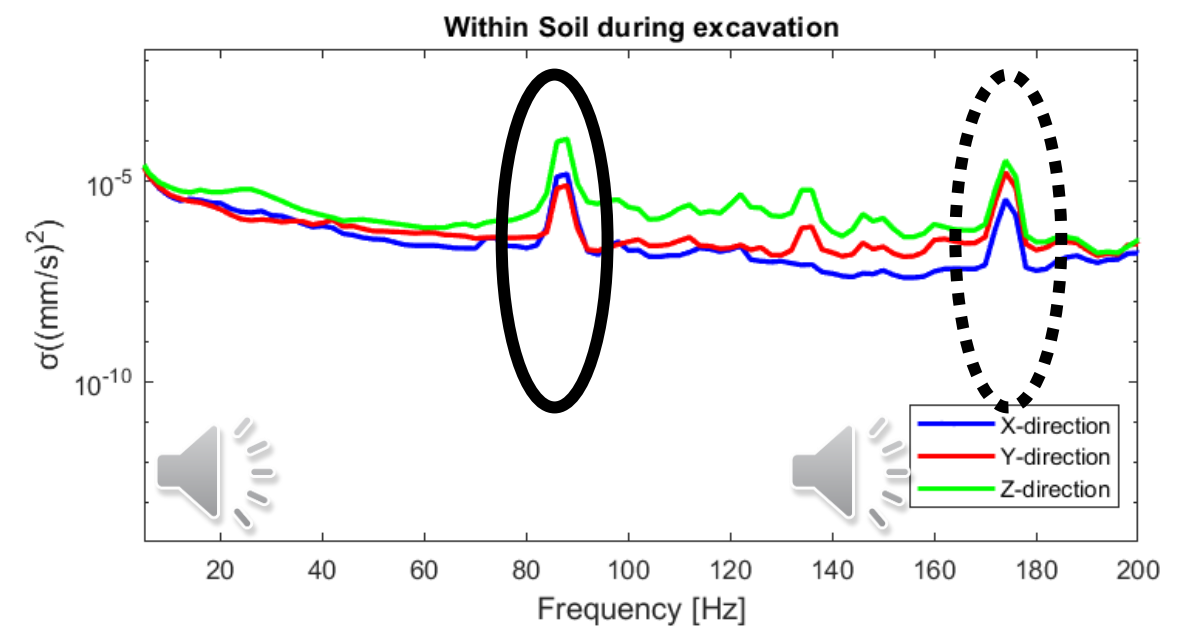
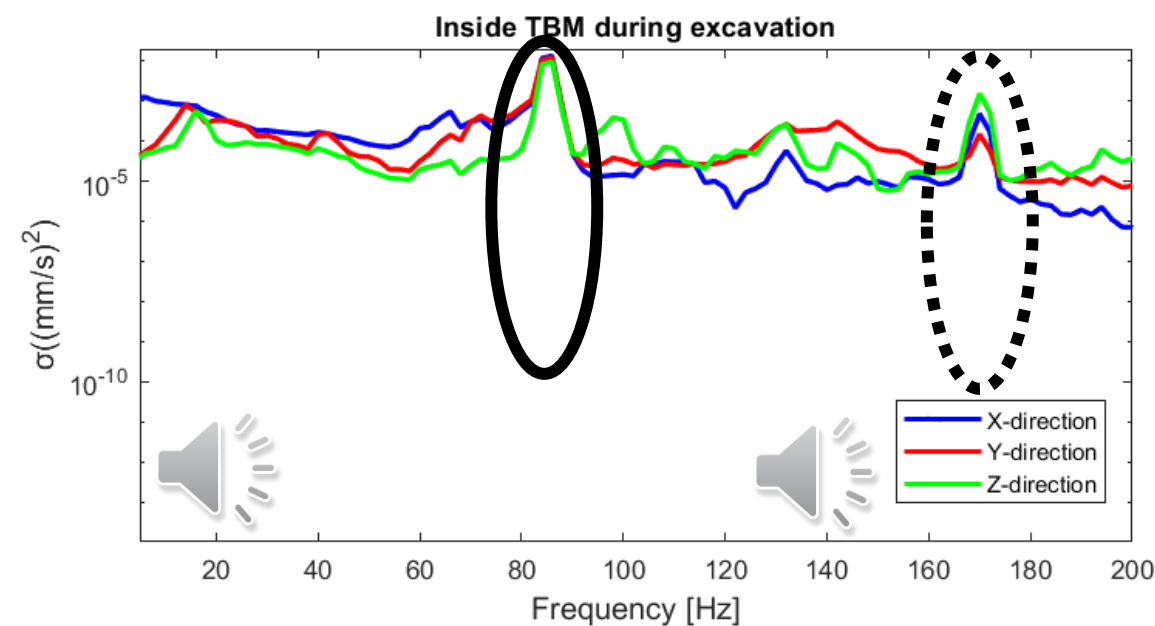
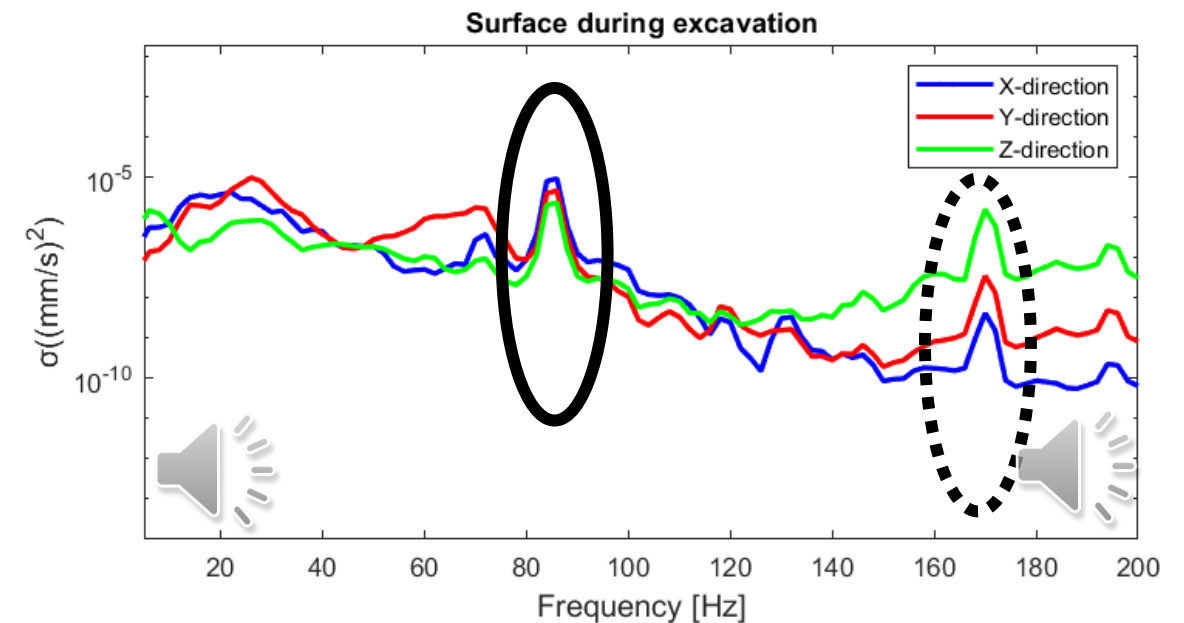
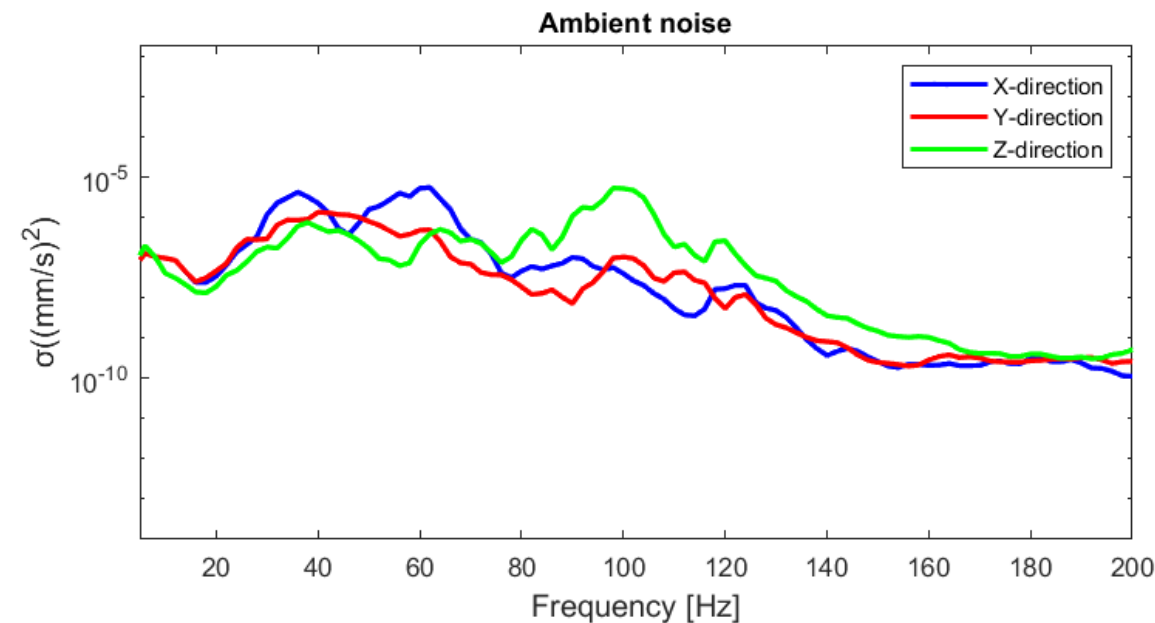
2.2 – Campagne expérimentale L18 (Orly)



2.3 – Analyse en domaine temporel



2.4 – Analyse en domaine fréquentiel



Question : quelle note entend-on en sous-sol ?

F2



Fa

F3



2.5 – Conclusion mesures saison 2

- ⇒ Site d'Orly (L18 du GPE),
 - forte couverture (28m)
 - terrains peu rigides ($V_s \in [230, 620] \text{ m/s}$)
- ⇒ Mesures vibratoires synchronisées dans le tunnelier, en surface et dans le sol au près de la source
- ⇒ $v_{TBM} \approx 10^0 \text{ mm/s} \gg v_{sol} \approx 10^{-1} \text{ mm/s} \gg v_{surface} \approx [0.1 - 0.7] \times 10^{-1} \text{ mm/s}$
- ⇒ Spectres de site mettent en évidence les gammes de fréquences caractéristiques de l'excavation

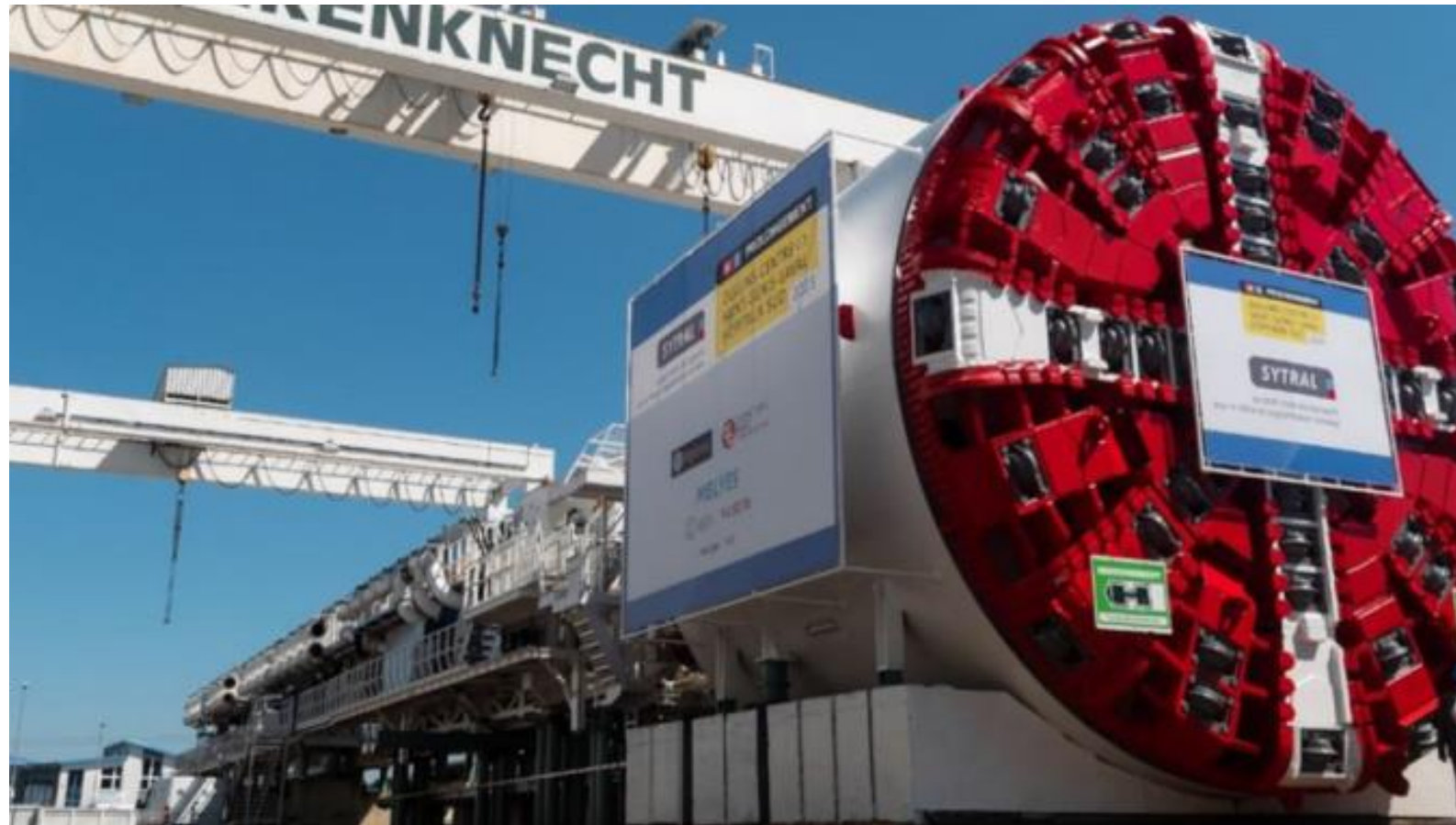
Référence :

Y. Aslan, A. Rallu, D. Branque, N. Berthoz, C. Chatzigogos and T. Makrypidi, (In submission). **Monitoring and analyzing vibrations from tunnel boring machine in urban areas**. Proceedings of the XVIII ECSMGE 2024

- 1 – Mesures in-situ (saison 1)
- 2 – Mesures in-situ (saison 2)
- 3 – Modélisation numérique**

3.1 – Site Lyon- granite

Le tunnelier à densité variable: “Coline” (Herrenknecht)



Paramètres	Tunnelier
Chambre	Pleine de bentonite
Diamètre d'excavation	9.8 m
Pression bentonitique appliquée au front de taille (P_{chambre})	180 kPa
Force de contact roue de coupe/terrain (F_{contact})	15 MN
Aire de la roue de coupe ($A_{\text{cutting wheel}}$)	75 m ²
Pas de pénétration	7mm/tour

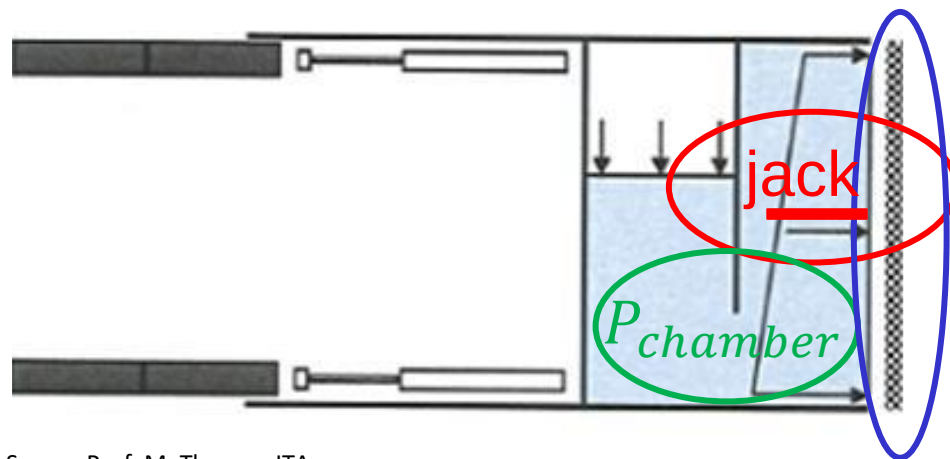
3.2 – Caractérisation de la source

Modélisation pression dynamique :

⇒ Les vibrations mesurées dans le TBM ne correspondent pas qu'à l'excavation

⇒ En revanche le contenu fréquentiel mesuré est cohérent avec les mesures en surface

Pression statique mesurée au front :



Source Prof. M. Thewes, ITA

$$F_{face} = F_{contact} + F_{ground\ pressure}$$

$$F_{ground\ pressure} = P_{chamber} \times A_{cutting\ wheel}$$

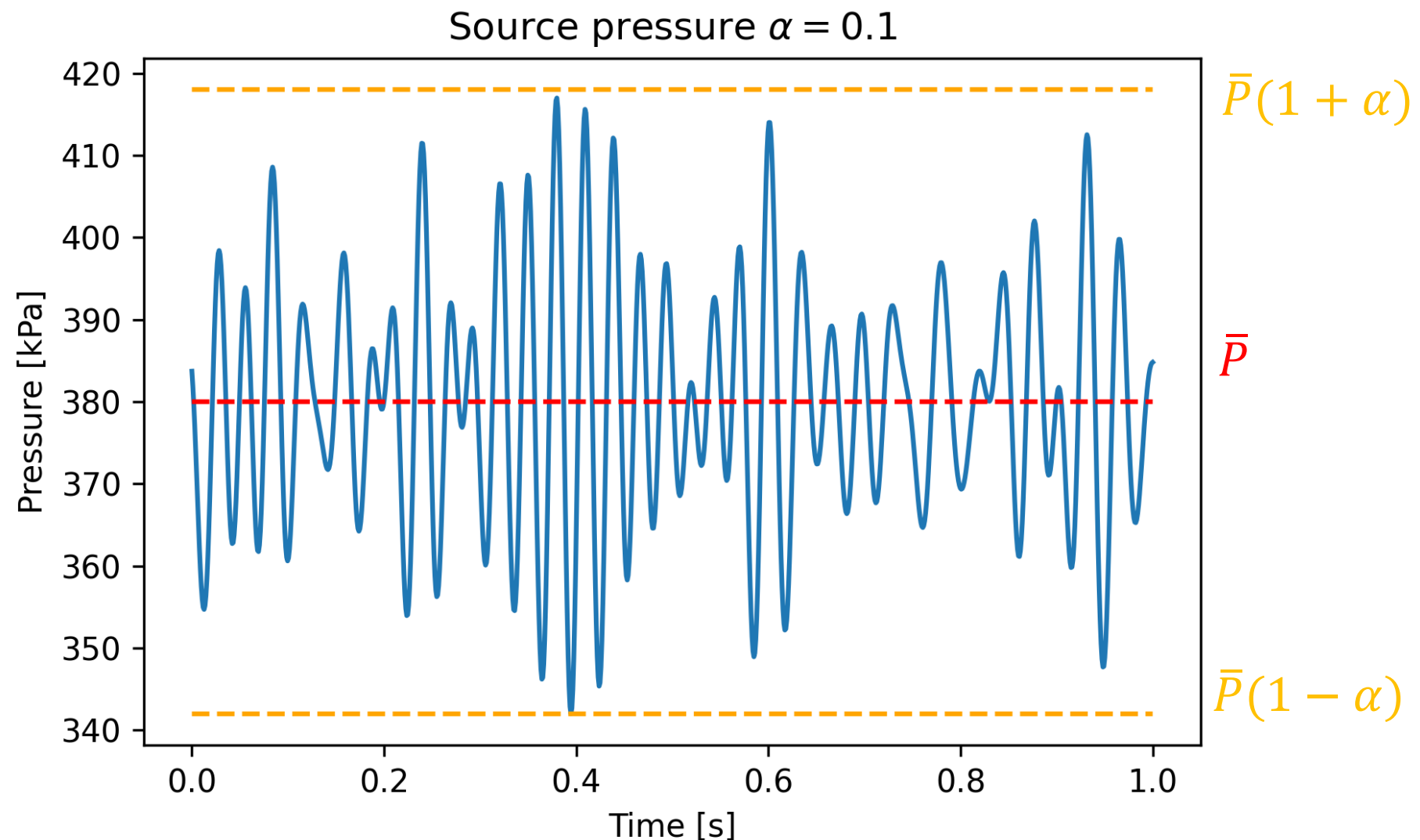
$$\Rightarrow \bar{p} = \frac{F_{face}}{A_{cutting\ wheel}} = 380\ kPa$$

3.2 – Caractérisation de la source

Modélisation pression dynamique :

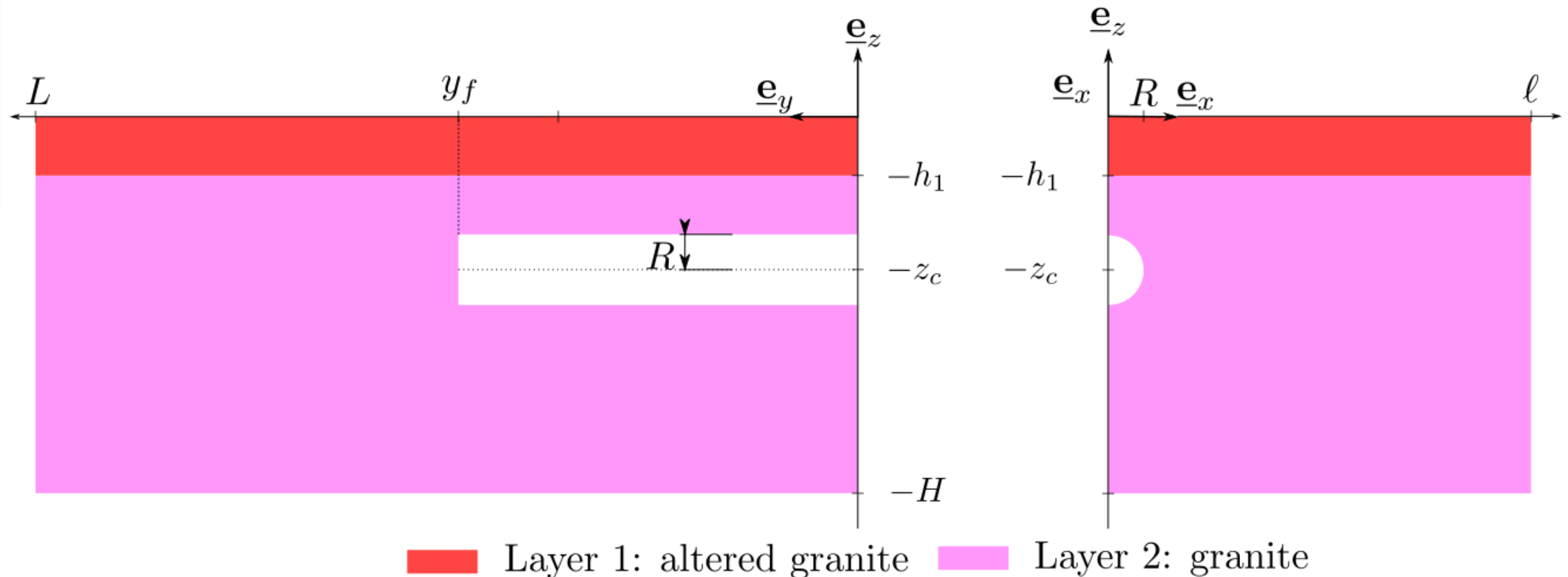
$$P(t) = \bar{P} \left(1 + \alpha \frac{v_L(t)}{\|v_L\|_{\infty}} \right)$$

v_L : Vitesse mesurée dans la direction longitudinale dans le TBM et filtrée à $[0,40]Hz$



3.3 – Formulation du problème en champ libre

Géométrie : Domaine Ω



Matériaux :

Granite : comportement élastique linéaire isotrope

material	j	$\rho [kg/m^3]$	$E [GPa]$	$\nu [-]$	$K_0 [-]$
Layer 1: Altered granite	1	2400	7.5	0.25	0.6
Layer 2: Granite	2	2700	60	0.25	0.4

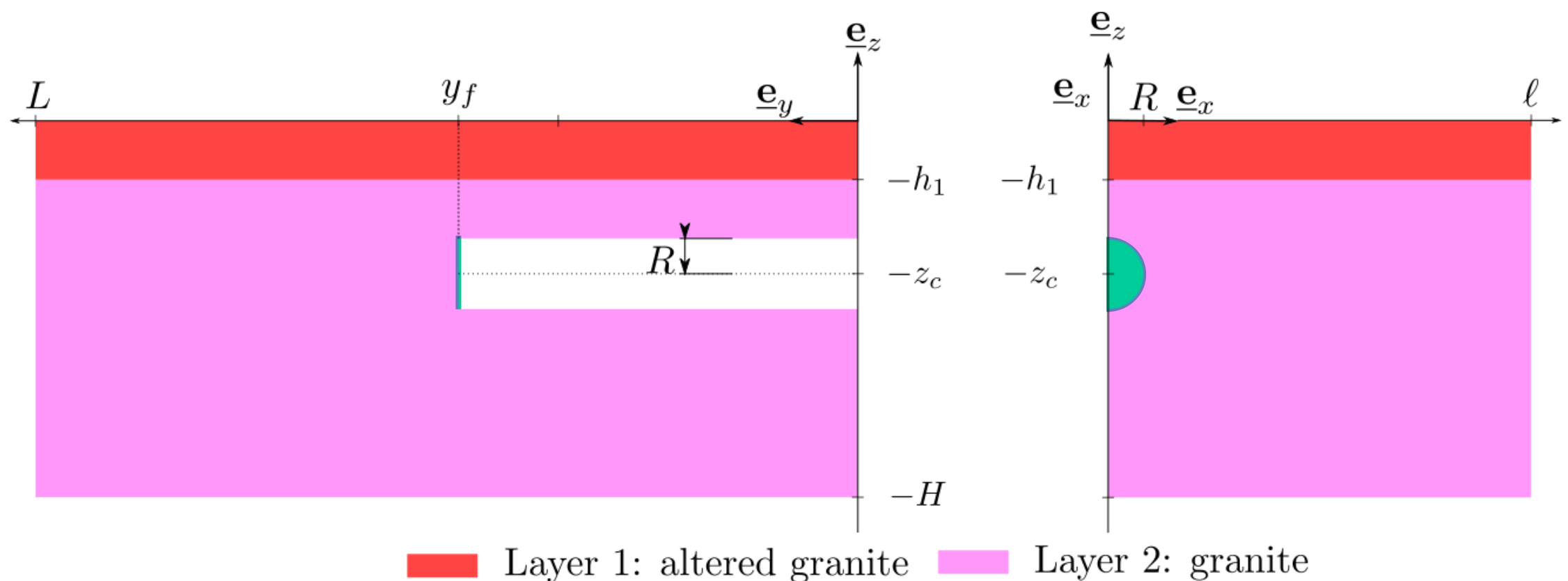
3.3 – Formulation du problème en champ libre

Conditions aux limites : $\forall t \in [0, T]$,

Pression dynamique au front :

$\forall (x, z) \in \text{front de taille},$

$$\underline{T}_{\underline{n}} \cdot \underline{\underline{\sigma}}(x, y = y_f, z, t) \cdot \underline{n} = P(t) = \bar{P} \left(1 + \alpha \frac{v_L(t)}{\max_{t \in [0, T]} |v_L(t)|} \right)$$



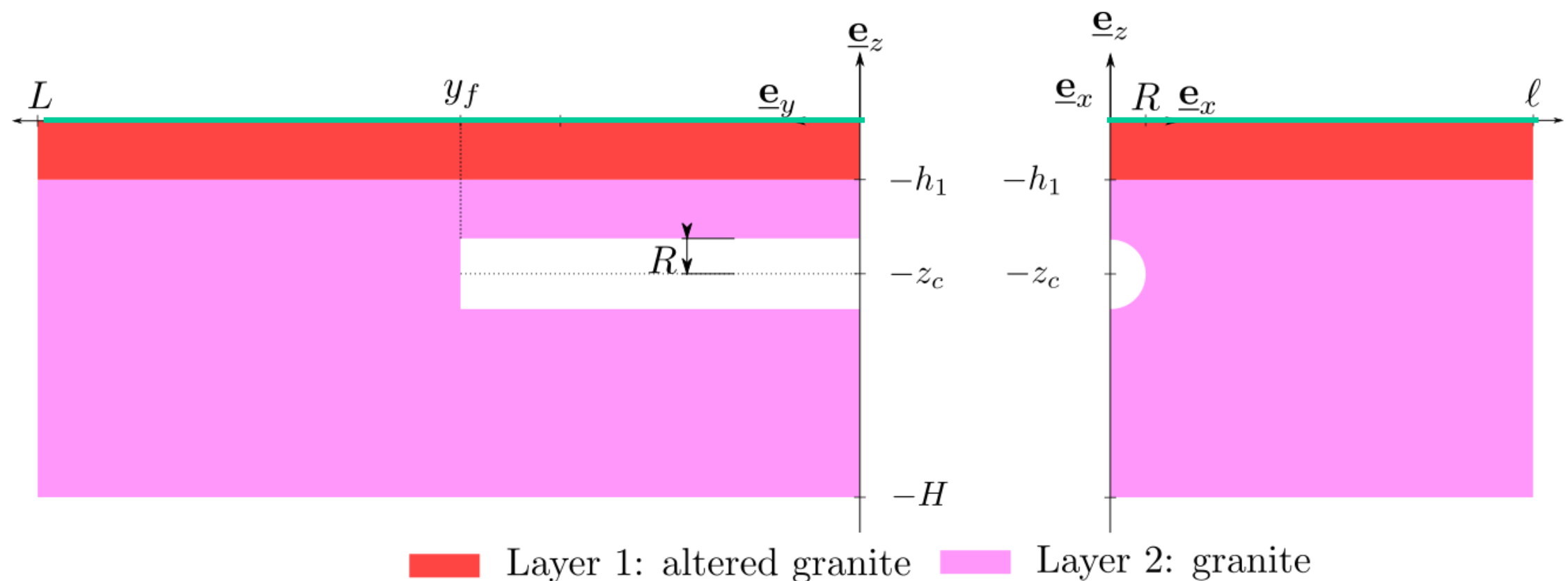
3.3 – Formulation du problème en champ libre

Conditions aux limites : $\forall t \in [0, T],$

Surface libre :

$\forall (x, y) \in]0, \ell[\times]0, L[,$

$$\underline{\underline{\sigma}}(x, y, z = 0, t) \cdot \underline{e}_z = \underline{0}$$



3.3 – Formulation du problème en champ libre

Conditions aux limites : $\forall t \in [0, T]$,

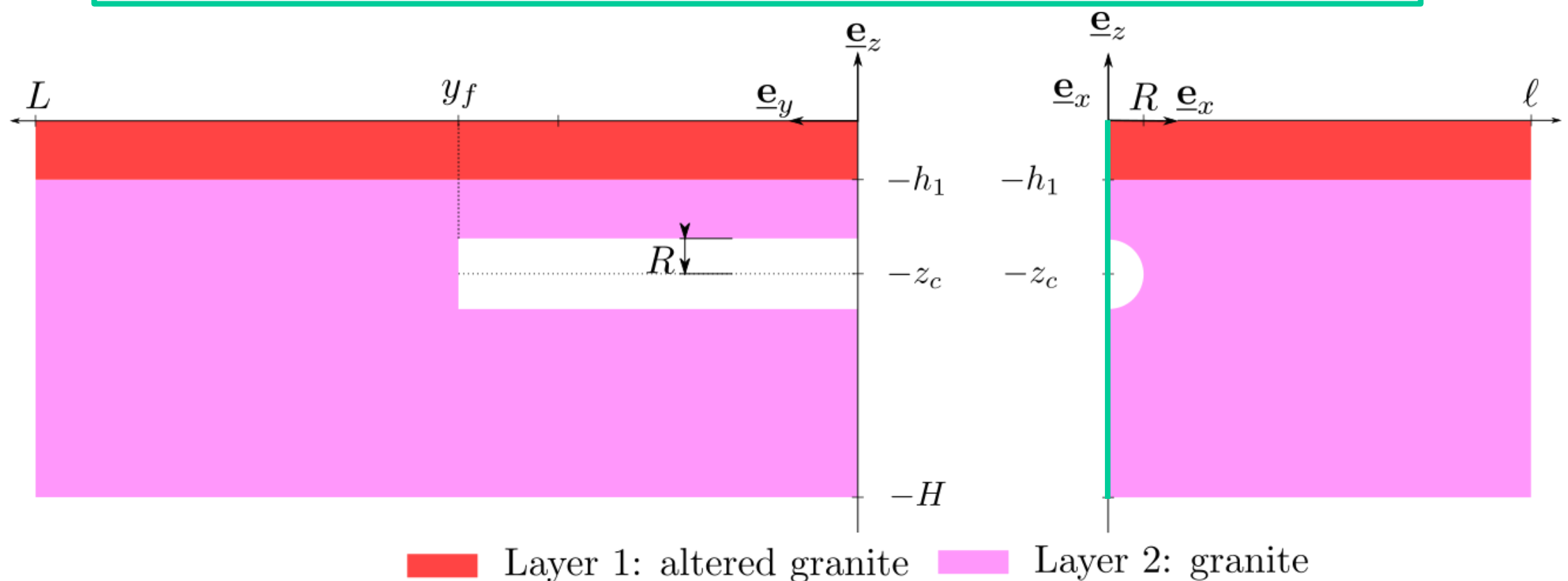
Symétrie:

$$\forall (y, z) \in]0, L[\times]-H, 0[,$$

$$\underline{u}(x = 0, y, z, t) \cdot \underline{n} = 0$$

$$\underline{T}_{\underline{t}} \cdot \underline{\underline{\sigma}}(x = 0, y, z, t) \cdot \underline{n} = 0$$

$$\underline{T}_{\underline{t}'} \cdot \underline{\underline{\sigma}}(x = 0, y, z, t) \cdot \underline{n} = 0$$



3.3 – Formulation du problème en champ libre

Conditions aux limites : $\forall t \in [0, T]$,

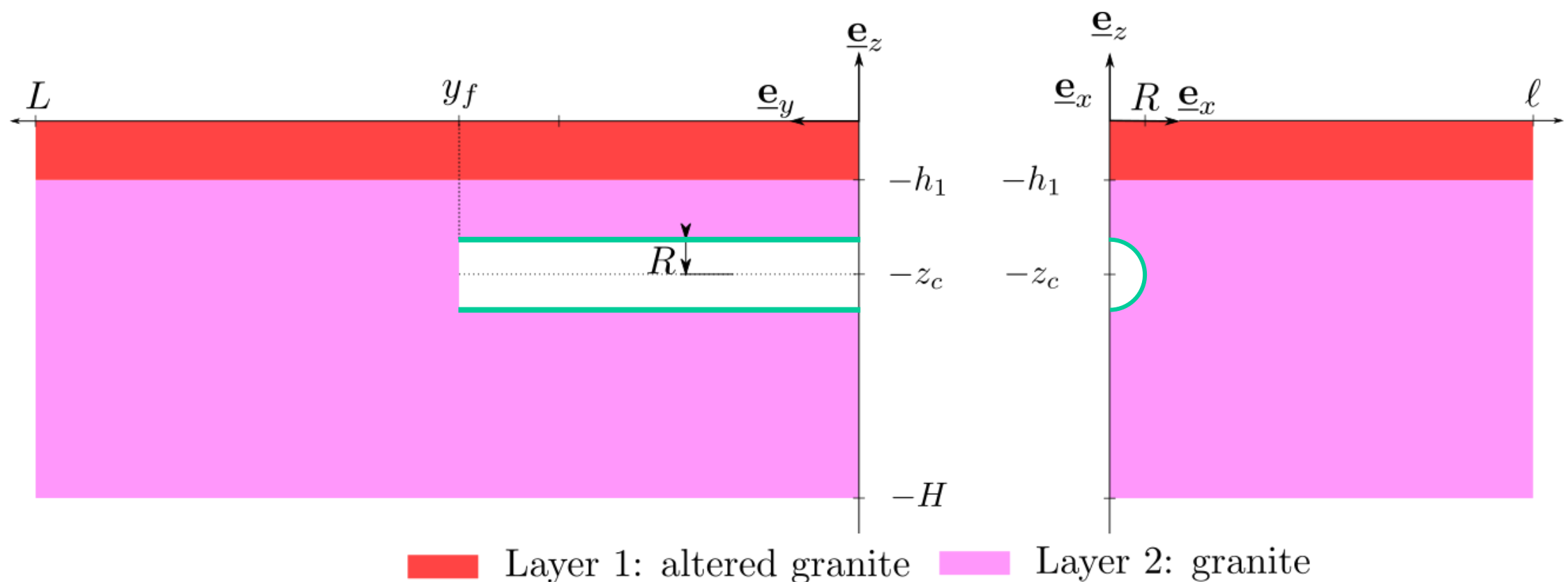
Pas de convergence du terrain :

$\forall y \in]0, y_f[, \forall (x, z) \in \text{surface du tunnel},$

$$\underline{u}(x, y, z, t) \cdot \underline{n} = 0$$

$$\underline{T}_{\underline{t}} \cdot \underline{\underline{\sigma}}(x, y, z, t) \cdot \underline{n} = 0$$

$$\underline{T}_{\underline{t}'} \cdot \underline{\underline{\sigma}}(x, y, z, t) \cdot \underline{n} = 0$$



3.3 – Formulation du problème en champ libre

Conditions aux limites : $\forall t \in [0, T]$,

Absorbing Boundary Conditions : [Lysmer & al., 1969]

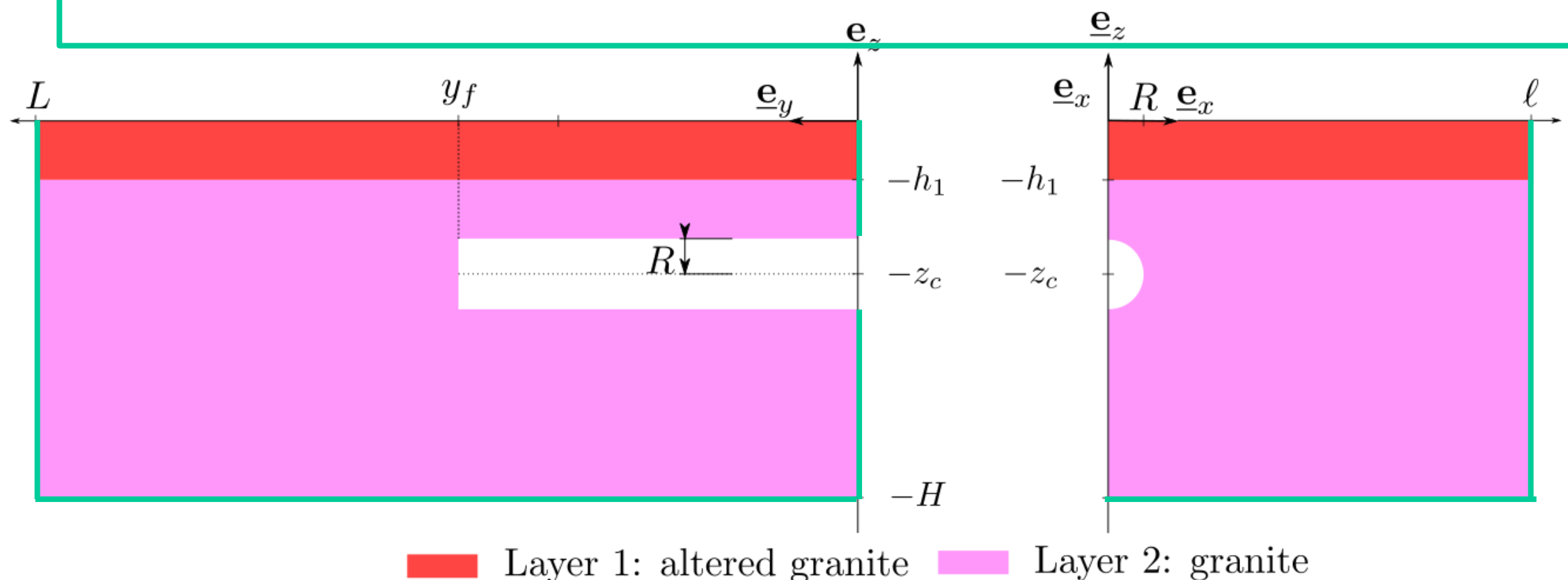
Sur les bords du domaine, tels que $\{y = 0, y = L, x = \ell, z = -H\}$,

$$\underline{\underline{T}}_{\underline{\underline{n}}} \cdot \underline{\underline{\sigma}}(x, y, z, t) \cdot \underline{\underline{n}} = -\rho(z)C_p(z)\partial_t \underline{\underline{u}}(x, y, z, t) \cdot \underline{\underline{n}}$$

$$\underline{\underline{T}}_{\underline{\underline{t}}} \cdot \underline{\underline{\sigma}}(x, y, z, t) \cdot \underline{\underline{n}} = -\rho(z)C_s(z)\partial_t \underline{\underline{u}}(x, y, z, t) \cdot \underline{\underline{t}}$$

$$\underline{\underline{T}}_{\underline{\underline{t'}}} \cdot \underline{\underline{\sigma}}(x, y, z, t) \cdot \underline{\underline{n}} = -\rho(z)C_s(z)\partial_t \underline{\underline{u}}(x, y, z, t) \cdot \underline{\underline{t'}} \quad (\underline{\underline{t'}} = \underline{\underline{n}} \wedge \underline{\underline{t}})$$

(C_p, C_s) vitesses des ondes P et S de chaque couche



3.3 – Formulation du problème en champ libre

Equilibre du problème

$$\rho(z)\partial_t^2 \underline{u}(\underline{x}, t) = \underline{\text{div}}(\underline{\underline{\sigma}}(\underline{x}, t)) + \rho(z)\underline{g} \quad \forall \underline{x} \in \Omega, \forall t \in]0, T]$$

Conditions aux limites

$$\forall \underline{x} \in \partial\Omega, \forall t \in [0, T]$$

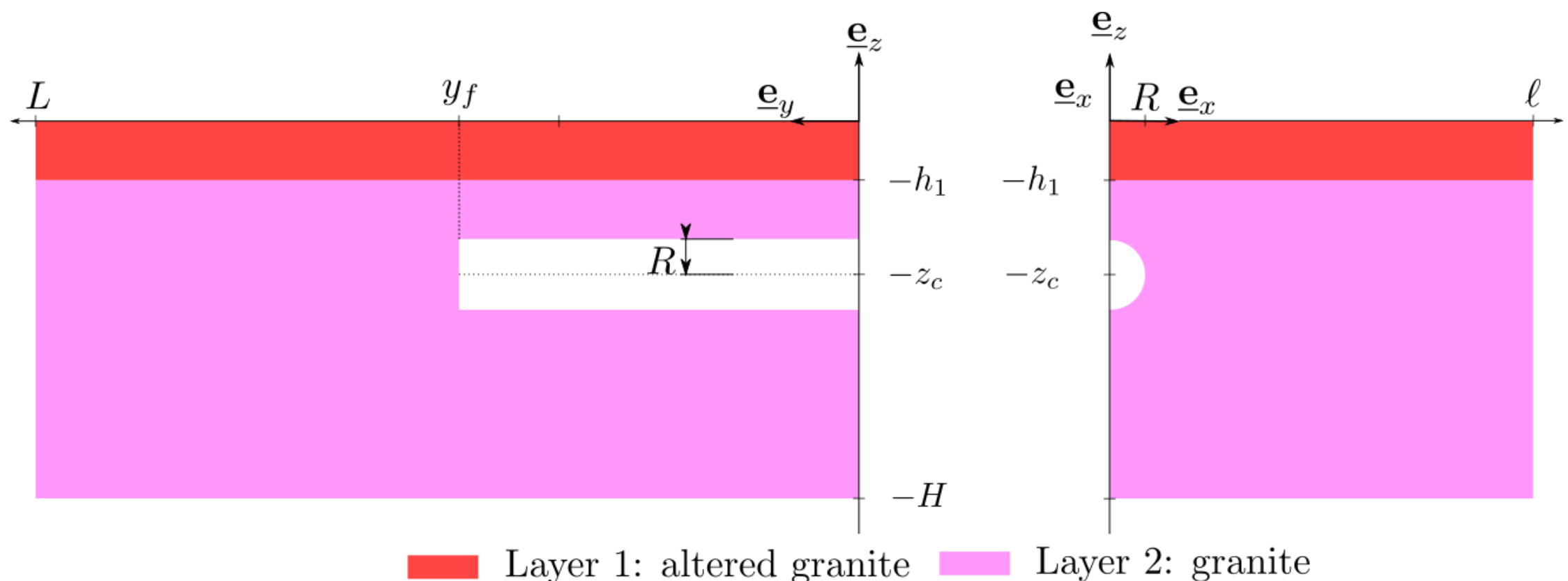
Conditions d'interface

$$\forall \underline{x} \in \partial\Omega, \forall t \in [0, T]$$

Conditions initiales

$$\forall \underline{x} \in \Omega, t = 0$$

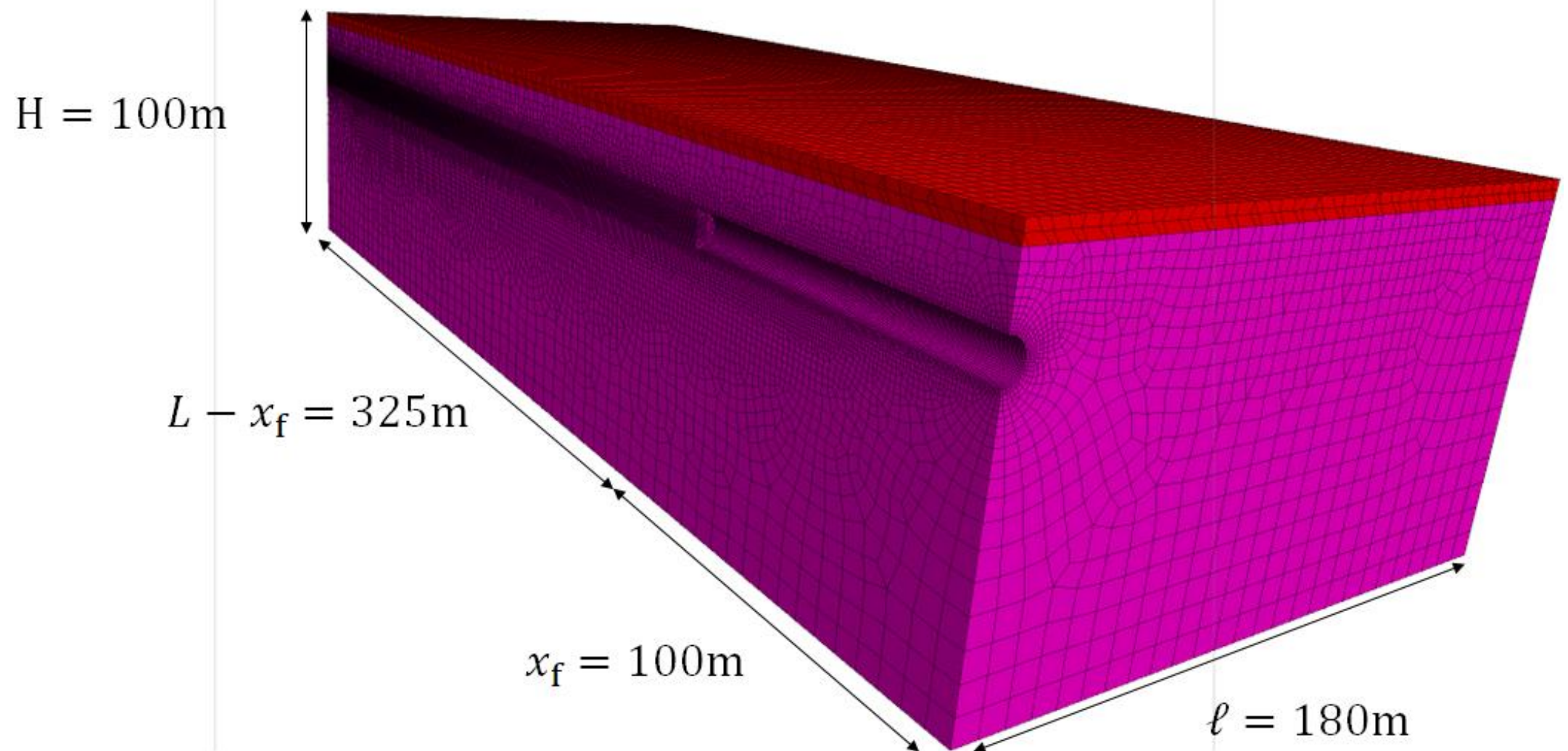
Problème bien posé (au sens de Hadamard) $\Rightarrow$ il existe une unique solution



3.4 – Résolution par differences finies

Modèle FLAC3D

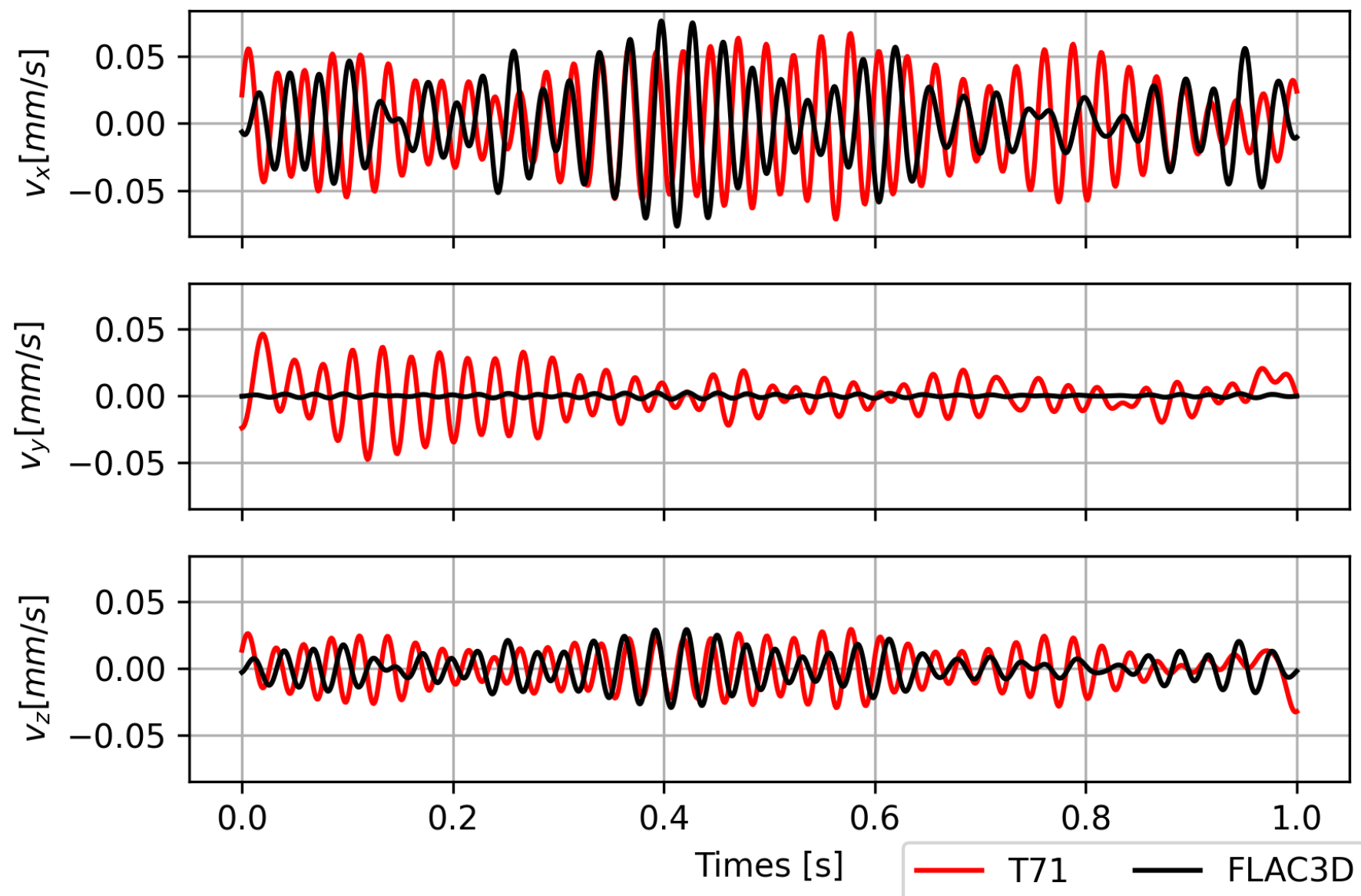
- Frontières absorbantes $\Rightarrow$ effets de bords à minimiser
- 1.3×10^6 nœuds au total (maillage hybride $d\ell \leq 3m$)
- $\delta t = 3.8 \times 10^{-5}s$ (CFL condition)



3.4 – Résolution par differences finies

Résultats:

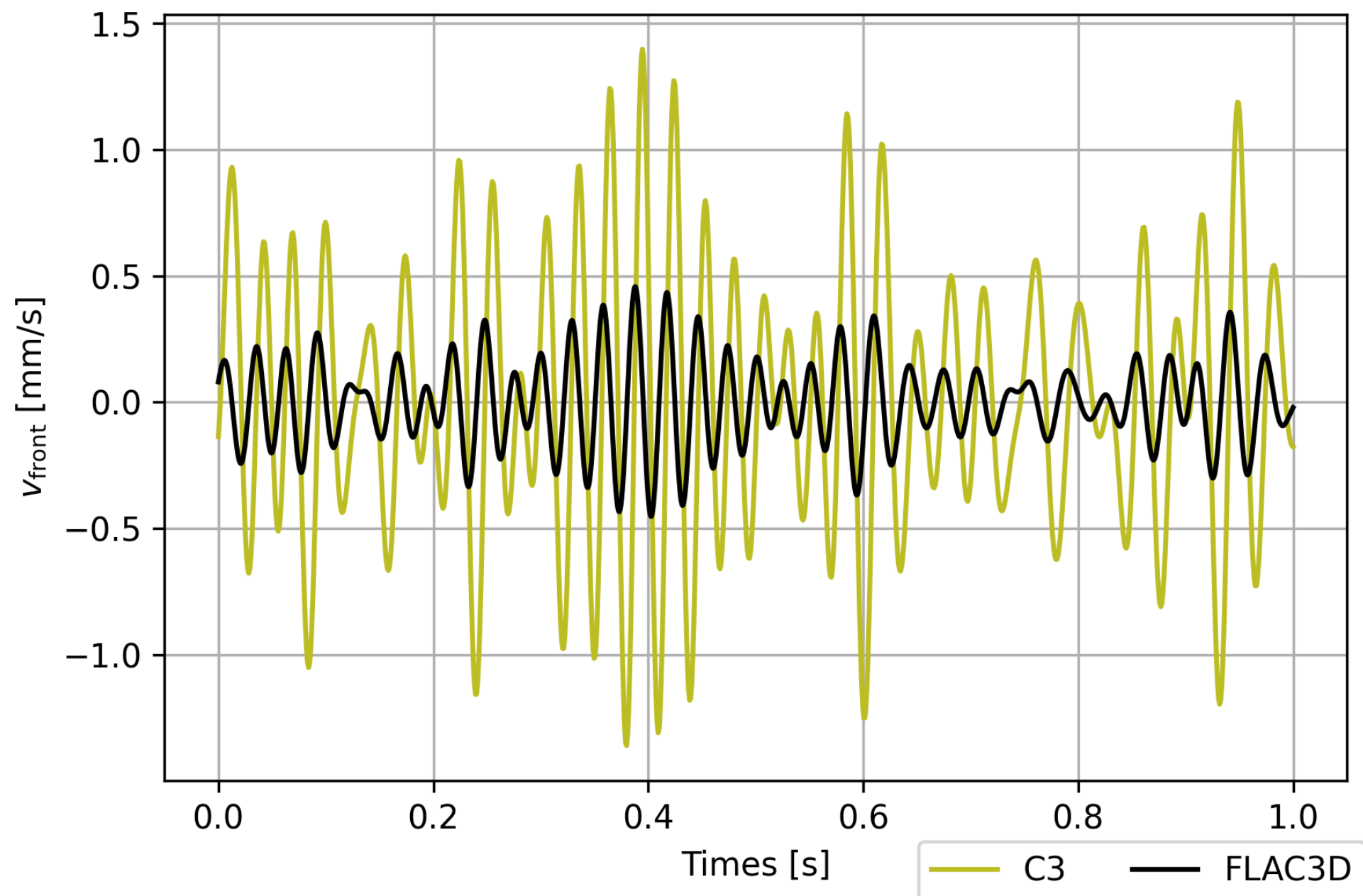
- Comparaison mesures surface : $\alpha = 5\%$



3.4 – Résolution par differences finies

Résultats:

- Comparaison mesures surface : $\alpha = 5\%$
- Comparaison signal source in-situ/numérique



3.5 – Conclusions modélisation numérique

- Formulation d'une loi empirique originale de pression dynamique au front
 - Données vibratoires dans le tunnelier $\Rightarrow$ contenu fréquentiel
 - Données de pilotage du tunnelier $\Rightarrow$ pression statique $\bar{P}$
 - Paramètre α : amplitude des oscillations autour de $\bar{P}$
- Résolution numérique en champ libre
 - Par analyse inverse : détermination de α pour ce site
 - Détermination des vitesses au front
- Prochaines étapes
 - Ajouter les efforts de cisaillement (couple dynamique)
 - Impact sur fondations profondes (pieu isolé, ou groupe de pieux)
 - ...

Références :

A. Rallu, D. Branque and N. Berthoz. **An empirical law for expressing exerted dynamic pressures by a TBM : Application to a rocky greenfield environment.** In submission

A. Rallu and D. Branque (2023). **Theoretical Modelling of Longitudinal Wave Propagation Emitted by a Tunnel Boring Machine in a Finite Domain**, In: Dimitrovová, Z., Biswas, P., Gonçalves, R., Silva, T. (eds) Recent Trends in Wave Mechanics and Vibrations. WMVC 2022. Mechanisms and Machine Science, vol 125. Springer, Cham. [doi:10.1007/978-3-031-15758-5_16](https://doi.org/10.1007/978-3-031-15758-5_16)

Références bibliographiques

M. Liu, S. Liao, Y. Yang, Y. Men, J. He, Y. Huang (2021). **Tunnel boring machine vibration-based deep learning for the ground identification of working faces**, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Volume 13, Issue 6, 2021, [doi:10.1016/j.jrmge.2021.09.004](https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2021.09.004)

Z. Lu, X. Wang, G. Zhou, L. Feng, Y. Jiang (2022). **Investigation on vibration influence law of double-shield tbm tunnel construction**, Applied Sciences (Switzerland) 12, [doi:10.3390/app12157727](https://doi.org/10.3390/app12157727)

M. Mooney, B. Walter, J. Steele and D. Cano. (2014) **Influence of geological conditions on measured TBM vibration frequency**. In: Davidson, G., et al. (Eds.), North American Tunneling Proceedings, SME, pp. 397e406. Colorado. [Lien pdf](#)

F. Wu, Q.M. Gong, Z.G. Li, J.F. Qui, C. Jin, L. Huang, L.J. Yin (2021). **Development and application of cutterhead vibration monitoring system for TBM tunnelling**. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 146, 104887, [doi:10.1016/j.ijrmms.2021.104887](https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104887)

K. Wu, Y. Zheng, S.C. Li, J. Sun, Y.C. Han, D.X. Hao (2022). **Vibration response law of existing buildings affected by subway tunnel boring machine excavation**. Tunn. Undergr. Space Technol., 120, 104318, [doi:10.1016/j.tust.2021.104318](https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104318)

K.Z. Zhang, H.D. Yu, Z.P. Liu, X.M. Lai (2010). **Dynamic characteristic analysis of TBM tunnelling in mixed-face conditions**. Simulat. Model. Pract. Theor. 18 (7), 1019-1031, [doi:10.1016/j.simpat.2010.03.005](https://doi.org/10.1016/j.simpat.2010.03.005)

Membres de l'équipe de recherche

Yara Aslan



ENTPE

L'école de l'aménagement durable des territoires

Antoine Rallu
Denis Branque
Claude Boutin
Joachim Blanc-Gonnet
Frédéric Sallet



Nicolas Berthoz
Cédric Gaillard

**GÉODYNAMIQUE
& STRUCTURE**

Charisis Chatzigogos
Theodora Makrypidi
Sofia Gobbi