



CARACTÉRISATION DES DIGUES PAR LA MÉTHODE SISMIQUE MASW

—

MESURES EN ENVIRONNEMENT CONTRÔLÉ ET SIMULATIONS 3D POUR ÉVALUER L'INFLUENCE DE LA GÉOMÉTRIE DES OUVRAGES

EDF R&D

IDEFIX – 16 mai 2023

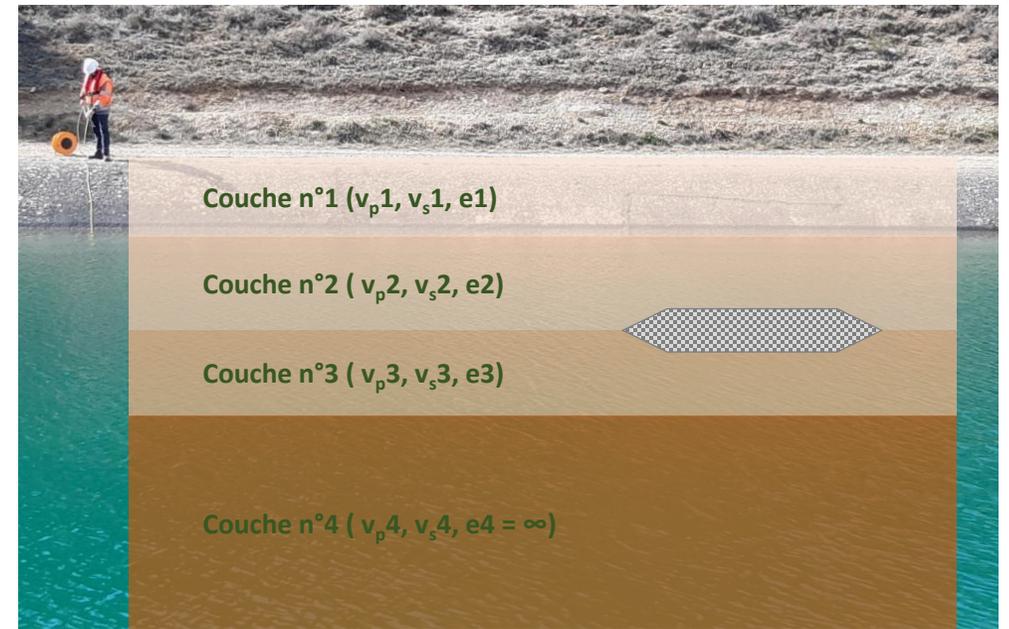
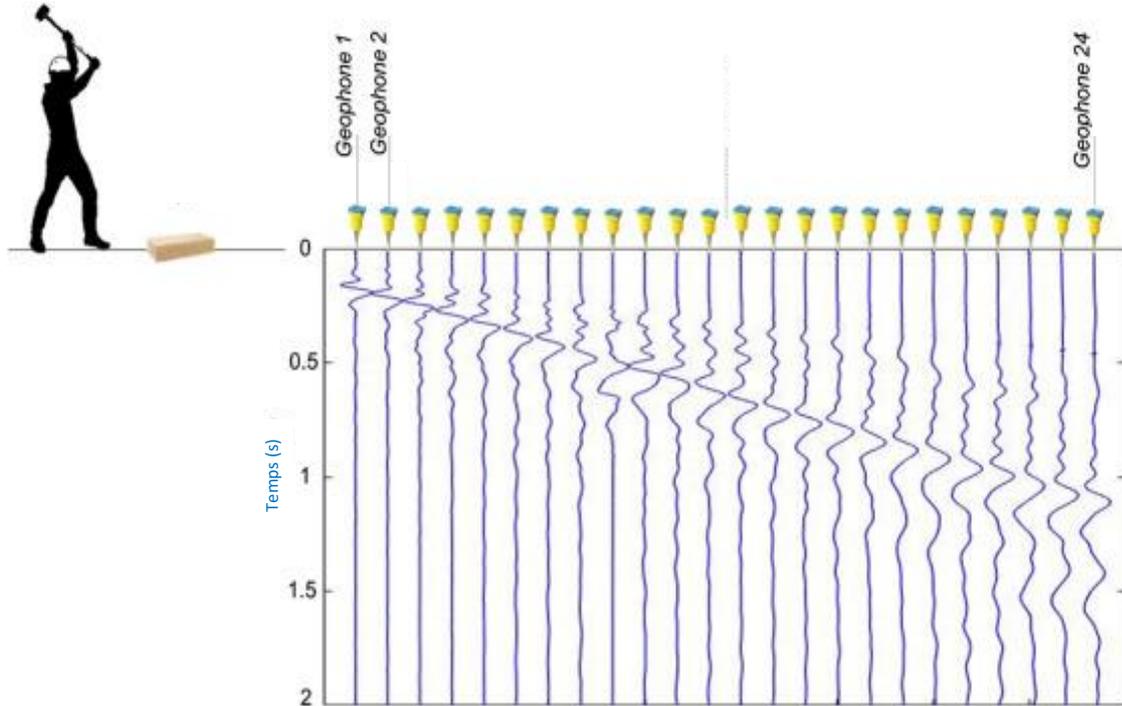


Contexte de l'étude

Reconnaissance de digues → imagerie du sous-sol :

- Caractérisation mécanique des couches de sol
- Détection de « lentilles »

Méthodes « grand rendement » → méthode sismique



Ex : canal EDF de la Durance (long. > 200 km)



Contexte projet : enjeu et méthode

Méthode MASW = Multi-Channel Analysis of Surface Waves

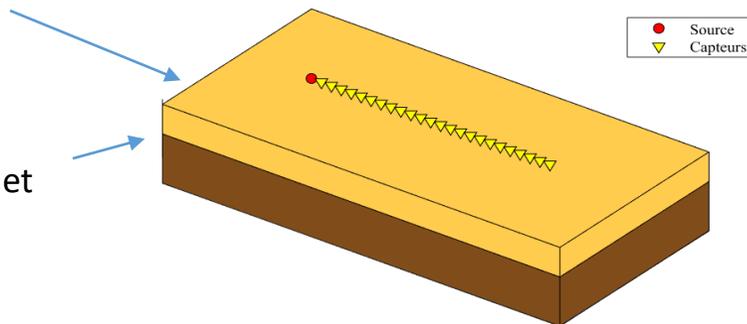
Principe : mesure de la vitesse de l'onde de surface en fonction de la fréquence

- Hautes fréquences → caractérisation des couches superficielles
- Basses fréquences → caractérisation des couches profondes

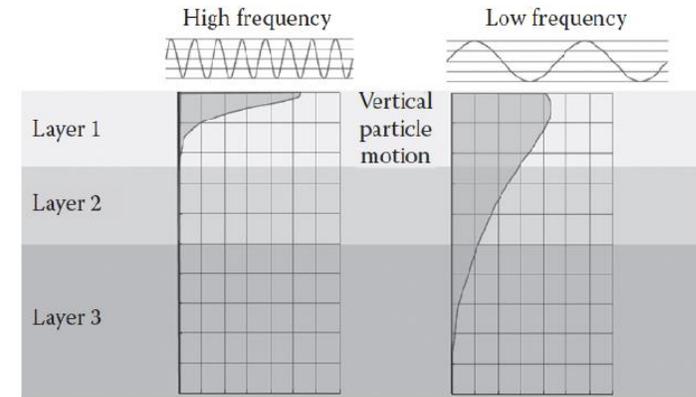
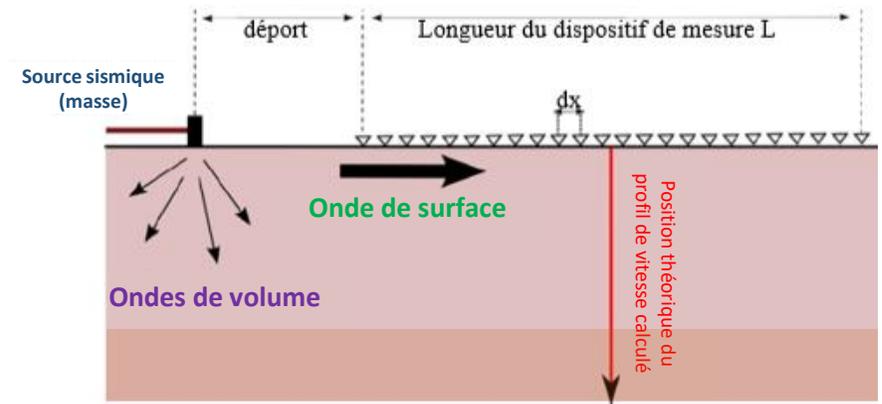
Hypothèse sous-jacente : milieu semi-infini tabulaire

Surface sol plane et horizontale

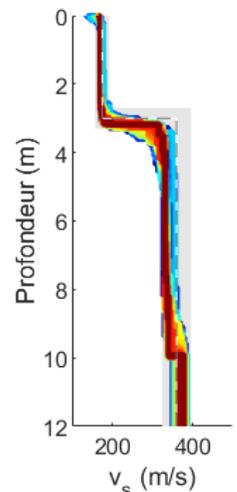
Interfaces planes et horizontales



→ Impact de la géométrie 3D des digues ?



→ **Résultat** : profil des caractéristiques mécaniques en fonction de la profondeur



Problématique

Hypothèse sous-jacente : milieu semi-infini tabulaire

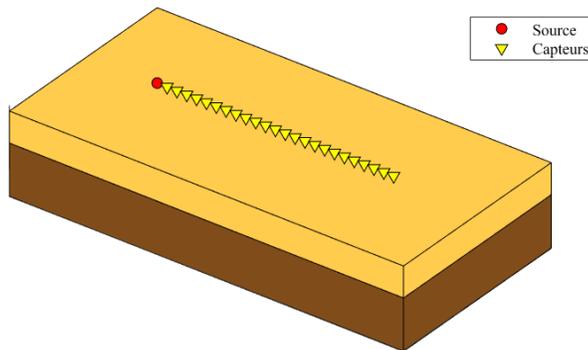
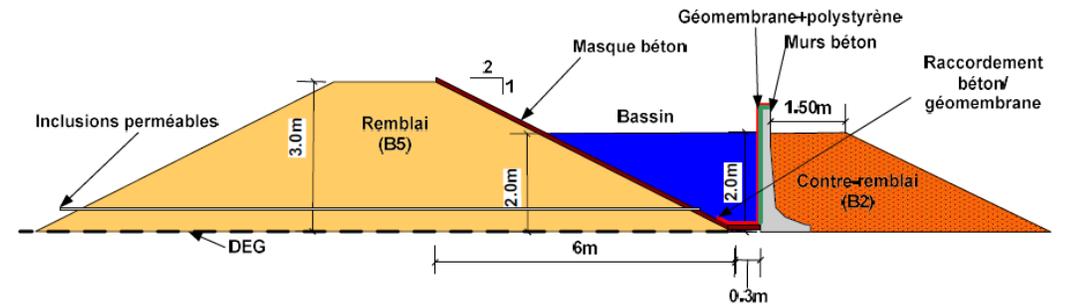
→ Impact de la géométrie 3D des diges ?

Recours à la simulation numérique :

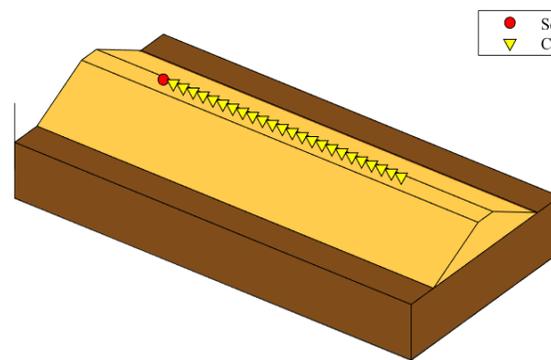
- Plusieurs configurations sans / avec géométrie 3D
- Pour chaque configuration : simulation d'une acquisition sismique
- Analyse des signaux et comparaison des résultats

Cas d'étude : maquette de digue de Rouen

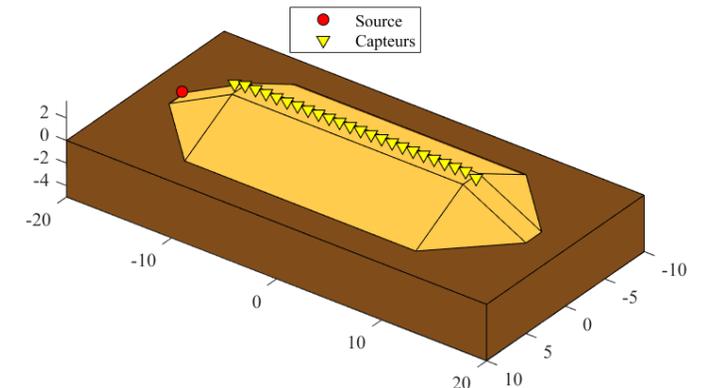
✓ Géométrie ouvrage et conditions maîtrisées



« Milieu tabulaire »



« Digue filaire »



« Géométrie 3D »

Modélisation en éléments finis avec code_aster

- ✓ Evaluation faisabilité et intérêt de la simulation avec code_aster, dans la gamme de fréquence pertinente pour la MASW

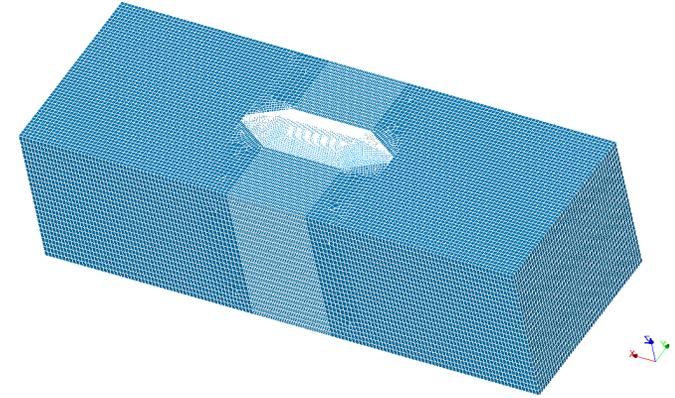
Etude réalisée en deux temps :

I. Validation de l'outil de simulation

Comparaison des résultats de simulation à des mesures réelles (en temporel et en fréquentiel)

II. Etude paramétrique à partir de différentes configurations

Influence de la géométrie et d'autres paramètres (positionnement du dispositif de mesure)



Validation de l'outil de simulation

Modèle numérique #1 : géométrie 3D

- Analyse en domaine fréquentiel- excitation uniforme entre 1-200 Hz
 - Calcul de fonction de transfert puis convolution avec signal source et IFFT
- Frontières absorbantes
- Maillage quadratique
 - Digue : tetra ($\Delta = 0.5$ m),
 - Sol : héxa ($\Delta = 1.0$ m horizontal, 1.5 m vertical)
- Amortissement hystérétique AH = 0,2 (choisi après analyses)

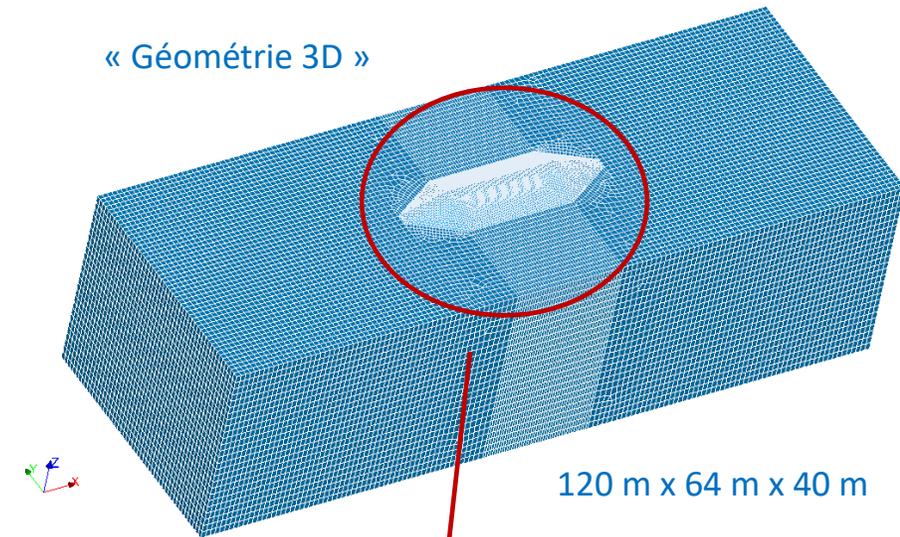
$$\Delta \sim \lambda / 2.5$$

Propriétés matériaux				
Digue h = 3 m	$v_p = 303$ m/s	$v_s = 175$ m/s	$\nu = 0,25$	$\rho = 1600$ kg/m ³
Sol	$v_p = 720$ m/s	$v_s = 360$ m/s	$\nu = 0,33$	$\rho = 2000$ kg/m ³

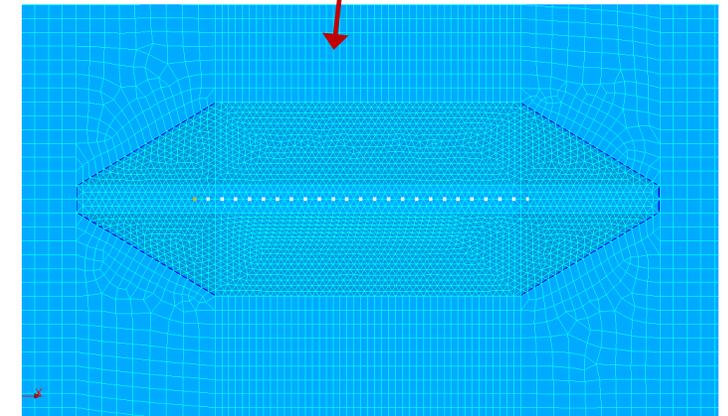
- Calcul parallèle sur plusieurs processeurs sur serveur cronos

$$\lambda = V_s / f_{\max}, \text{ ici } f_{\max} \sim 180\text{Hz}$$

« Géométrie 3D »



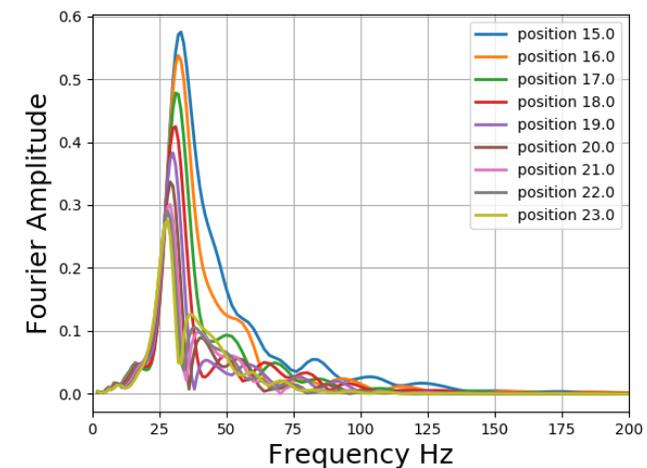
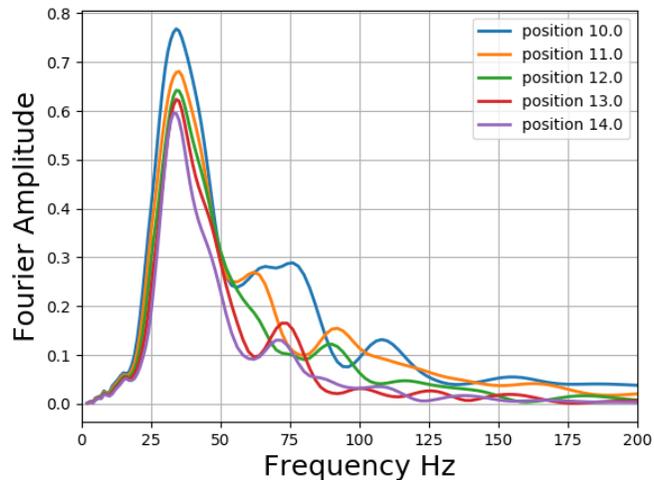
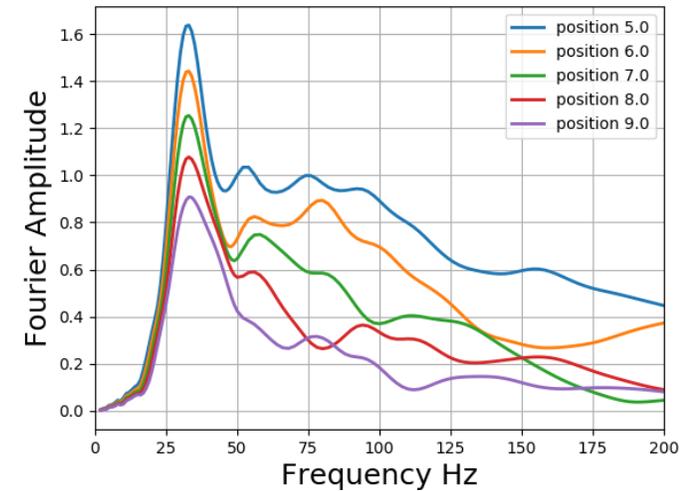
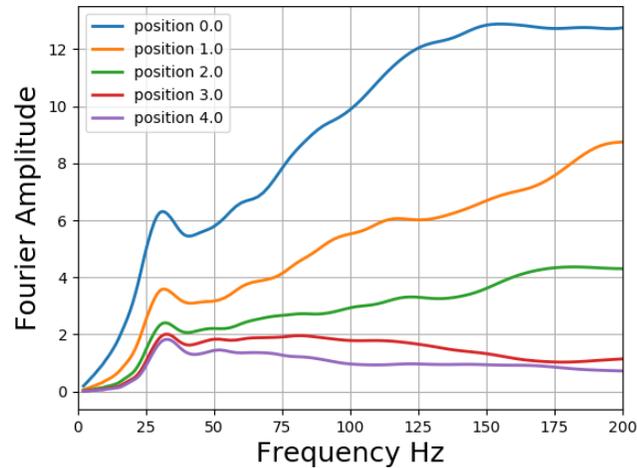
120 m x 64 m x 40 m



Zoom vue dessus avec capteurs (distance entre capteurs = 1 m)

Validation de l'outil de simulation

- Evolution des fonctions de transfert à différentes distance (1 m – 24 m)

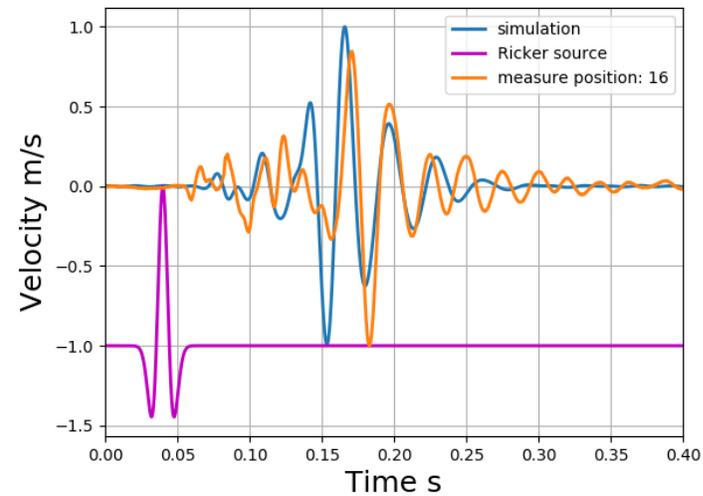
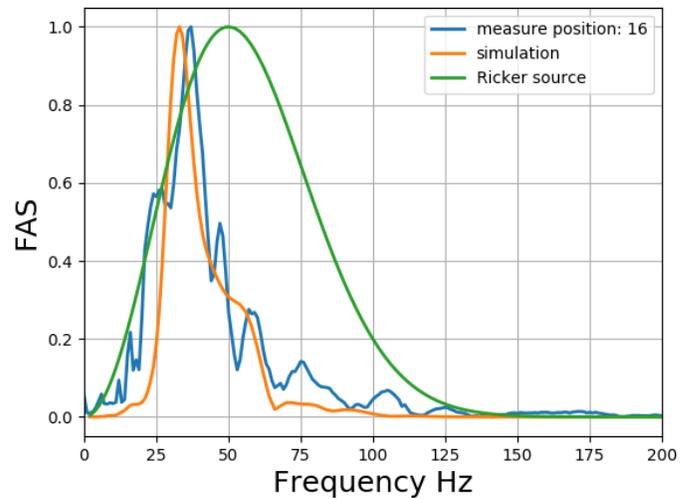
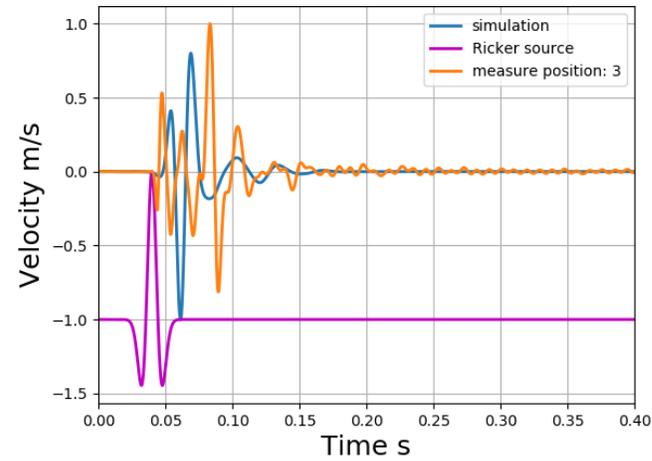
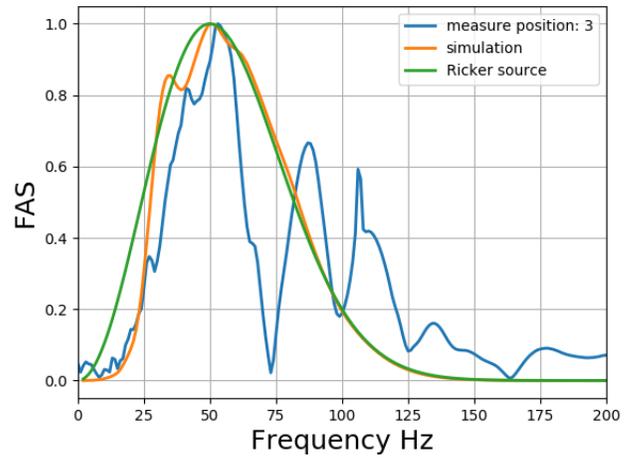
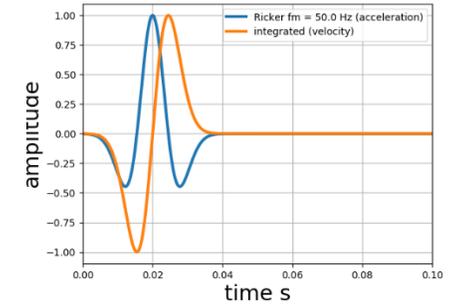




Validation de l'outil de simulation

Signal source idéalisé
(Ricker 50 Hz)

- Comparaison mesures/simulation en fréquentiel et en temporel

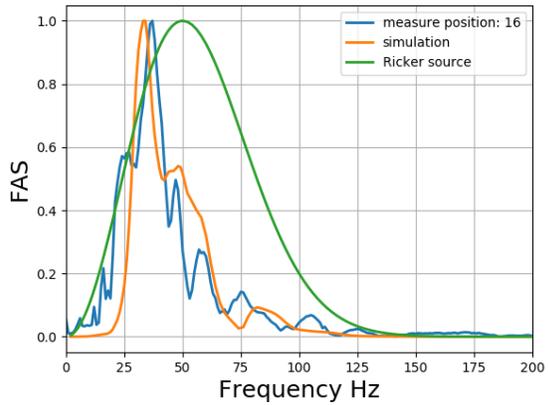




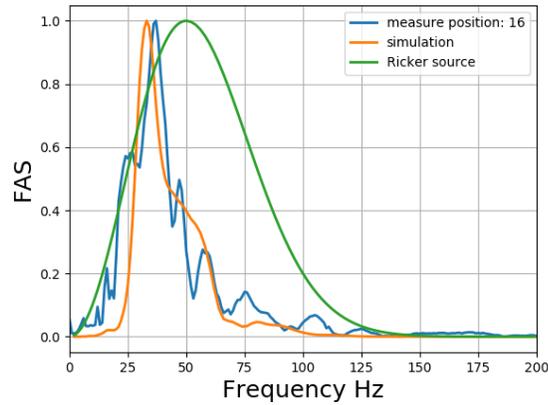
Validation de l'outil de simulation

Impact amortissement $Q = \frac{1}{AH} = \frac{1}{2\xi}$

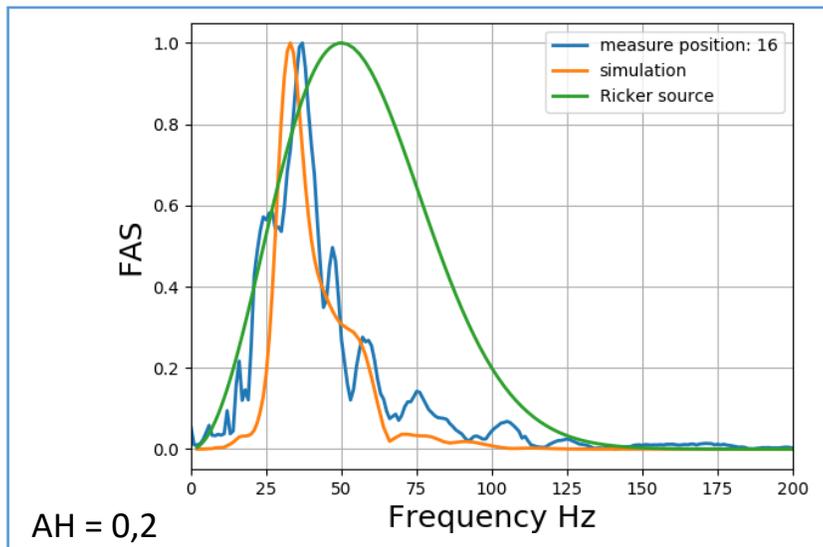
Distance 16m



AH = 0,1

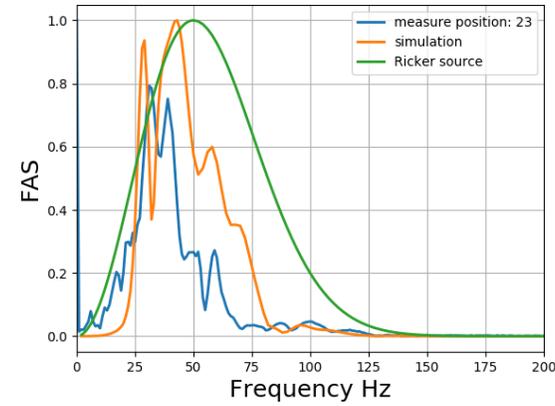


AH = 0,15

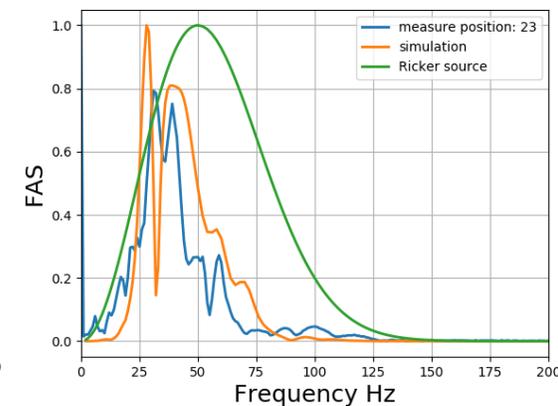


AH = 0,2

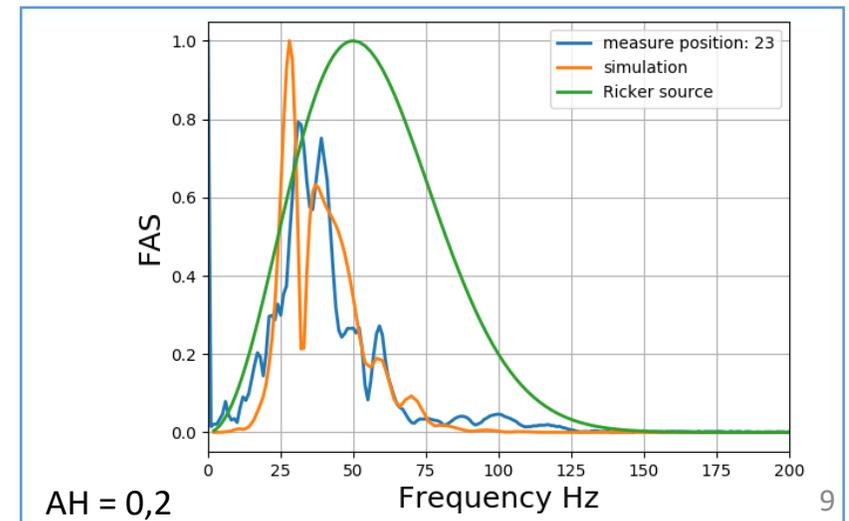
Distance 23m



AH = 0,1



AH = 0,15



AH = 0,2

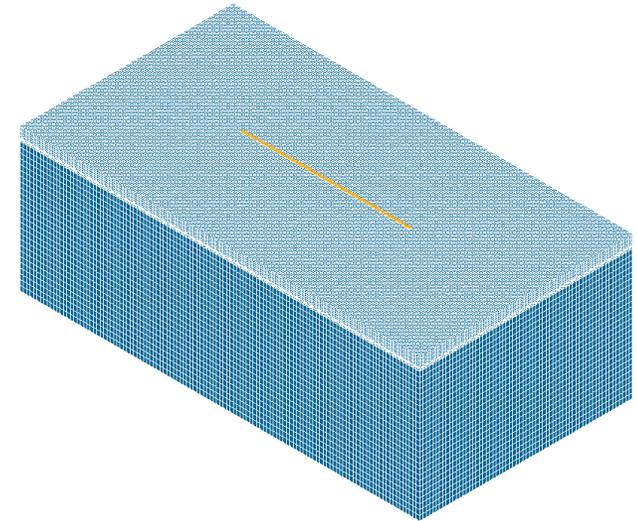
Simulations complémentaires

Modèle numérique #2 : milieu tabulaire
(7 Mio ddl)

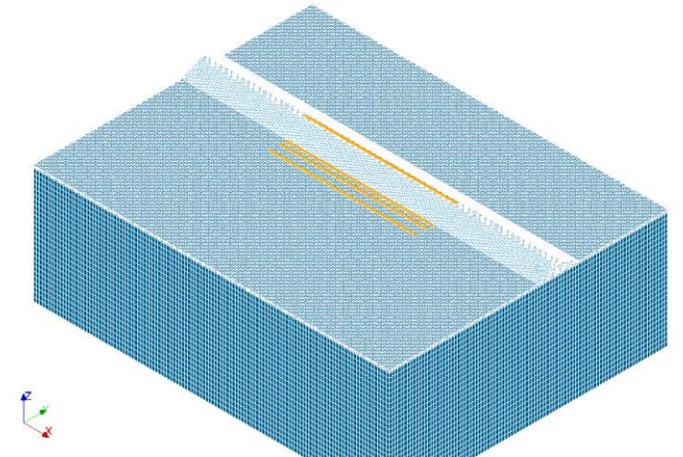
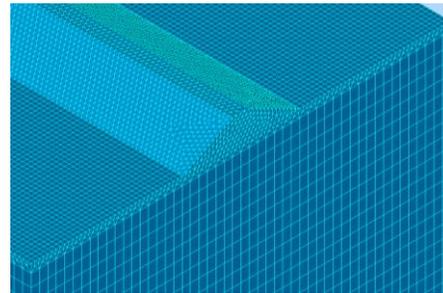
Dispositif 100 capteurs, inter-traces de 50 cm

Modèle numérique #3 : digue filaire
(5.5 Mio ddl)

- Temps de calcul : 20-30 h
- Memory (MB) : 170 000.0
- Number of processors openMP : 8, nodes MPI : 4, processors MPI : 16

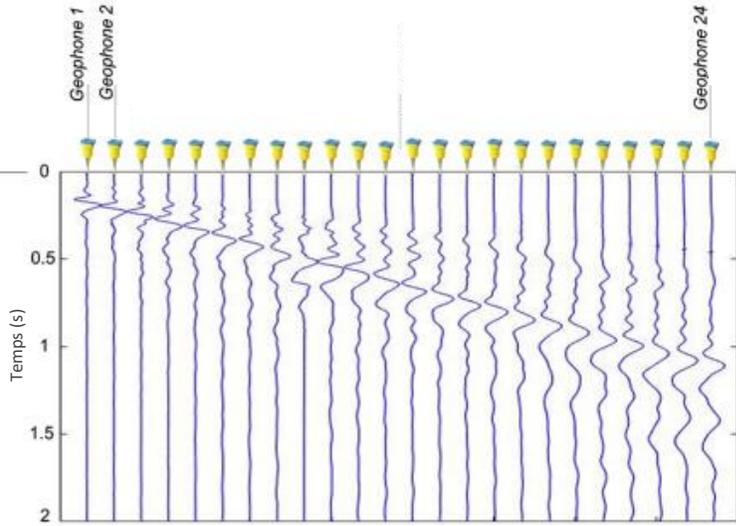


Taille: 120 m x 64 m x 40 m

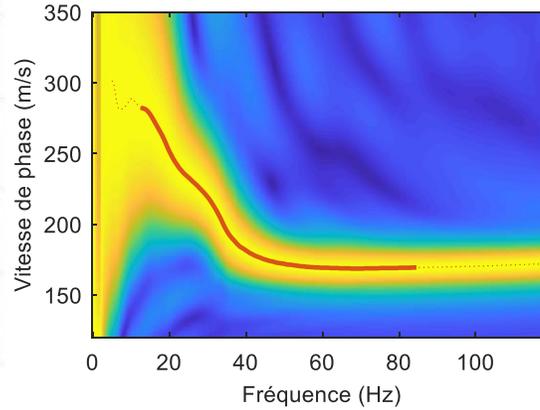


Version HPC pas (encore) disponible pour calcul en domaine fréquentiel

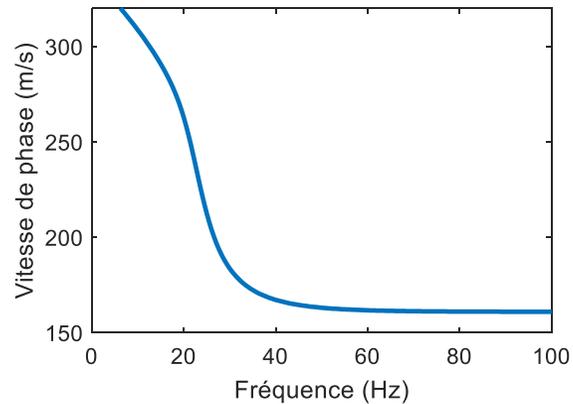
Principe de la méthode MASW



Courbe expérimentale



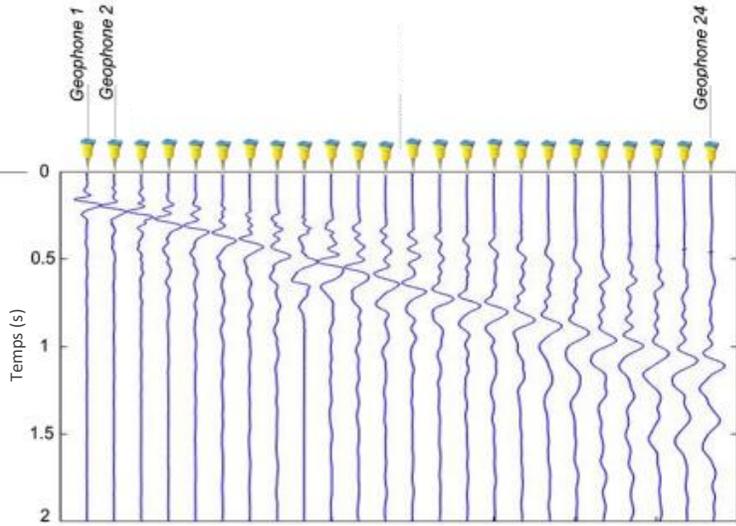
Sortie du modèle analytique



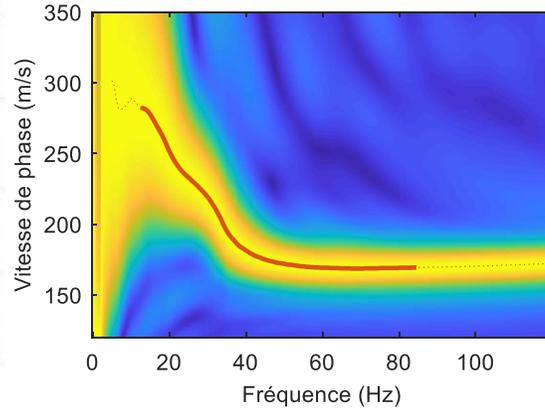
Propriétés matériaux

Propriétés matériaux				
Couche n°1	$v_p = 303 \text{ m/s}$	$v_s = 175 \text{ m/s}$	$\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$	$h = 3 \text{ m}$
Couche n°2	$v_p = 720 \text{ m/s}$	$v_s = 360 \text{ m/s}$	$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$	$h = \text{inf}$

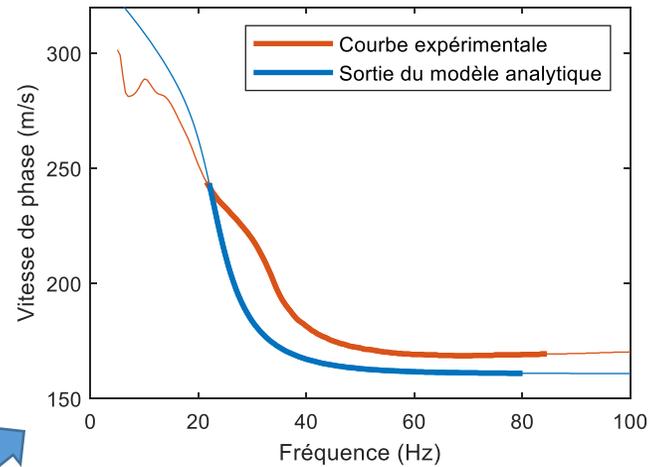
Principe de la méthode MASW



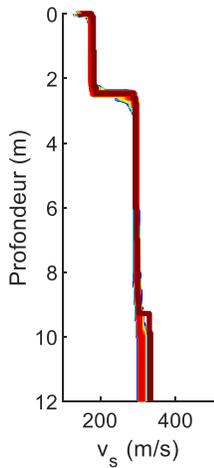
Courbe expérimentale



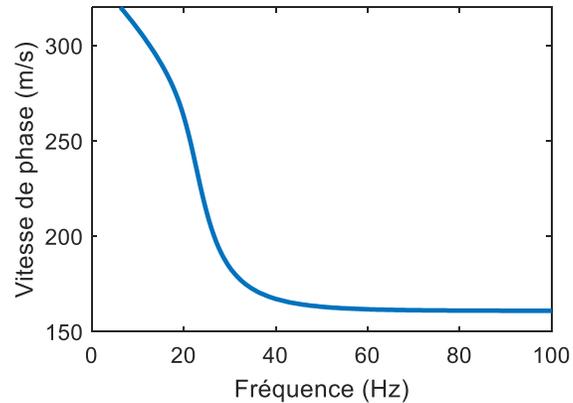
Ecart entre les deux courbes de dispersion à minimiser



Meilleurs résultats



Sortie du modèle analytique

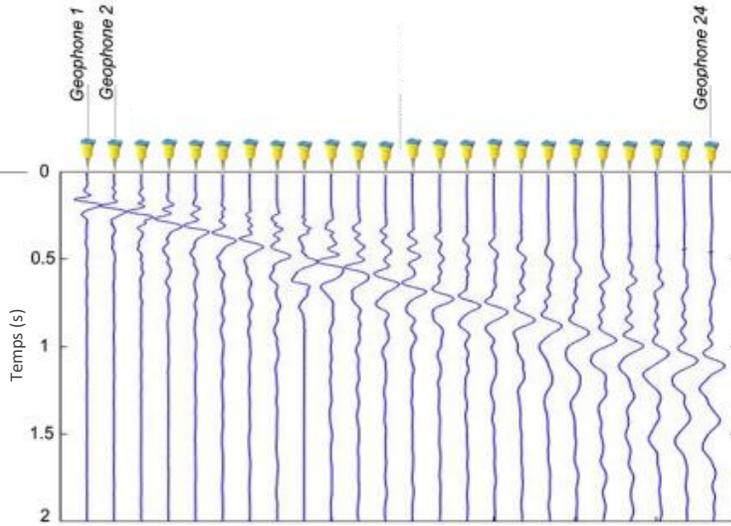


Propriétés matériaux

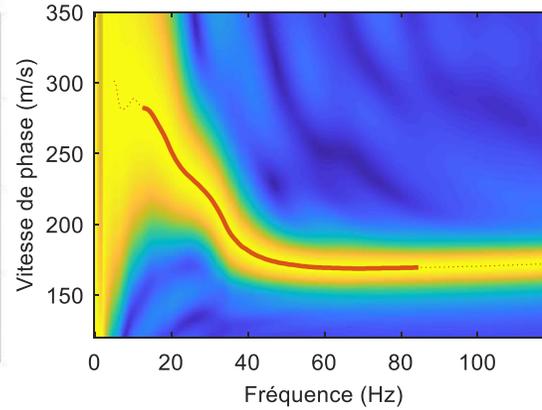
Couche n°1	$v_p = 303 \text{ m/s}$	$v_s = 175 \text{ m/s}$	$\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$	$h = 3 \text{ m}$
Couche n°2	$v_p = 720 \text{ m/s}$	$v_s = 360 \text{ m/s}$	$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$	$h = \text{inf}$

Paramètres à optimiser

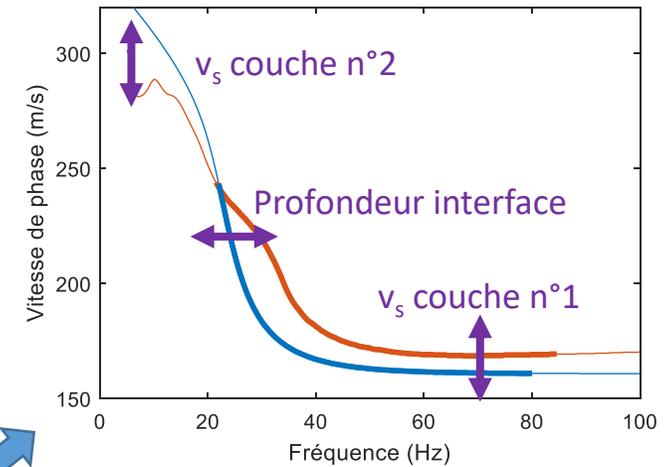
Principe de la méthode MASW



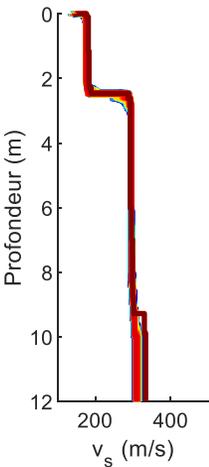
Courbe expérimentale



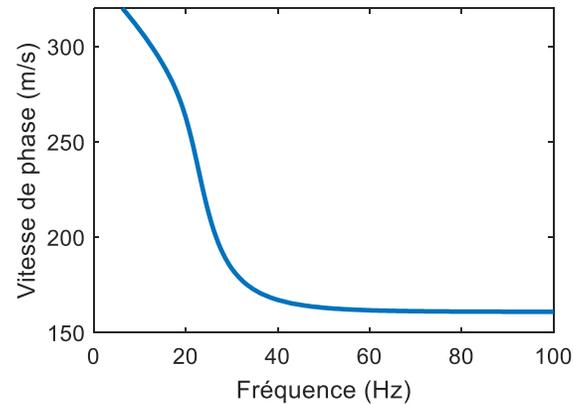
Ecart entre les deux courbes de dispersion à minimiser



Meilleurs résultats



Sortie du modèle analytique



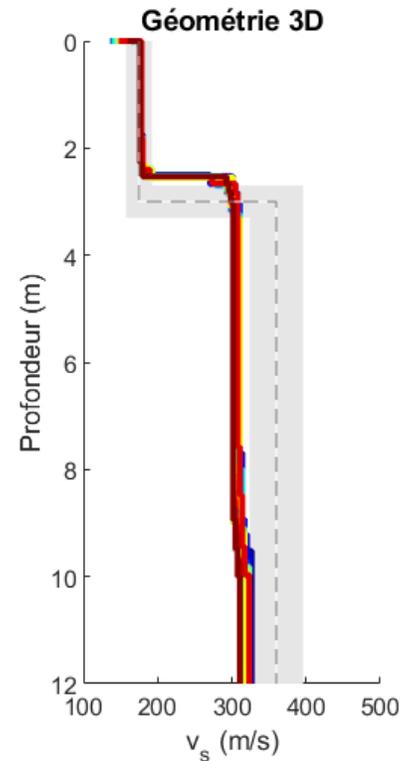
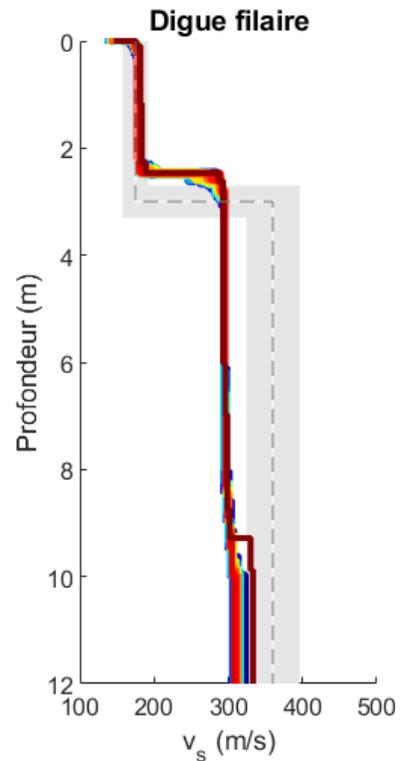
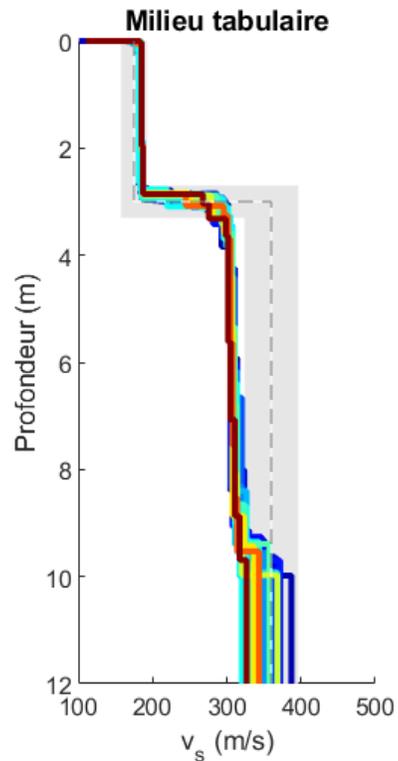
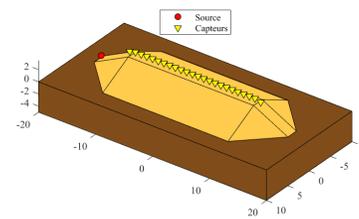
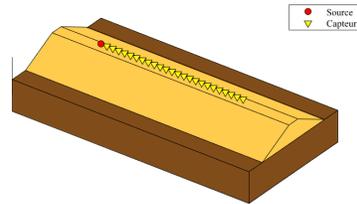
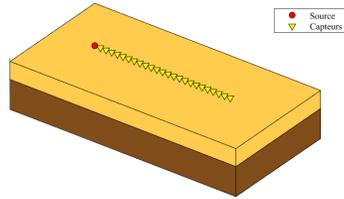
Propriétés matériaux

Couche n°1	$v_p = 303 \text{ m/s}$	$v_s = 175 \text{ m/s}$	$\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$	$h = 3 \text{ m}$
Couche n°2	$v_p = 720 \text{ m/s}$	$v_s = 360 \text{ m/s}$	$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$	$h = \text{inf}$

Paramètres à optimiser

Résultats de l'étude paramétrique

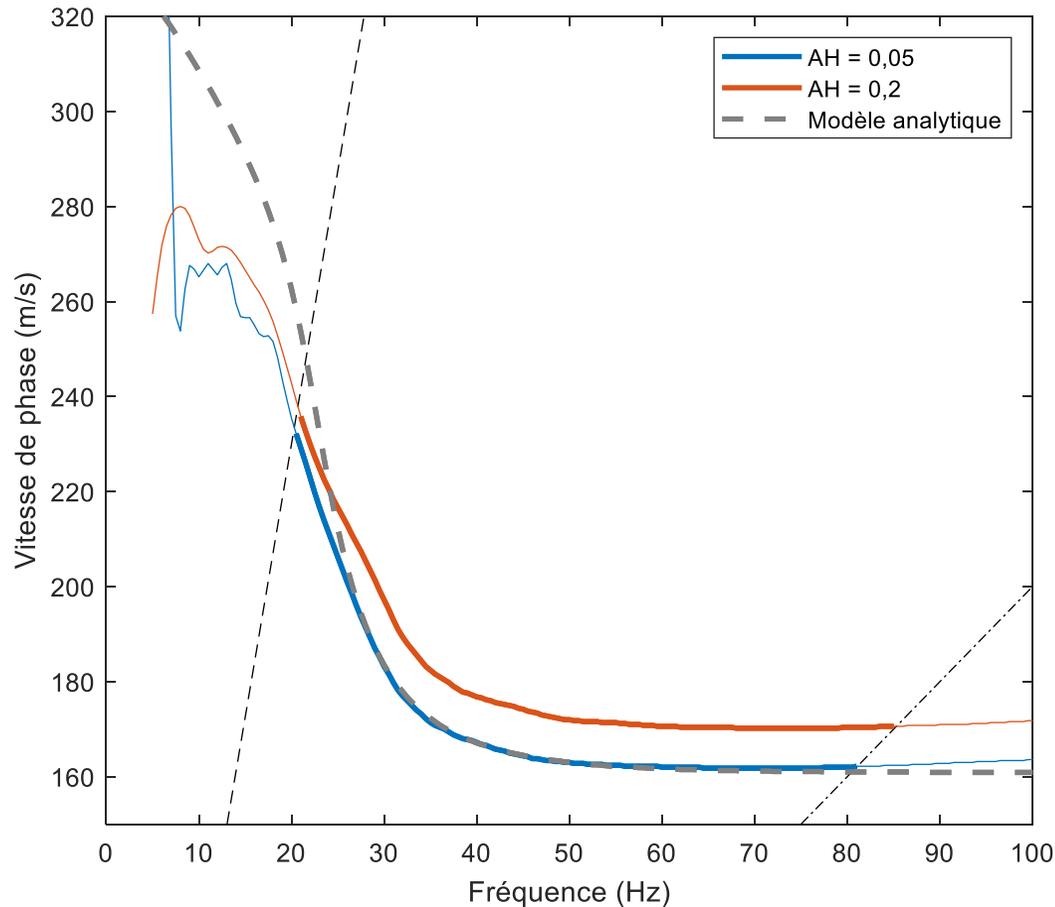
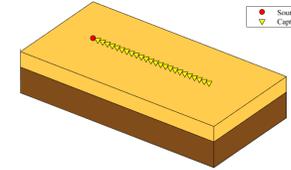
Influence de la géométrie (en gris pointillé : solution attendue)



- La géométrie de la digue entraîne une sous-estimation de la profondeur de l'interface.
- Sous-estimation de v_s dans la deuxième couche dans les trois cas
- Légère surestimation de v_s dans la première couche dans les trois cas

Résultats de l'étude paramétrique

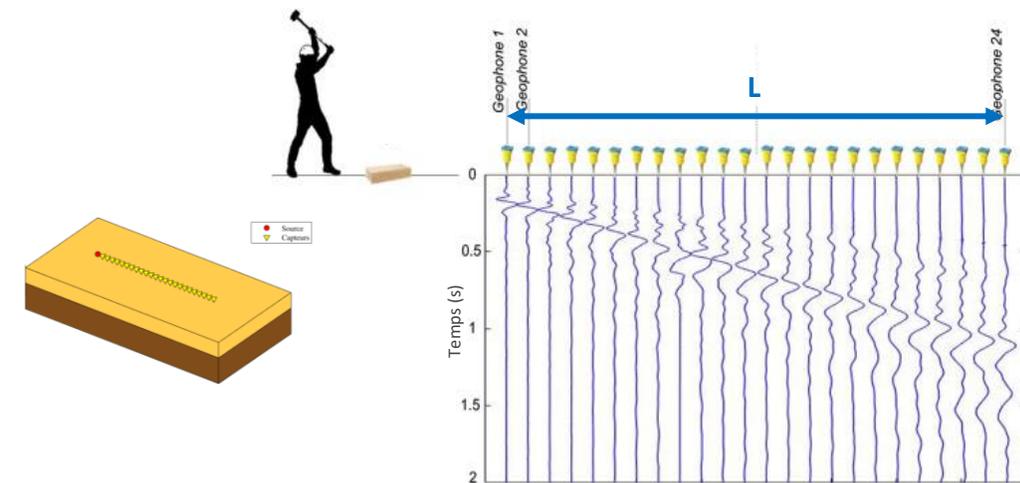
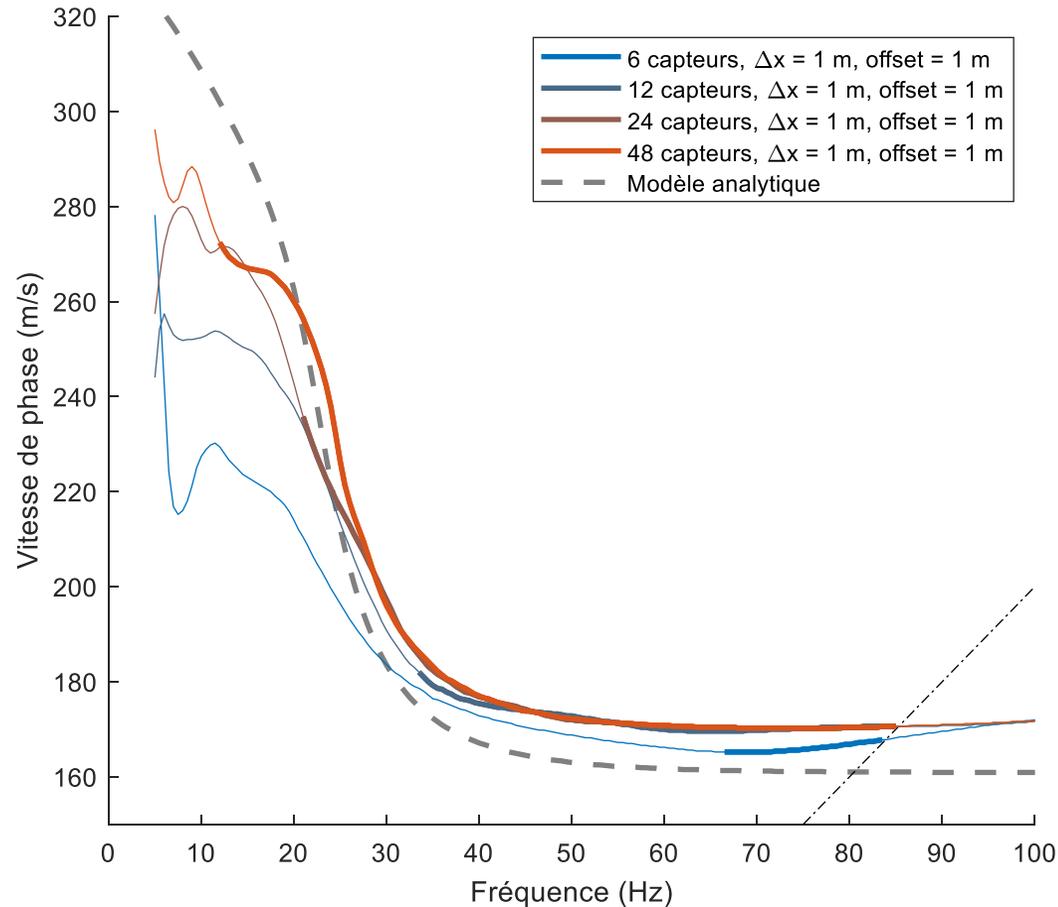
Influence de l'amortissement (cas du milieu tabulaire bicouches)



- Ecart entre les deux courbes dans les hautes fréquences :
 - Une augmentation du facteur d'atténuation entraîne une augmentation de la vitesse de phase
 - Le résultat pour $AH = 0,05$ coïncide avec la sortie du modèle analytique.
- Biais d'analyse dans les hautes fréquences car l'amortissement n'est pas pris en compte dans le modèle analytique.

Résultats de l'étude paramétrique

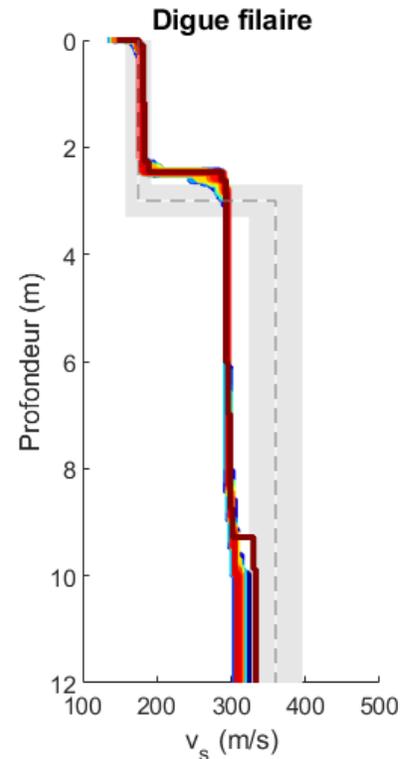
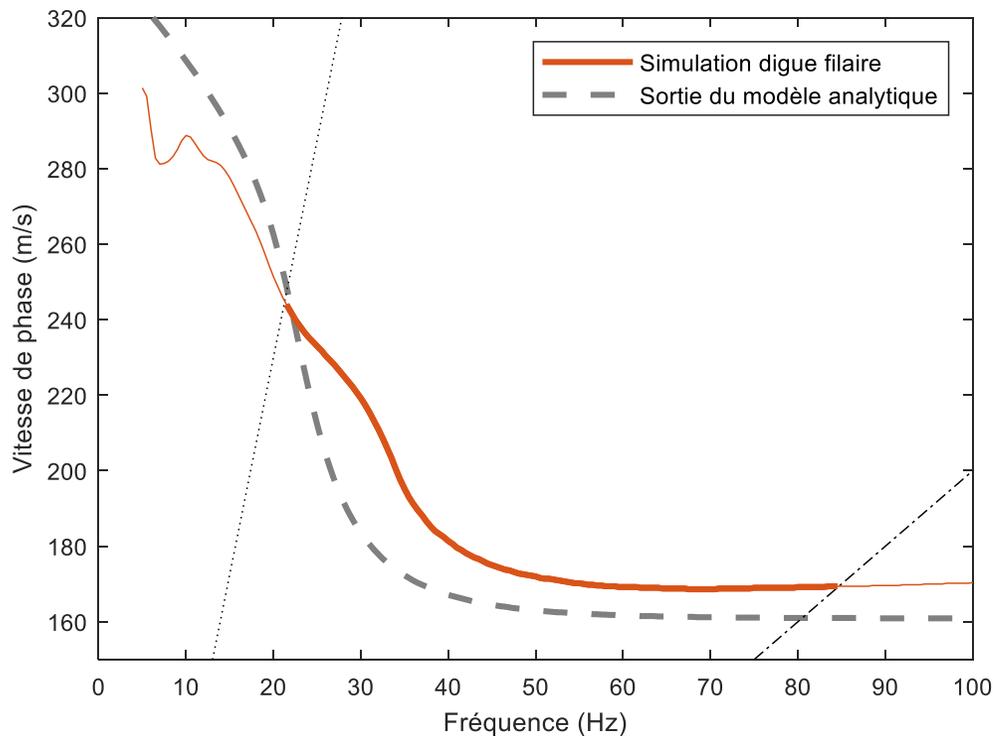
Influence de la longueur du dispositif de mesure (cas du milieu tabulaire bicouches)



- Ecart entre la sortie du modèle analytique et les résultats de simulation dans les basses fréquences.
→ Effet de champ proche
- Plus le dispositif est long, moins l'écart est important.
→ Meilleure caractérisation des couches profondes

Conclusions et perspectives

- Bon accord entre mesures réelles et résultats de simulation pour la configuration de la digue de Rouen
- Bilan de l'étude paramétrique :



- La géométrie 3D de l'ouvrage influence l'estimation de la profondeur de l'interface. (sous-estimation ~ 50 cm, erreur relative ~ 17 %)
- Les effets de champ proche entraînent une sous-estimation de v_s dans la 2^{ème} couche. (sous-estimation ~ 40 m/s, erreur relative ~ 11 %)
- Il est préférable de faire des acquisitions avec des dispositifs de mesure longs et des offsets source – capteurs courts.
- Il existe un biais d'analyse dans les hautes fréquences qui entraîne une légère surestimation de v_s dans la 1^{ère} couche. (surestimation ~ 10 m/s, erreur relative ~ 6 %)

Conclusions et perspectives

Passage à des configurations plus réalistes :

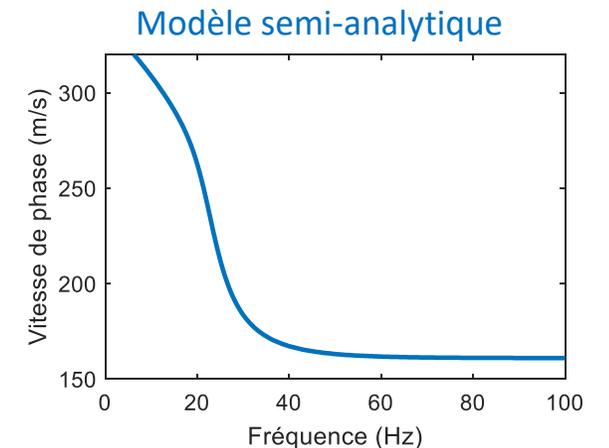
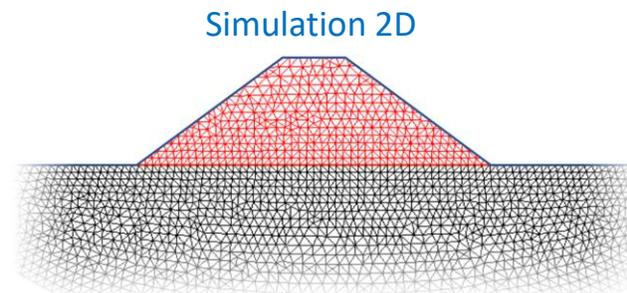
- Digue de taille réelle
- Influence de la géométrie de la digue (hauteur, pentes latérales), des caractéristiques matériaux (contraste digue / sol)
- Configurations plus complexes : présence de lentilles, de variations latérales, d'un noyau argileux, ...

➤ Extension de code_aster HPC au calcul harmonique

➤ Utilisation de la méthode SAFE (Semi-Analytical Finite Elements)

Propriétés matériaux				
Couche n°1	$v_p = 303 \text{ m/s}$	$v_s = 175 \text{ m/s}$	$\rho = 1600 \text{ kg/m}^3$	$h = 3 \text{ m}$
Couche n°2	$v_p = 720 \text{ m/s}$	$v_s = 360 \text{ m/s}$	$\rho = 2000 \text{ kg/m}^3$	$h = \text{inf}$

+ Géométrie 2D de la digue

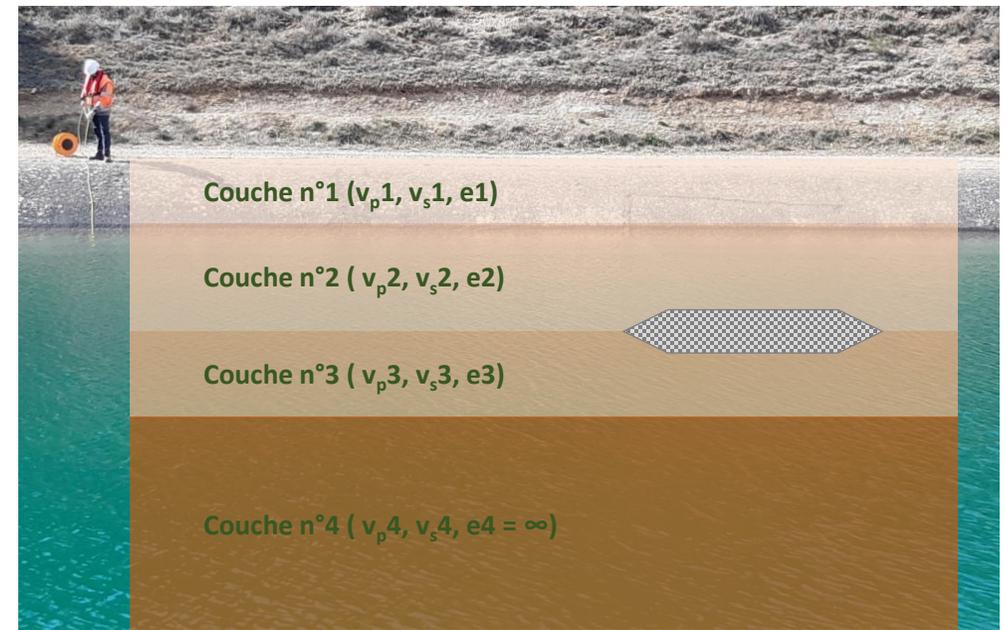


→ Géométrie = information a priori ? inconnue à estimer ?

Conclusions et perspectives

- Présence de variations latérales
Ex : interface non horizontales, détection de lentilles, ...

- MASW utilisée pour d'autres techniques
 - US
Ex : épaisseur d'acier des CBAT, ...



- RADAR ?
Ex : teneur en eau du béton, ...





MERCI