



**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

## Webinaire « Doctorants en géotechnique »

Amélioration des Sols par Inclusions Rigides: Application  
aux fondations d'éoliennes sous chargements sismiques

NOHRA, CHARBEL



**Université  
Gustave Eiffel**

9 JANVIER 2023



**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

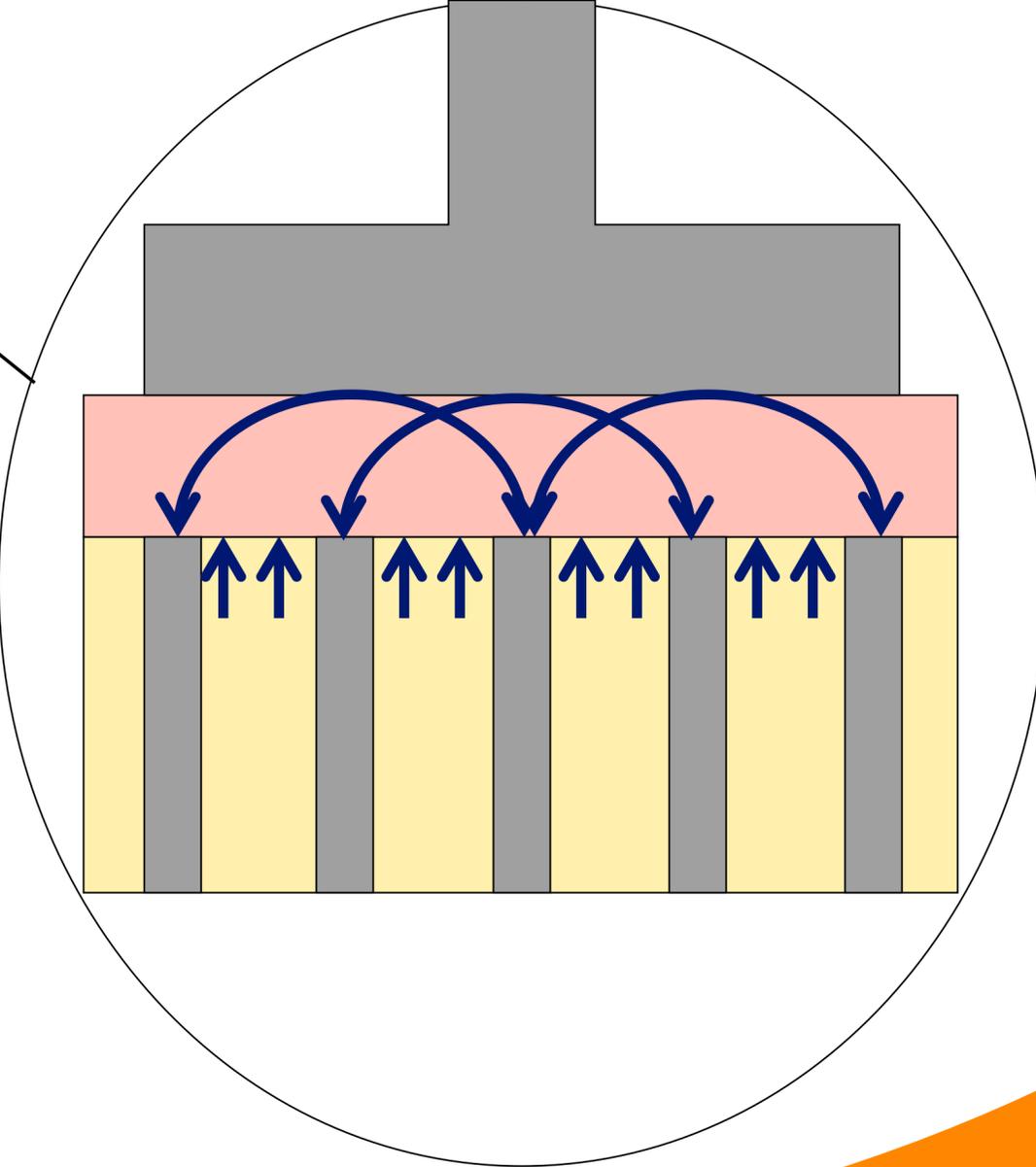
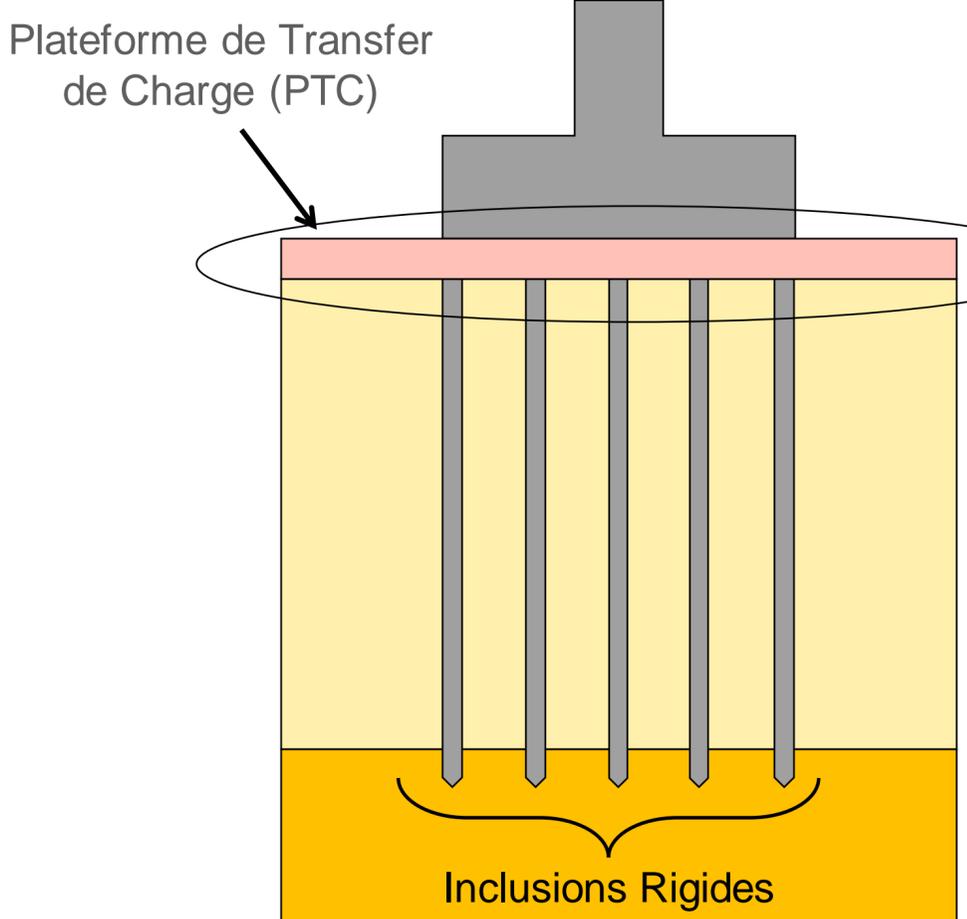
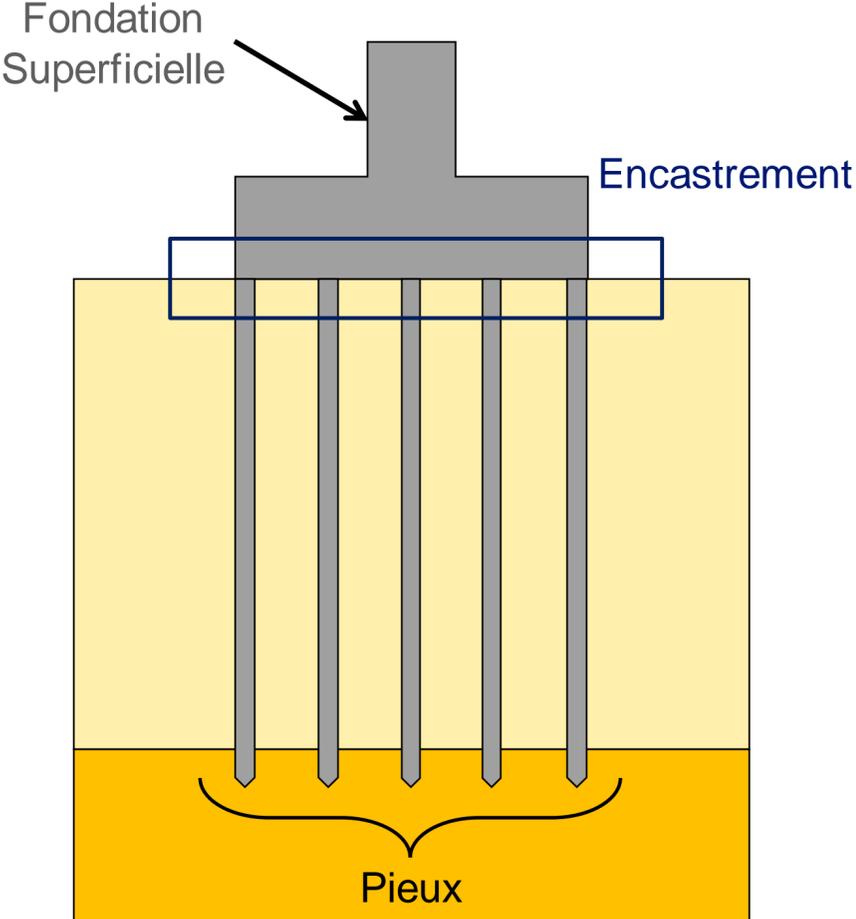
# Introduction



Amélioration des Sols par Inclusions Rigides: Application aux  
fondations d'éoliennes sous chargements sismiques

09 janvier 2024

# Renforcement des sols par IR



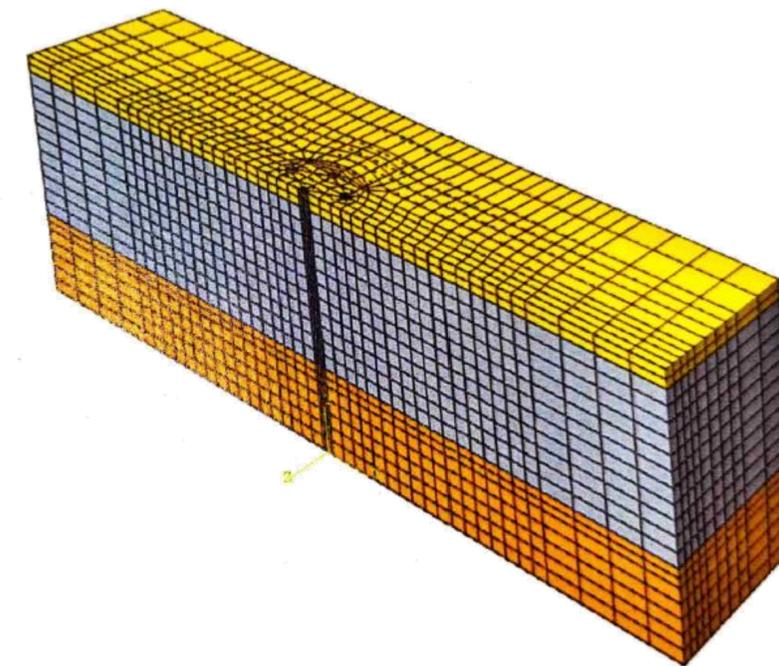
# Objectif

► ***Étude de l'interaction Sol-Inclusions-Structure d'un système de sol mou renforcé par Inclusions Rigides sous sollicitations sismiques et sinusoidales***

Essais en centrifugeuse



Modélisation numérique FEM (ABAQUS)





**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

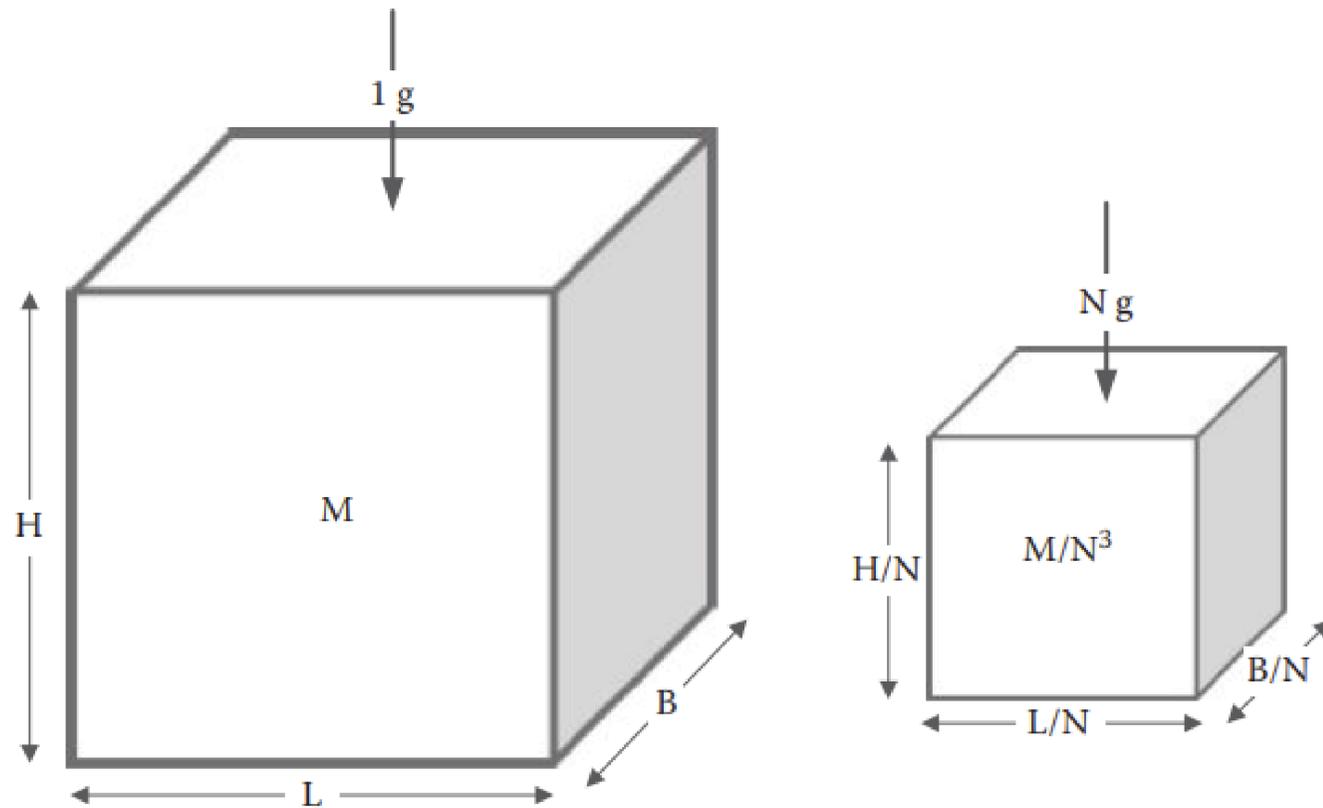
# Essais en Centrifugeuse



Amélioration des Sols par Inclusions Rigides: Application aux  
fondations d'éoliennes sous chargements sismiques

09 janvier 2024

# Principe de la modélisation en centrifugeuse



Prototype

Model

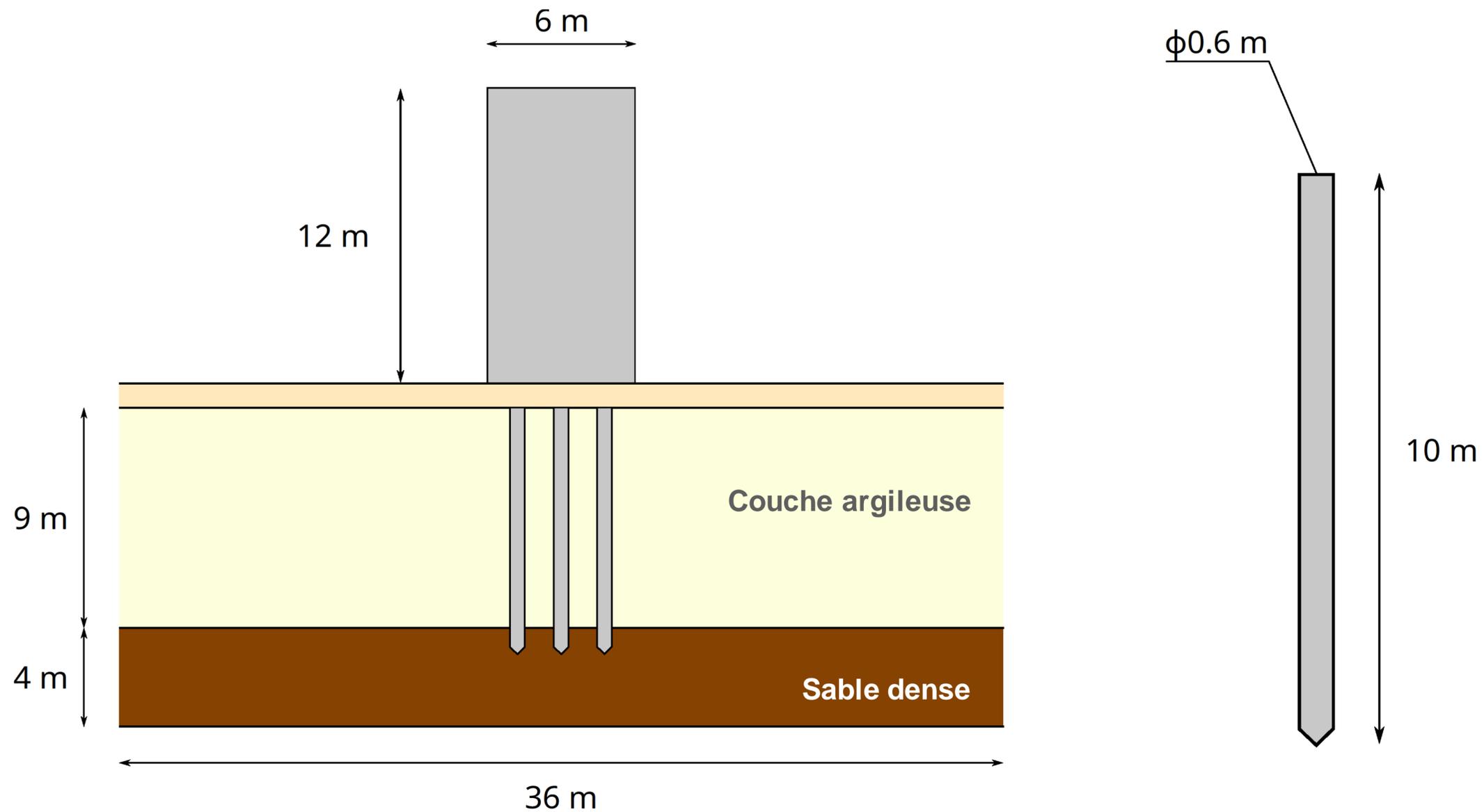
$$\sigma_v = \frac{Mg}{L \times B}$$

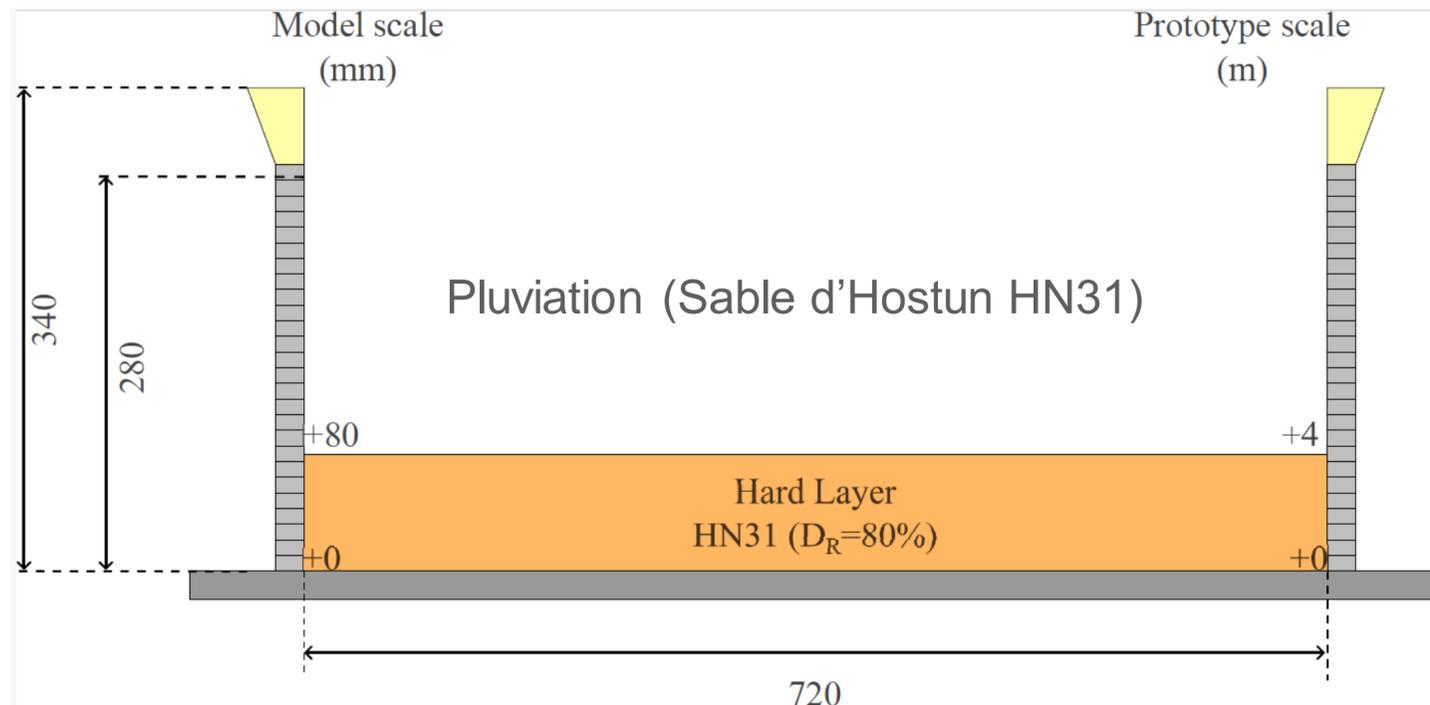
$$\sigma_v = \frac{\frac{M}{N^3} \times Ng}{\frac{L}{N} \times \frac{B}{N}} = \frac{Mg}{L \times B}$$

	Parameter	Scaling law modell/prototype	Units	
General scaling laws (slow events)	Length	1/N	m	
	Area	1/N <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	
	Volume	1/N <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	
	Mass	1/N <sup>3</sup>	Nm <sup>-1</sup> s <sup>2</sup>	
	Stress	1	Nm <sup>-2</sup>	
	Strain	1	-	
	Force	1/N <sup>2</sup>	N	
	Bending moment	1/N <sup>3</sup>	Nm	
	Work	1/N <sup>3</sup>	Nm	
	Energy	1/N <sup>3</sup>	J	
	Seepage velocity	N	ms <sup>-1</sup>	
	Time (consolidation)	1/N <sup>2</sup>	s	
	Dynamic events	Time (dynamic)	1/N	s
		Frequency	N	s <sup>-1</sup>
Displacement		1/N	m	
Velocity		1	ms <sup>-1</sup>	
Acceleration/Acceleration due to gravity (g)		N	ms <sup>-2</sup>	



# Cas étudié



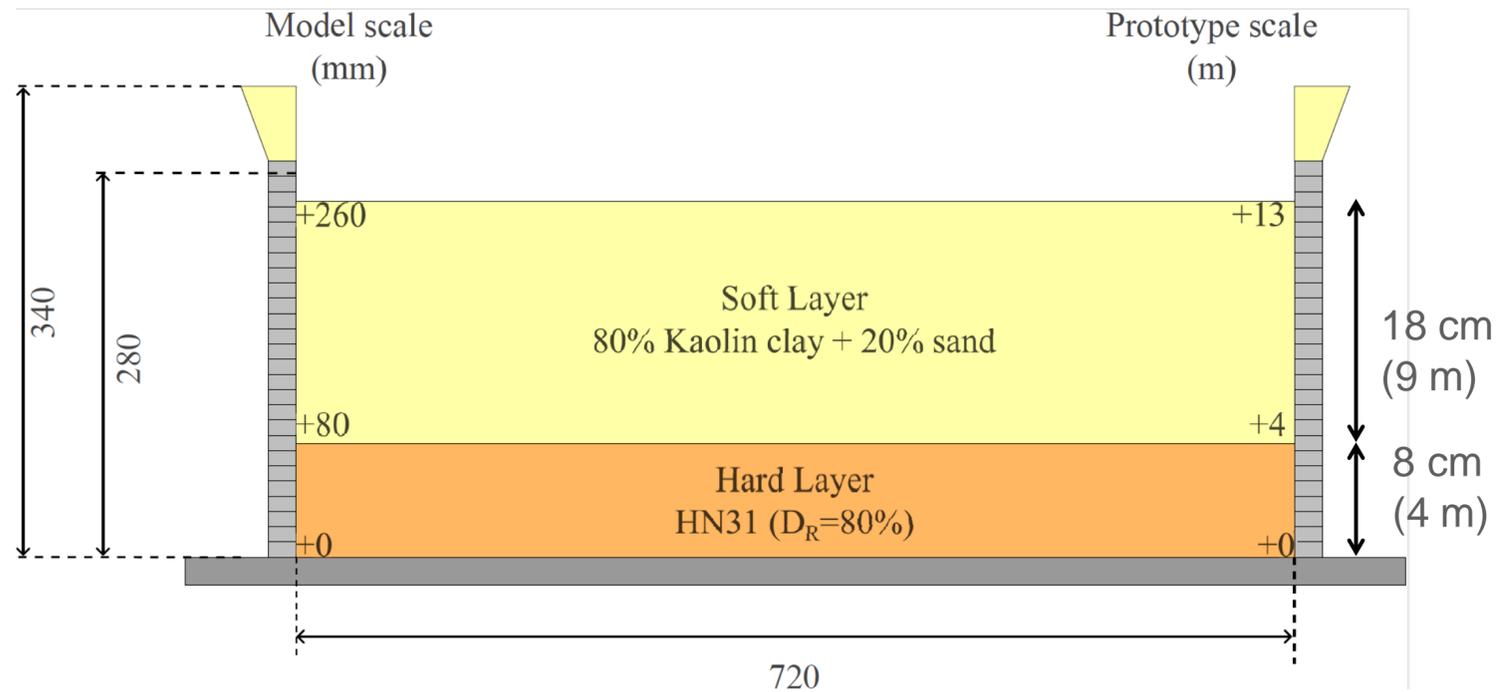


- Hauteur de Pluviation
  - Ouverture de fente
  - Vitesse de déplacement
- }
 Densité Relative requise      80 %

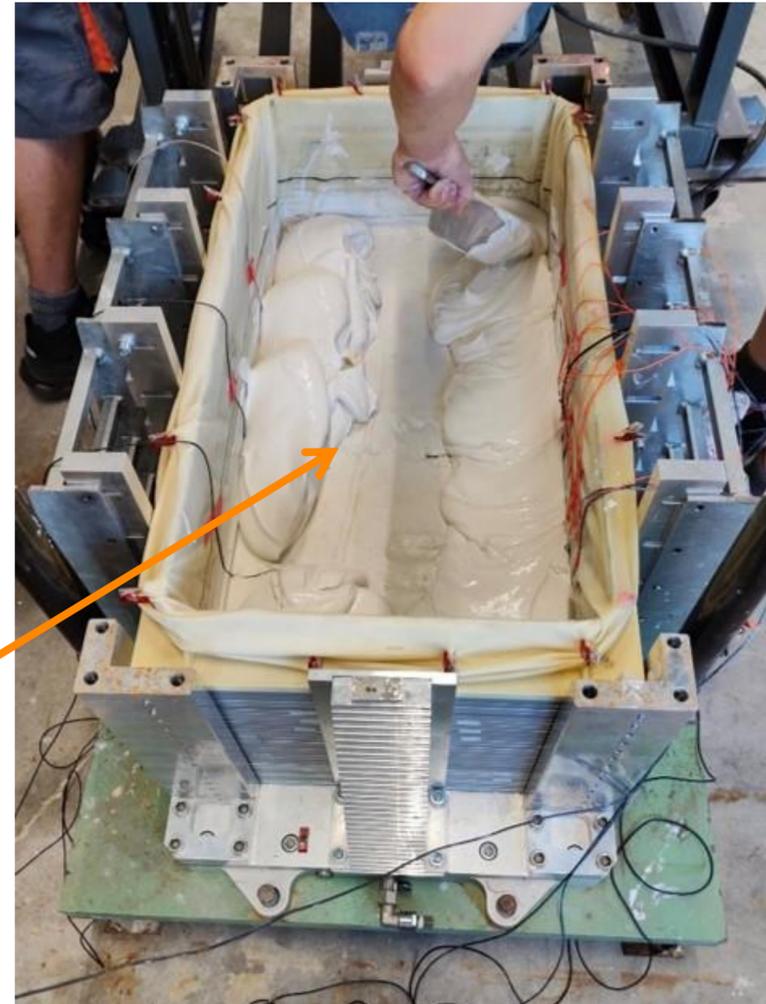


# Préparation du massif

## Couche molle



Argile Speswhite Kaolinite	80 %
Sable de Fontainebleau	20 %
Teneur en eau	60 %

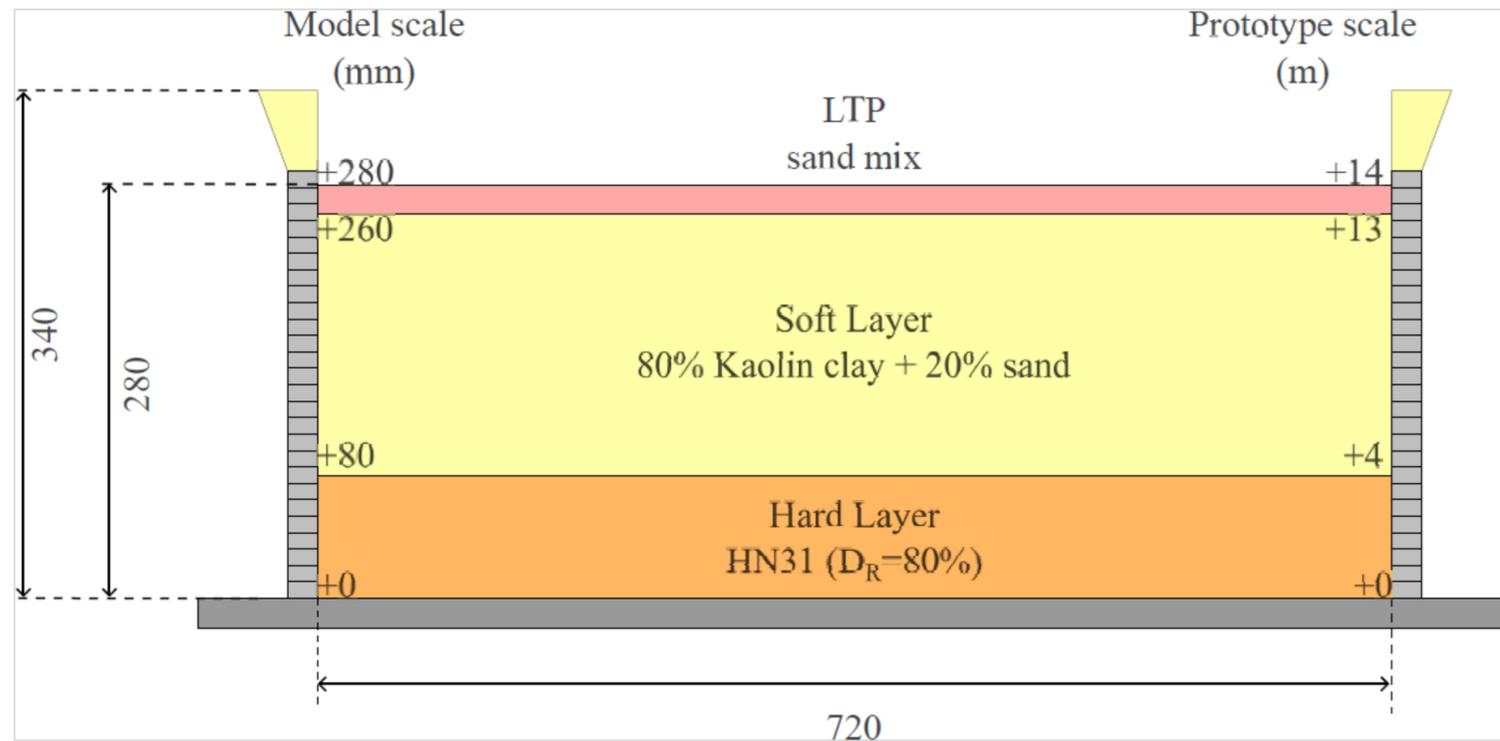


Piston Hydraulique



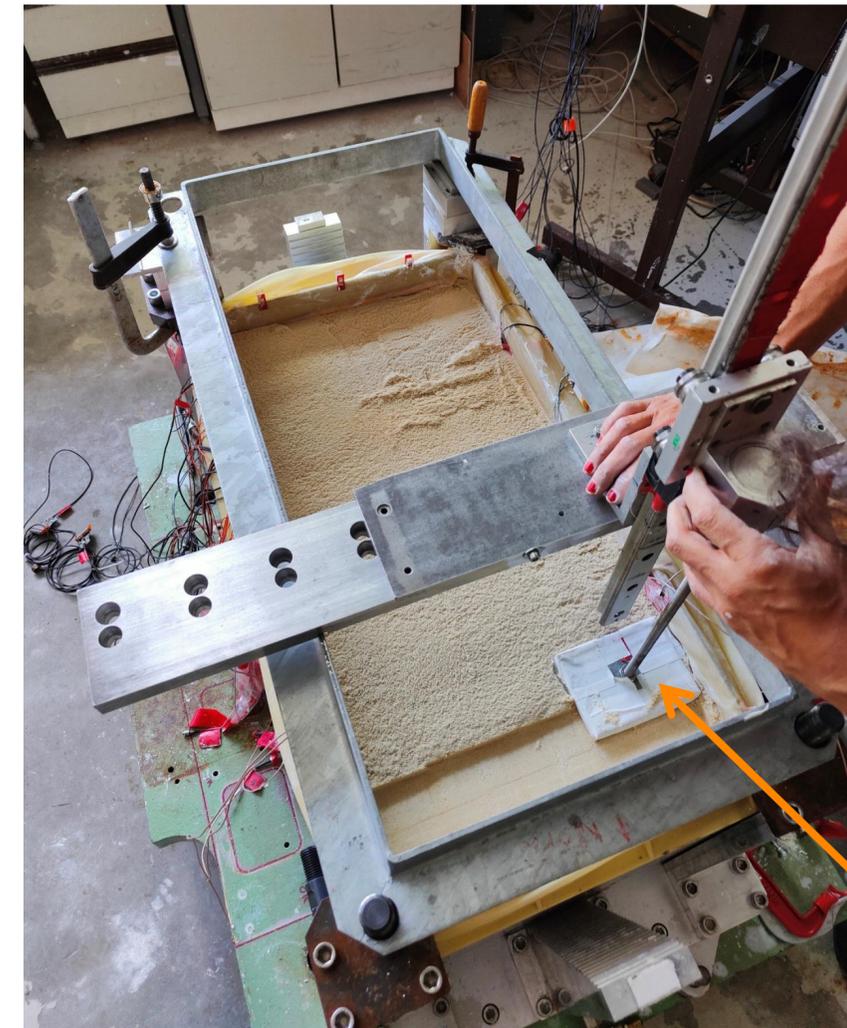
# Préparation du massif

## Plateforme de Transfert de Charge



### Couche de PTC:

- Epaisseur : 2 cm (1 m)
- Mélange de sables: HN31, HN34, HN38 et HN0.6-4
- Préparée par compactage ( $w = 5\%$ )

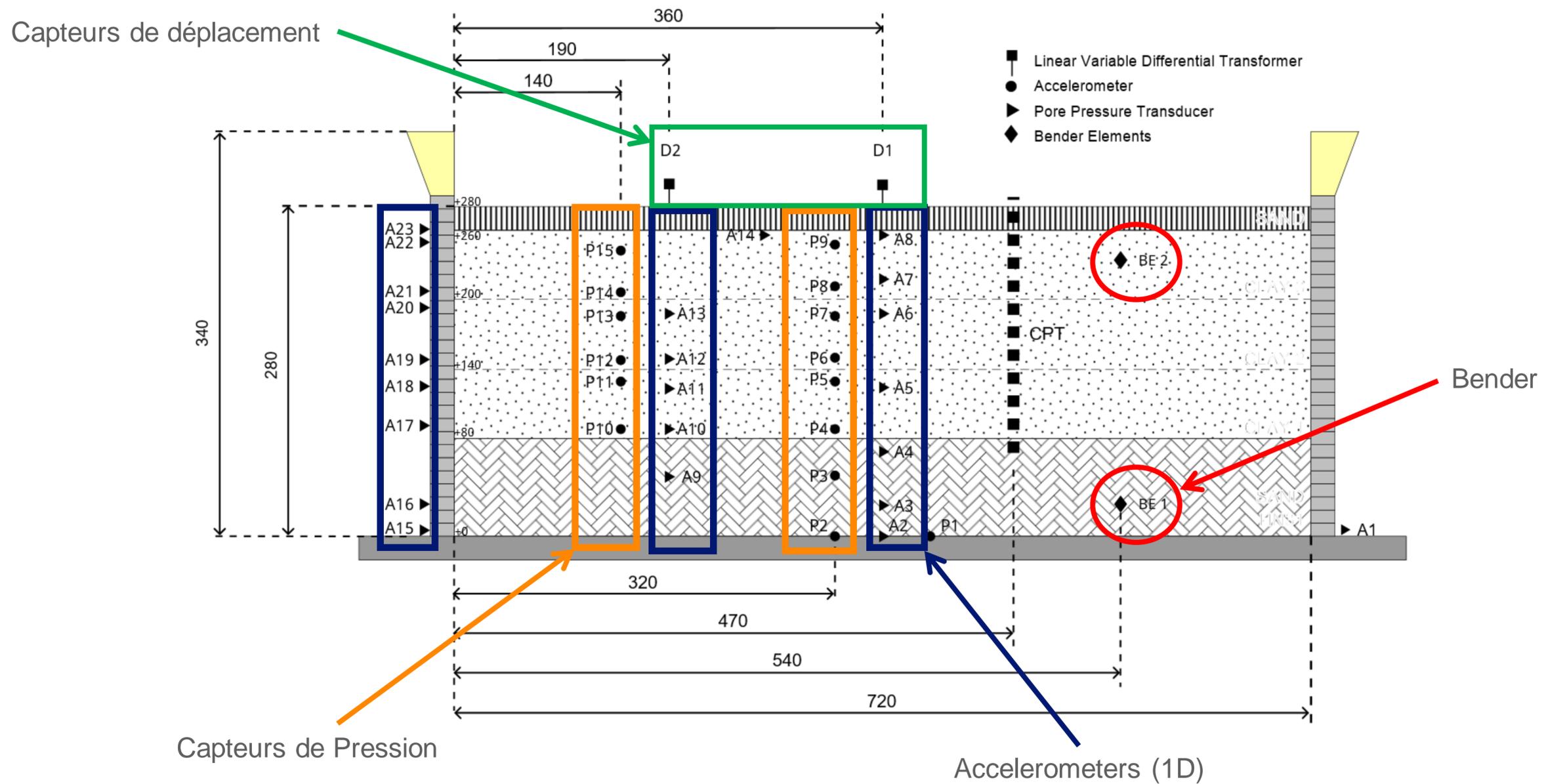


Compacteur



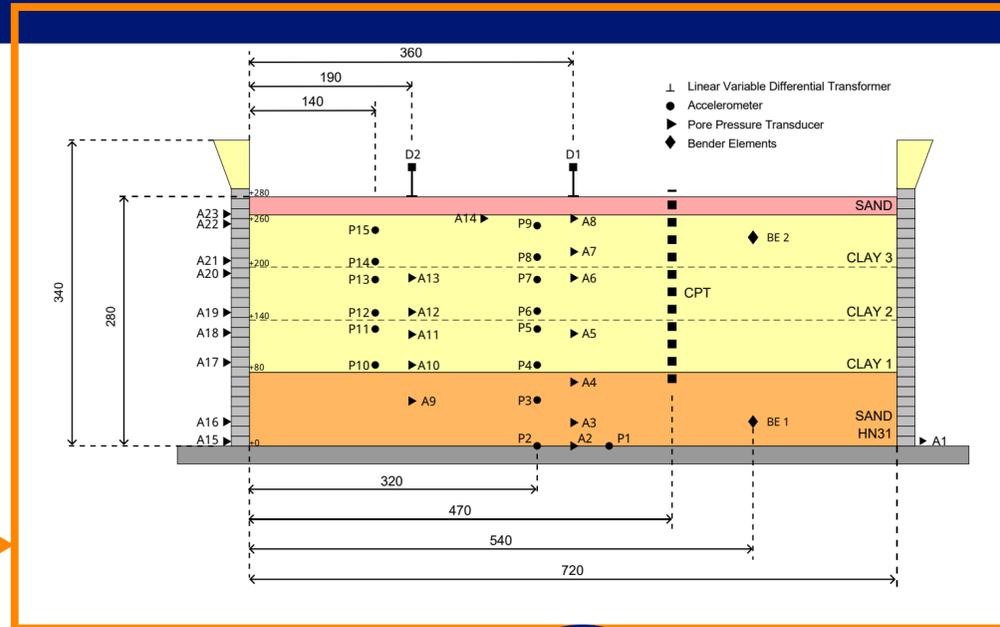
# Préparation du massif

## Instrumentation

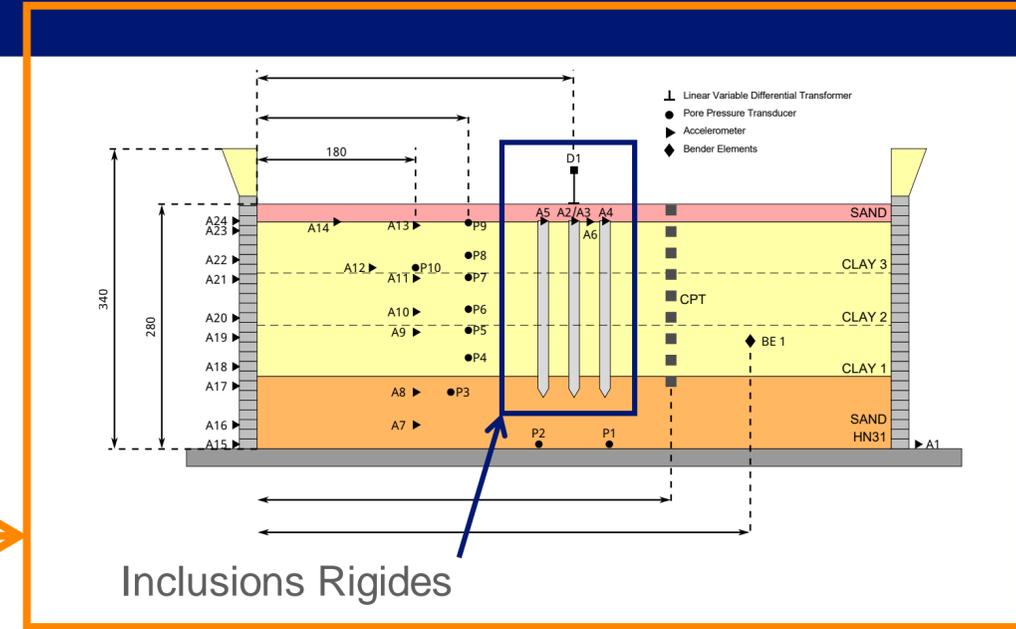


# Configurations testées

Champs Libre

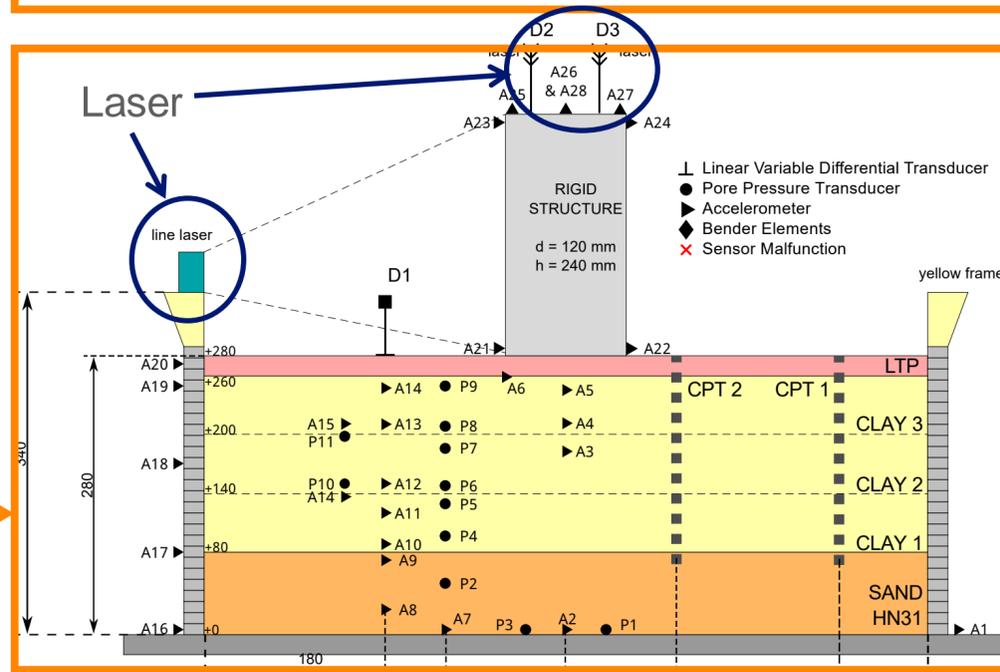


Sol Renforcé

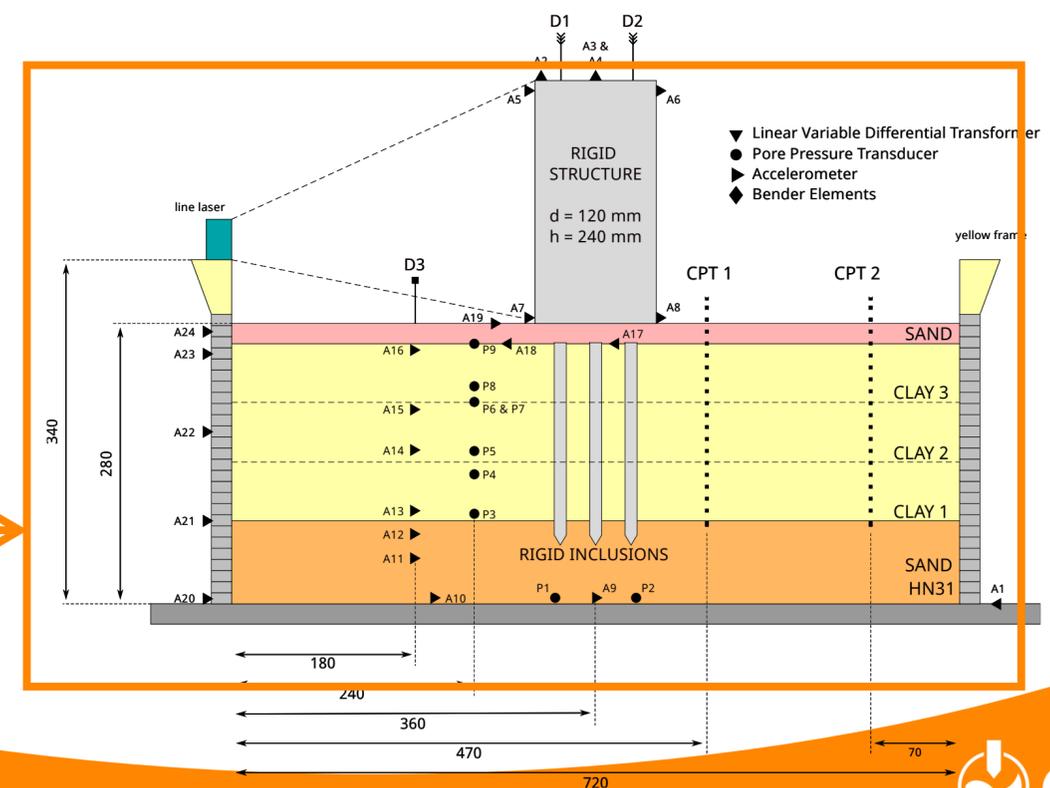


Inclusions Rigides

Structure

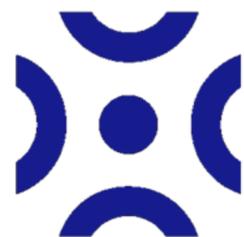


Structure + RI

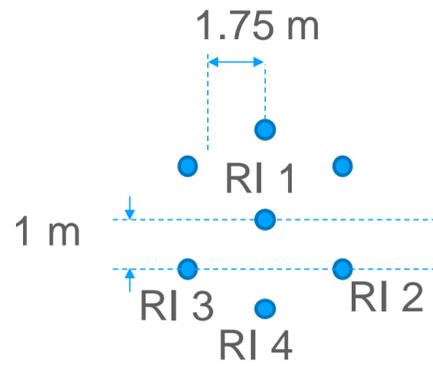
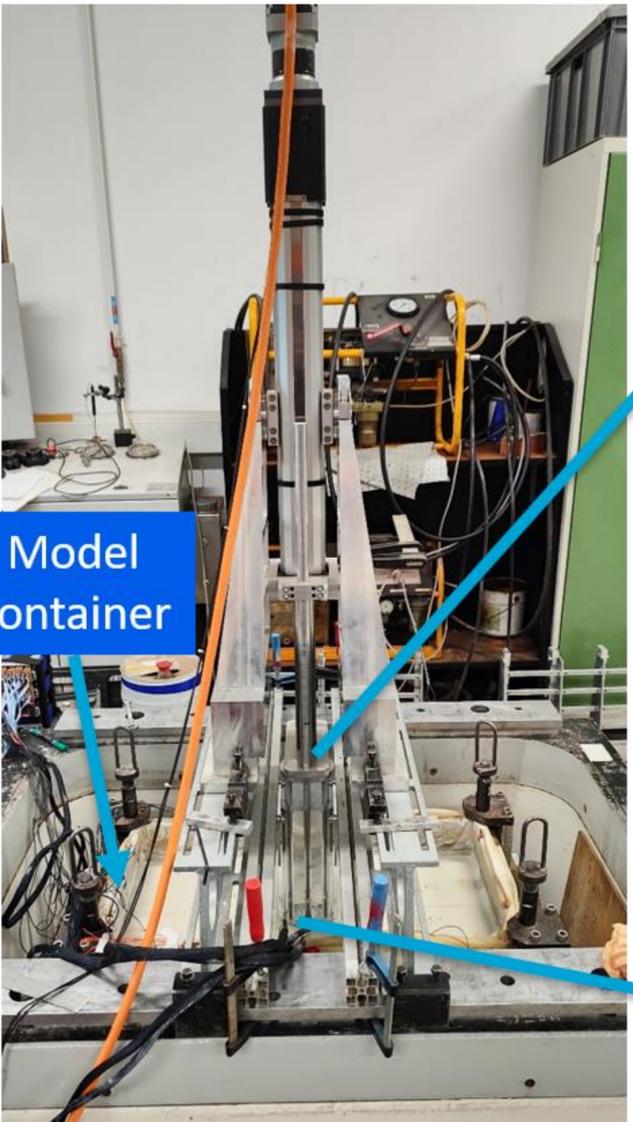


Amélioration des Sols par Inclusions Rigides: Application aux fondations d'éoliennes sous chargements sismiques

09 janvier 2024



# Installation des Inclusions



➡ Vitesse d'enfoncement  $v = 0.1 \text{ mm/s}$

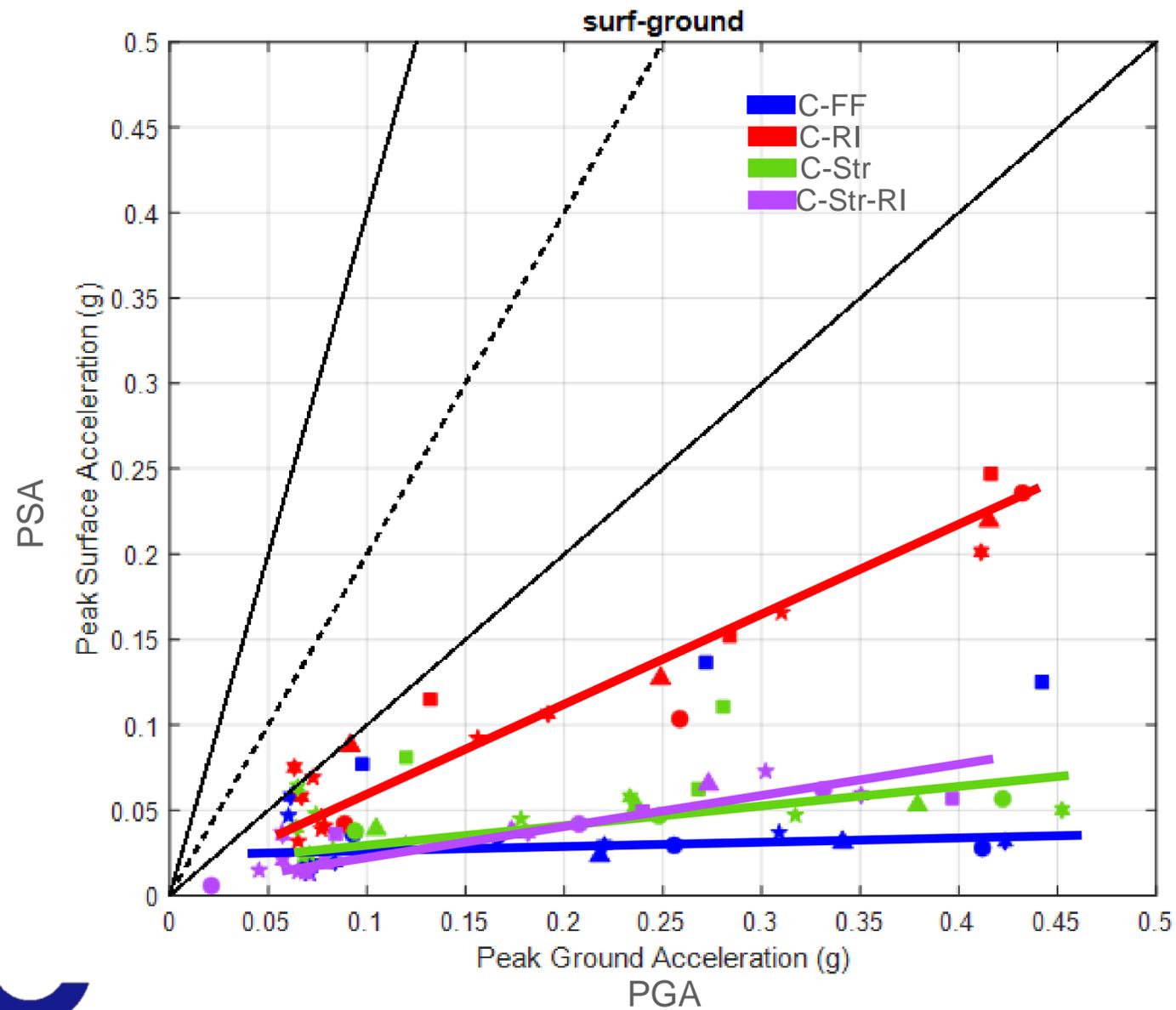


# Séismes d'entrée

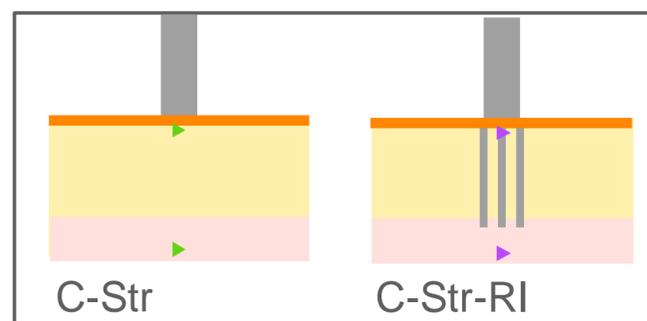
Input	Fréquence Prédominante (Hz)	PGA(g)
→ Landers	variable	0,05
Northridge	variable	0,05
Sinus	1	0,05
Sinus	1	0,15
Sinus	1	0,25
→ Landers	variable	0,05
Sinus	1.8	0,05
Sinus	1.8	0,15
Sinus	1.8	0,25
→ Landers	variable	0,05
Sinus	2.4	0,05
Sinus	2.4	0,15
Sinus	2.4	0,25
→ Landers	variable	0,05
Landers	variable	0,15
Landers	variable	0,25
Northridge	variable	0,05
Northridge	variable	0,15
Northridge	variable	0,25
→ Landers	variable	0,05



# Résultat



Marker	Ground motion
★	Landers
*	Northridge
■	Sine 1 Hz
●	Sine 1.8 Hz
▲	Sine 2.4 Hz



## Interprétation

- C-FF: Faible augmentation du PSA → Dissipation SAUF pour le sinus 1 Hz
- C-RI: Allure proche de 1:1

Inclusions rigides augmentent l'amplification du signal

- C-S et C-S-RI: Allure similaire SAUF Sinus 1 Hz

Pas d'effet notable des Inclusions Rigides





**cfms**

COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

# Modélisation numérique



Amélioration des Sols par Inclusions Rigides: Application aux  
fondations d'éoliennes sous chargements sismiques

09 janvier 2024

# Modélisation numérique

## Essais en centrifugeuse

- Longue durée
- Matériel Limité

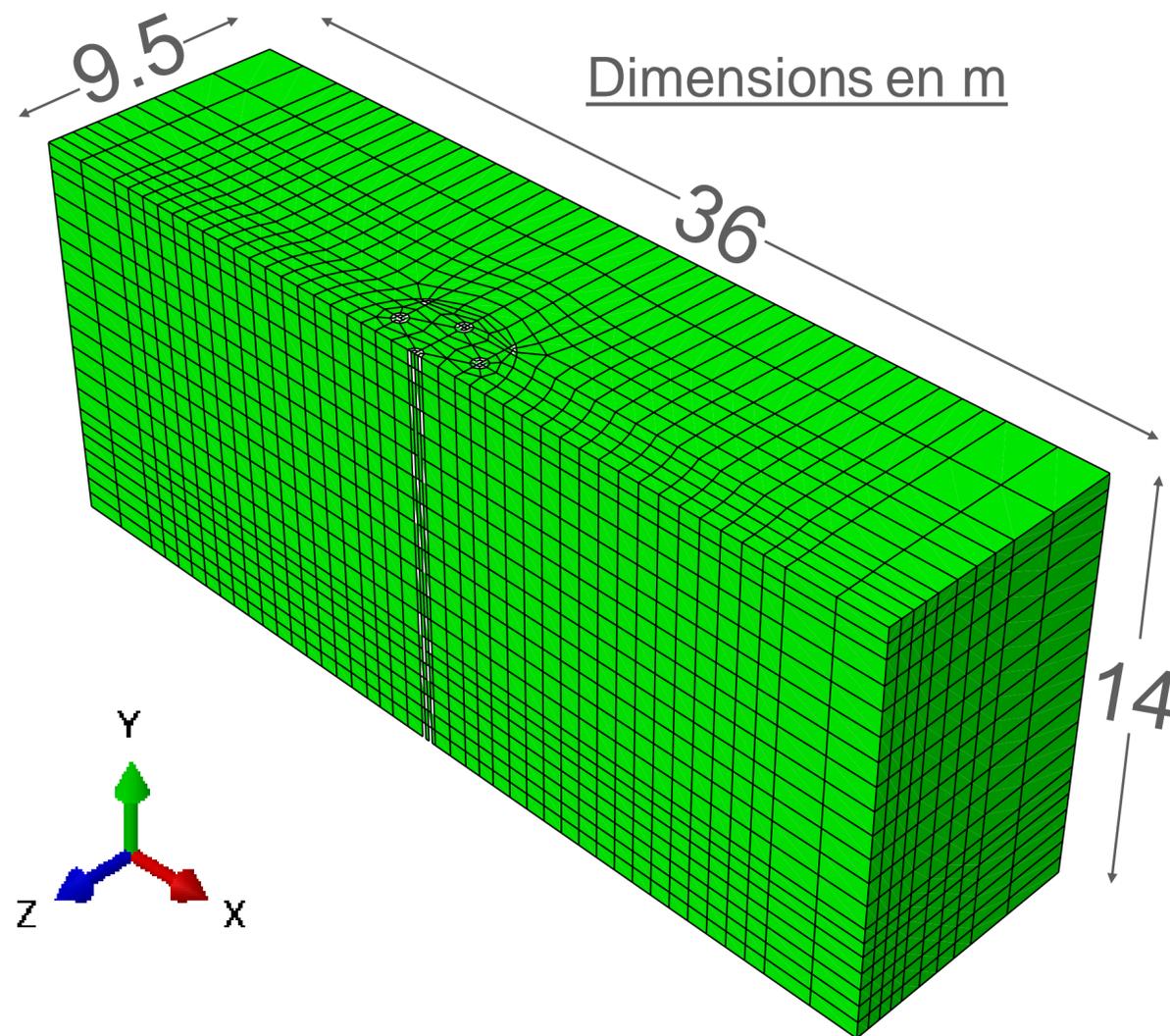
## Modèle FEM 3D - ABAQUS

- Résultat plus rapide
- Capable de réaliser des études paramétriques
- Calibré à partir des résultat expérimentaux



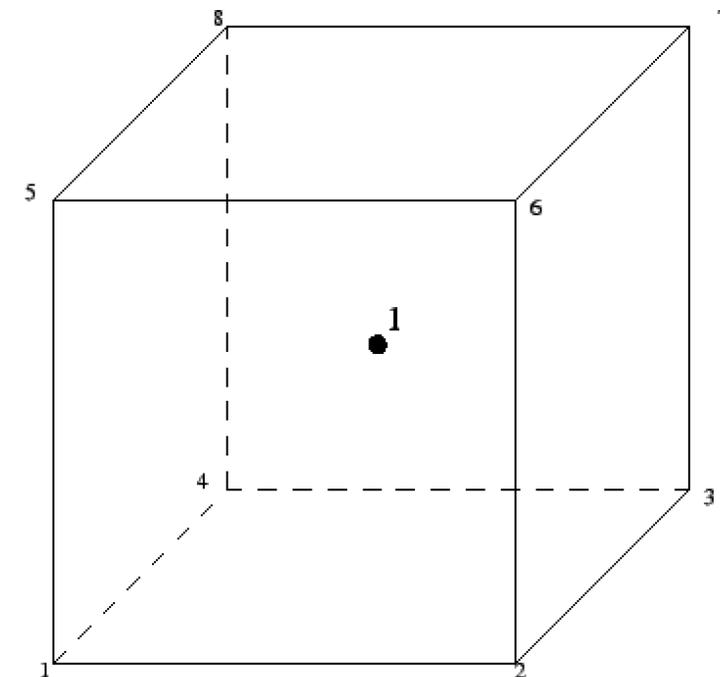
# Modélisation numérique

## Géométrie



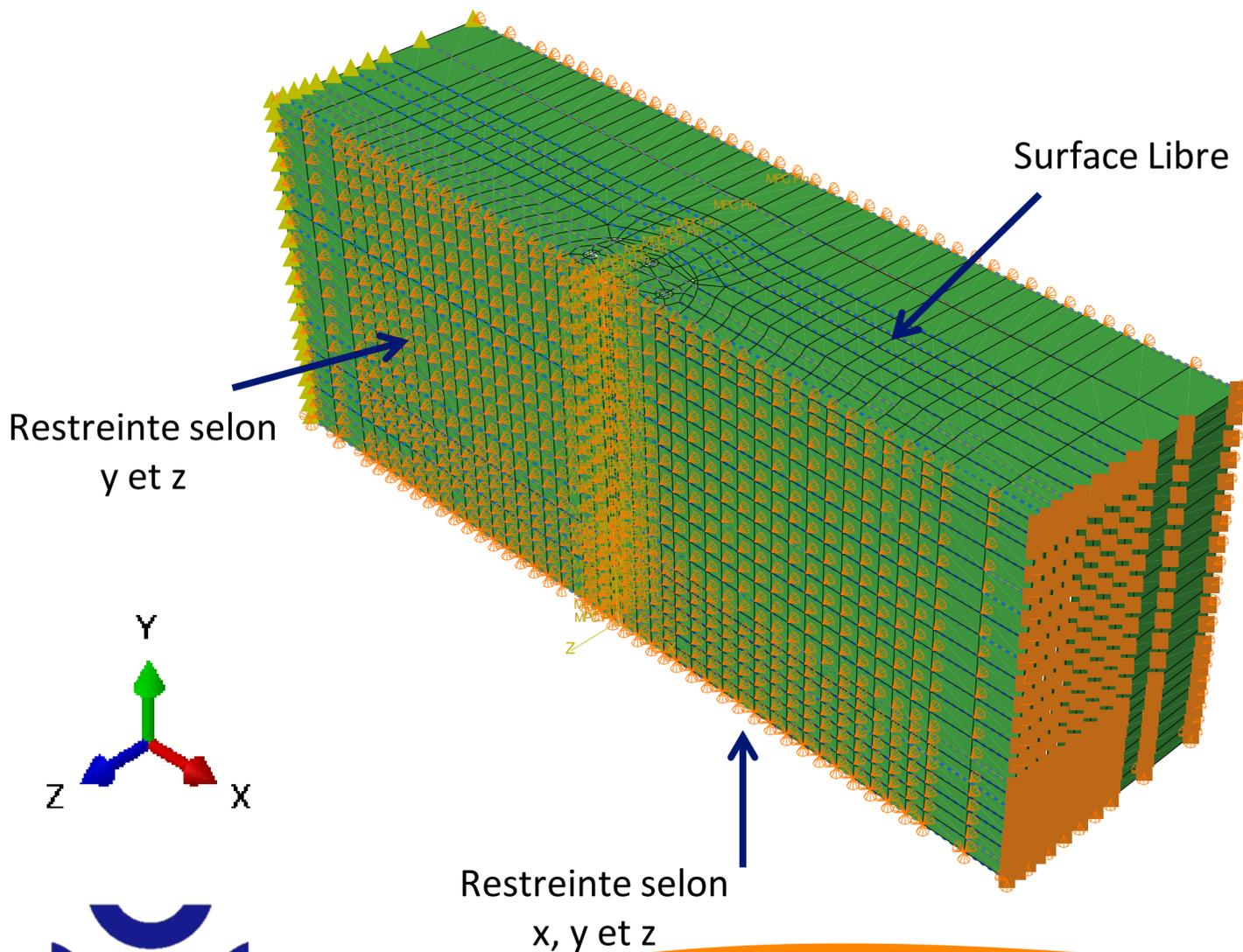
## Maillage

- 11382 Nœuds
- 9760 Eléments (type C3D8R)



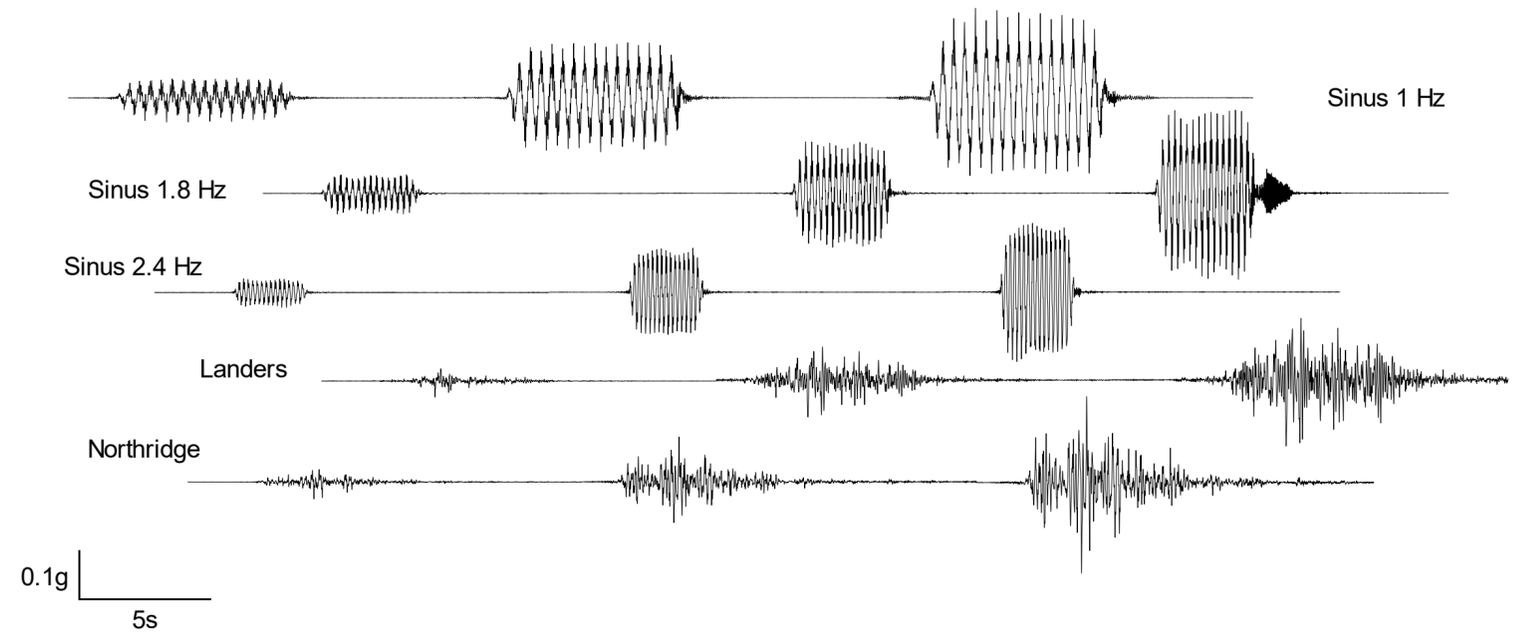
# Modélisation numérique

## Conditions aux limites



## Chargements

- Géostatique (Gravité)
- Dynamique (Séisme & Sinus)



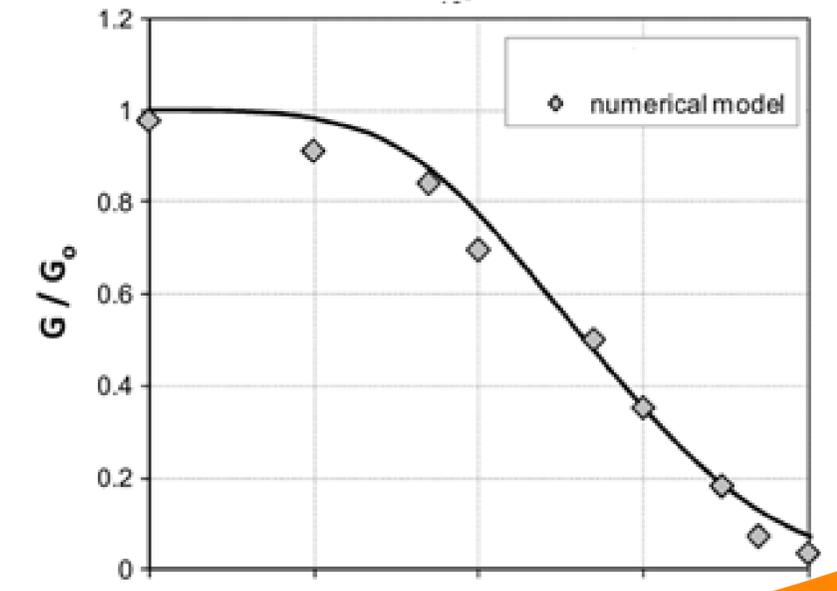
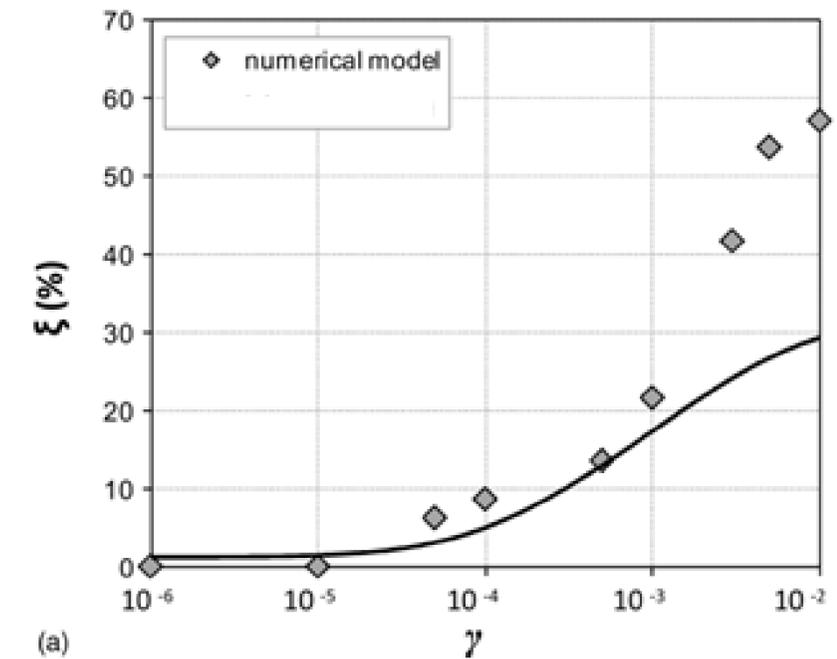
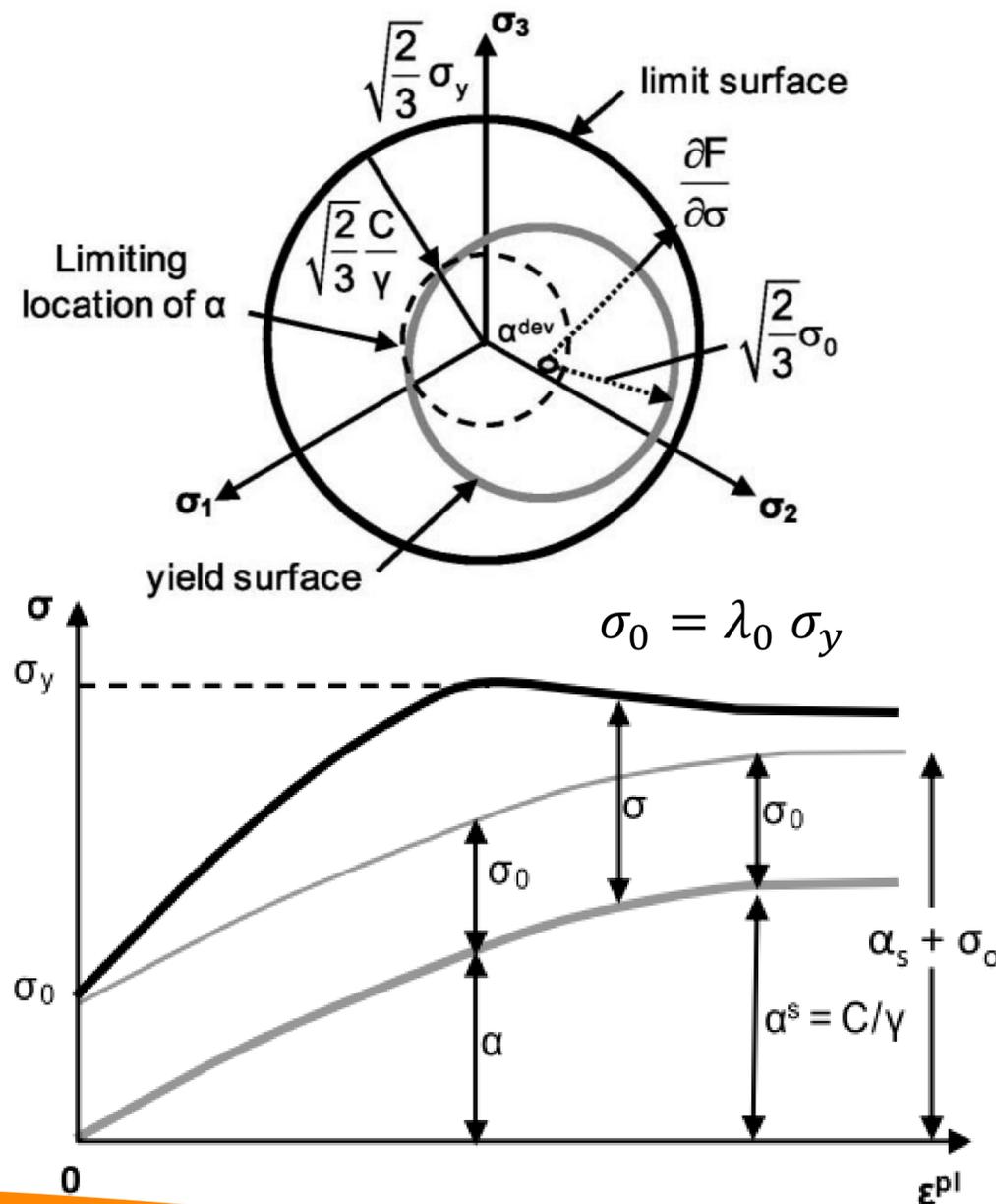
# Modélisation numérique

## Modèle de Chaboche

- Modèle élasto-plastique non linéaire
- Écrouissage cinématique

## Calibration

- $\sigma_0$ : Contrainte de plasticité initiale  
→ à partir de  $G_0$  ( $V_s$ )
- $\sigma_y$ : Contrainte de plasticité maximale  
→ à partir du CPT ( $S_u$ )
- Évolution de  $\lambda_0$   
→ à partir de la courbe  $G - \gamma$



# Conclusion et Perspectives

## Essais en Centrifugeuse

- Sans bâtiment: L'amplification en terme de PGA est plus grande avec les IR
- Avec bâtiment: Pas d'effet des IR sur l'amplification sauf pour le sinus 1 Hz
- Effets des RI et du Bâtiment ne sont pas superposables

## Modélisation numérique

- Modèle élasto-plastique de Chaboche à écrouissage cinématique

## Perspectives

- Essais en centrifugeuse avec une structure basse
- Calibration et Validation du modèle non-linéaire (Chaboche) + Etudes Paramétriques



# Laboratoire Centrifugeuse Géotechnique

## Personnels

### ➤ Six chercheurs

- Mathieu BLANC (Chef du Laboratoire)
- Thierry Dubreug
- Christelle ABADIE
- Luc THOREL (Directeur)
- Sandra ESCOFFIER (Encadrante)
- Zheng LI (Encadrant)

Projets en Statique

Projets en Dynamique

### ➤ Cinq techniciens

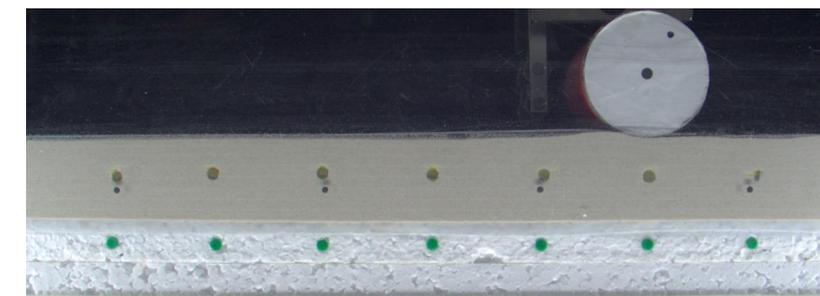
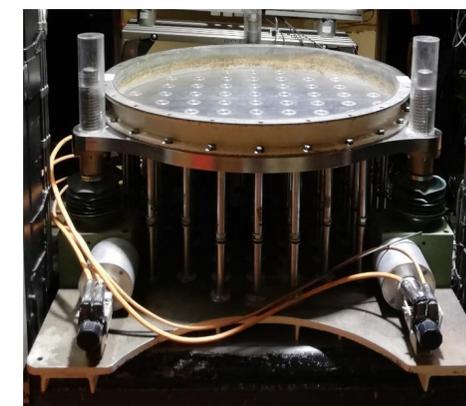
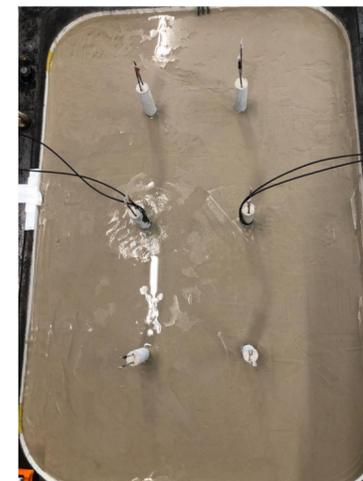
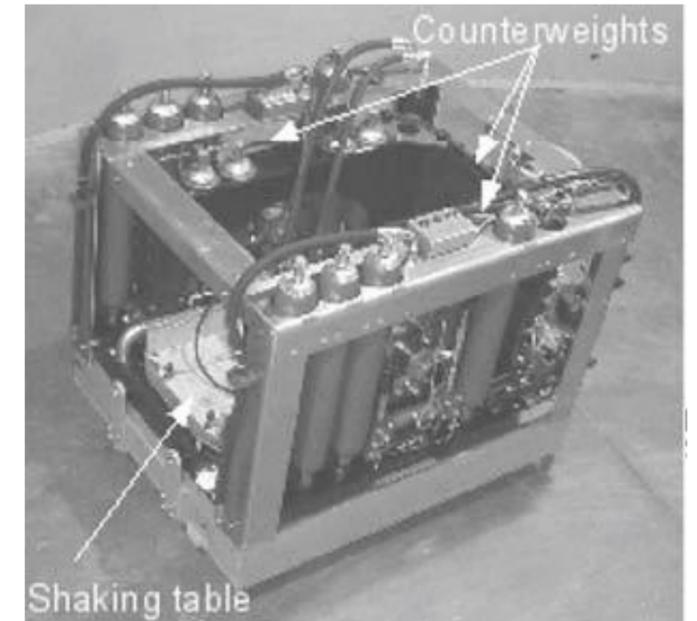
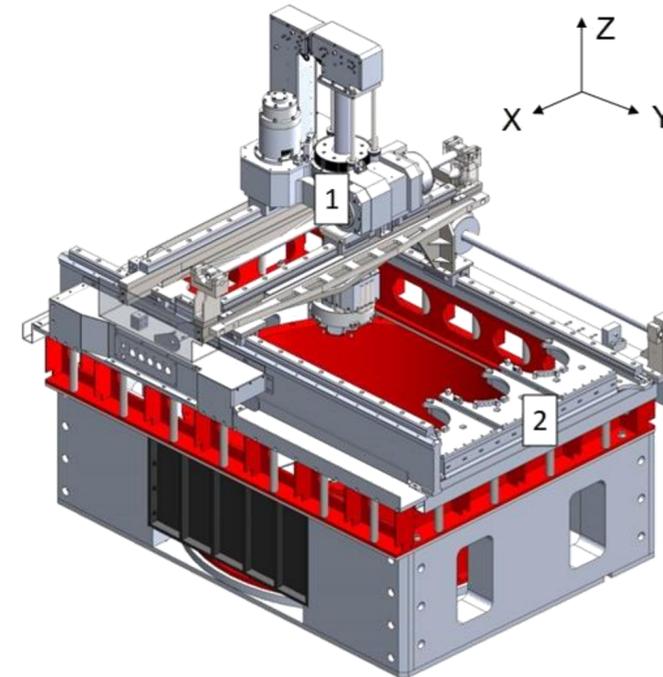
- Patrick GAUDICHAU
- Philippe AUD
- Stephane LERAT
- Alain NEEL
- Alexandre JAGU

### ➤ Post Doctorants

- Cristian SORIANO-CAMELO
- Chedid SAADE

### ➤ Doctorants

- Eva KHAMIS
- Charbel NOHRA



Amélioration des Sols par Inclusions Rigides: Application aux fondations d'éoliennes sous chargements sismiques

09 janvier 2024

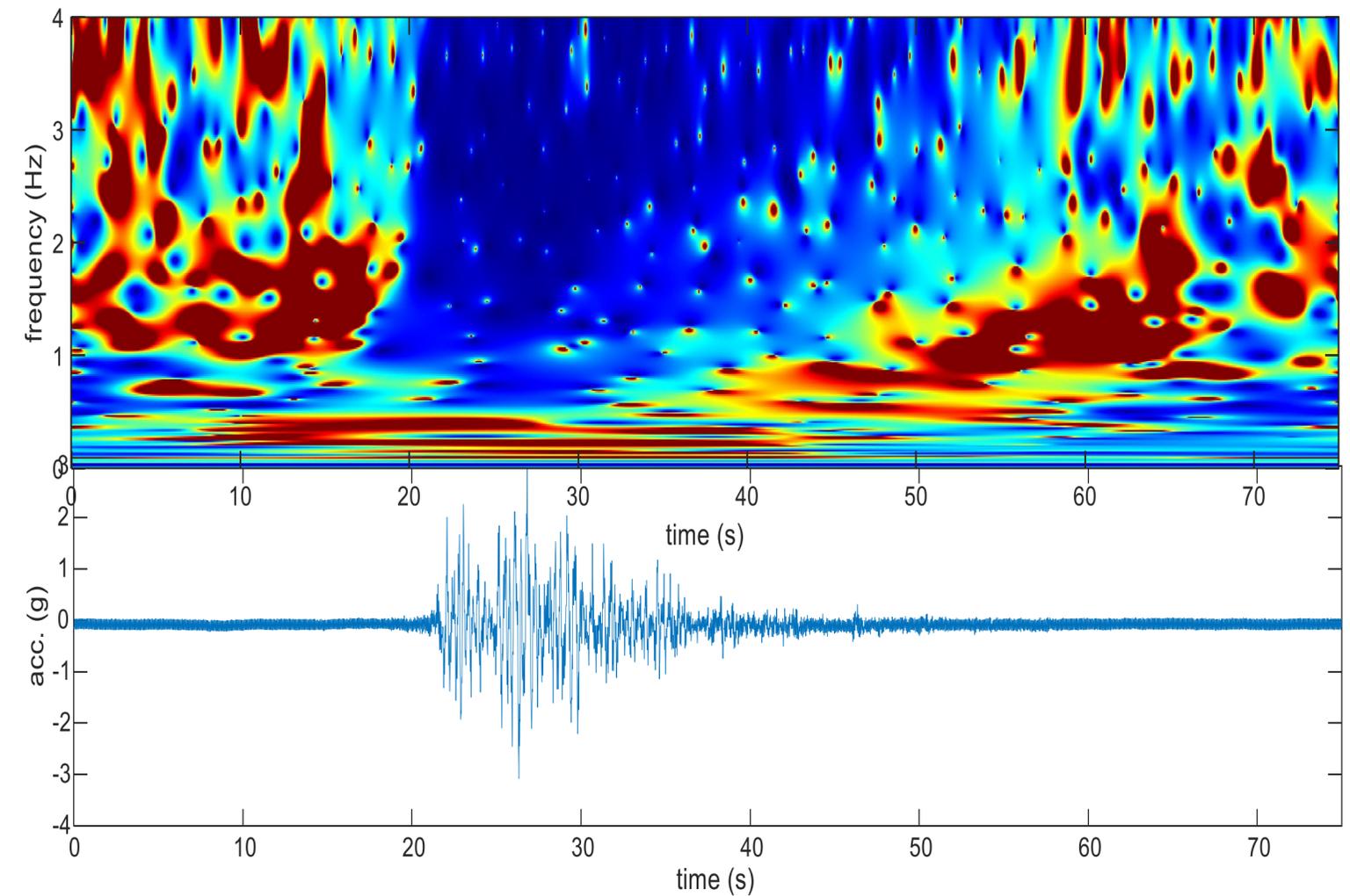
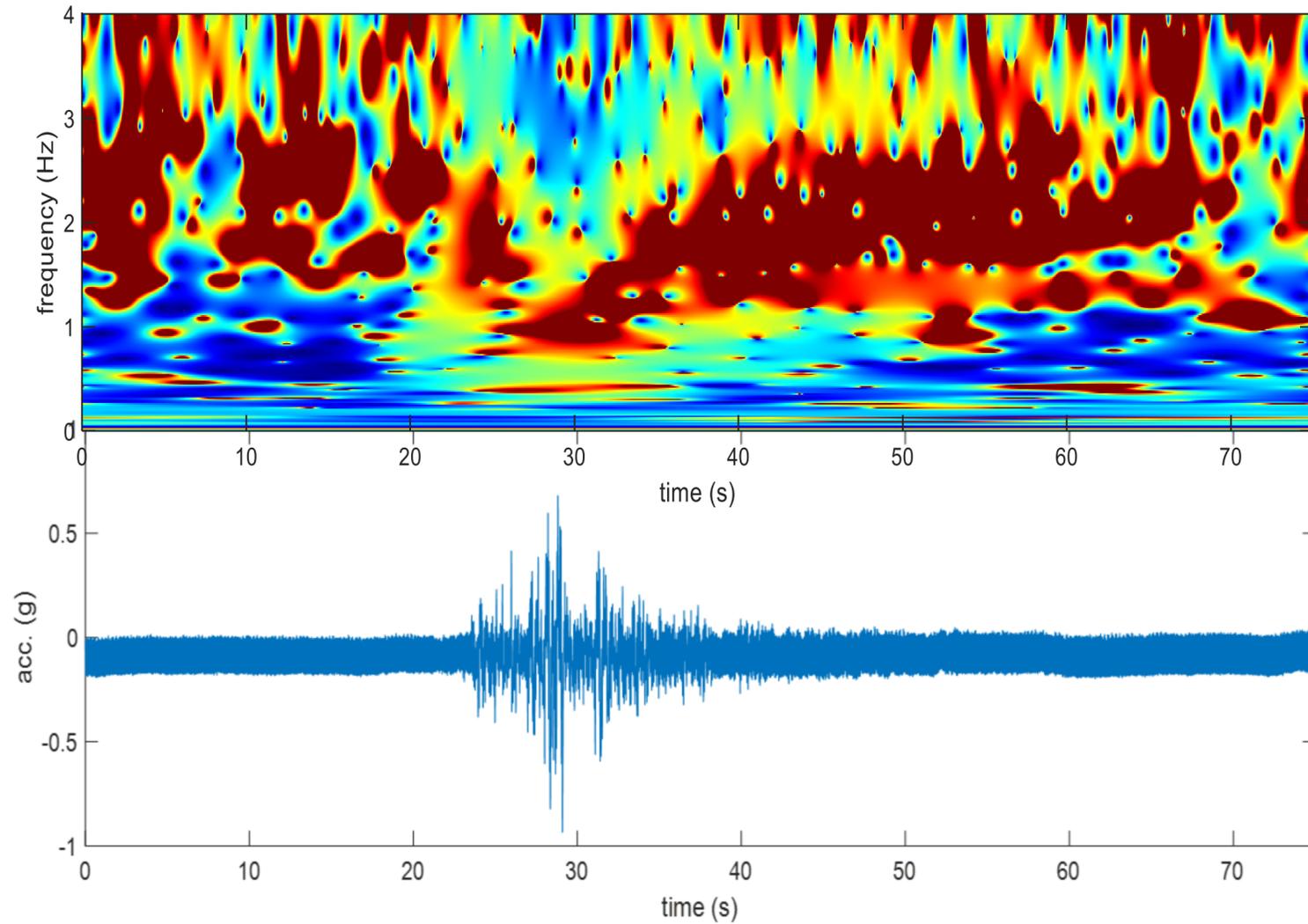


**cfms**

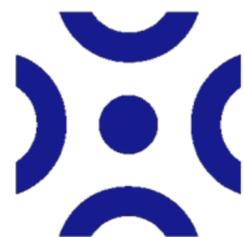
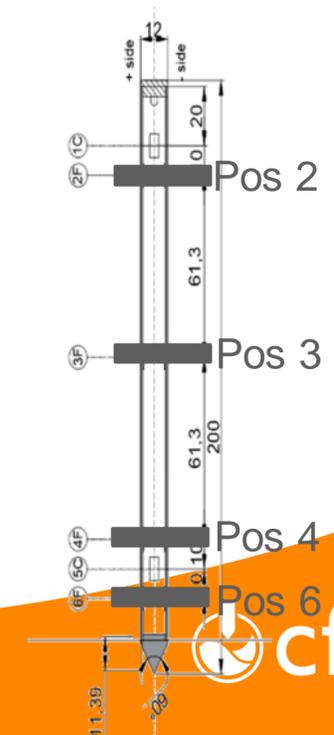
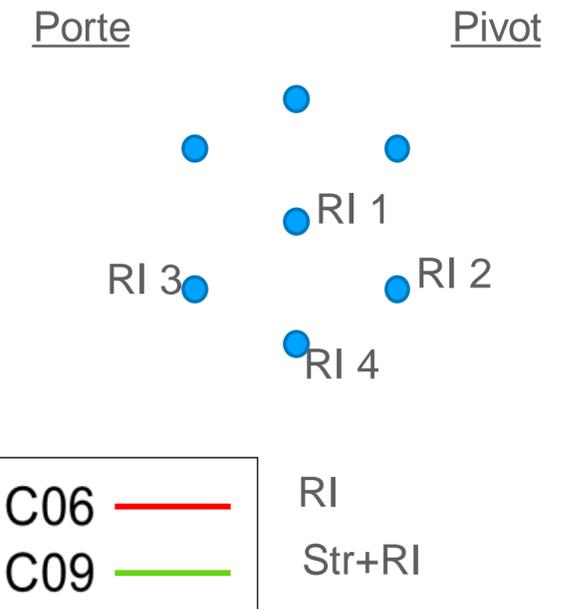
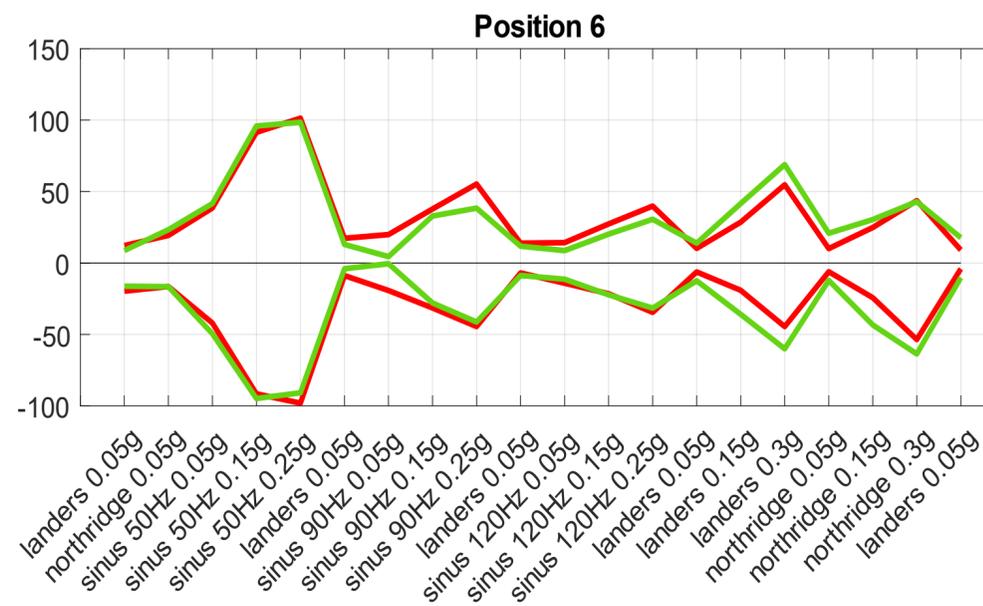
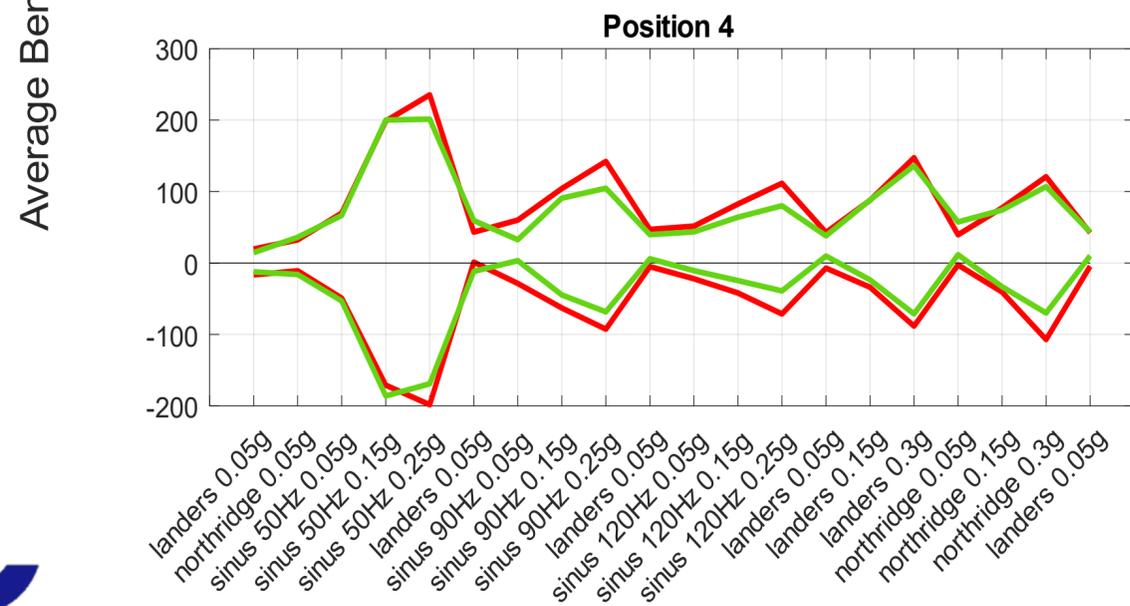
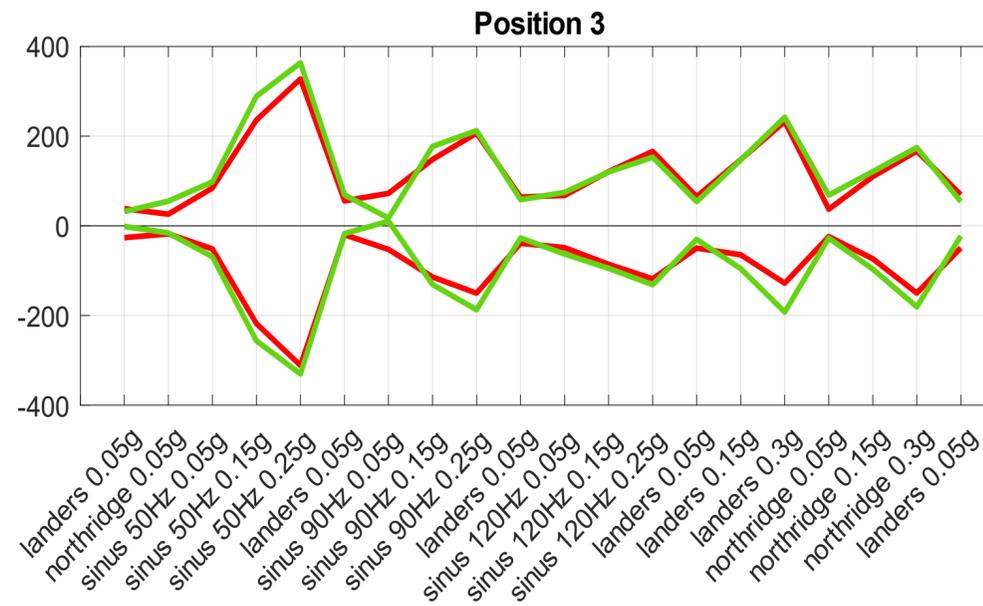
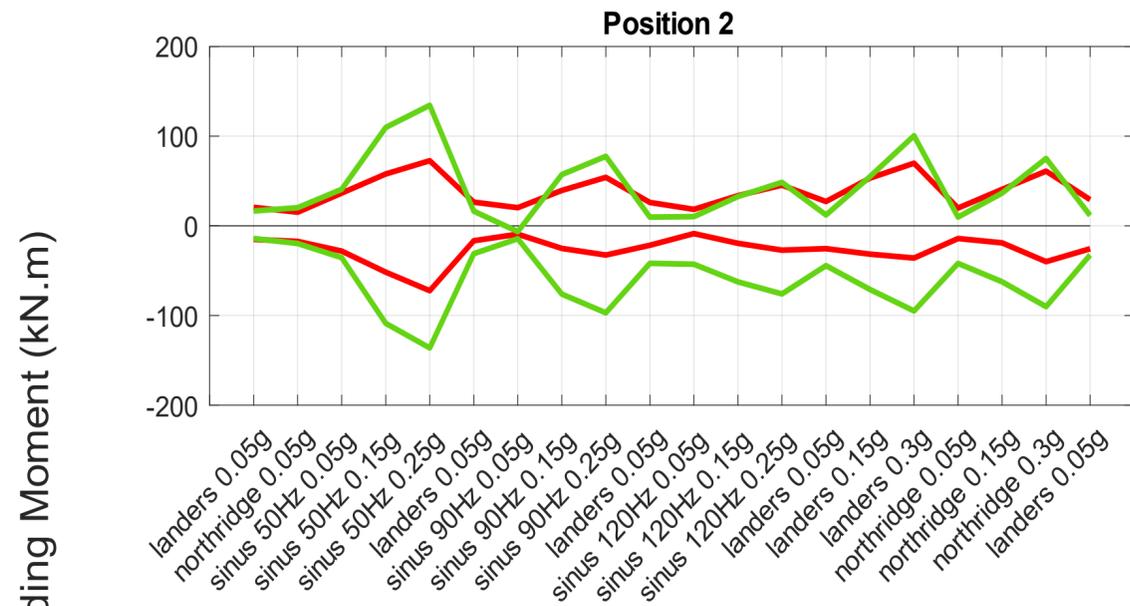
COMITÉ FRANÇAIS DE MÉCANIQUE  
DES SOLS ET DE GÉOTECHNIQUE

**Merci de votre  
attention.**

# Non-linéarité dans le sol

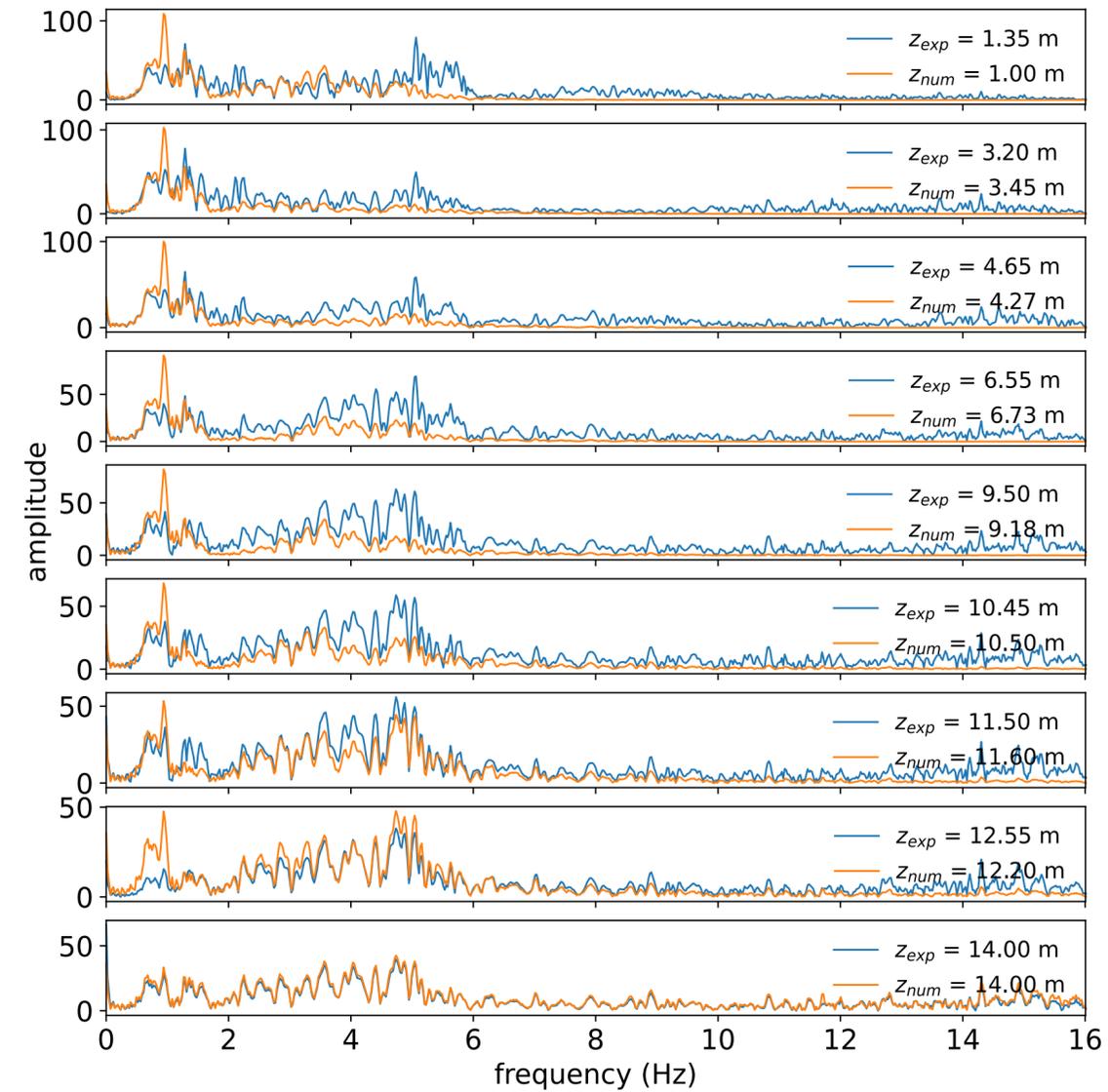
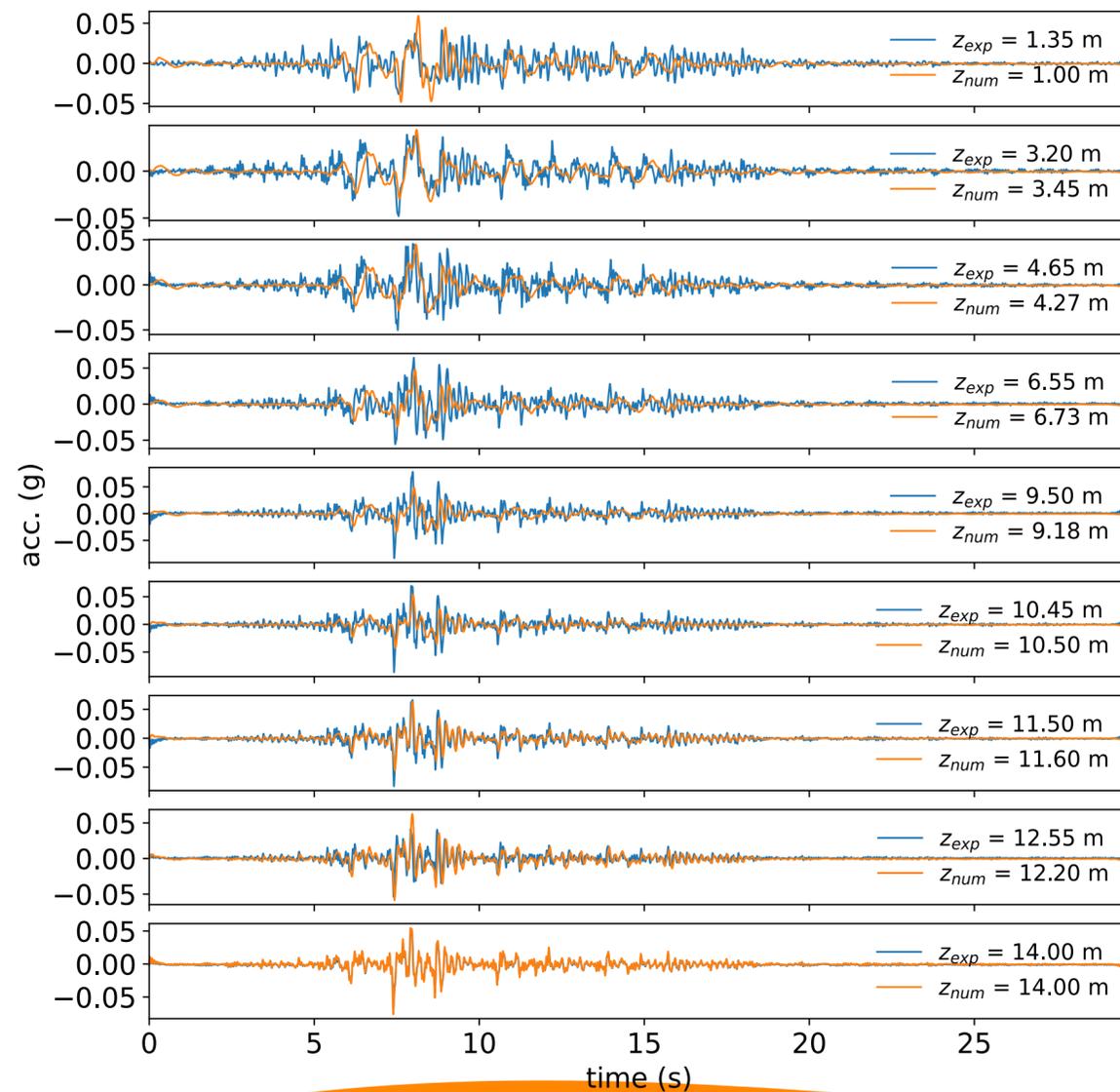


# Moments dans les IRs



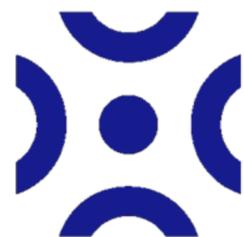
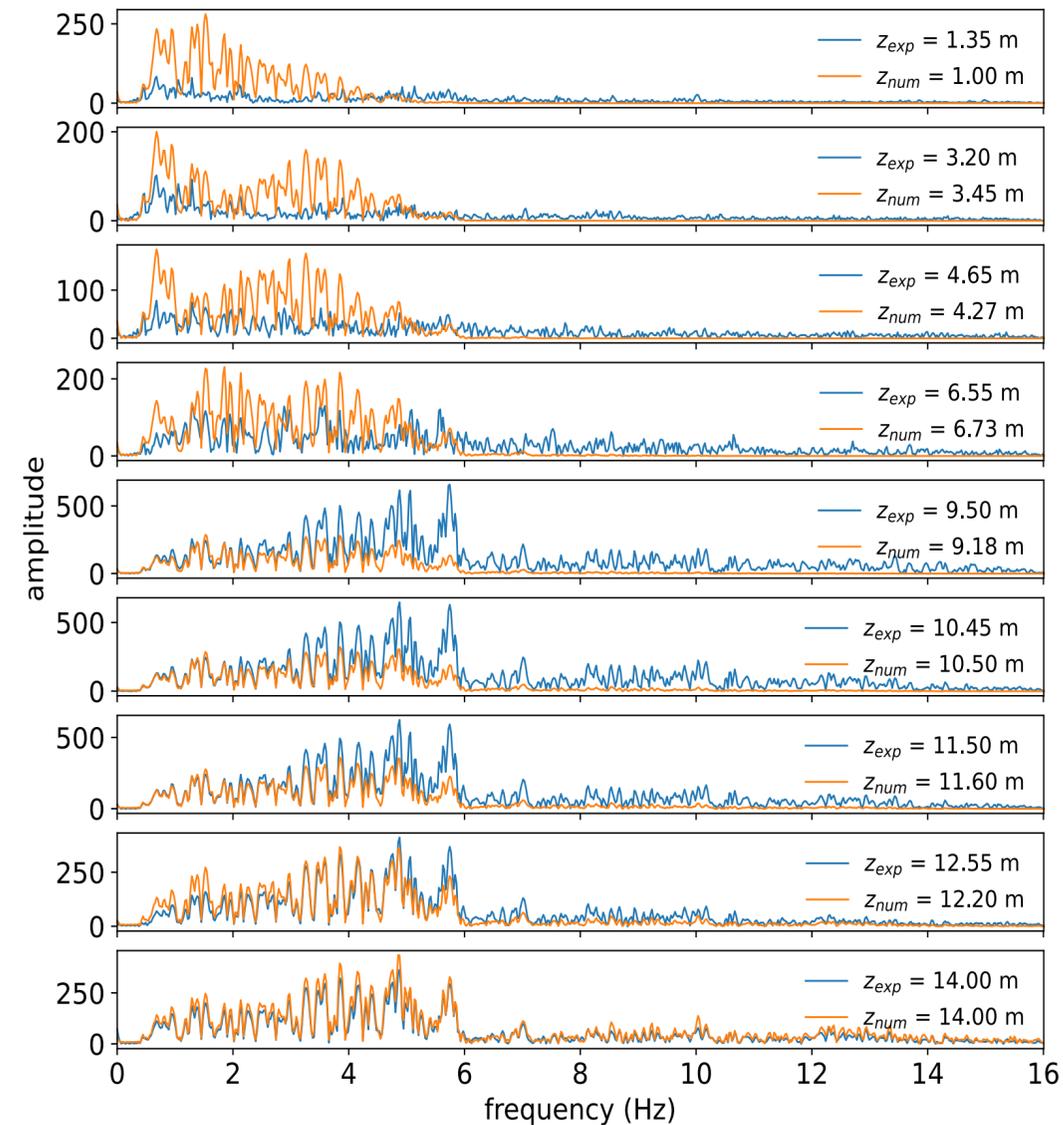
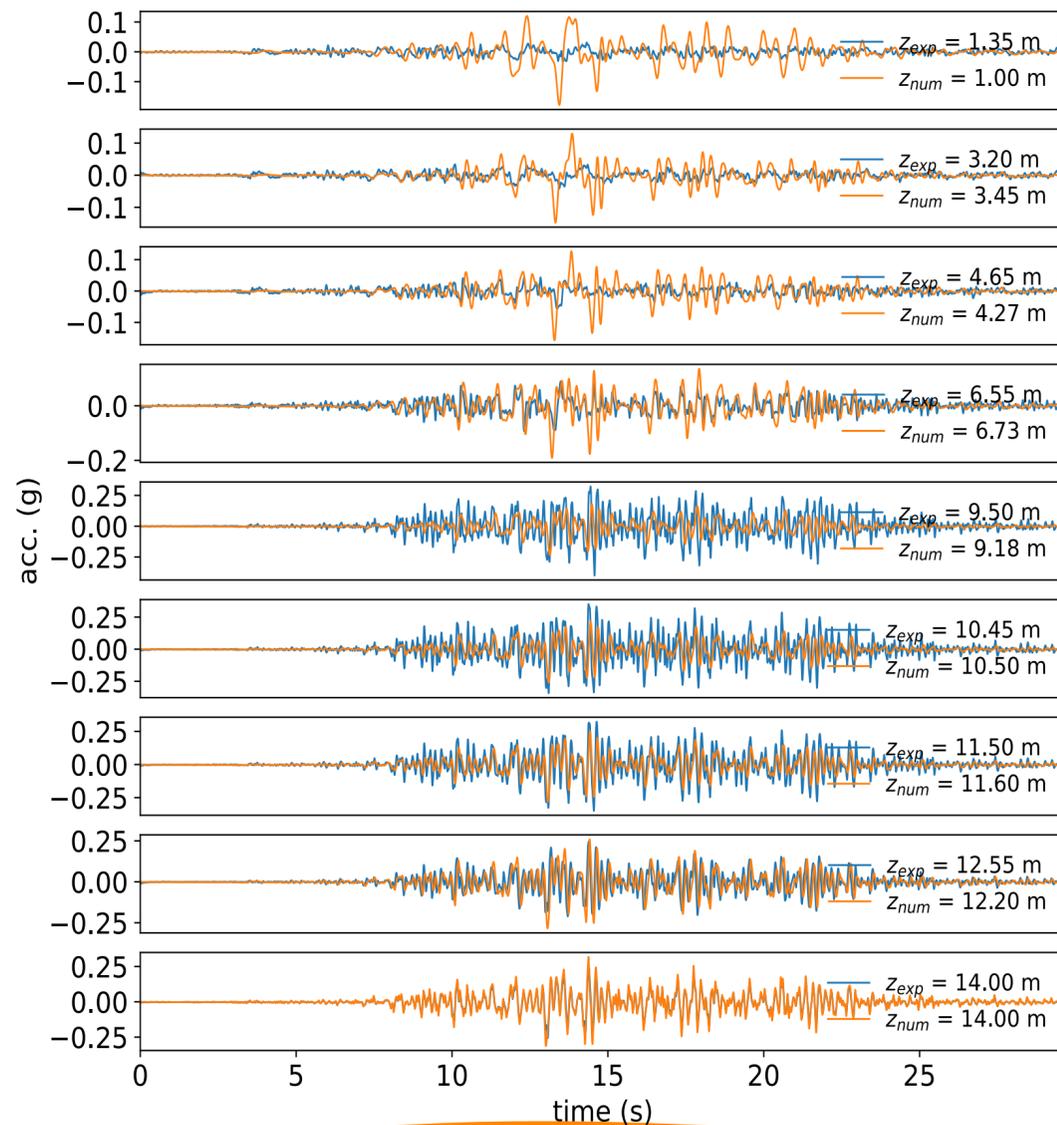
# Modèle numérique

- Landers 0,05g

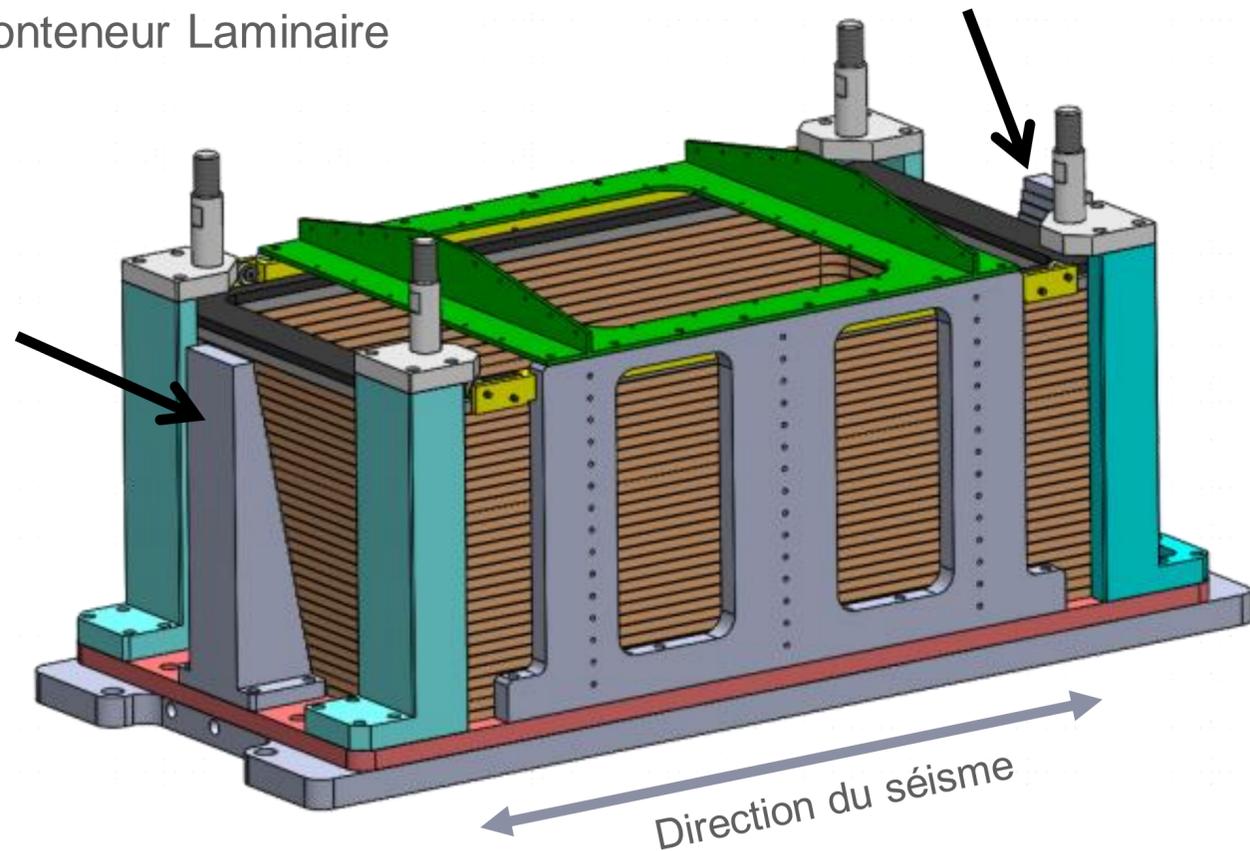


# Modèle numérique

- Landers 0,3g



Conteneur Laminaire



(Li et Escoffier, 2020)

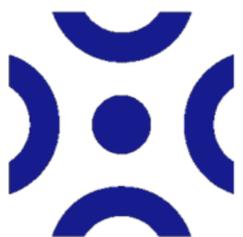
## Avantages

- Réponse du système contrôlée par celle du sol

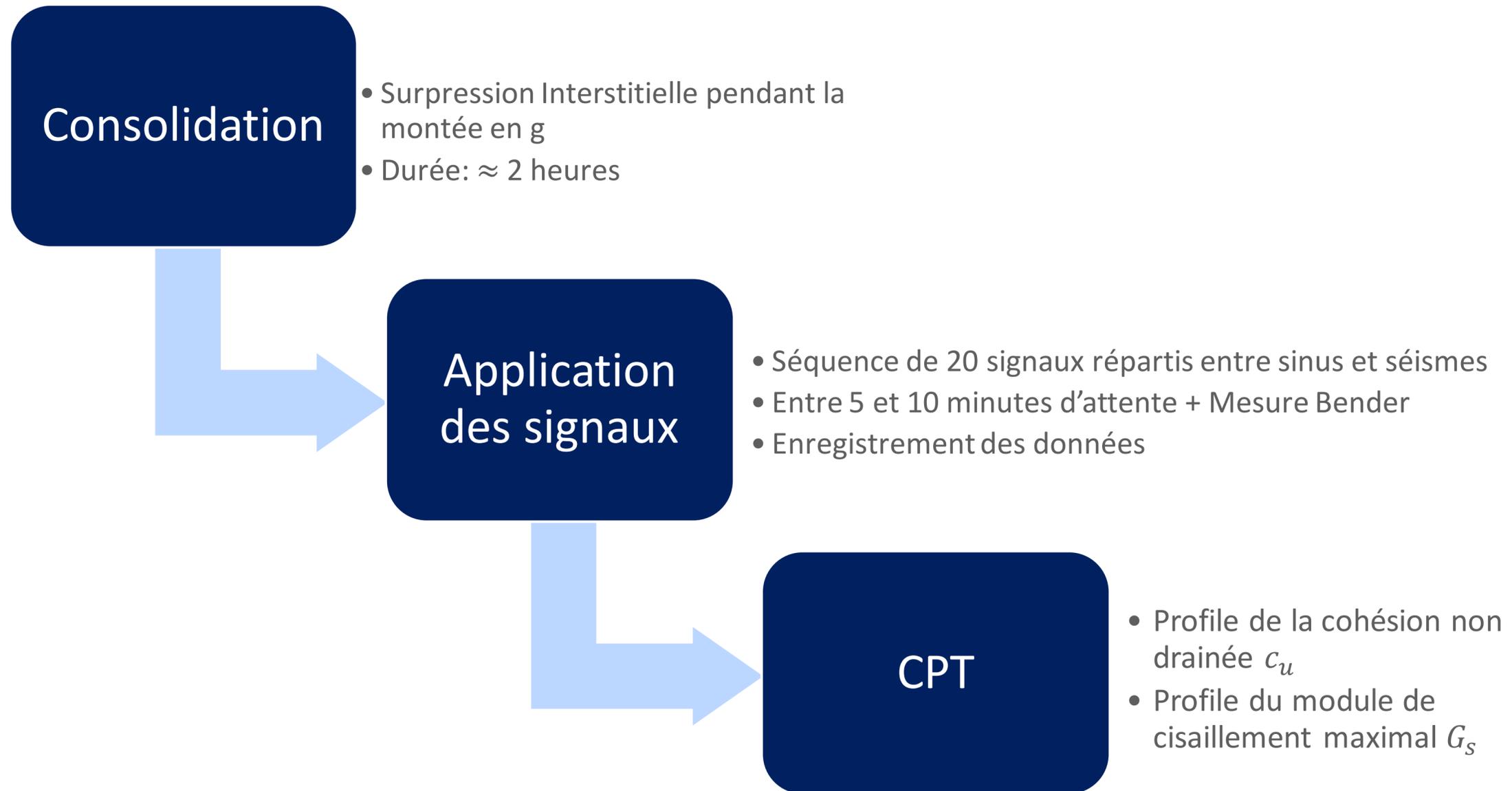
## Caractéristiques

- Lames rectangulaires superposées et séparées par des joints
- Masse faible pour diminuer les effets inertiels
- Rigidité minimale pour garantir la condition du sol au repos (condition  $K_0$ )
- Déplacement latéral maximal contrôlé

(Esmailpour et al., 2023)

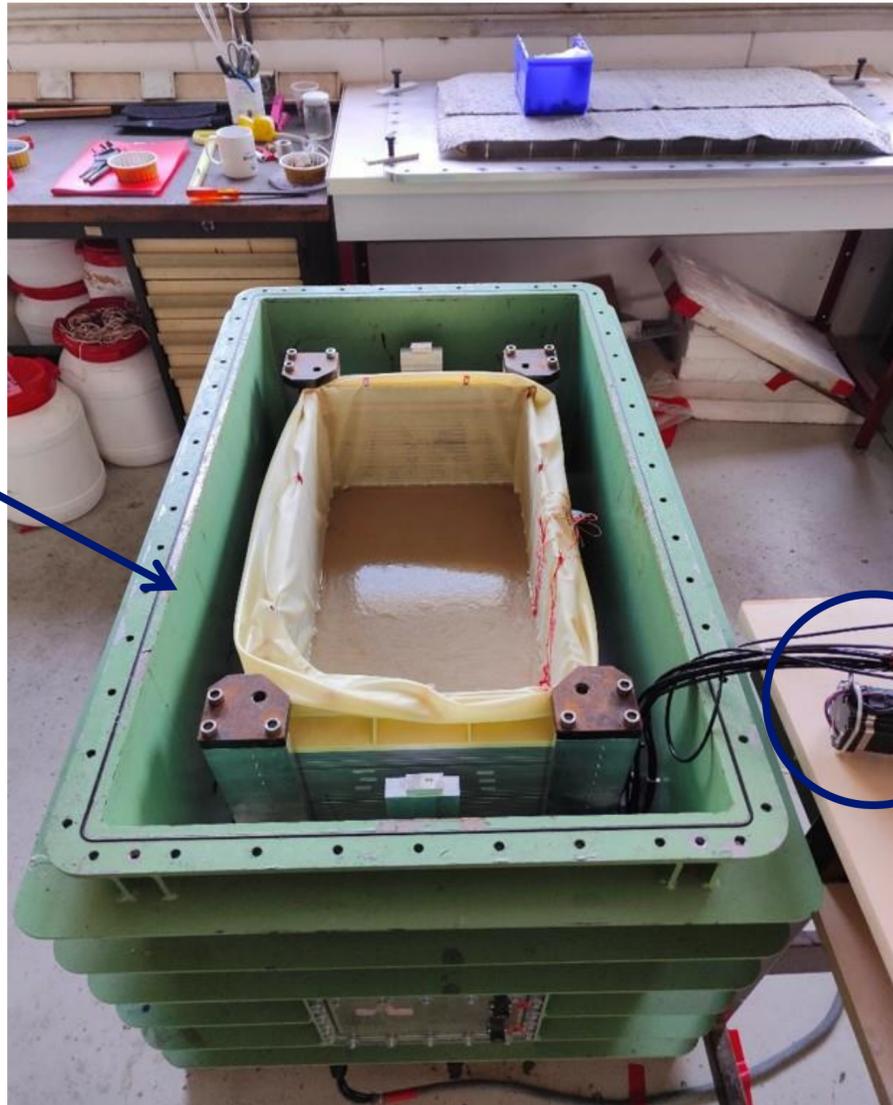


# Déroulement de l'essai



# Préparation du massif

## Couche inférieure



### Procédure

- Application d'une pression négative
- Injection de CO<sub>2</sub> (plus soluble dans l'eau que l'air)
- Injection d'eau à travers un piège à bulle

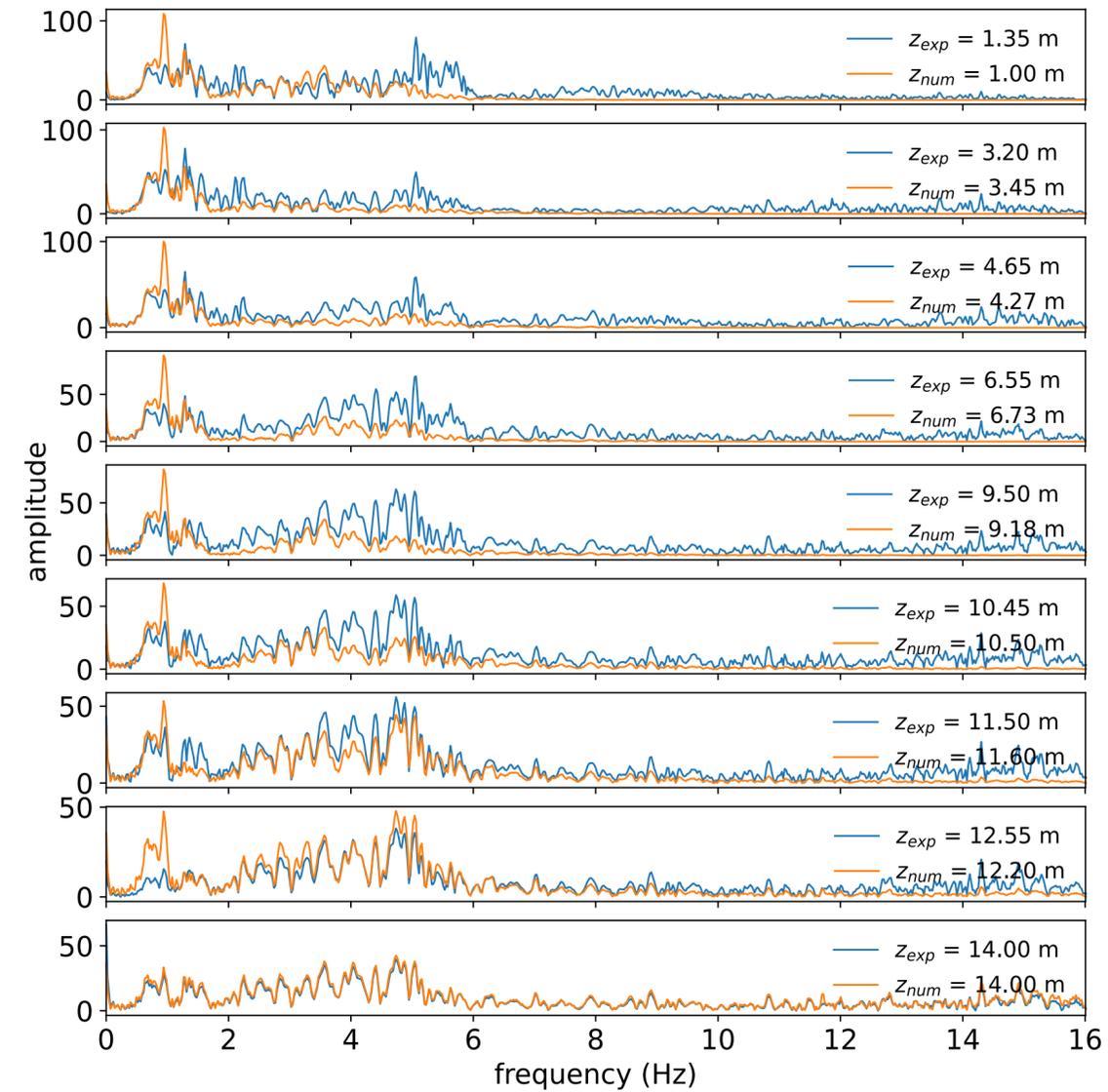
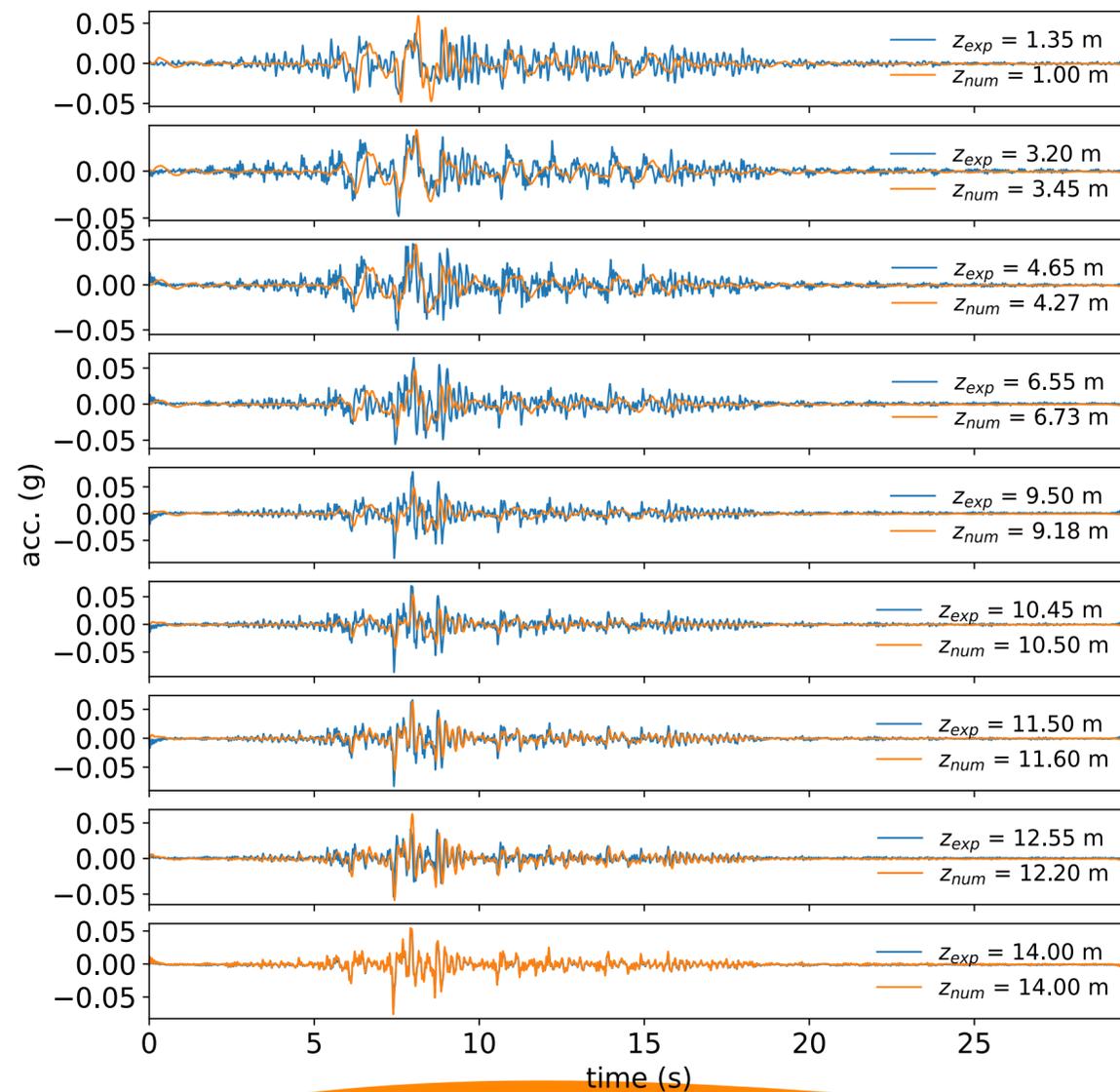
Deux fois

(Kutter, 2013)

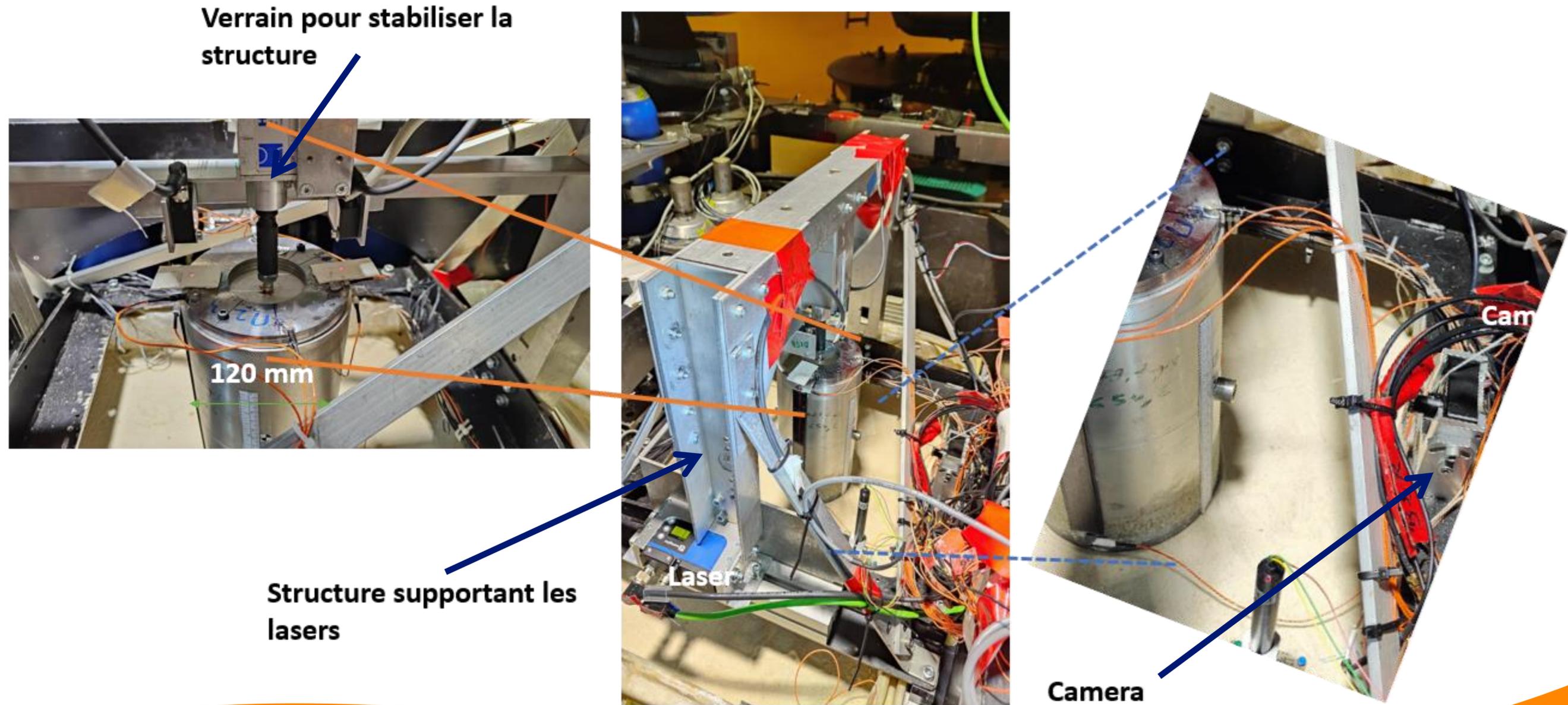


# Résultat préliminaire

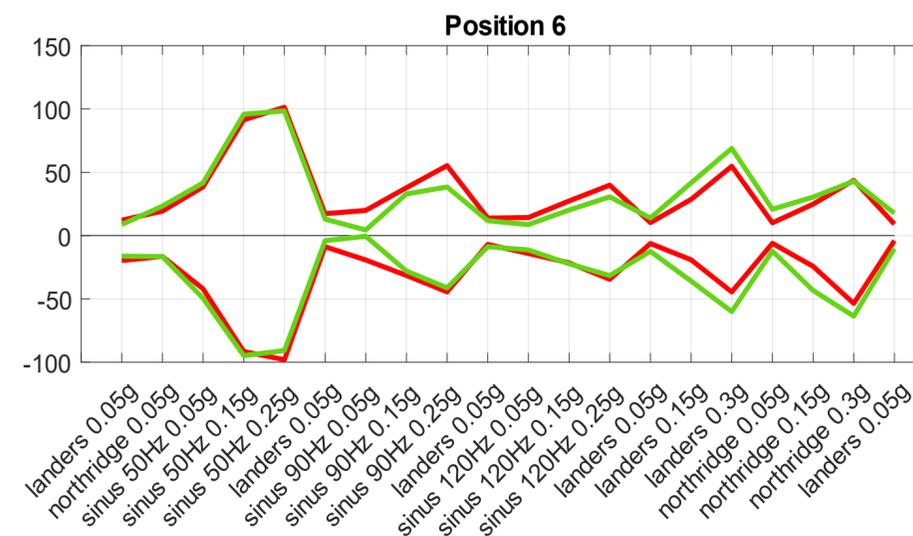
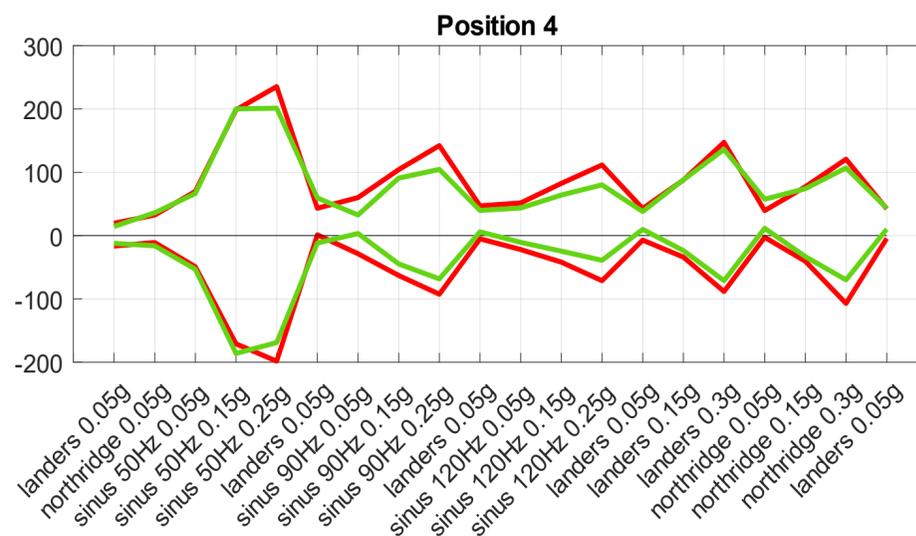
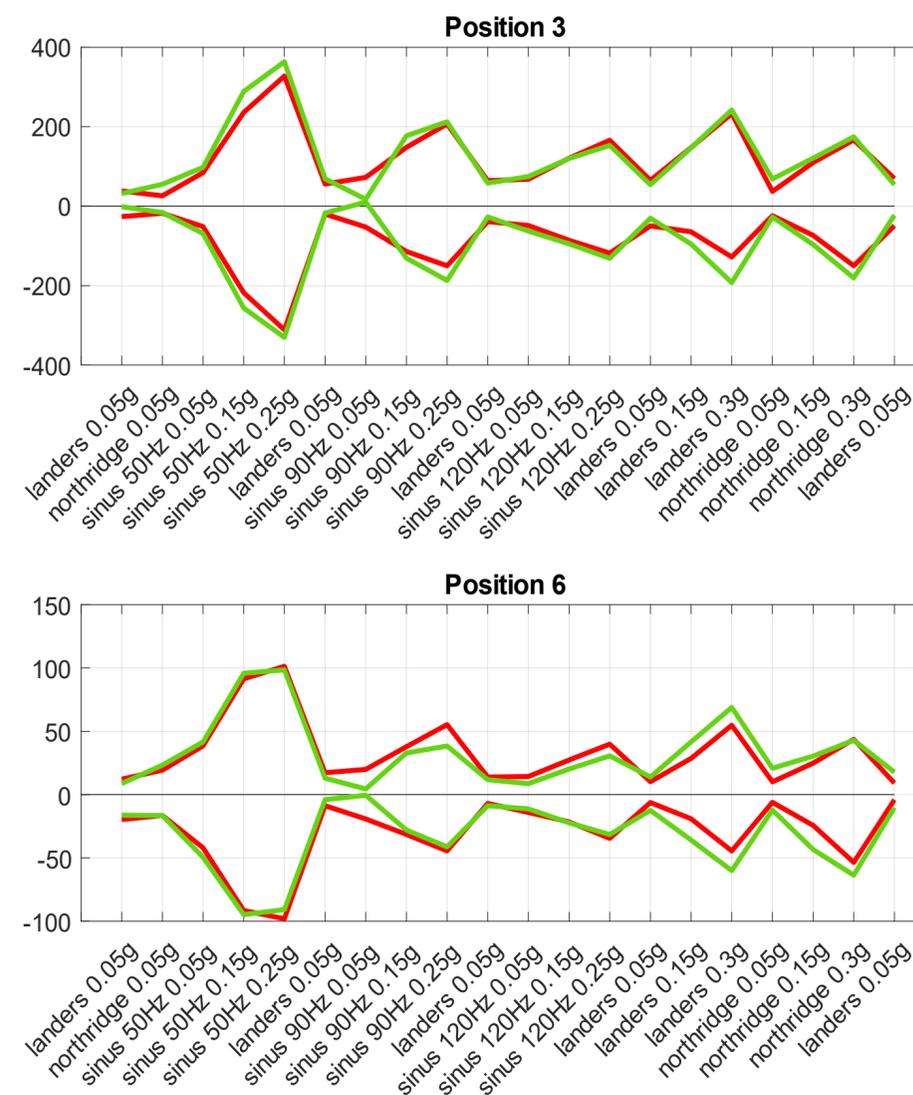
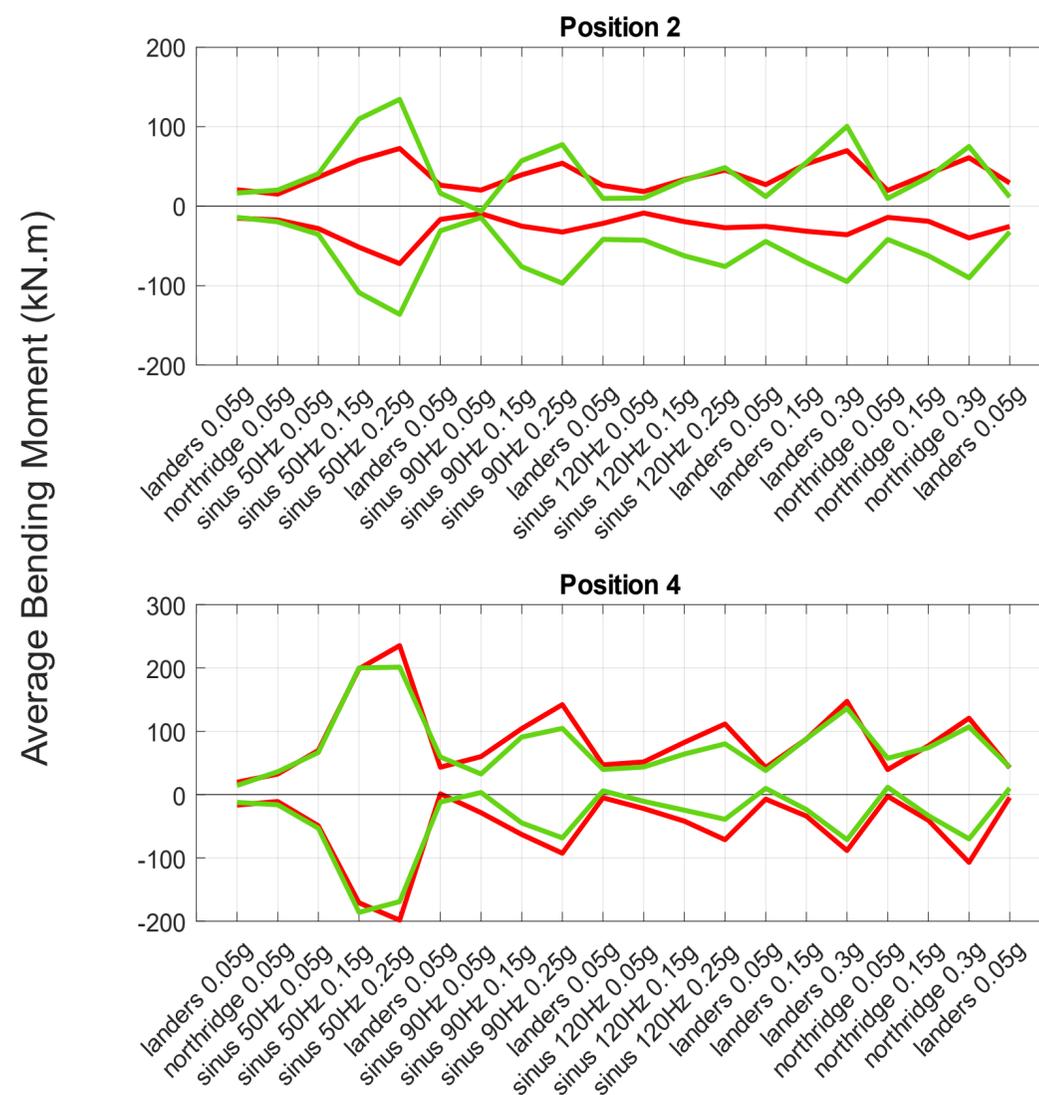
- Landers 0,05g



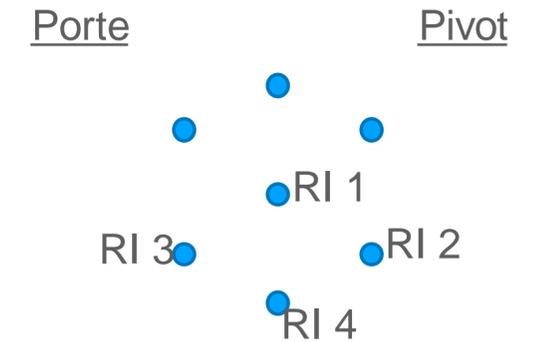
# Installation de la Structure



# Quelques résultats: Moments des IR

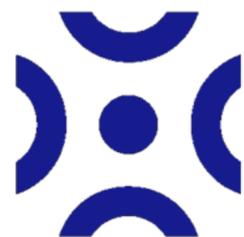
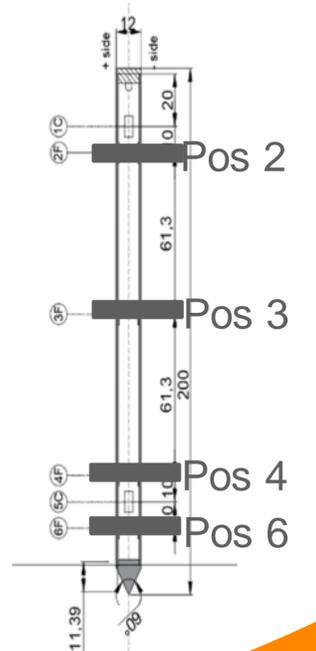


Input signal

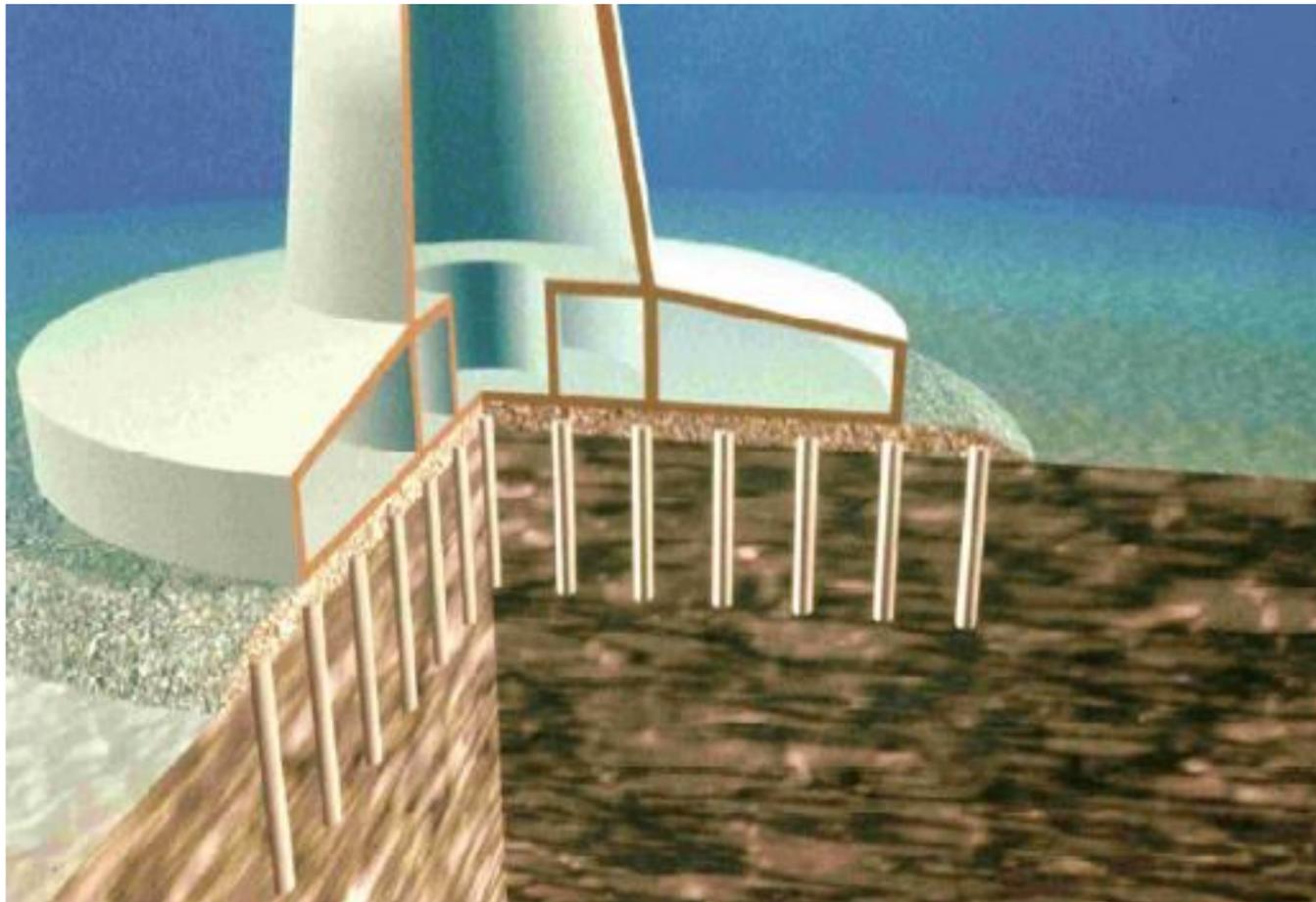


— RI

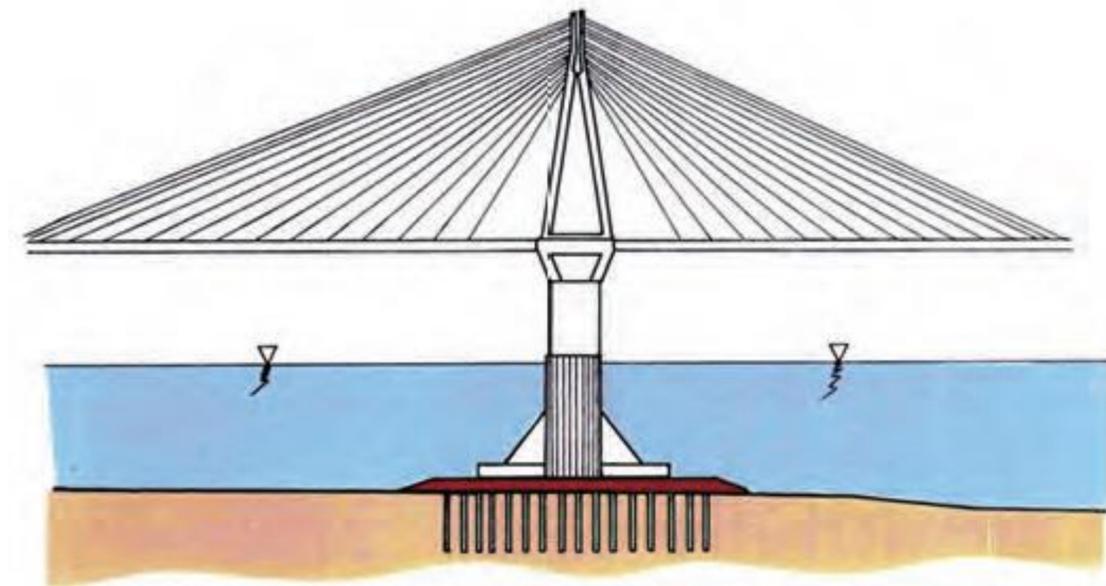
— Structure + RI



# Pont Rion-Antirion



- Pile du pont de diamètre 90 m
- Entre 150 et 200 IR installées sous chaque pile
- PTC épaisseur 2,8 m
- Inclusions L = 25 – 30 m et D = 2 m



(Pecker, 2004; ASIRI Recommendations, 2012)

