

" Une approche hybride pour modéliser la propagation des vibrations d'origine ferroviaire sur viaduc "

présenté par Philippe JEAN



La Mure Isère

Vibrations transmises par un sol

Source vibratoire: trains: BF < 300 Hz
en surface, en tunnel, sur un viaduc,..
tramways, trains voyageurs, Fret

Au CSTB:

modèle SEA (70s,..) pour les bâtiments,
puis FEM (Nastran 3D)
modèle FEM/BEM : mefisto (années 90 ..2D,2.5D, 3D)
modèle de source ferroviaire (VibraFer)

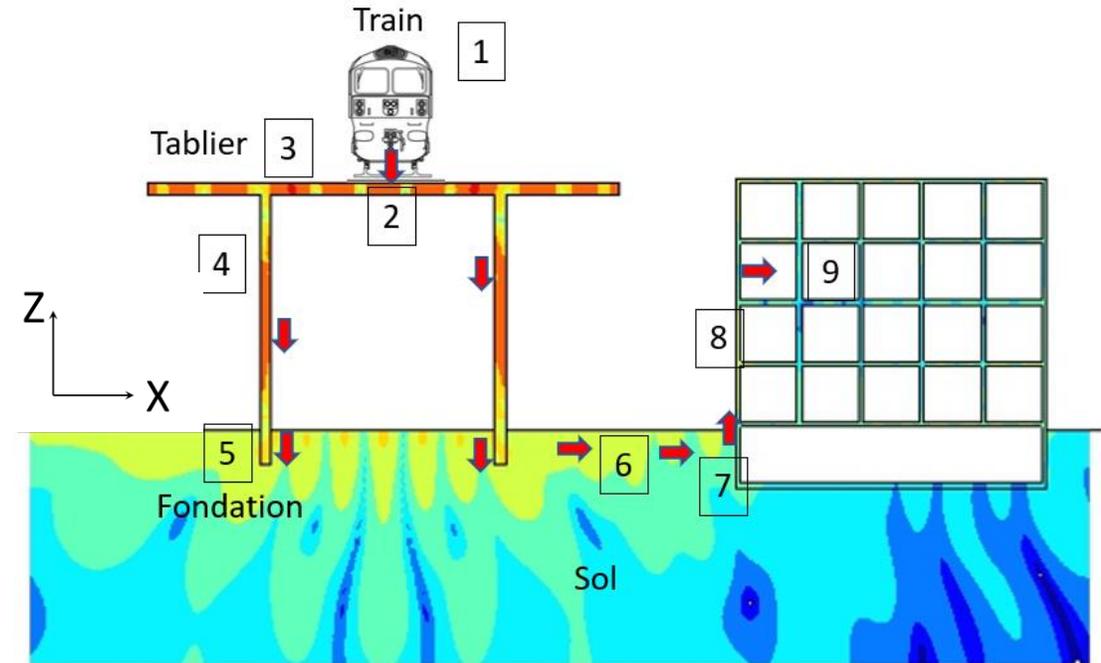
Grand Paris: mefisto : modèle de référence, de nombreux développements
12 bureaux d'étude

Prédiction: vibrations et bruit solidien

Solution de réduction: écrans, coupure (ressorts, ..)

Modèles hybrides (2.5D avec 3D, modèles simplifiés pour le bâtiment ...

- 1) Train
- 2) Système de voies
- 3) **Tablier**
- 4) **Piles + fondations**
- 5) **Interaction Fondations/Sol**
- 6) **Propagation des vibrations dans le sol**
- 7) **Interaction sol/fondations**
- 8) Transmission dans les bâtiments
- 9) Rayonnement dans les volumes
- 10) Cartographie ?



Problème complexe: on suppose F_z sur tablier connu, on recherche la vitesse en pied de bâtiment
on résout (3) -> (7)

Les étapes 8 et 9 peuvent être résolues par approches simples (RIVAS) ou numériques complexes.

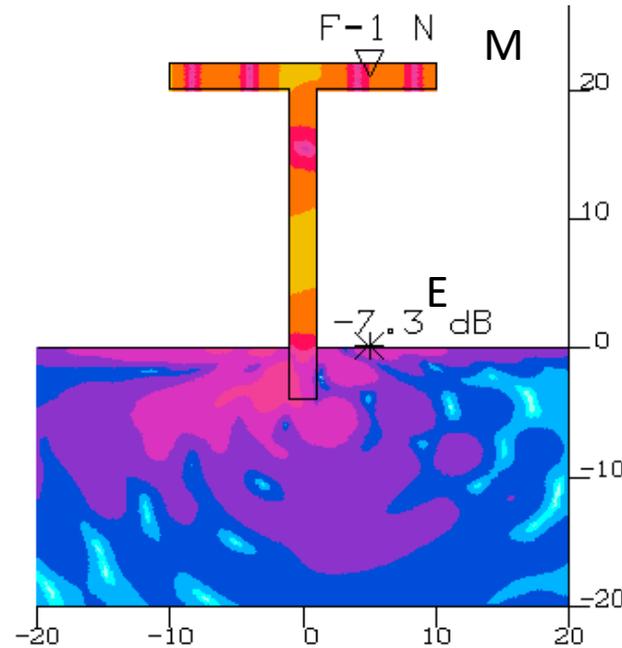
Réciprocité

Pb1: Force en M, récepteur en M: problème à résoudre

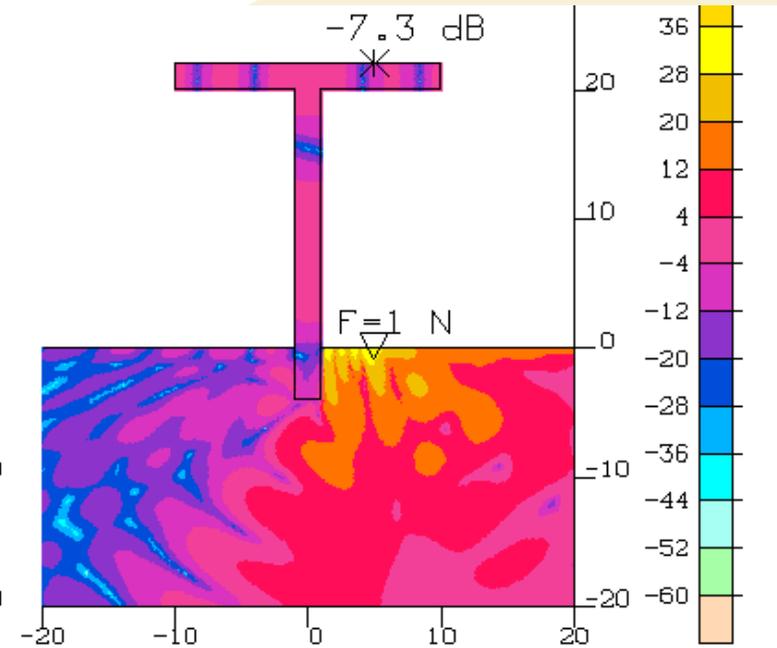
Pb2: Force en E, récepteur en M

Réciprocité: $Pb1 = Pb2 \Rightarrow$ on résout Pb2

Problème direct



Problème réciproque



Méthode des mobilités: cas simple

(problème réciproque; F au sol, M sur tablier)

1 pile et surface de contact Sc ramenée à un point (1 ddl) (composantes verticales)

Coupure du problème en 2 parties $z < 0$ et $z > 0$

La force résultante en Sc (bas de pile) peut être écrite

$$F_C = v_{0c} \cdot (Y_S + Y_R)^{-1}$$

La Vitesse en M pour une force F appliquée en E s'écrit

$$V_M = F_C \cdot V_{0M}$$

Y_S : mobilité source (sans la partie $z > 0$)

force 1N en Sc

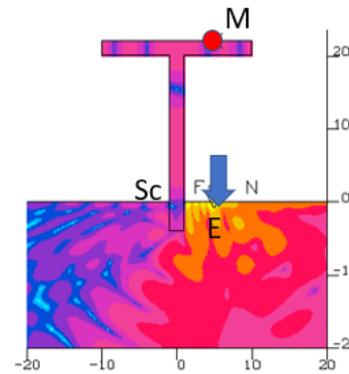
Y_R : mobilité réception (sans la partie $z < 0$)

force 1N en Sc

V_{0M} : vitesse en M pour une force 1N en Sc

V_{0c} : vitesse en Sc pour une force 1N en E

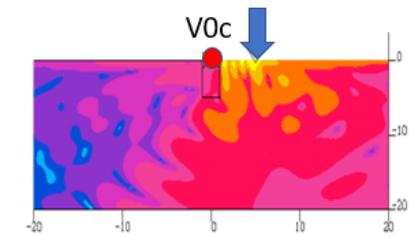
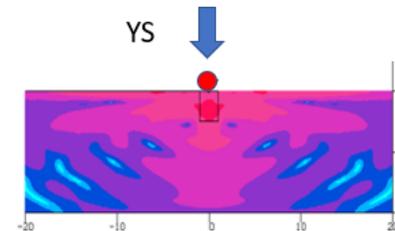
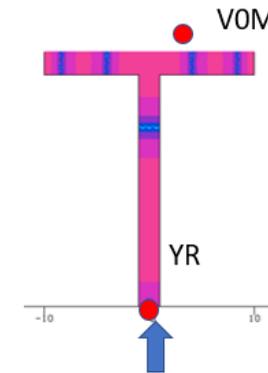
Dans ce cas: scalaires



$Z < 0$
YS & V0c

Force 1 N
● Vitesse verticale

$Z > 0$
YR & V0M



* Cas contact en Sc ramené à un point (1 pile):

On ajoute les composantes en x et y: force et vitesse
Les quantités V_{0c} , V_{0M} deviennent des vecteurs dimension 3, Y_R et Y_S deviennent des matrices 3x3

* N piles

On ajoute les composantes en x et y: force et vitesse
Les quantités V_{0c} , V_{0M} deviennent des vecteurs dimension 3N, Y_R et Y_S deviennent des matrices 3N x 3N

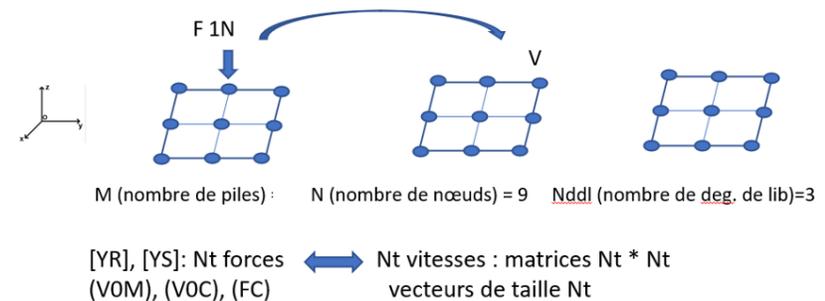
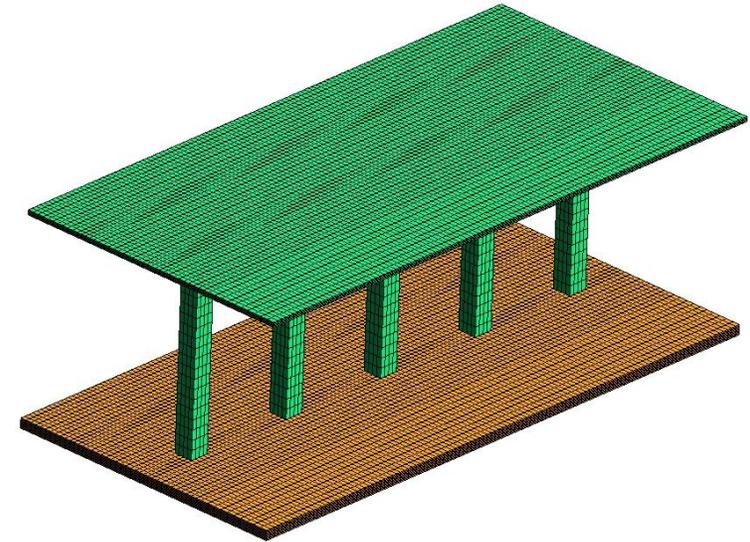
* N piles, M points de contact par section Sc

On ajoute les composantes en x et y: force et vitesse 3 composantes
Les quantités V_{0c} , V_{0M} deviennent des vecteurs dimension $Nt=3NM$, Y_R et Y_S deviennent des matrices 3NM x 3NM

$$\{Fc\} = \{V_{0c}\} \cdot ([Y_S] + [Y_R])^{-1}$$

$$V_M = \langle Fc \rangle \cdot \{V_{0M}\} \quad VM \text{ Composante } Vz \text{ en } M$$

* On a testé différentes simplifications

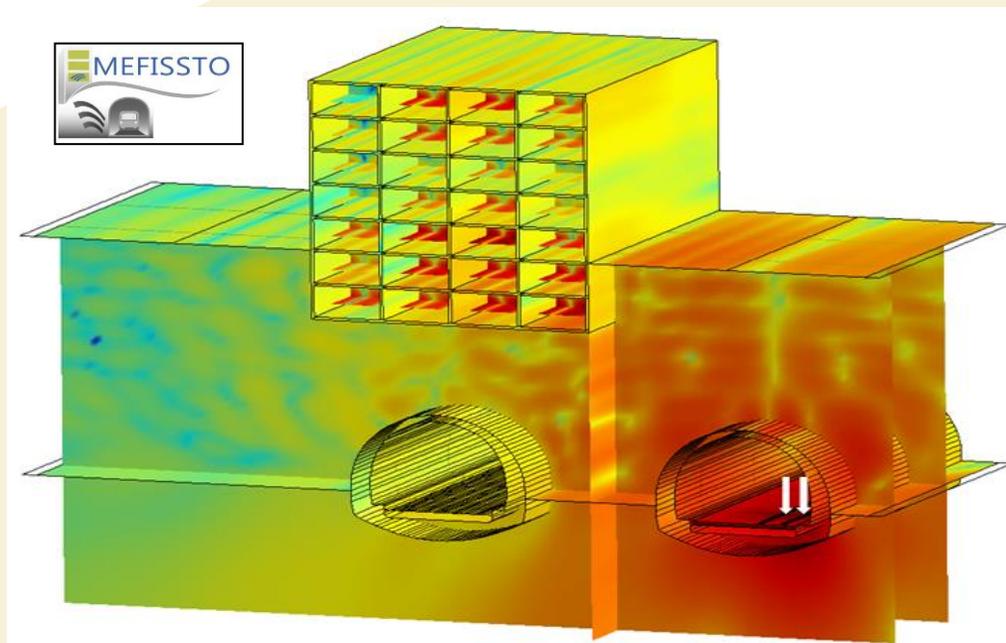
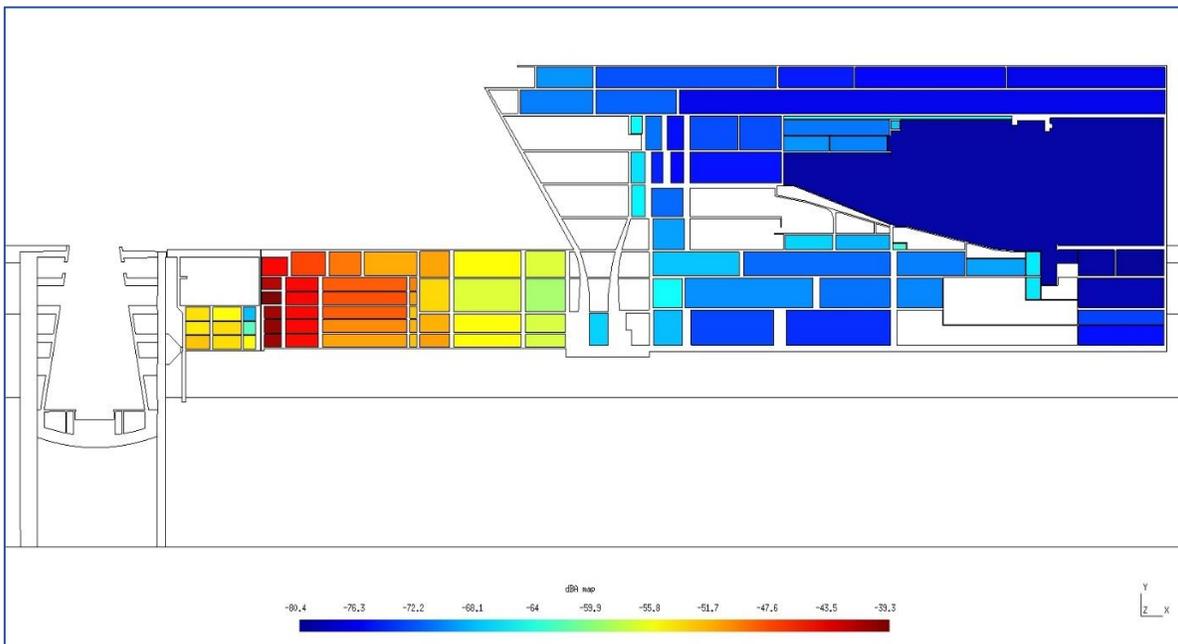
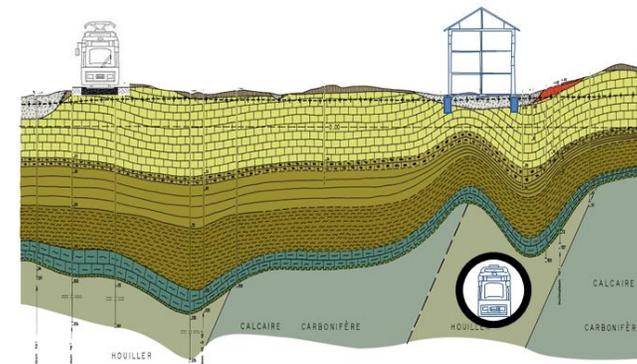


Géométrie divisée en régions (couches de sol, structures,..)

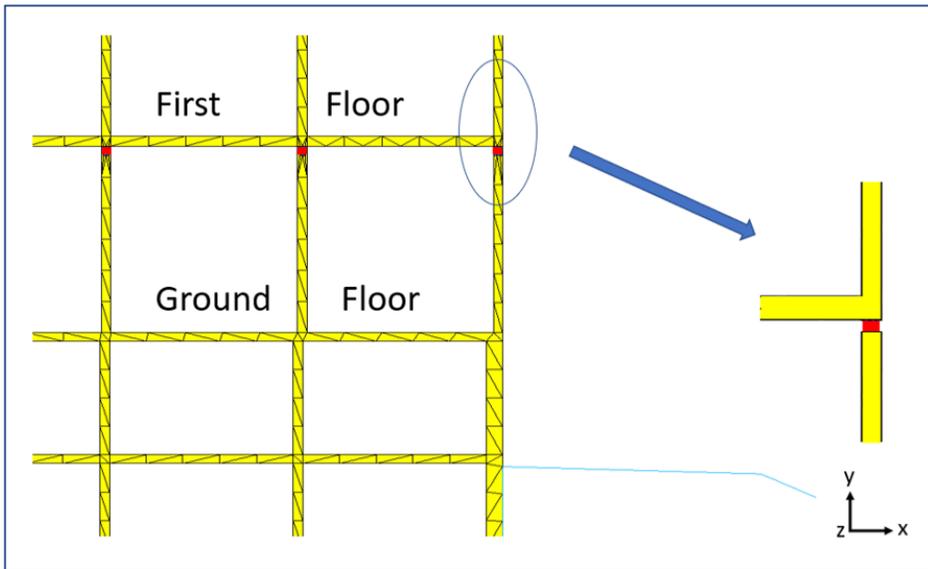
FEM ou BEM

FEM pour structure , BEM pour le sol

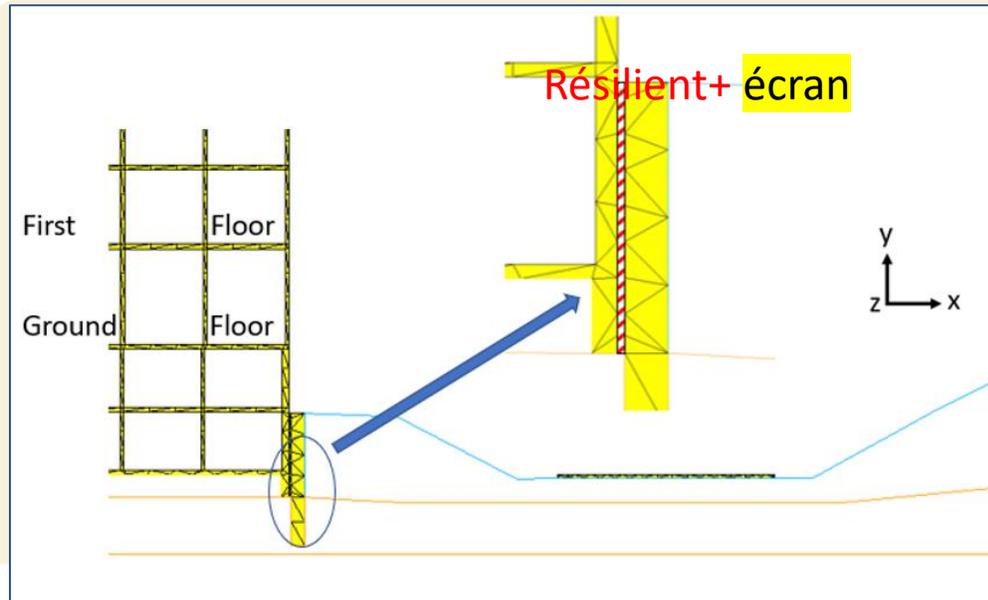
Volumes: approche modale 3D



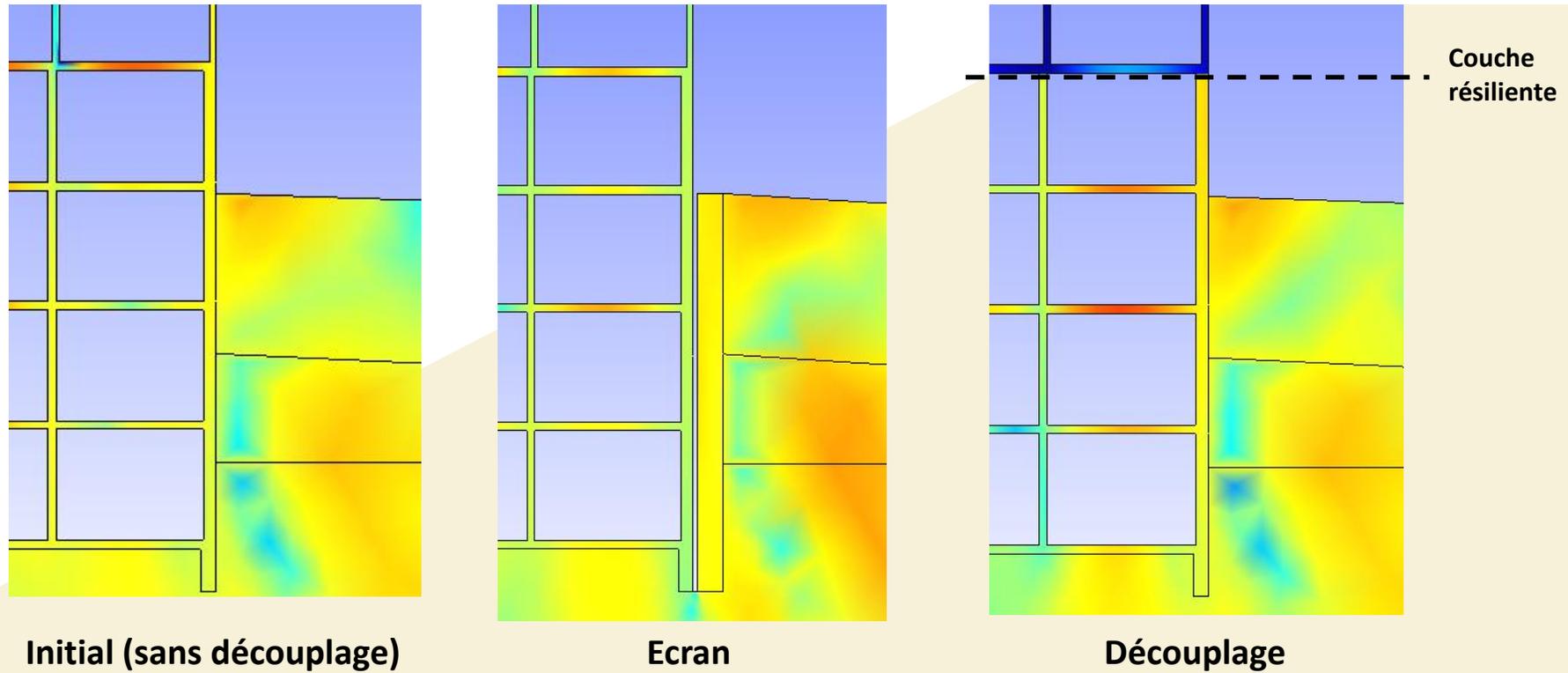
Ressorts



Tapis sous ballast



➤ Impact de différentes solutions d'isolation



Validation dans un cas simple

Sol infini remplacé par une dalle fortement amortie

Solution de référence rapidement évaluée (.. et précisément)

Tablier: $L_x=30$ m, $L_y=60$ m, $h=50$ cm

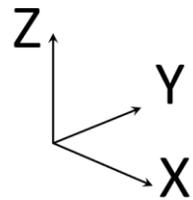
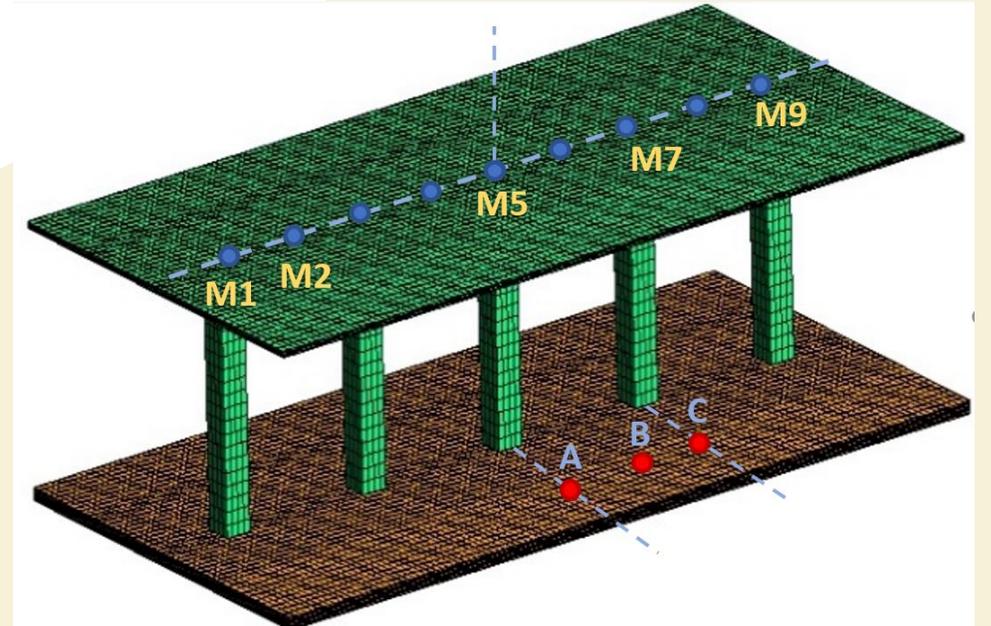
Cinq piles: section: 2×2 m², hauteur 20 m espacées de 12 m

9 excitations M1 à M9

Récepteurs: A, B, C

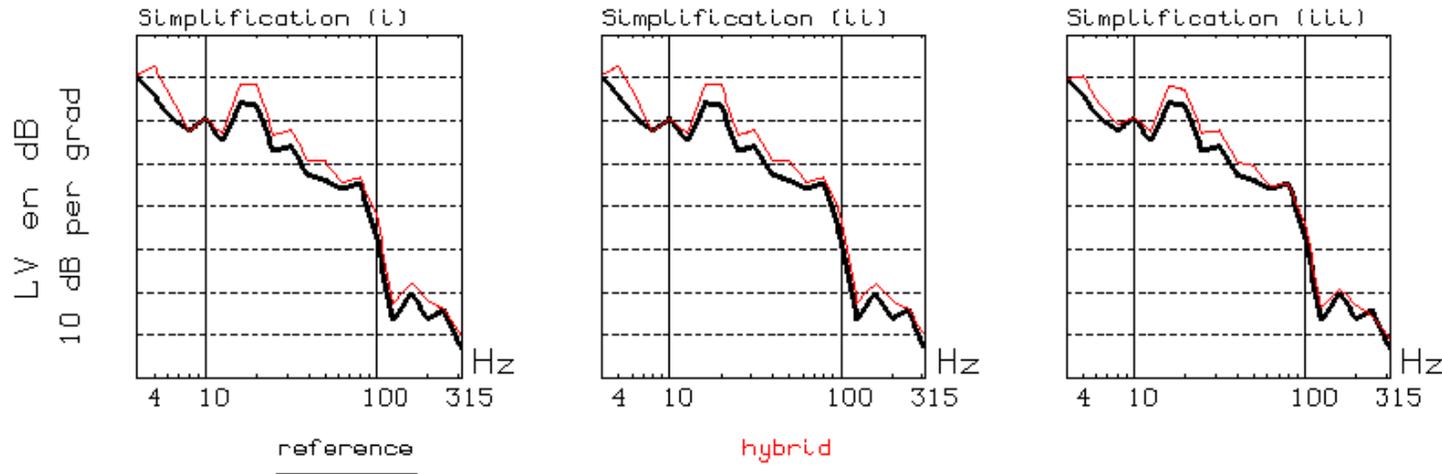
On résout $F(A,B,C)$ $V(M1 \text{ à } M9)$ (problème inverse)

Sommation $V1,.. V9$



Différentes simplifications (N=5 piles de 1x1 m²)

- i) 3 ddl par contact: valeurs rms (sections Sc indéformables):
On prend les valeurs rms pour chaque contact Sc => Nt=3*5=15
- i) Nddl=1 (Vzrms) => Nt=5
- ii) Termes croisés entre piles négligés. Calcul scalaire précédent (Nt=1). YS constant, YR différent par pile.
VM = somme sur les contributions de chaque pile en M (par réciprocité: somme sur les forces)



Calcul simple (iii) retenu: facile à mettre en place

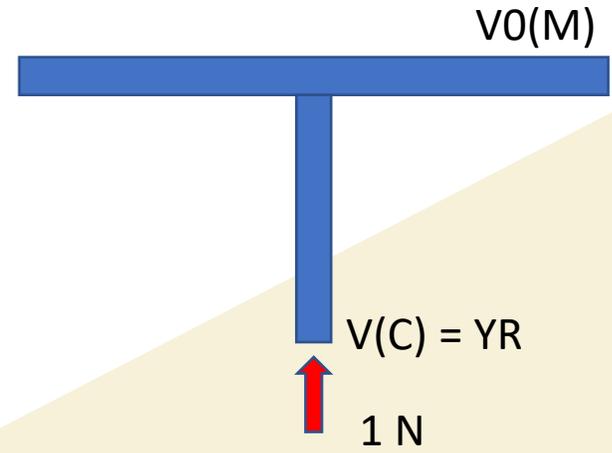
Note: on a vérifié que le calcul complet donne exactement la solution de référence

Cas avec sol semi-infini

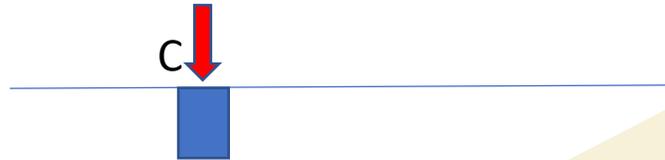
Décomposition des calculs

[A] Excitation successive de chaque pile (partie hors sol: $z > 0$)

=> Y_R et V_{OM}

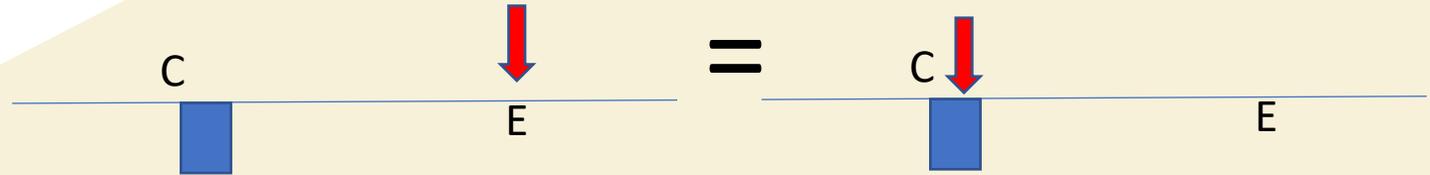


[B] Sol + fondation seule ($z < 0$) :



* Y_S => $F_z = 1 \text{ N}$ en C $V_{0C} = V_z(C)$: 1 seul calcul (toutes les fondations identiques)

• $F = 1 \text{ N}$ en E (en surface) et $V_z(C)$:



on utilise encore la réciprocité:

$F = 1 \text{ N}$ en C et $V_z(E)$

Note: on a vérifié que le calcul complet (tous les ddl) donne exactement la solution de référence.

2 calcul

C1: Champ proche en 3D (FEM3D ou BEM3D) $V_{3D}(H)$

C2: Champ lointain: BEM 2.5D, rapide et précis

Pe1: empreinte fondation, Pe2: calcul de $V(H)$

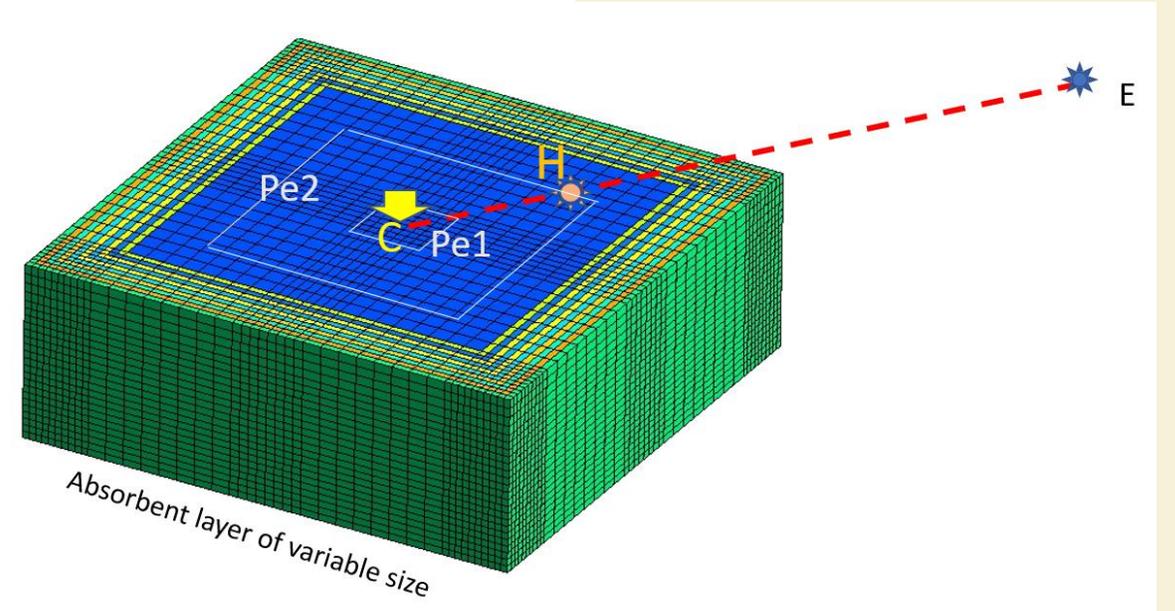
$$A = V(E)/V(H)$$

$A_{3D} \sim A_{2.5D}$ quand H s'éloigne de E (champ lointain)

$A_{2.5D}$:

$A_{2.5D}(\text{avec fondation}) \sim A_{2.5D}(\text{sans fondation})$

$$V(E) = V_{3D}(H) \cdot A_{2.5D}$$



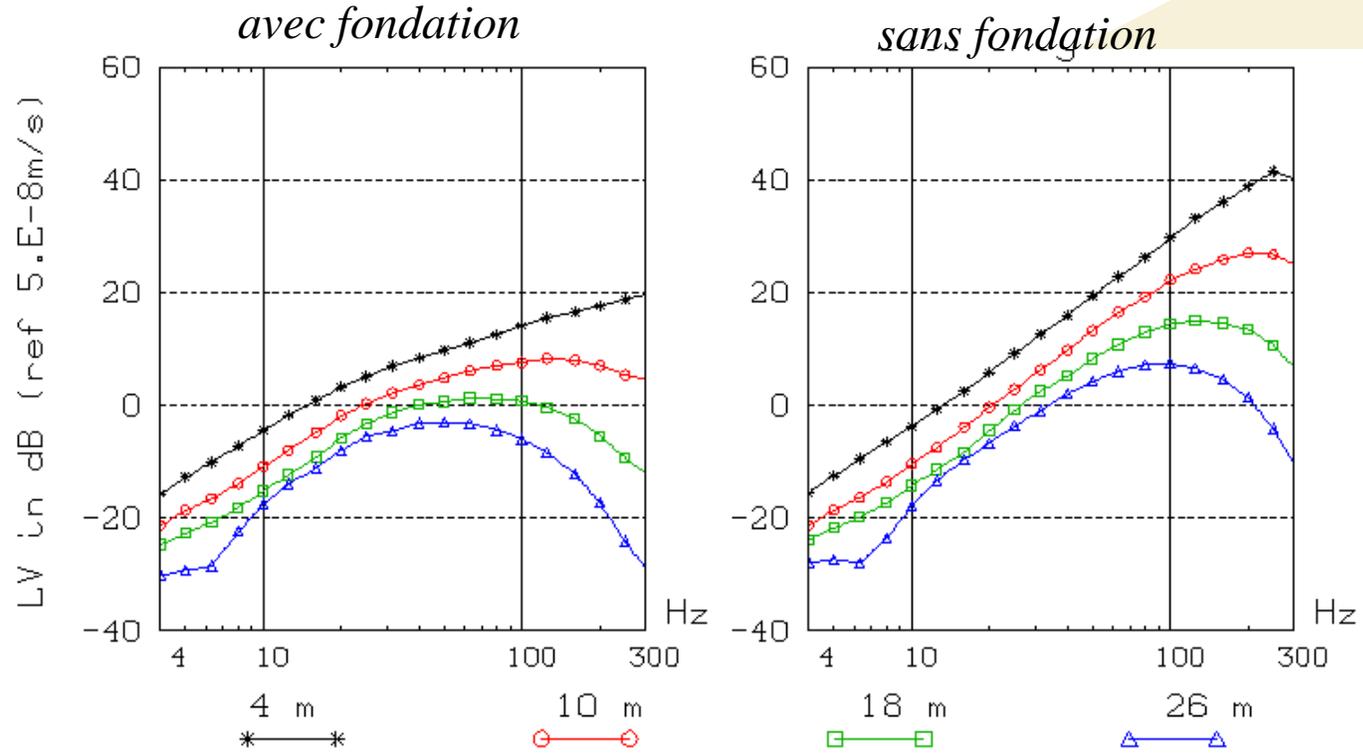
Cas d'un calcul 3D en FEM

$A_{2.5D}$ peut être calculé en présence de bâtiments

Atténuation avec la distance: BEM 2.5D

Sol semi infini, 200 MPa
Niveaux de vitesse verticale

A (avec fondation) $\sim A$ (sans fondation)

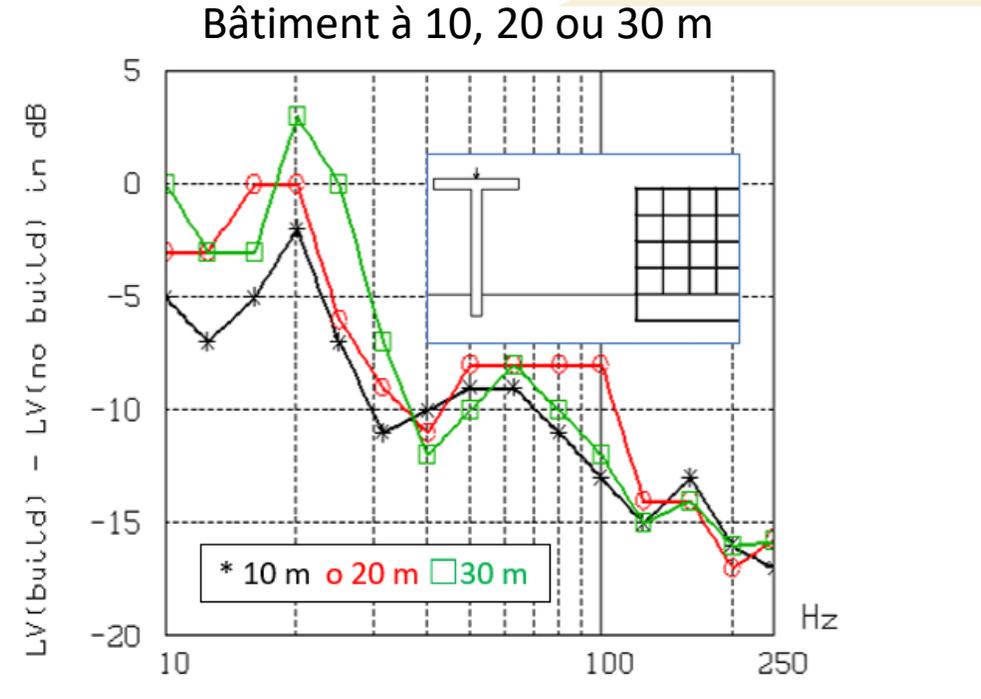
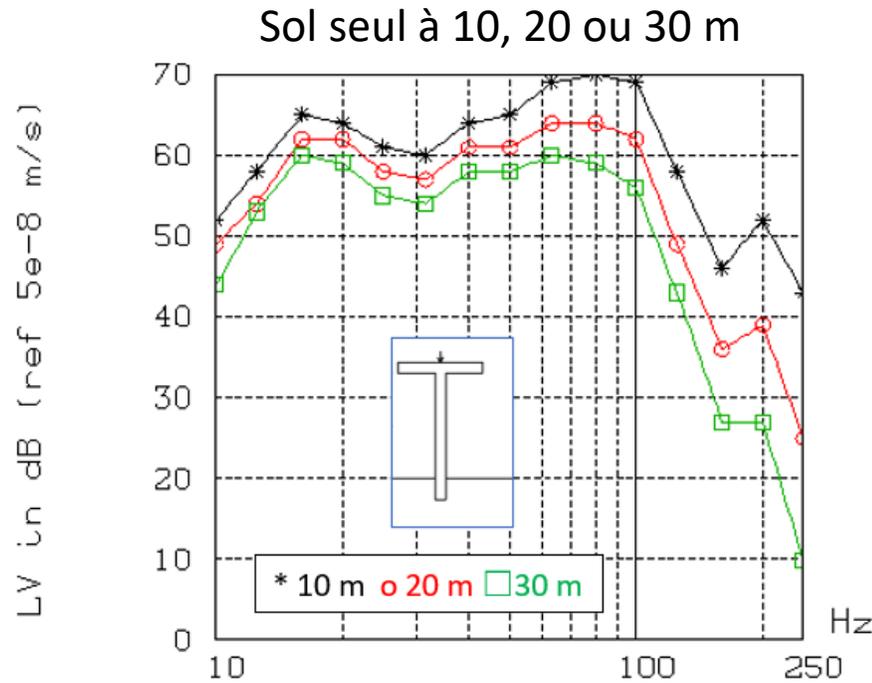


Application Viaduc, sans et avec bâtiment

Tablier largeur $L_x=16$ m

Sol semi infini, 200 MPa
Niveaux de vitesse verticale

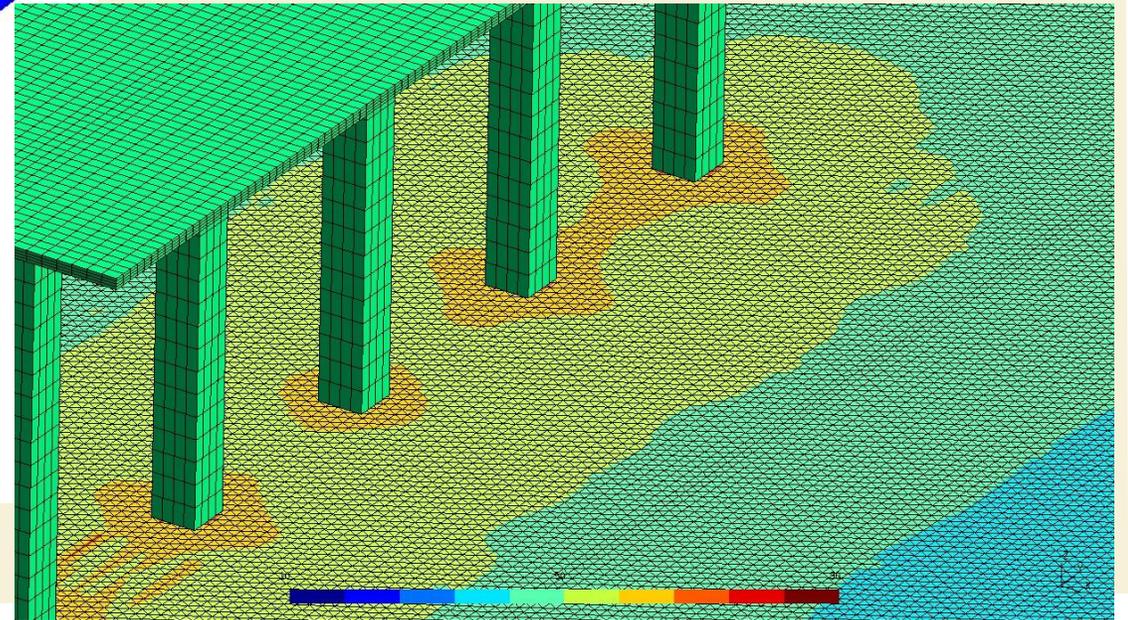
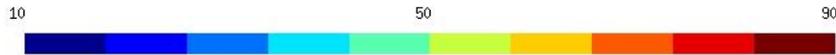
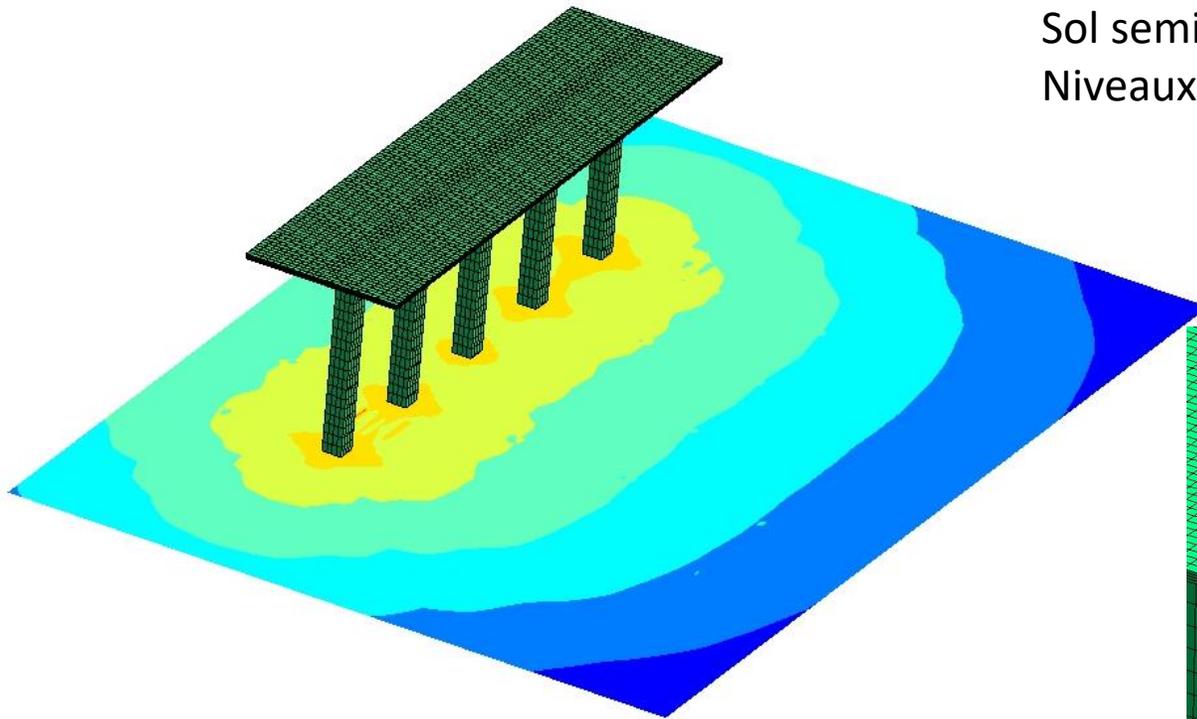
LV à 10, 20 ou 30 m



Visualisation de la vitesse en surface à 100 Hz

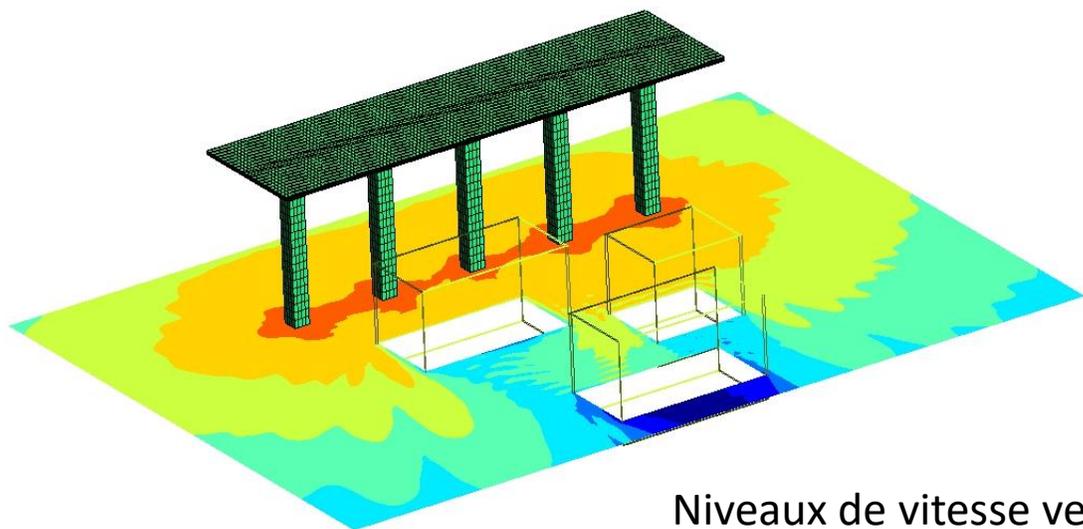
Tablier: largeur 16 m, Longueur 60 m

Sol semi infini, 200 MPa
Niveaux de vitesse verticale

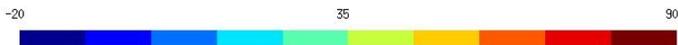


Combinaison avec un modèle de cartographie vibratoire

1 ou 2 ou 3 bâtiments avec fondations

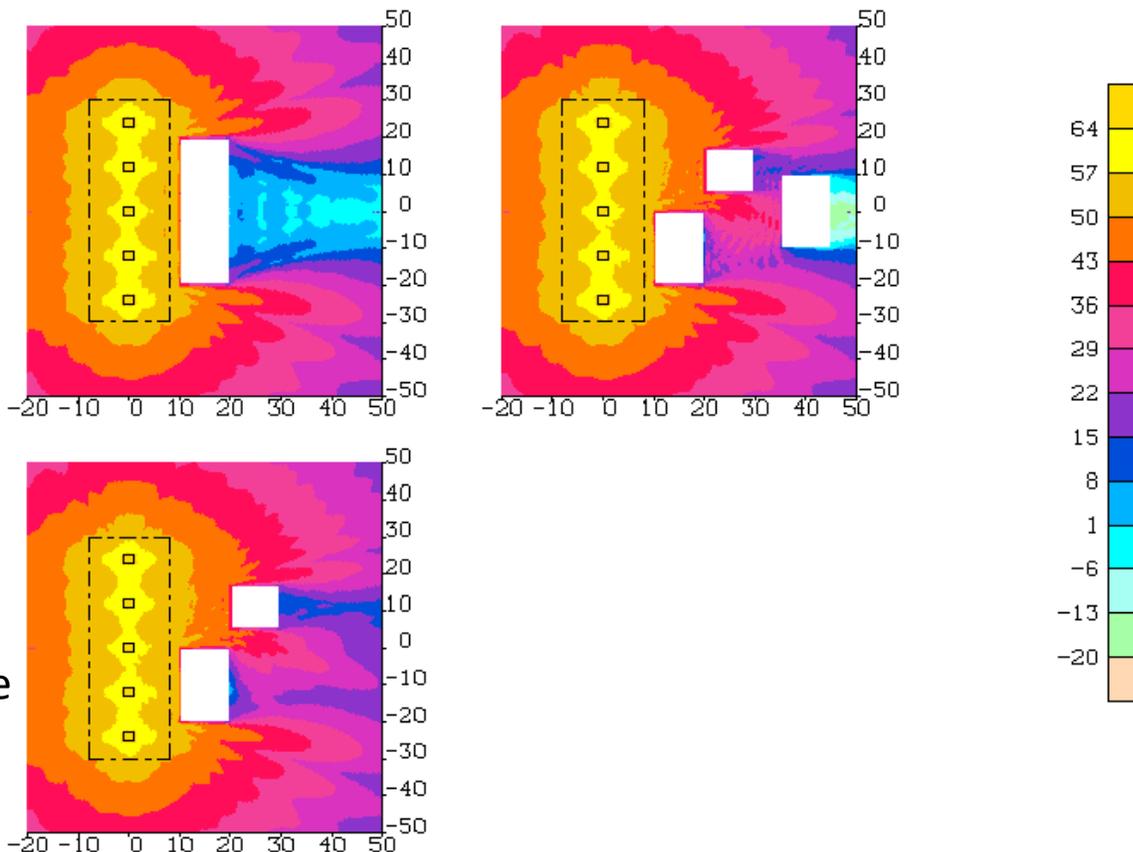


Niveaux de vitesse verticale



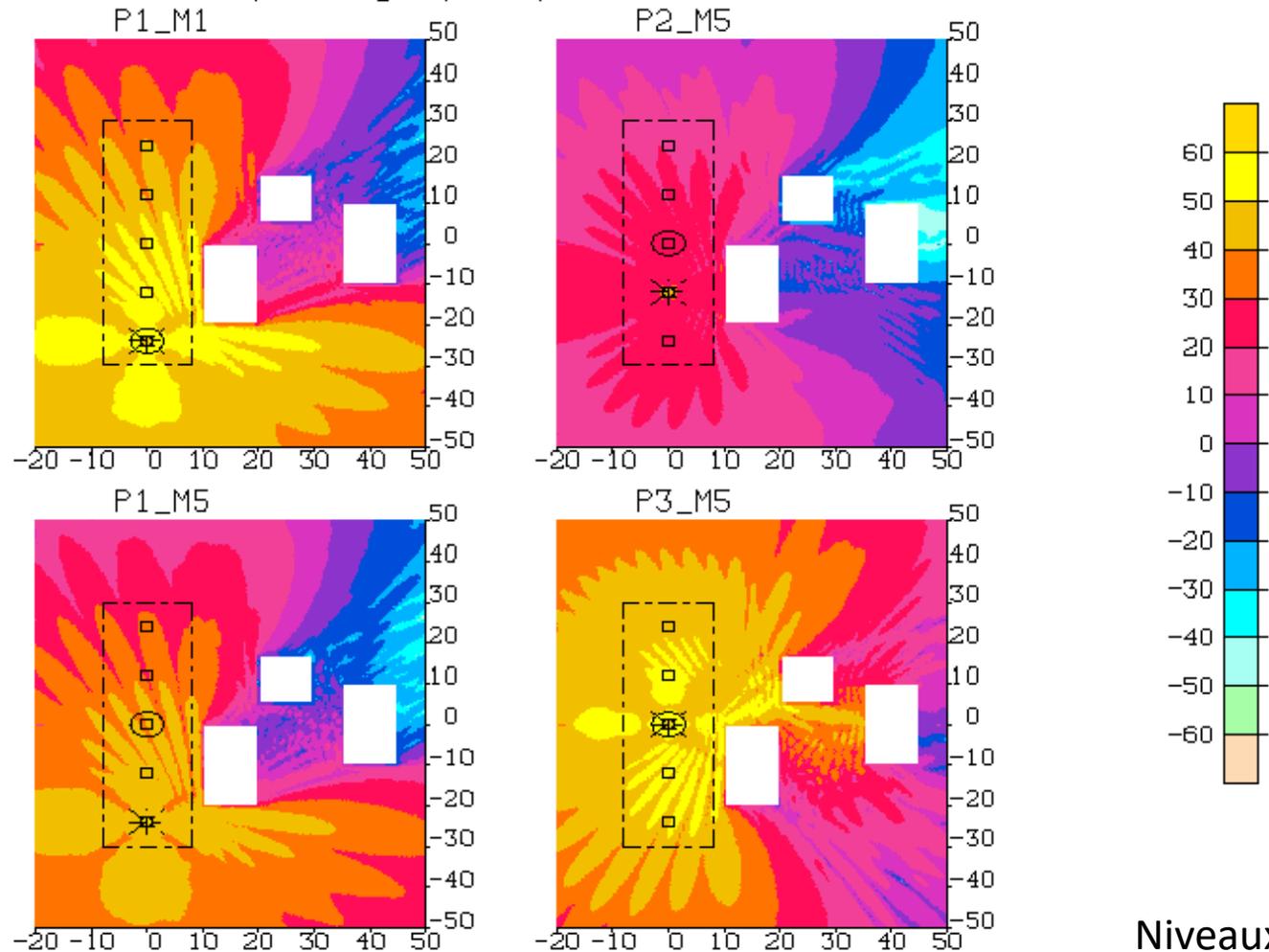
$A_{2.5D}$ peut être calculé en présence de bâtiments

100 Hz



Détail par pile (*) et par position de la force (O)

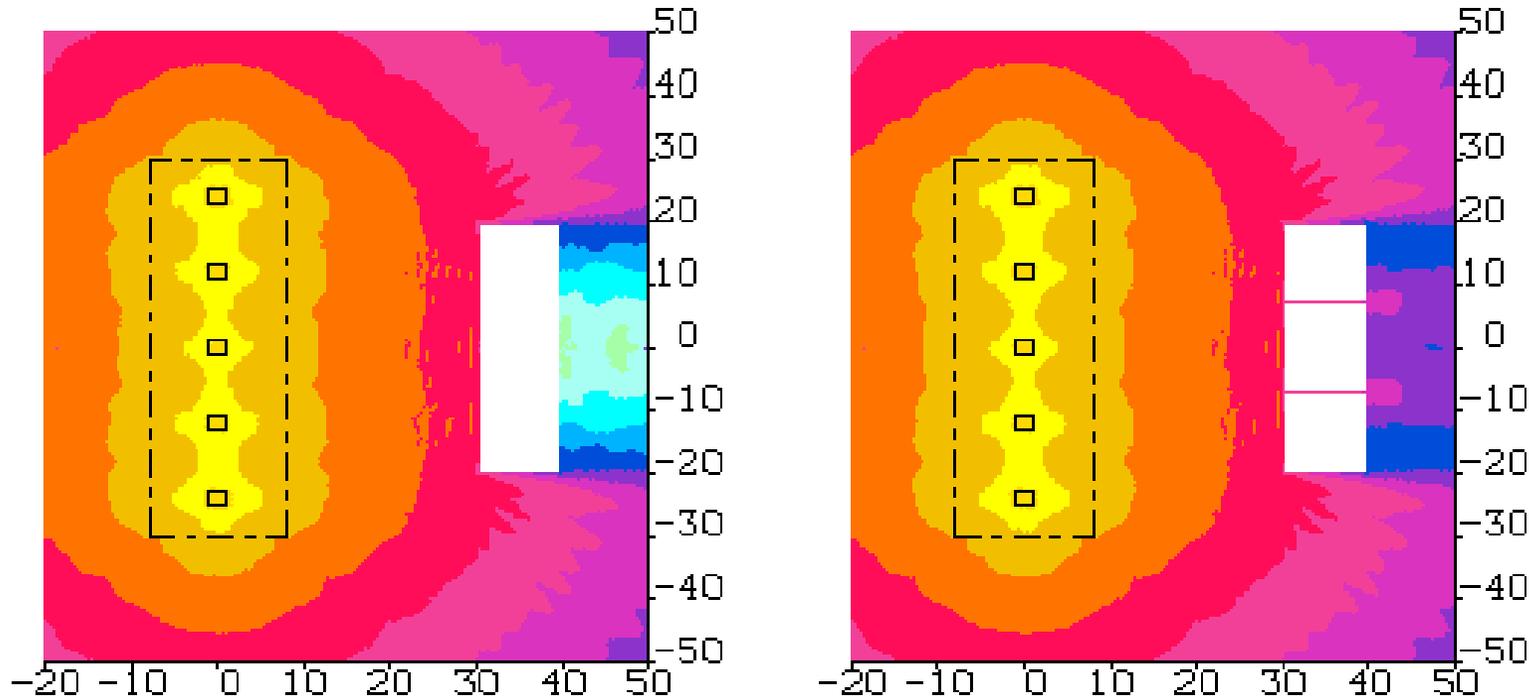
Permet une compréhension des différents chemins de propagations.



Niveaux de vitesse verticale

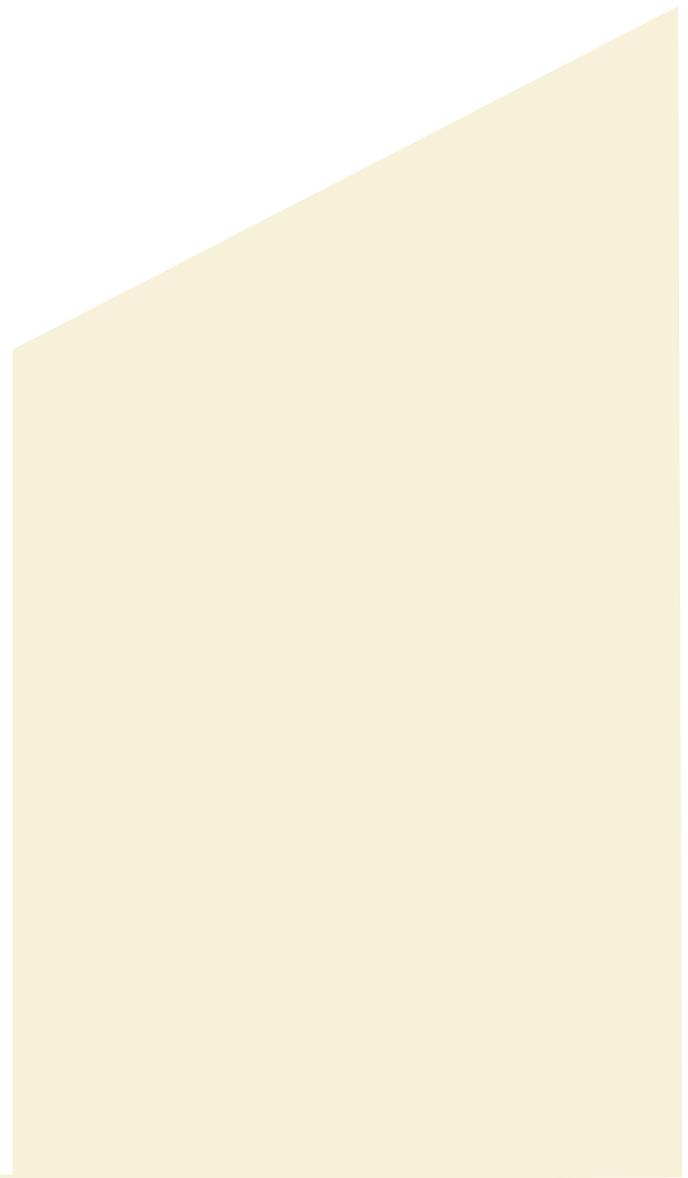
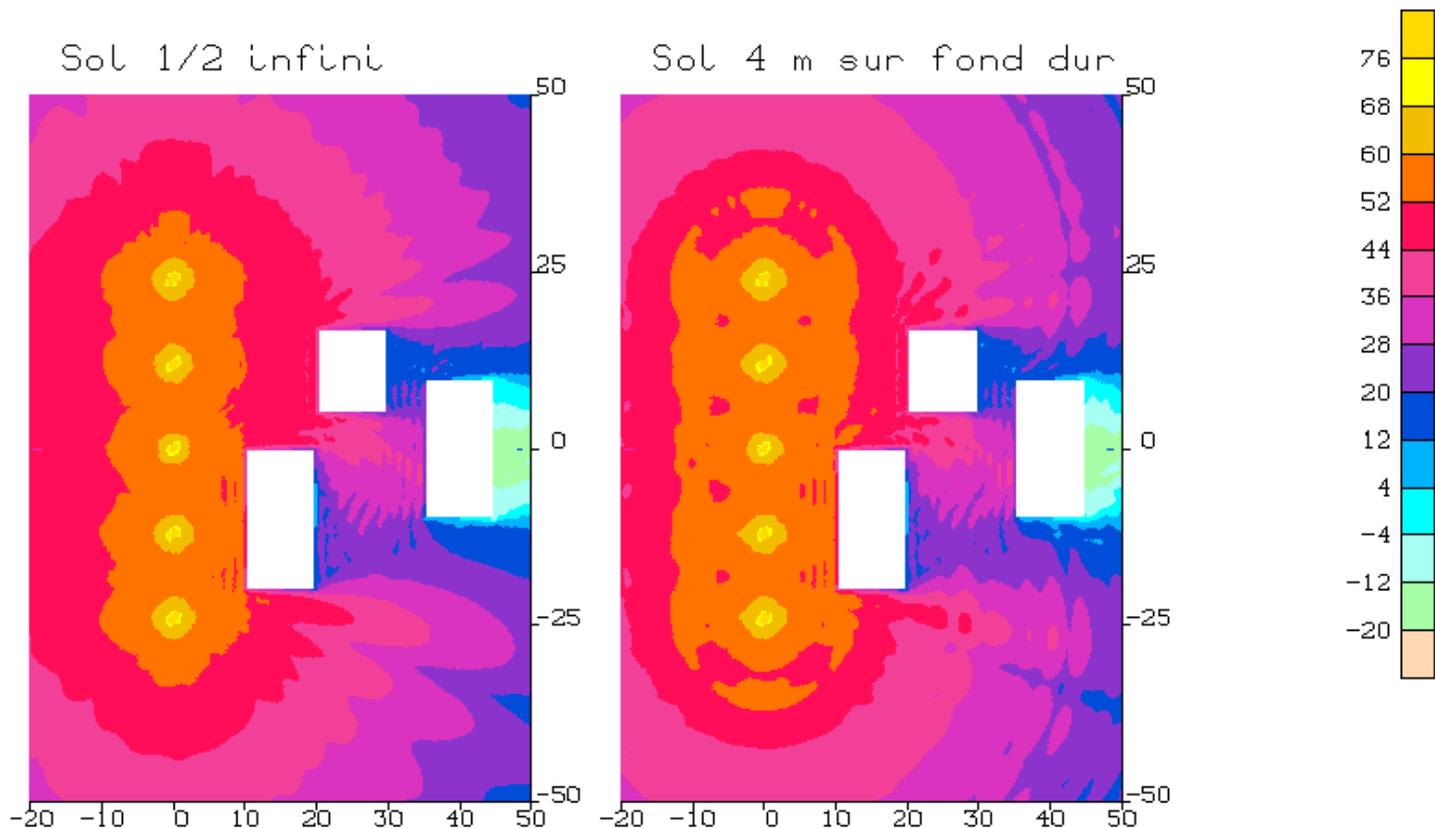
Prise en compte de parois internes

Importance du transfert vibratoire au travers du bâtiment en zone d'ombre (100 Hz)



Niveaux de vitesse verticale

Importance du transfert vibratoire au travers du bâtiment en zone d'ombre (100 Hz)



Transmission des vibrations viaduc/fondations + sol + bâtiment + acoustique

Application ferroviaire ; basses fréquences (< 400 Hz)

Tout FEM3D: temps de calculs et difficulté à propager à distance.

Une méthode hybride combinant différents modèles. Approche par mobilités.

Optimisant les temps de calculs, fondations complexes, sols.

Différents niveaux de simplification

Un logiciel dédié combinant automatiquement les différentes étapes

- Difficulté à valider numériquement
- Validation expérimentale: difficulté à connaître les sols
- Poursuite de la cartographie en surface
- Optimisation numérique (CPU, ..)
- Etude paramétriques
- Niveaux de bruits dans les logements
- Approches simplifiées (viaduc, bâtiments,..)

