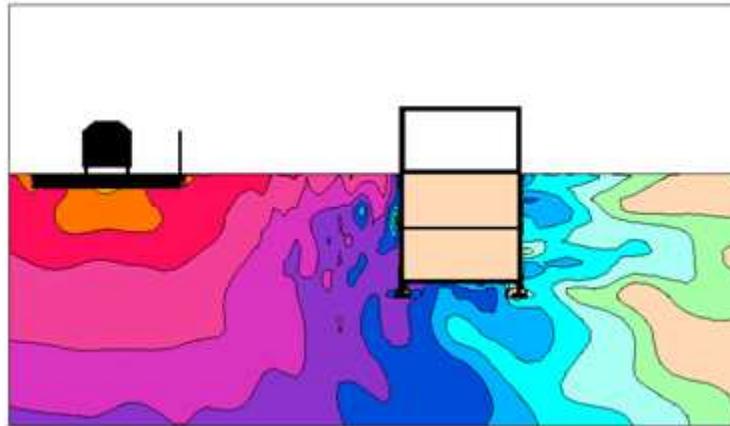


Outils de modélisation de la propagation couplée sol-structure

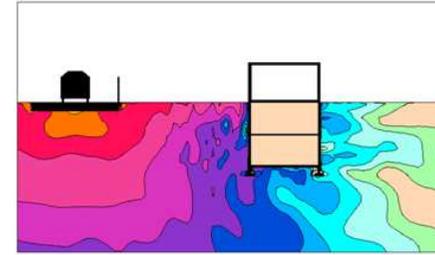
Philippe JEAN, Michel VILLOT

JTAV Blois 24 Mai 2013



CSTB
le futur en construction

Introduction



Problème

source : mesure / modèles recalés

Propagation: modélisation des sols

Transfert aux structures: type de contact, 2D, 3D

Propagation dans les structures

Rayonnement dans les locaux

Gêne: tactile, auditive

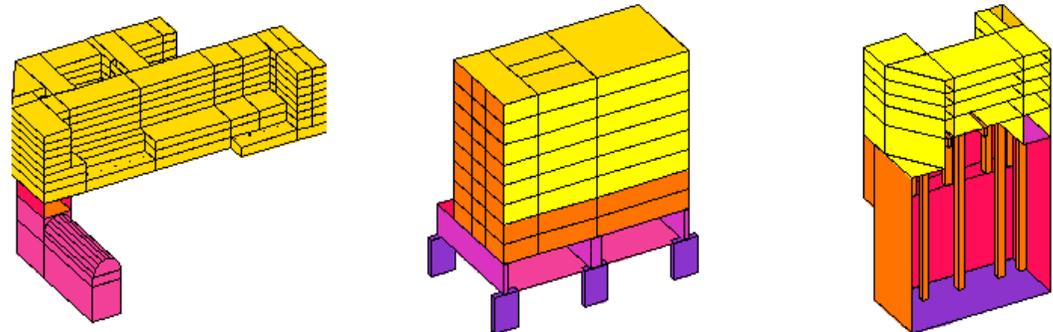
Indicateurs

Modèles: Energétiques, FEM/BEM, mixtes, mobilités,...

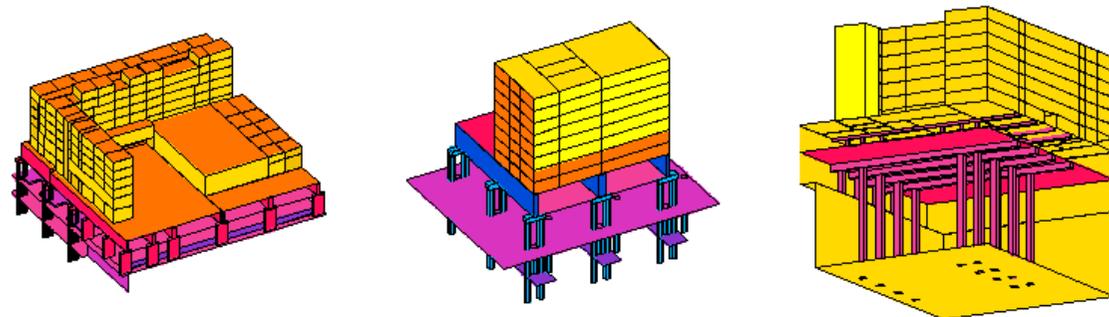
Approche
énergétique
(SEA) Statistical
Energy Analysis

Grands Projets: gares Parisiennes

Eole



RERD



Dalle SEMAPA (Austerlitz)

SEA ; superstructures, modèles dédiés en infrastructures (ondes/SEA)

SEA : limites

Il faut une densité modale suffisante

Problème aux basses fréquences : OK seulement pour excitation en flexion

⇒ Modèles mixtes SEA/ modal / ondes

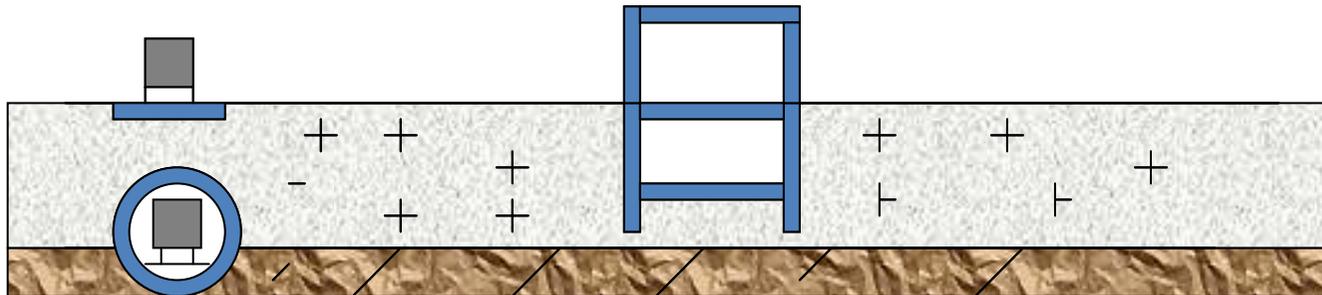
Modèles adaptés aux Basses fréquences: FEM / BEM

Les méthodes FEM/BEM Logiciel MEFISSTO



FEM : Finite Element Method

BEM : Boundary Element method



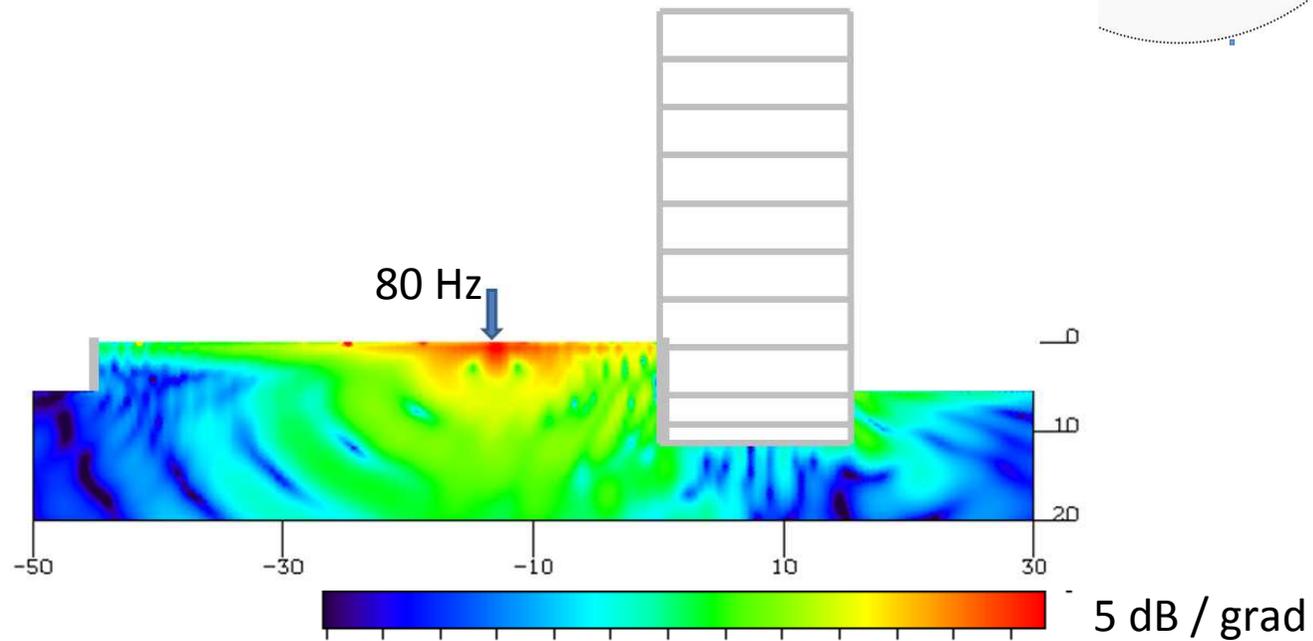
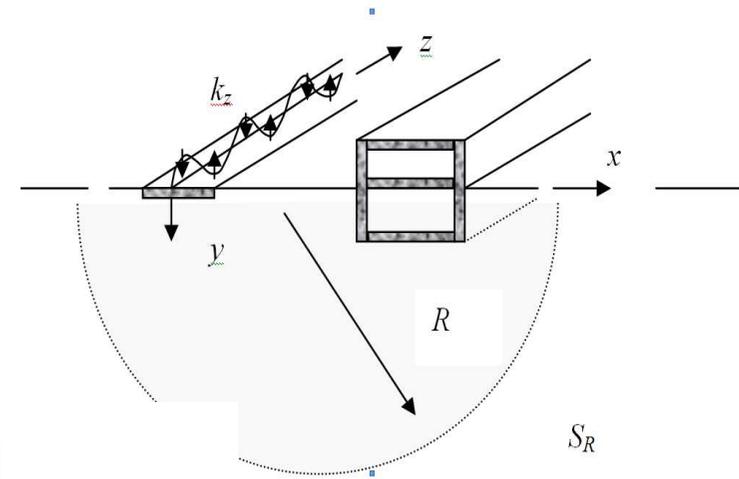
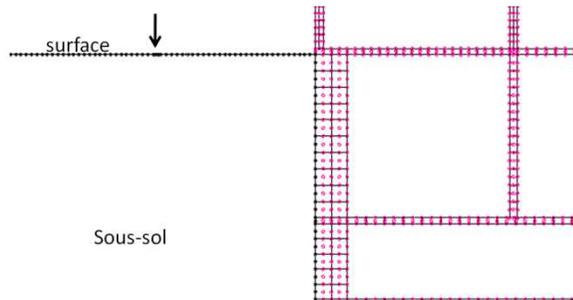
$$\bar{u}(M) \cdot \bar{I}(M) = \int_S [\bar{T}(Q, M) \cdot \bar{u}(Q) - \bar{G}(Q, M) \cdot \bar{t}(Q)] dS + \bar{h}(M)$$

- Séparation en sous-domaines
- Représentation intégrale BEM (collocation) (sols ou structure épaisses)
- ou FEM: condensation aux frontières (structure ou portions de sols)
- Continuité des déplacements et/ou des contraintes aux interfaces
- Versions 2D, 2.5D, 3D

Les méthodes FEM/BEM

Logiciel MEFISSTO

2.5D



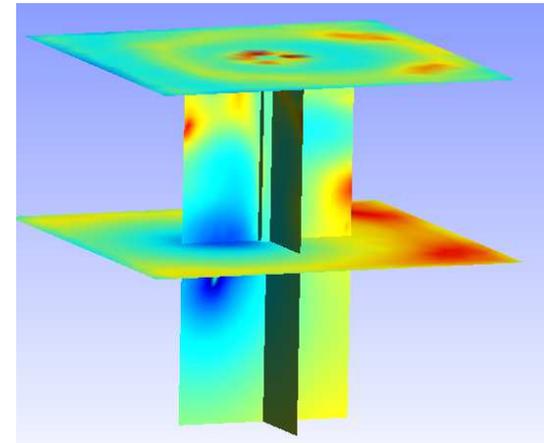
BEM 3D

Même architecture que la version 2D

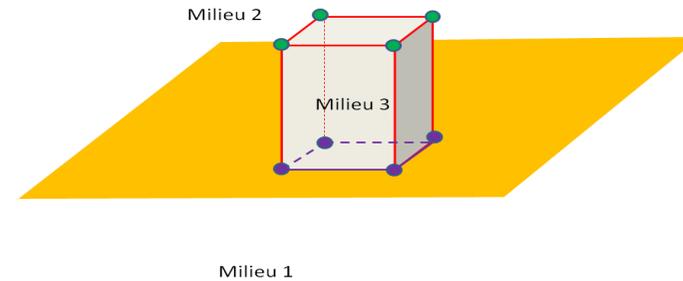
Parties BEM et FEM

Domaines multiples

Mailleur incorporé: maillage variant avec la fréquence



BEM 3D



Difficultés numériques:

Singularités: Singularité faible (termes $U.t$) : changement de variables

Singularité forte (termes $T.u$) approche de Dangla & Semblat

Gestion des discontinuités: Plusieurs approches testées:

SC: Séparation des contraintes => système matriciel non carré

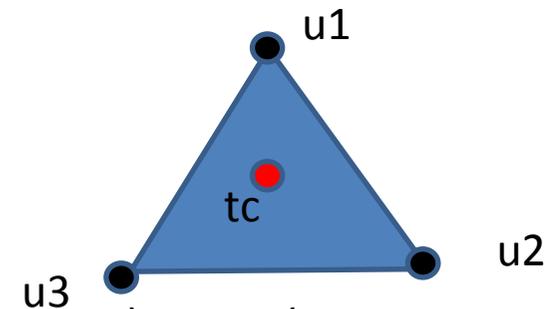
1. SC + xtra relations linéaires (GAO)

2. approche Chaillat: élément hybride:

linéaire en u et constant en t

+ combinaison linéaire des équations pour avoir un système carré

3. SC + ajout de nœuds fictifs pour avoir un système carré



BEM 3D

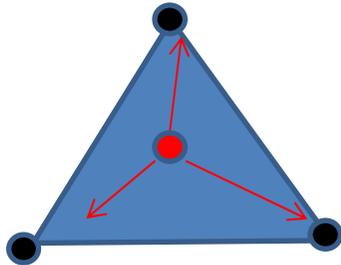
Ajout de nœuds fictifs au centre (sans ddl associés):

ddl = interpolation des ddl des 3 sommets

Gestion automatique

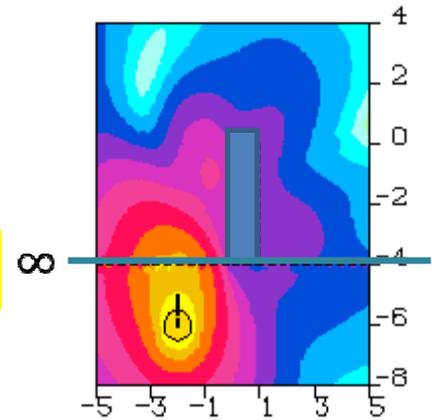
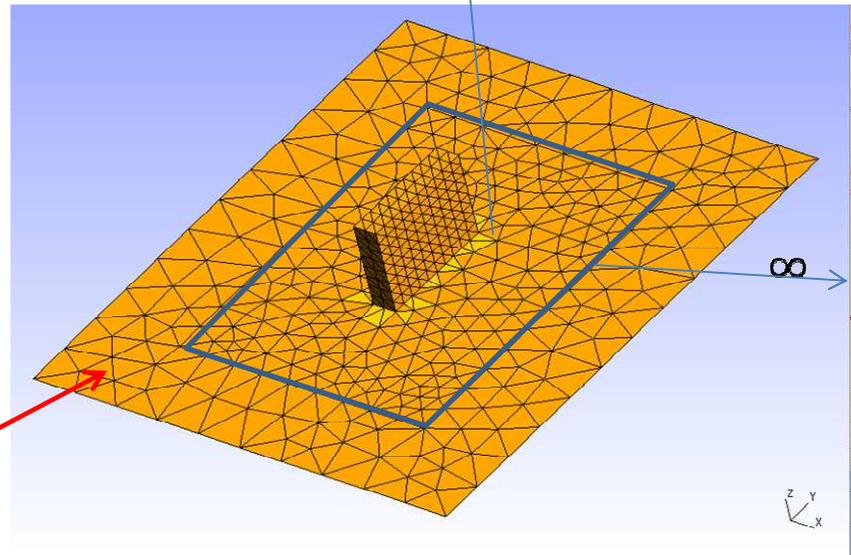
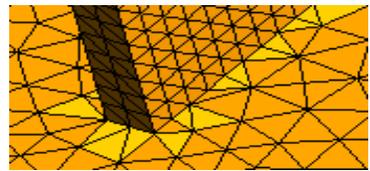
$$u_c = (u_1 + u_2 + u_3) / 3$$

$$t_c = (t_1 + t_2 + t_3) / 3$$



Zone variable selon la fréquence

Éléments avec nœuds fictifs



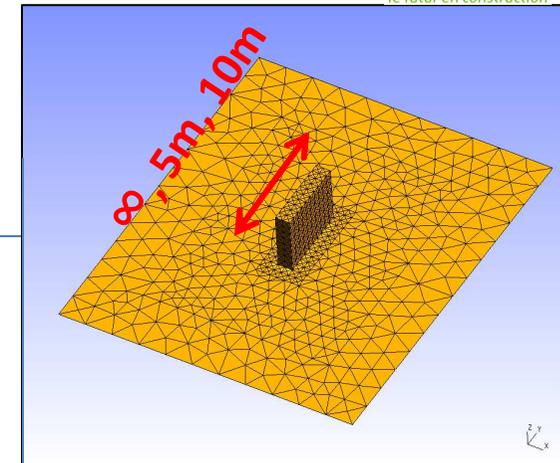
BEM 3D : exemple 1

2.5D/3D Fz 20 Log(Uz) à 100 et 200 Hz

2.5D Ly=∞

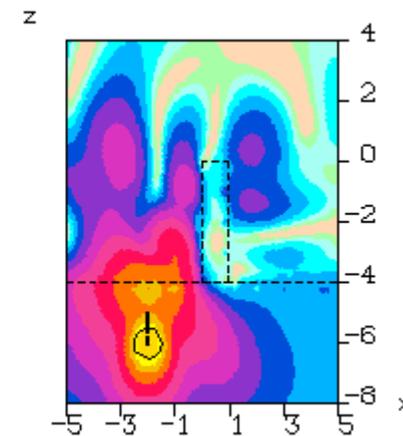
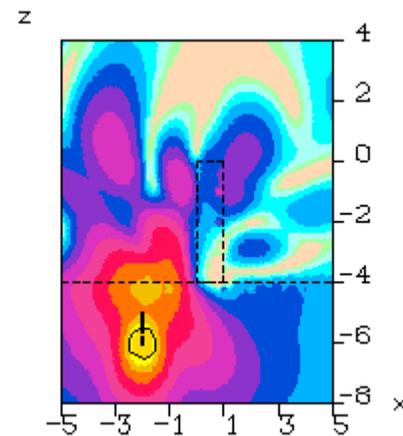
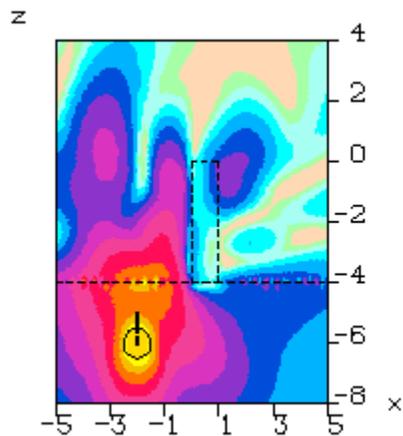
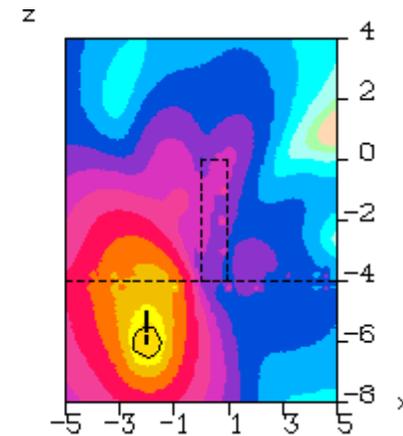
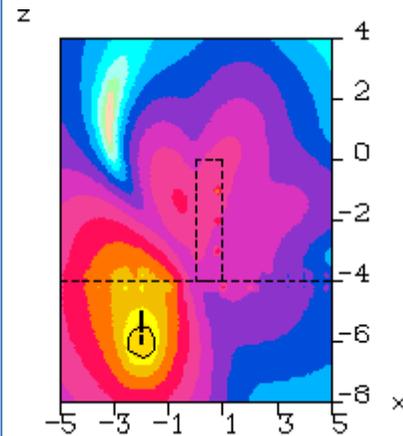
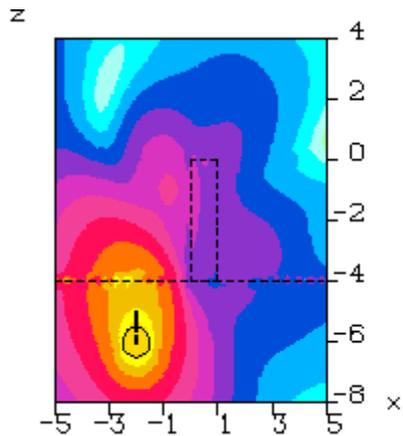
3D Ly=5m

3D Ly=10m



100 Hz

200 Hz

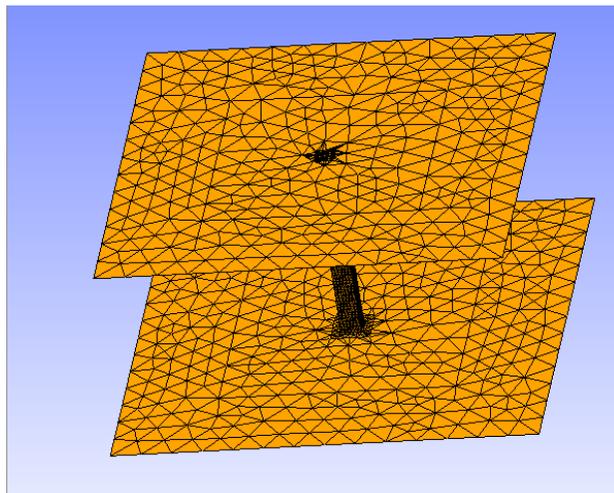


BEM 3D : exemple 2 (Hong-Kong)

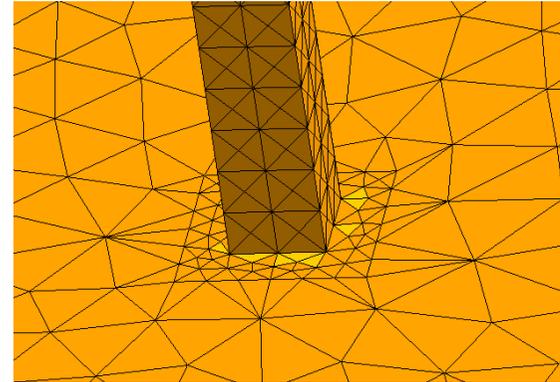
Colonne de béton: 1x1 m² , H=10m



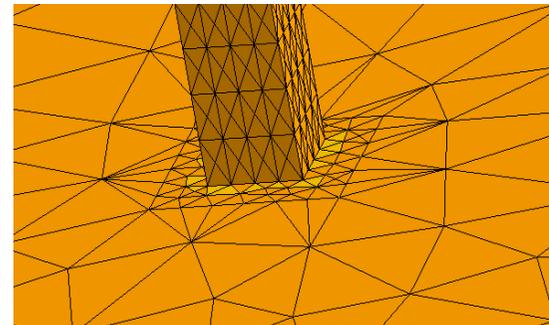
Maillage des surfaces



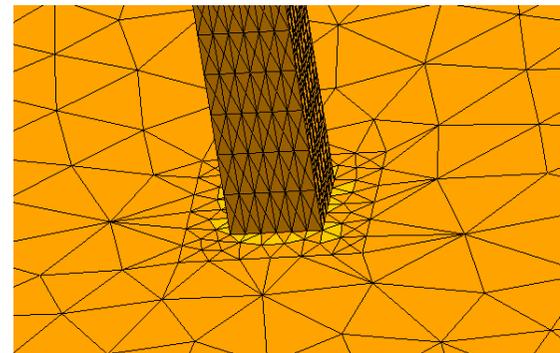
Maillage 1 : 2 mailles à la base



Maillage 2 : 4 mailles à la base



Maillage 3 : 6 mailles à la base

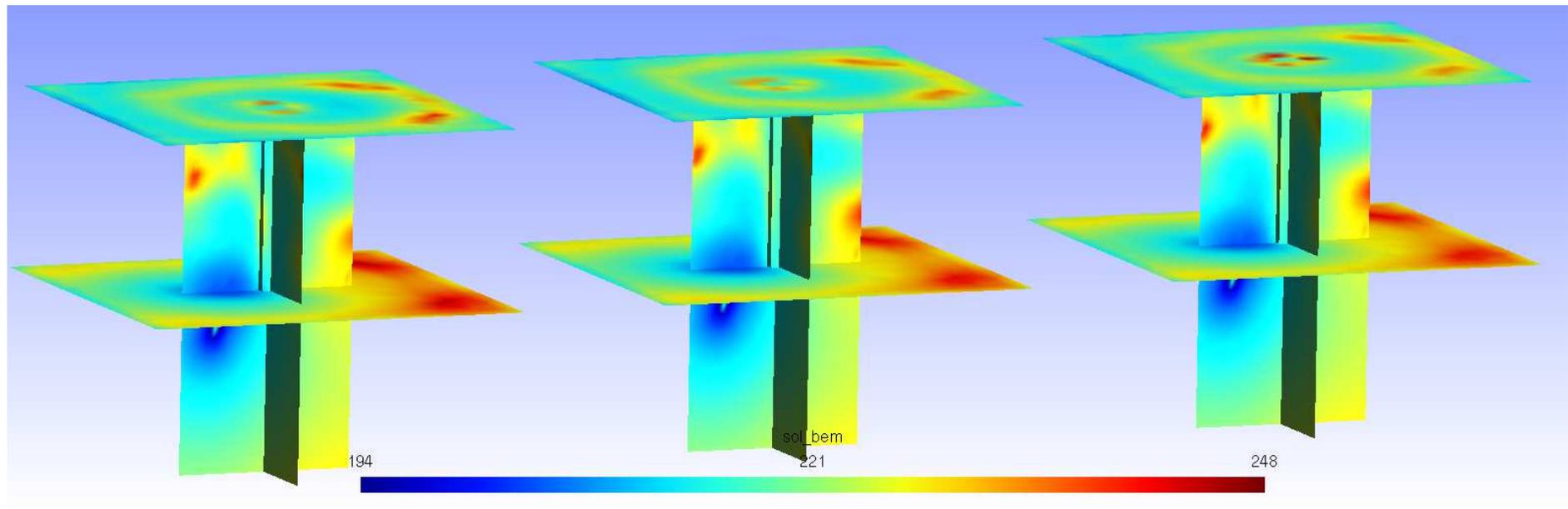


Convergence avec le maillage

Maillage 1

Maillage 2

Maillage 3



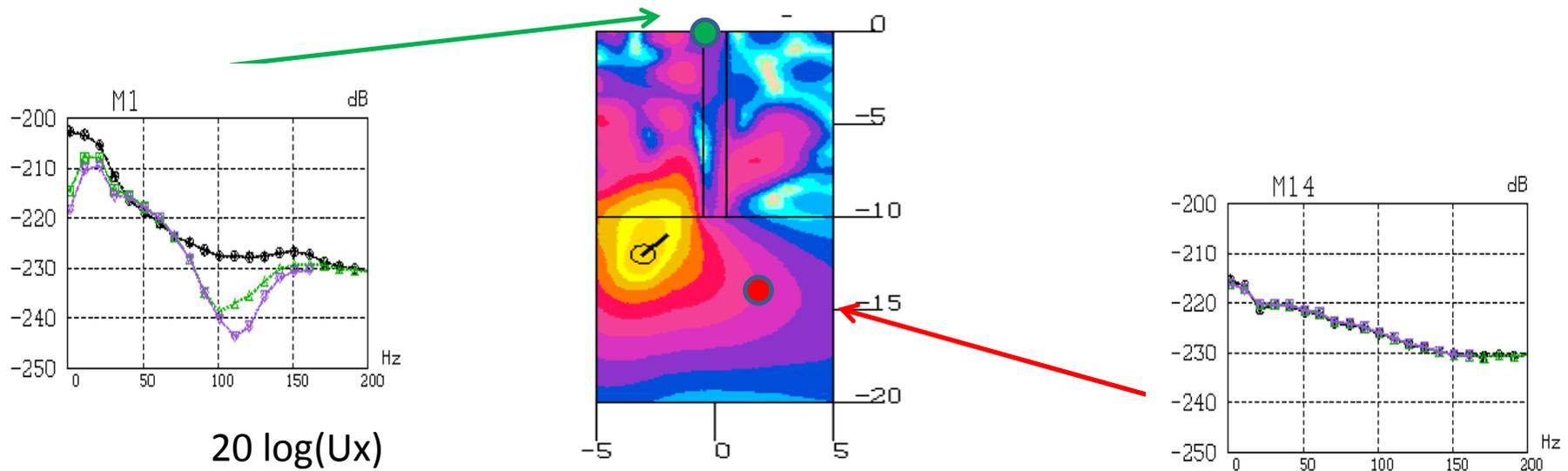
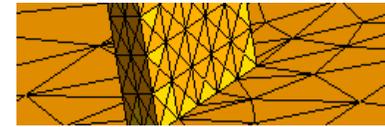
50 Hz

Convergence avec le maillage

3 Maillages mail1 mail2 mail3

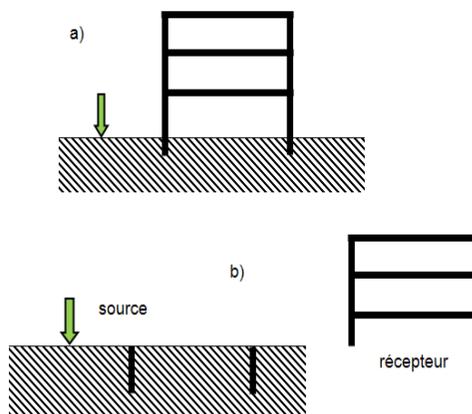
2 positions de points fictifs intercouche ----

bord de colonne (o----o)

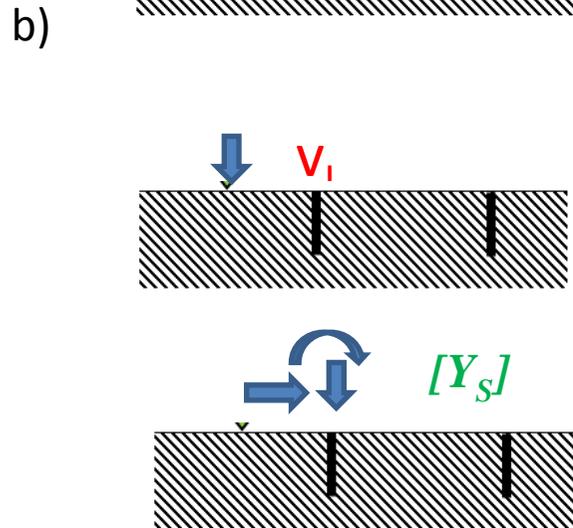
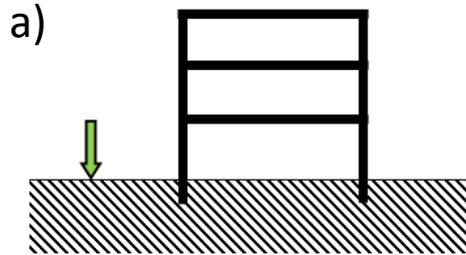


Approche par mobilités

*Thèse Pierre ROPARS
(2008-2011)*



PRINCIPE

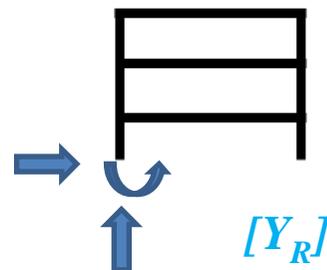


Séparation d'un problème en deux parties
(a) / (b) : source/récepteur

$$(f_c) = ([Y_S] + [Y_R])^{-1} (v_L)$$

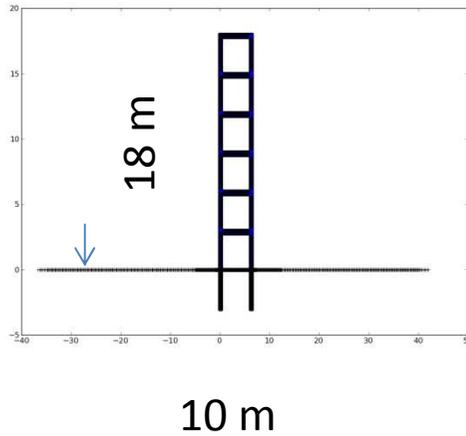
$$(v_c) = [Y_R]([Y_S] + [Y_R])^{-1} (v_L)$$

$$\Pi = 1/2 \operatorname{Re} \{ (f_c)^T (v_c)^* \}$$

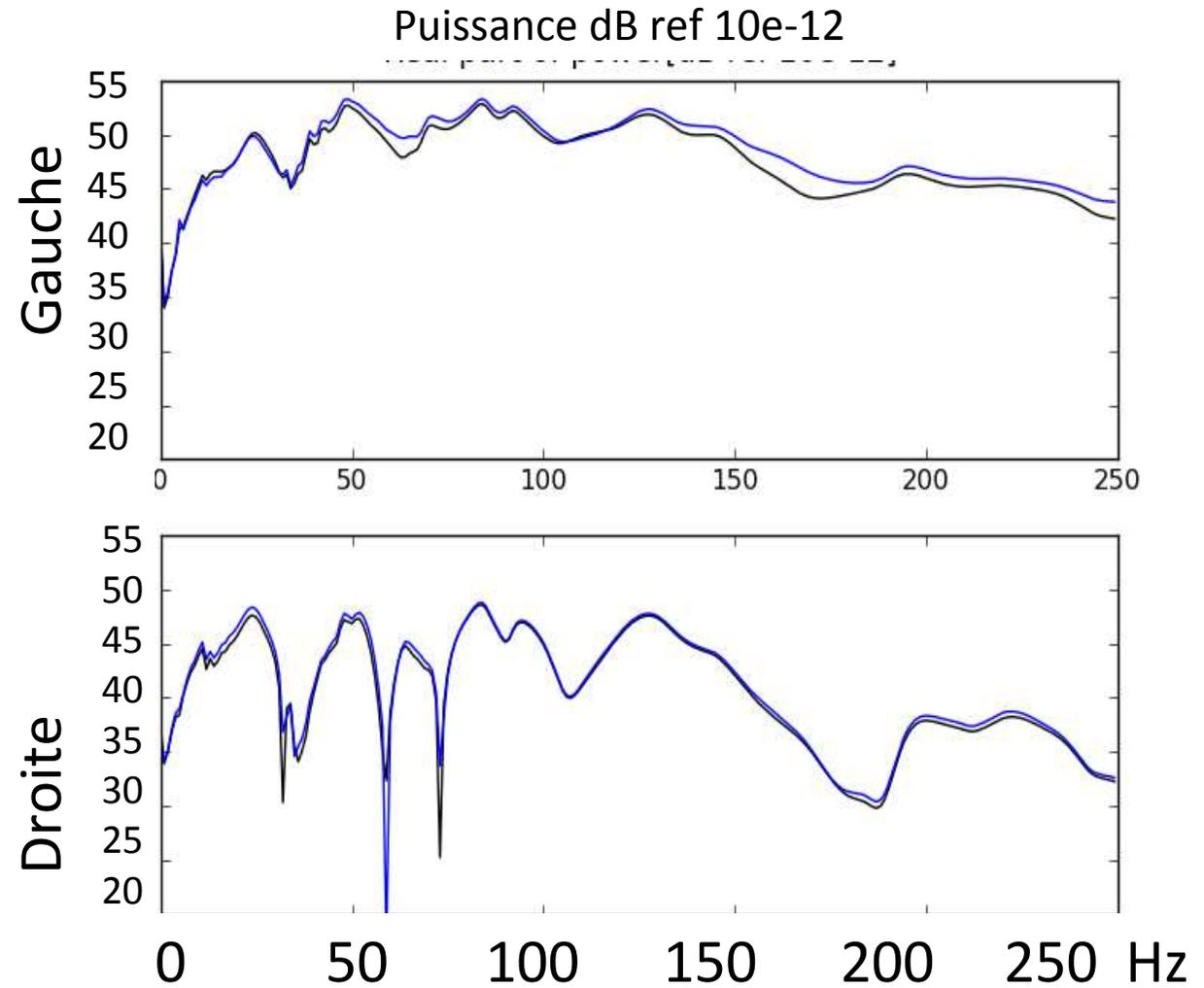


Technique des mobilités: VALIDATION

Approche par mobilités

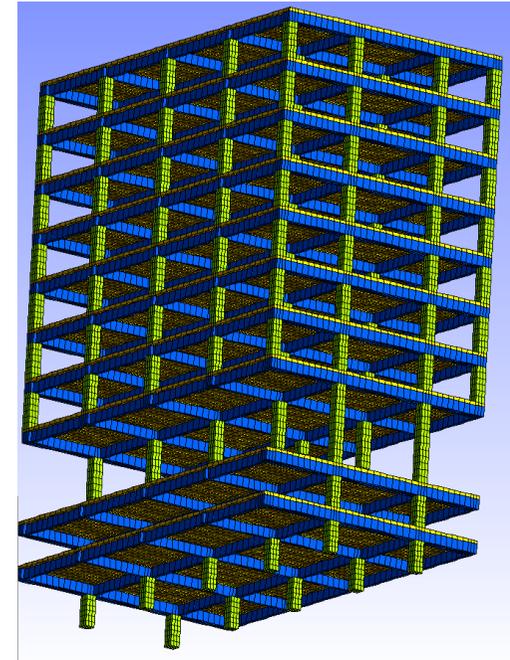
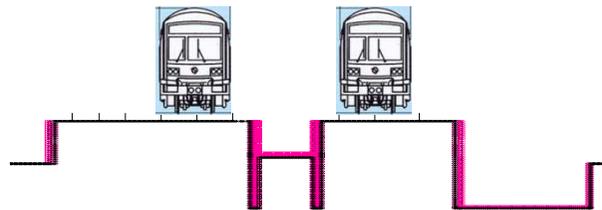


Puissance totale injectée :
méthode des mobilités
MEFISSTO



Application mobilités (1) : Bâtiment voisin d'une gare ferroviaire

SNCF-Eole

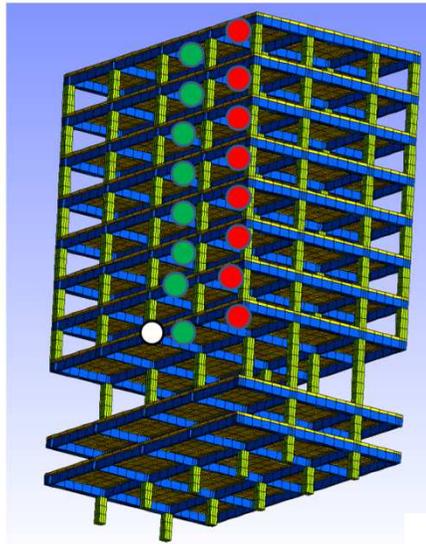


*Partie sous-terraines (calculs BEM) et
supérieure (calcul Nastran) d'un bâtiment*

Réponse des dalles: flexion

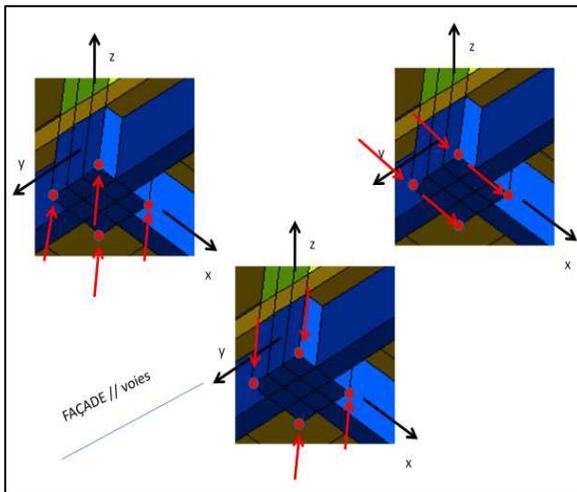
Bâtiment voisin d'une gare

- Excitation
- Colonne 1
- Colonne 2



Excitation horizontale

verticale



Colonne 1

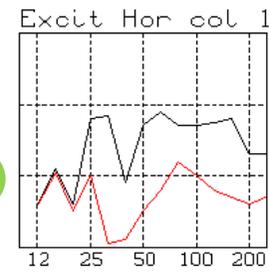


Colonne 2

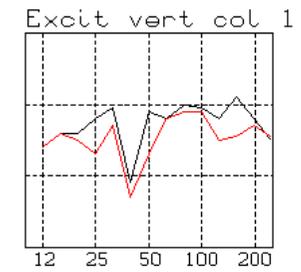


LV flexion de dalles

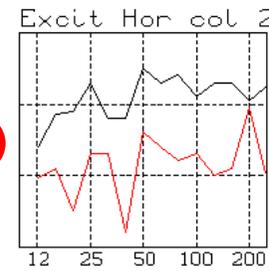
10 dB / grad



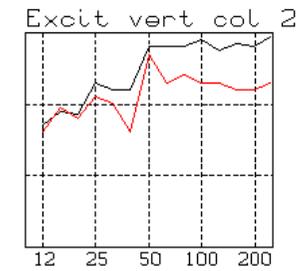
Hz



Hz



Hz



Hz

RDC

RDC+1

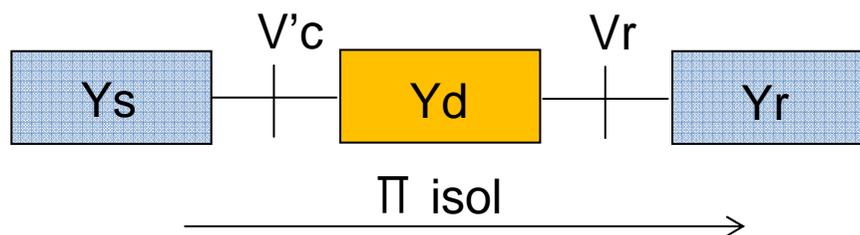
Application mobilités (2) : projet DIAVIBAT

Projet ADEME sur 2 ans (2013-2014) ; participation CSTB, CDM, ACOUPHEN

Objet: dispositif d'atténuation vibratoire dans les bâtiments (plots élastomères et boîtes à ressort)

Utilisation des mobilités amont (fondations) et aval (bâtiment en superstructure) pour mieux estimer (prévoir) la performance des dispositifs (perte par insertion en termes de puissance vibratoire transmise)

Utilisation des vitesses amont et aval pour contrôler sur site la performance des dispositifs.

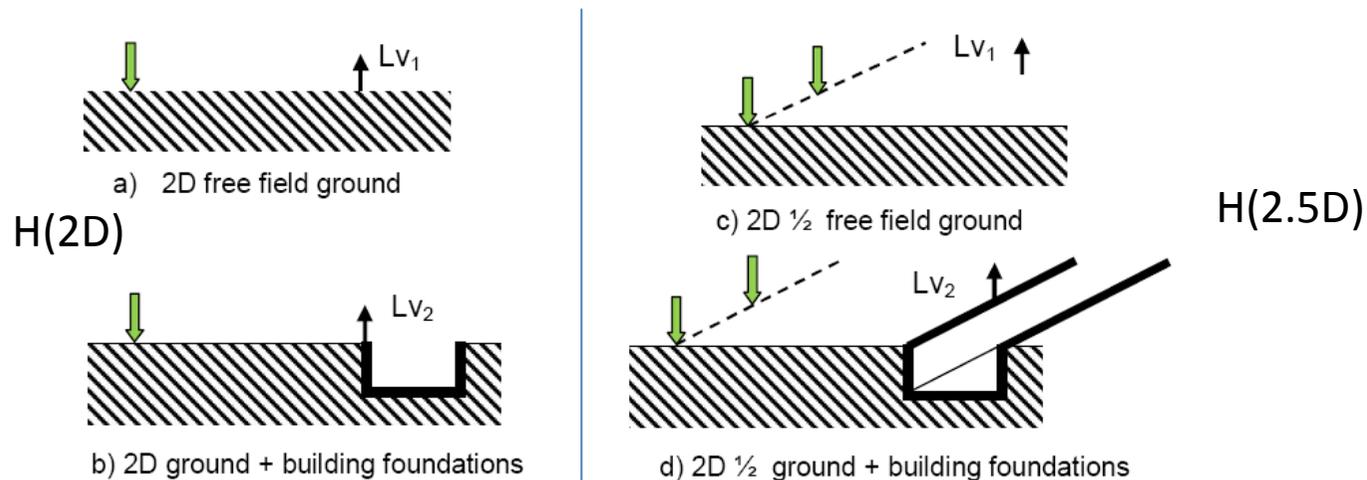


$$Y_R' = Y_R + Y_d$$

Validation expérimentale Ferroviaire

SNCF/CSTB/SATEBA

1. Démarche: pas de bâtiment: recalage des vitesses en surface (BEM 2.5D)
2. Fonction de transfert: $H = LV(\text{sol seul}) - LV(\text{sol+fondation})$

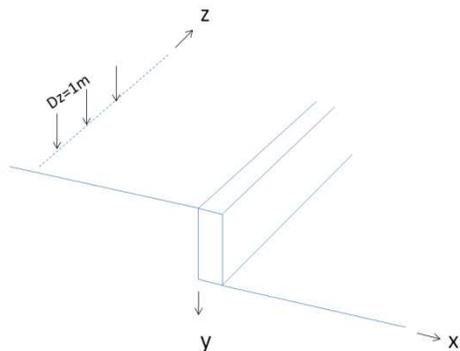


3. Extrapolation à d'autres cas: calculs BEM2D: recalage des calculs 2D avec:

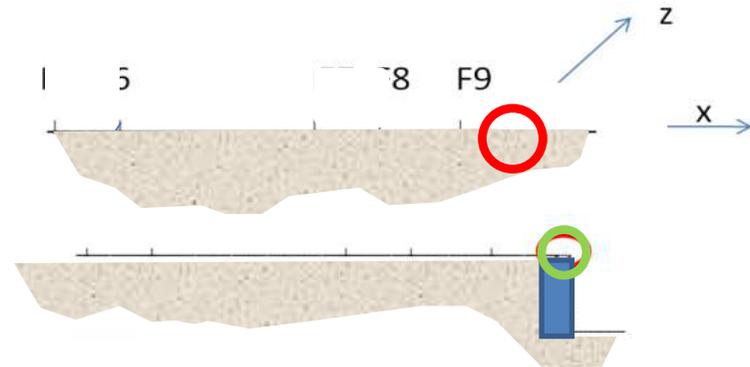
(H supposée indépendante de la distance aux voies)

$$H(2D) / H(2.5D)$$

Importance du 2.5D / 2D



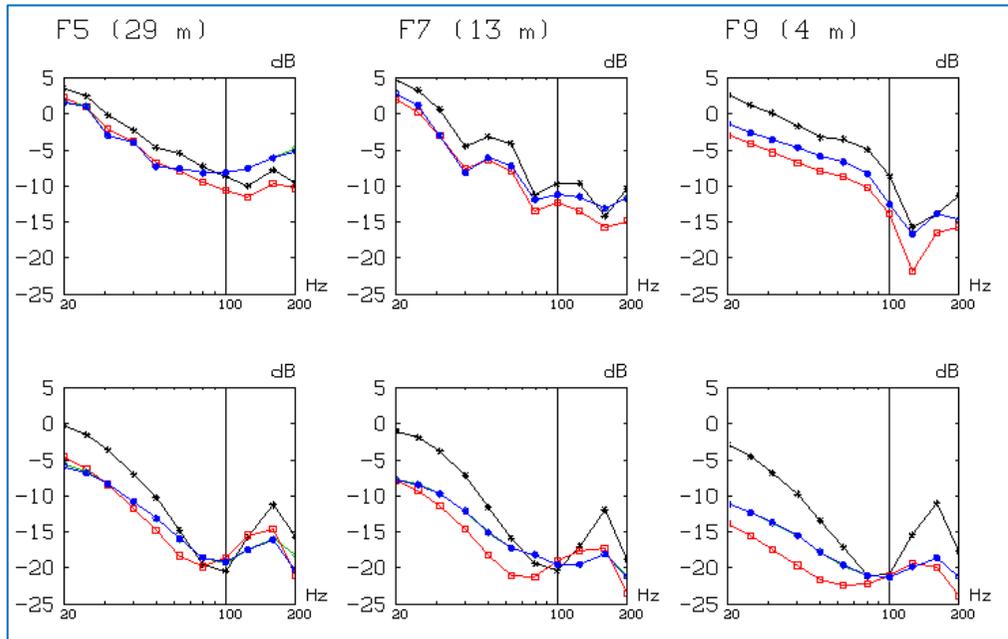
$$H = LV(\text{ }) - LV(\text{ })$$



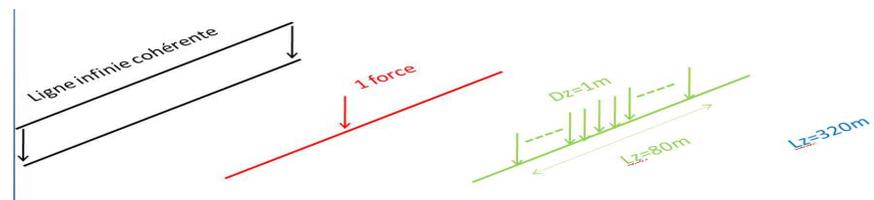
$$H = LV(\text{ }) - LV(\text{ })$$

Horiz

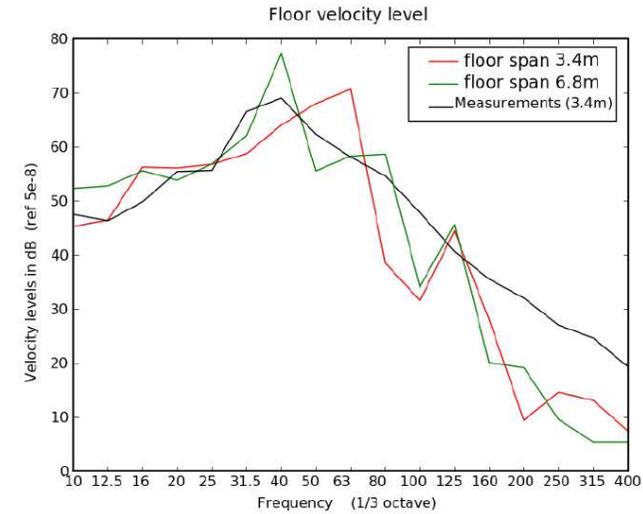
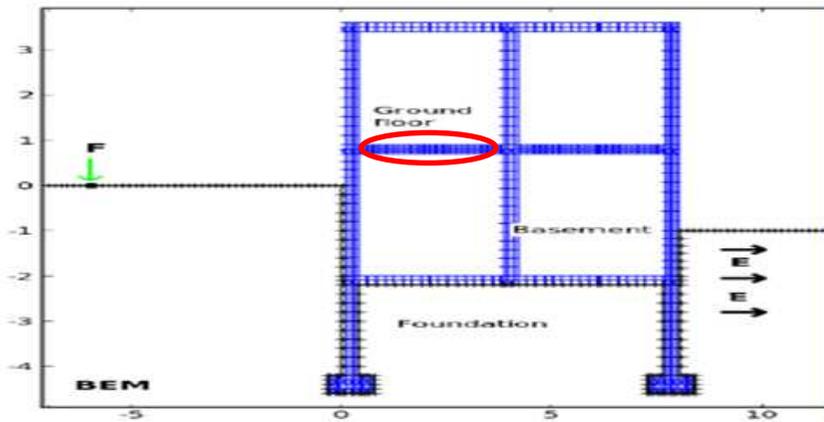
Vert



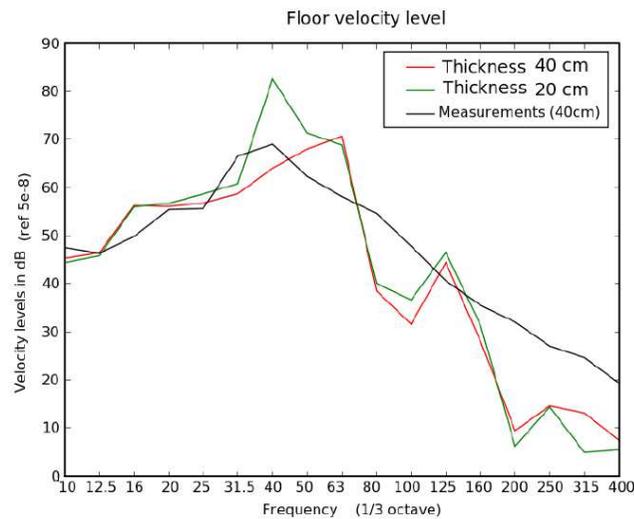
ligne cohérente , source ponctuelle, répartition de forces (tous les m) sur 80 m, sur 320 m



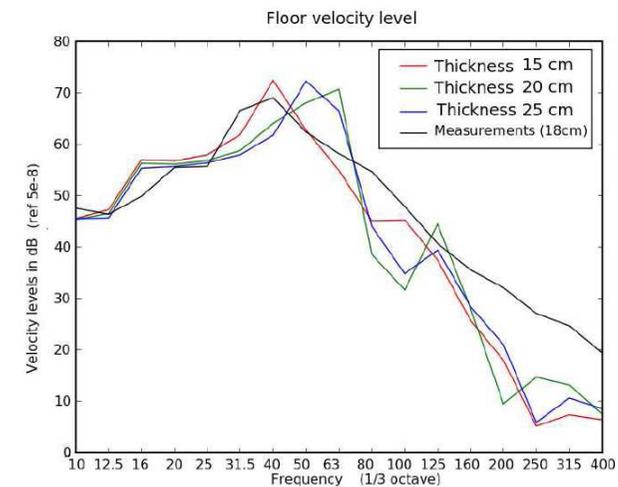
Influence de données géométriques



Influence de la portée des dalles



Influence de l'épaisseur de la façade

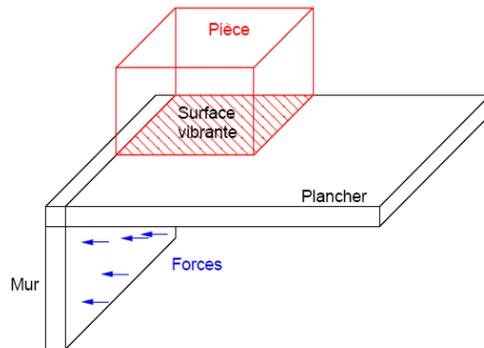


Influence de l'épaisseur des dalles

Rayonnement dans les volumes

Calculs

Thèse Guillaume COCQUEL (2005-2008) RATP/CSTB



$$\sigma = \frac{\Pi_{rad}}{\rho_0 c_0 S \langle v^2 \rangle}$$

where

$$\Pi_{rad} = \frac{\langle p^2 \rangle A}{4\rho_0 c_0}$$

Modélisation du rayonnement acoustique

Modèle analytique => vitesse V au sol

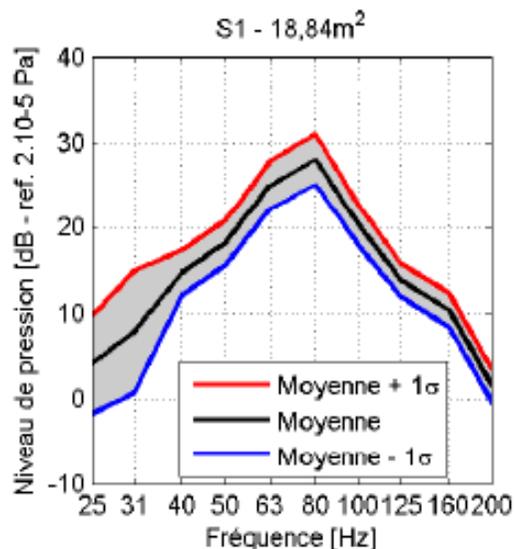
Rayonnement acoustique: Vsol, G réponse local => P

$$p(M) = \int_{S_v} j\omega\rho_0 \times v(Q) \times G_v(M, Q) \times dS(Q)$$

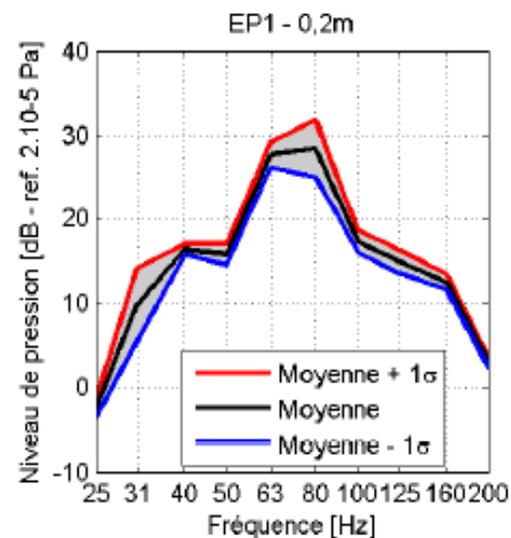
Tr => A A et P² => Π_{rad} => σ

Rayonnement dans les volumes - variabilité

Incertitude issue des simulations



surface bloquée



épaisseur bloquée

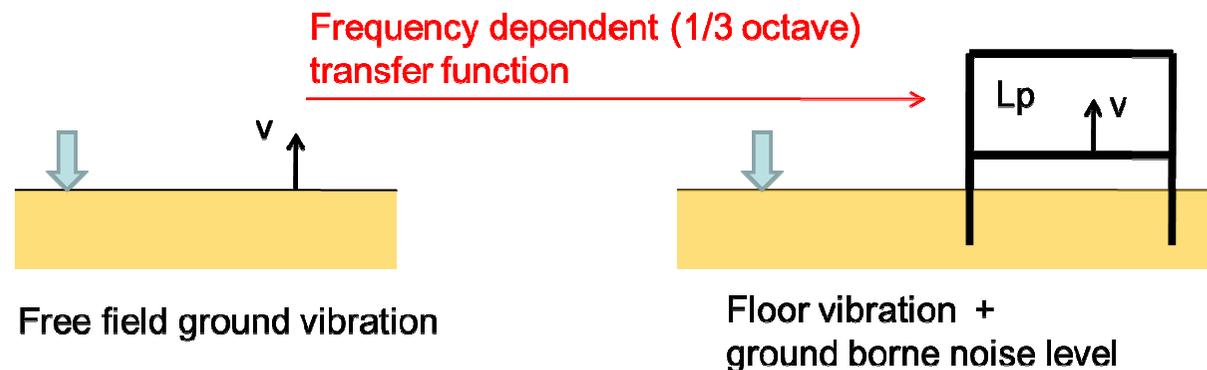
- Salle de séjour : S1 = 18,24m², S2 = 19,11m², S3 = 20,00m², S4 = 20,91m², S5 = 21,84m²,
- Hauteur : H1 = 2,5m, H2 = 2,6m, H3 = 2,7m, H4 = 2,8m, H5 = 2,9m, H6 = 3m,
- Epaisseur de la dalle : EP1 = 0,200m, EP2 = 0,225m, EP3 = 0,250m, EP4 = 0,275m, EP5 = 0,300m,
- Conditions aux limites : Encastré (CC), Appuis Simples (SS).

Objet: traitement des vibrations ferroviaires à la source (trains, voies, sol)

Partenariat important (compagnies ferroviaires, industriels, universités et centres techniques: FR,ES,DE,CH,GB,BE,SE)

Performances exprimées en termes de perte par insertion (1/3 octave) en niveau vibratoire au sol près des voies

Rôle du CSTB : transfert des performances des traitements développés, du sol au bâtiment en terme de diminution d'exposition vibratoire et sonore (bruit solidien) des habitants



Méthode

Décomposition en 4 fonctions de transfert :

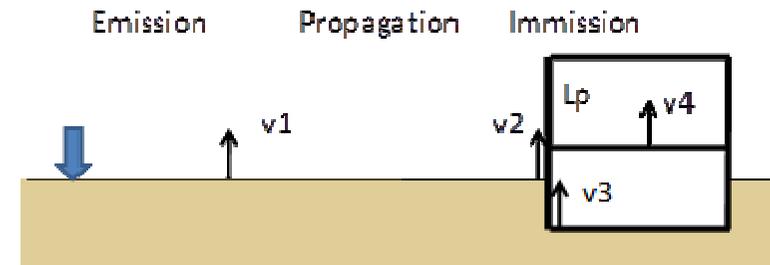
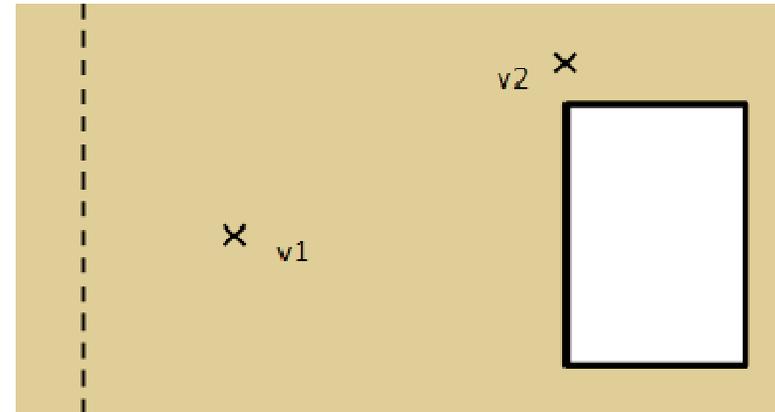
- TF1: du sol (près des voies) au sol (champ libre) près du bâtiment (latéral)
- TF2: du sol (près du bâtiment) aux fondations du bâtiment
- TF3: des fondations aux planchers
- TF4: du plancher (vibrations) au local (bruit solidien)

Détermination de:

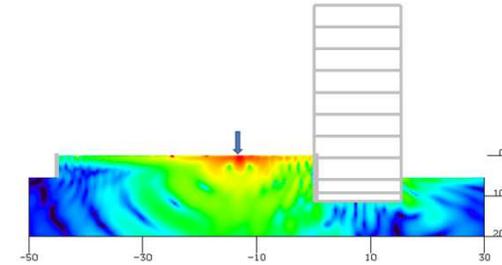
- TF1: par modèle sol 2D ½ (MEFISSTO)
- TF2 et TF3: modèles empiriques (statistiques) existants (Suisse et Allemagne) (*)
- TF4: par modèle statistique énergétique (thèse G. COCQUEL)

Outil MATLAB de transfert sol-bâtiment développé, intégrant le calcul des descripteurs d'exposition (signaux temporels).

(*) données empiriques sol/fondations pauvres ; effets de variation du sol et/ou des fondations sur TF2 calculés avec MEFISSTO pour enrichir les modèles empiriques existants



Conclusions et perspectives



- SEA: valide avec excitation en flexion dès 50 Hz
- Approches BEM/FEM
- Approche source /récepteur par mobilités: sol/fondation: BEM2.5D, 3D
structure isolée: logiciel du commerce (Nastran,..)
- Superstructure en 2D: résultats suffisants pour une étude paramétrique
- Etude de sensibilité aux variations des paramètres structuraux:
=> permet d'élargir les bases de données des modèles empiriques
- Estimation du bruit solidien depuis des niveaux vibratoires
- Indicateurs d'exposition vibratoire en post-traitement
=> expression de modifications structurales ou de traitements en terme de variation de la gêne