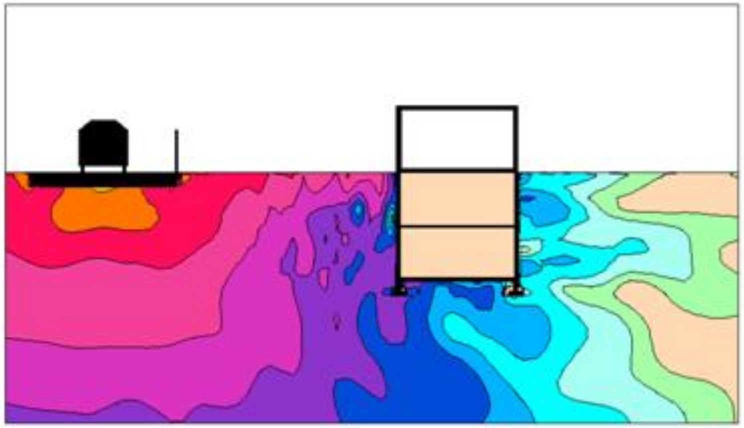
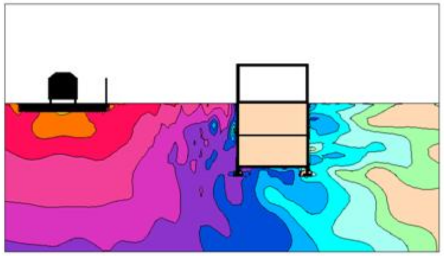
# Outils de modélisation de la propagation couplée sol-structure

Philippe JEAN, Michel VILLOT



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

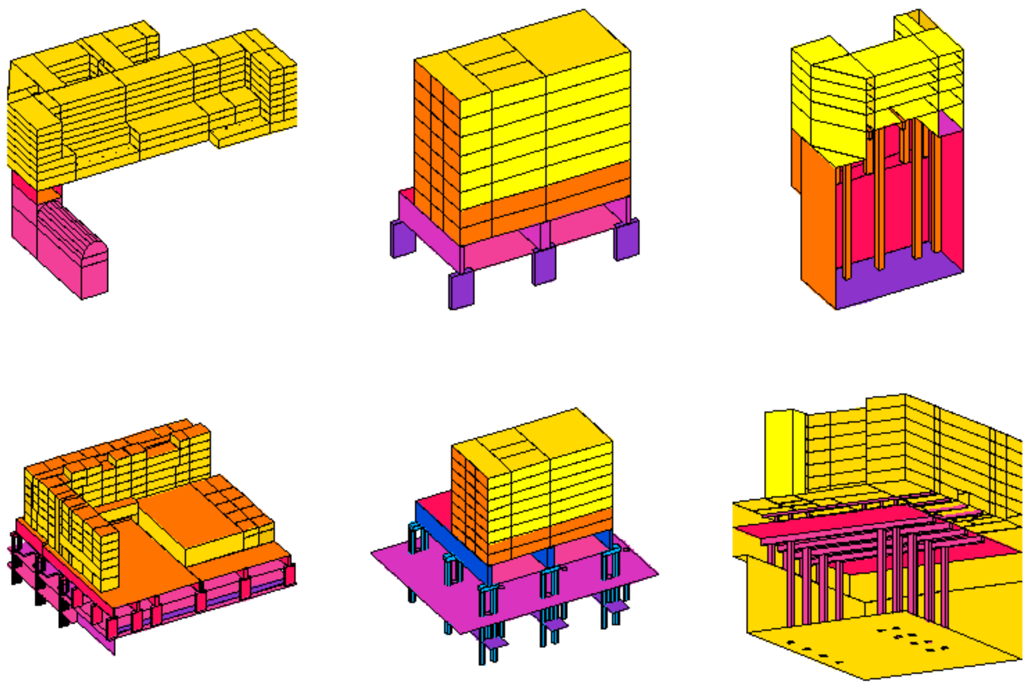
Rayonnement dans les locaux

Gêne: tactile, auditive

Indicateurs

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

Approche énergétique (SEA) Statistical Energy Analysis



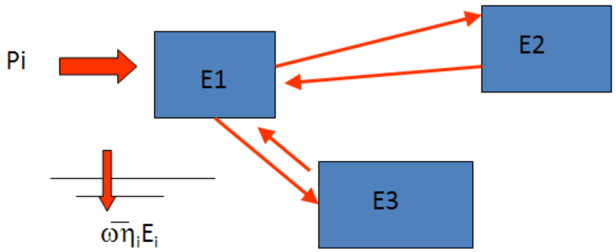
# SEA : Principe

Décomposition en systèmes : plaques/ poutres/ poteaux/ volumes

Energies moyennes (F,L,T) par système et par bande de fq (1/3 octave)

Bilan de puissance

$$P_i = \omega\eta_i E_i + \Sigma\ \omega\eta_{ij}\ (E_i\ /ni - E_j/n_j)$$




$$\begin{pmatrix} \eta_1+\eta_{12}+\eta_{13} & -\eta_{21} & -\eta_{31} \\ -\eta_{12} & \eta_2+\eta_{21} & 0 \\ -\eta_{13} & 0 & \eta_3+\eta_{31} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} E1 \\ E2 \\ E3 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_i/\omega \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}$$

# SEA : limites

Il faut une densité modale suffisante

Problème aux basses fréquences pour les ondes longitudinales
ondes de flexion > 50 Hz

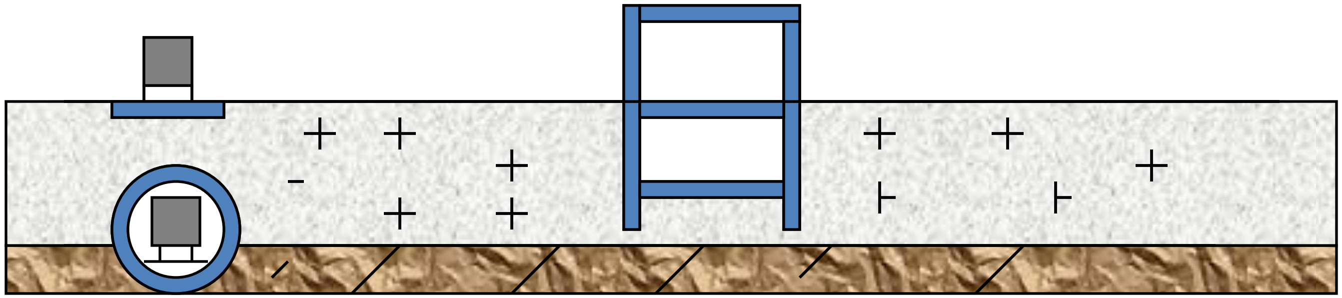
$\Rightarrow$ Modèles mixtes SEA/ modal / ondes

Modèles adaptés aux Basses fréquences: FEM / BEM

# Les méthodes
# FEM/BEM
# Logiciel MEFISSTO


FEM : Finite Element Method
BEM : Boundary Element method

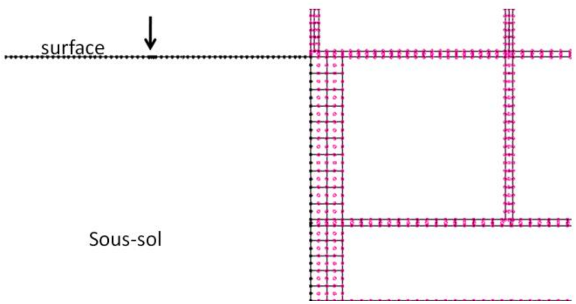
# Interaction Sols/Structures (2D et 2.5D)



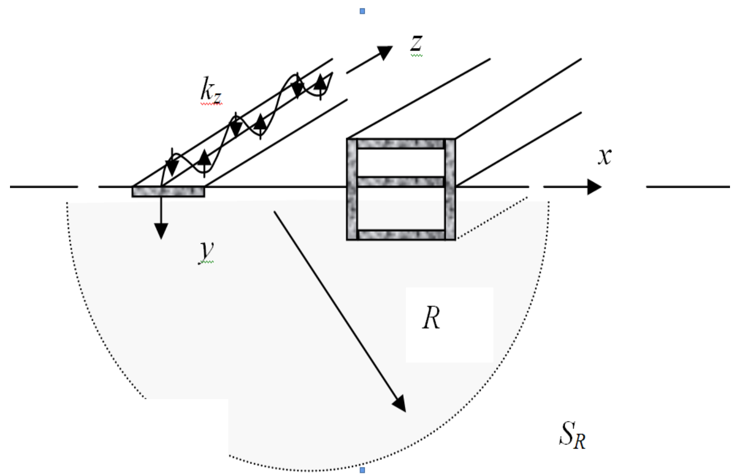
$$\bar{u}(M).\bar{I}(M) = \int_S [\bar{\bar{T}}(Q,M).\bar{u}(Q) - \bar{\bar{G}}(Q,M).\bar{t}(Q)]dS \quad + \quad \bar{h}(M)$$

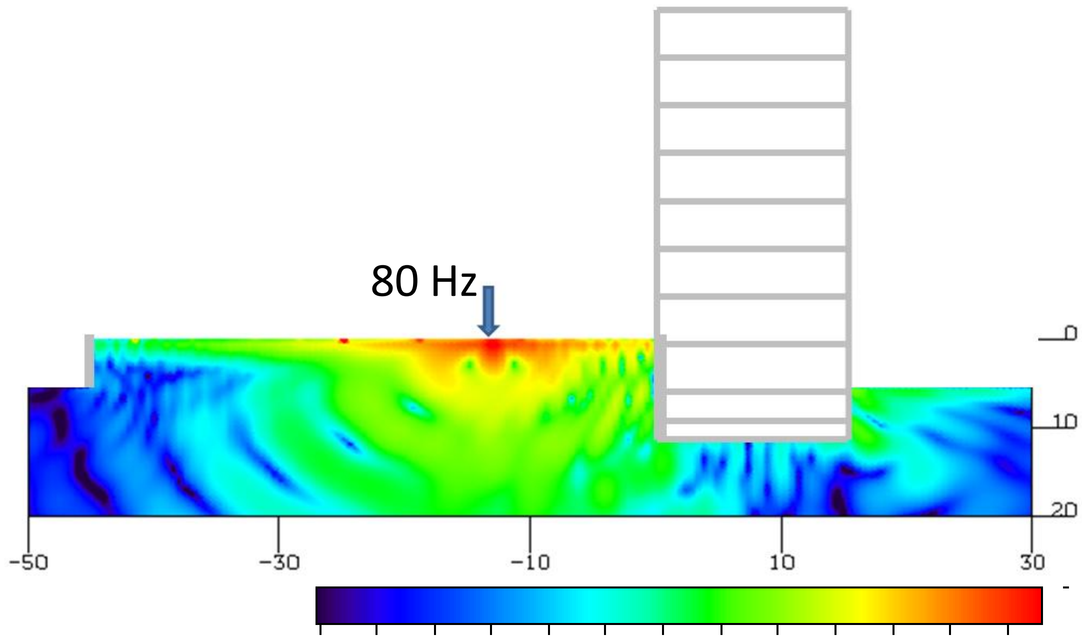
- Séparation en sous-domaines
- Représentation intégrale BEM (collocation) (sols ou structure épaisses)
- ou FEM: condensation aux frontières (structure ou portions de sols)
- Continuité des déplacements et/ou des contraintes aux interfaces

# Les méthodes FEM/BEM

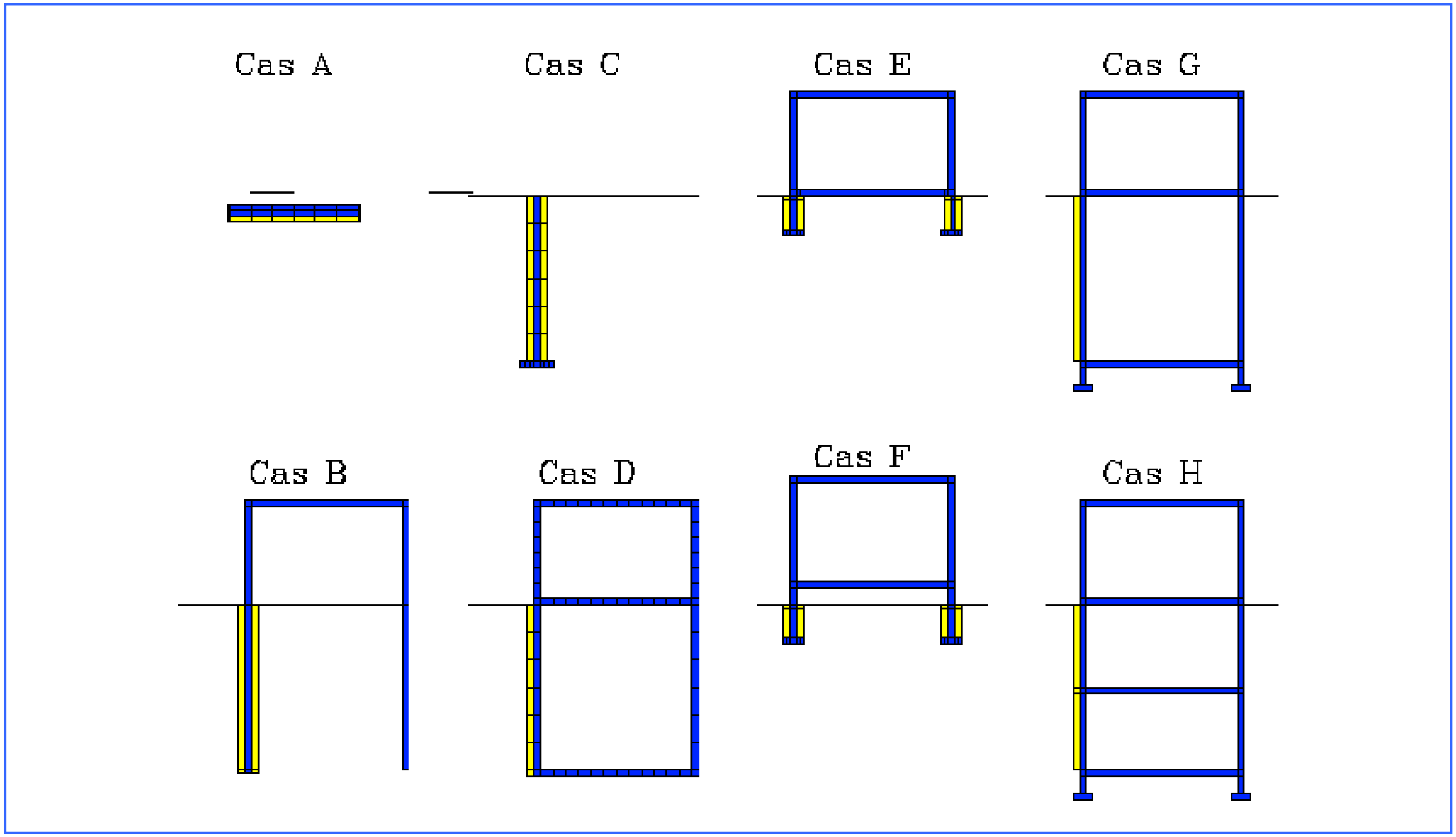



2.5D

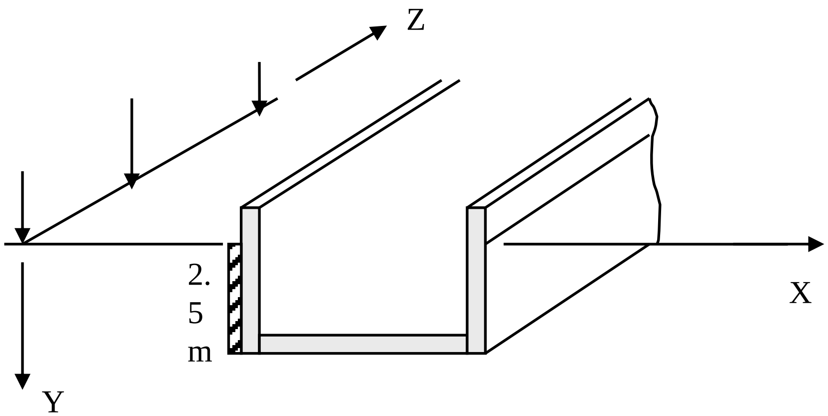


# Protection des fondations *(financement ADEME)*

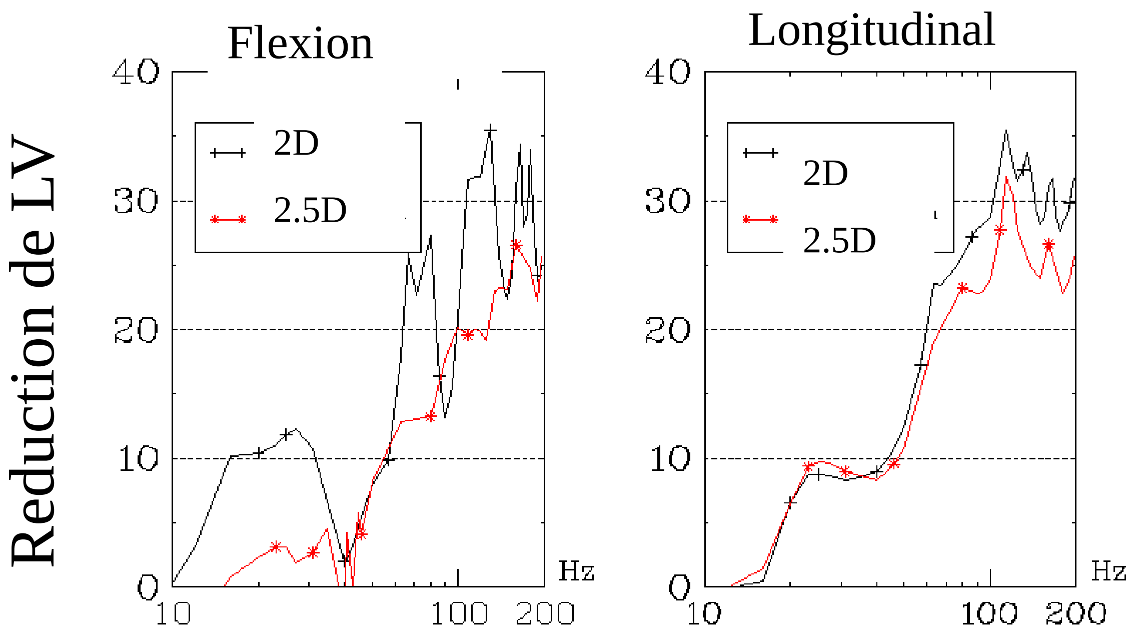


# BEM 2.5D



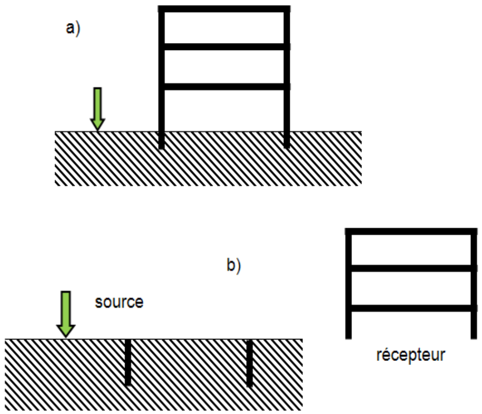

Vérification expérimentale au CSTB

Efficacité
du doublage



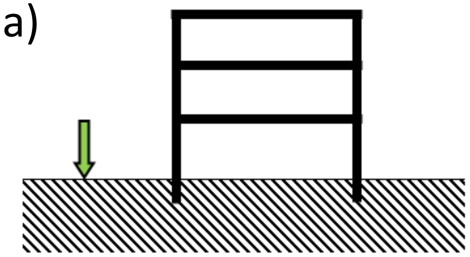
# Approche par mobilités

*Thèse Pierre ROPARS*

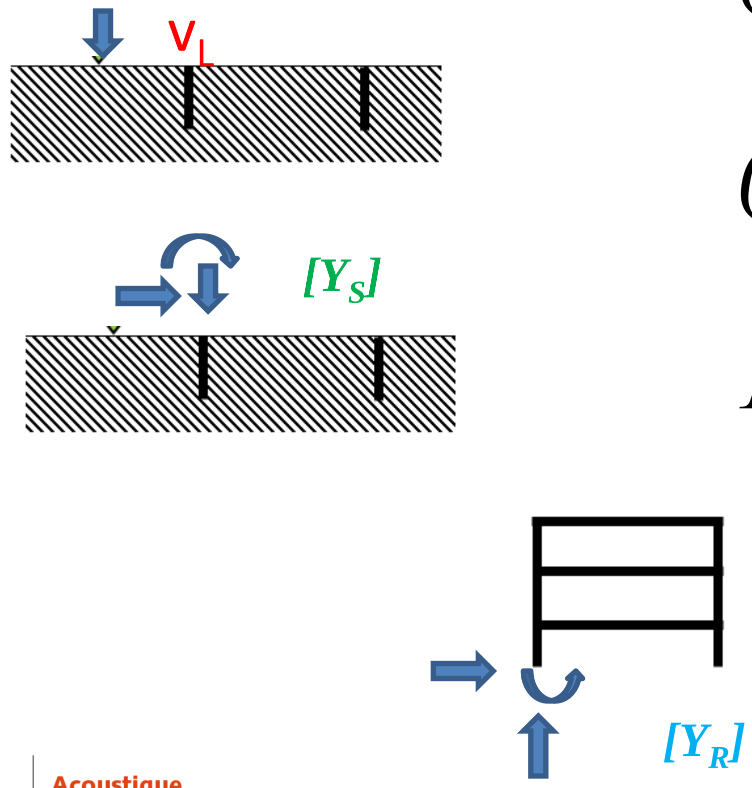


# PRINCIPE

a)



b)




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

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

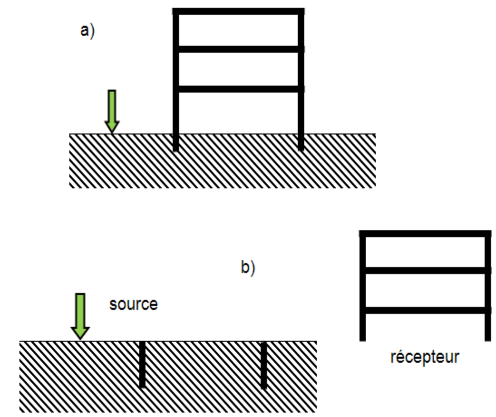
$$(v_c) = [Y_R]([Y_S] + [Y_R])^{-1}(v_L)$$

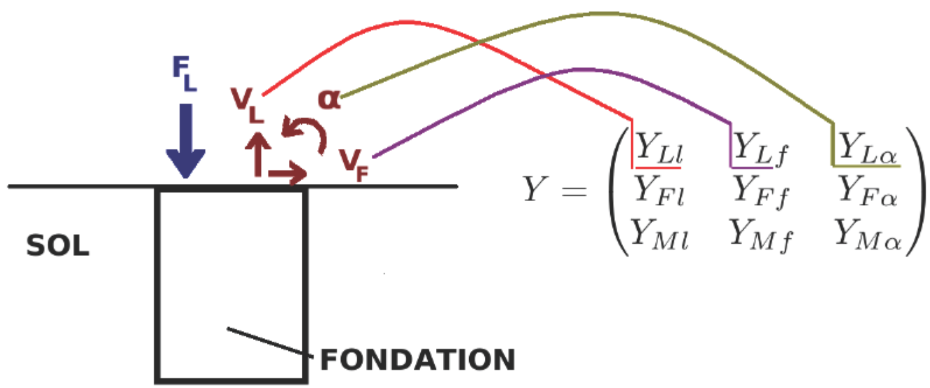
$$\Pi = 1/2 \, Re\{ (f_c)^T (vc)^* \}$$

Couplage

BEM/FEM (Mefissto) : sols + fondations

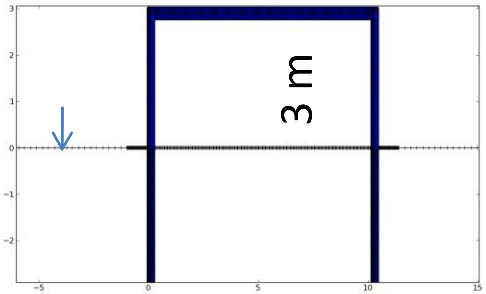
FEM (NASTRAN) : Bâtiments



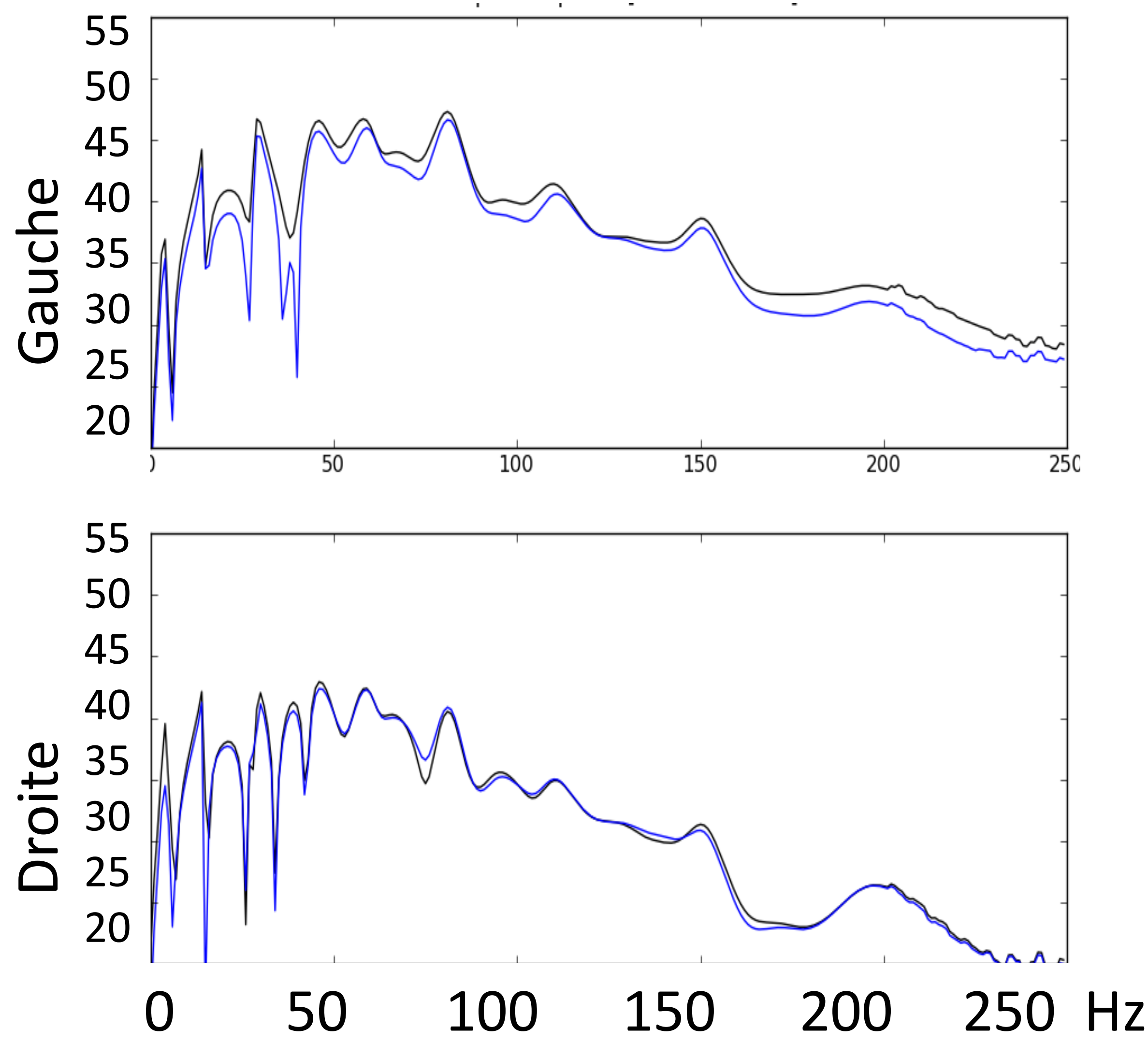

$$Y = \begin{pmatrix} Y_{Ll} & Y_{Lf} & Y_{L\alpha} \\ Y_{Fl} & Y_{Ff} & Y_{F\alpha} \\ Y_{Ml} & Y_{Mf} & Y_{M\alpha} \end{pmatrix}$$

# Technique des mobilités: VALIDATION




10 m

Puissance dB ref 10e-12

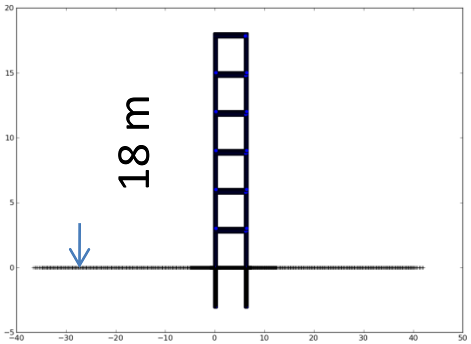



Puissance totale injectée :

**méthode des mobilités**

**MEFISSTO**

# Technique des mobilités: VALIDATION

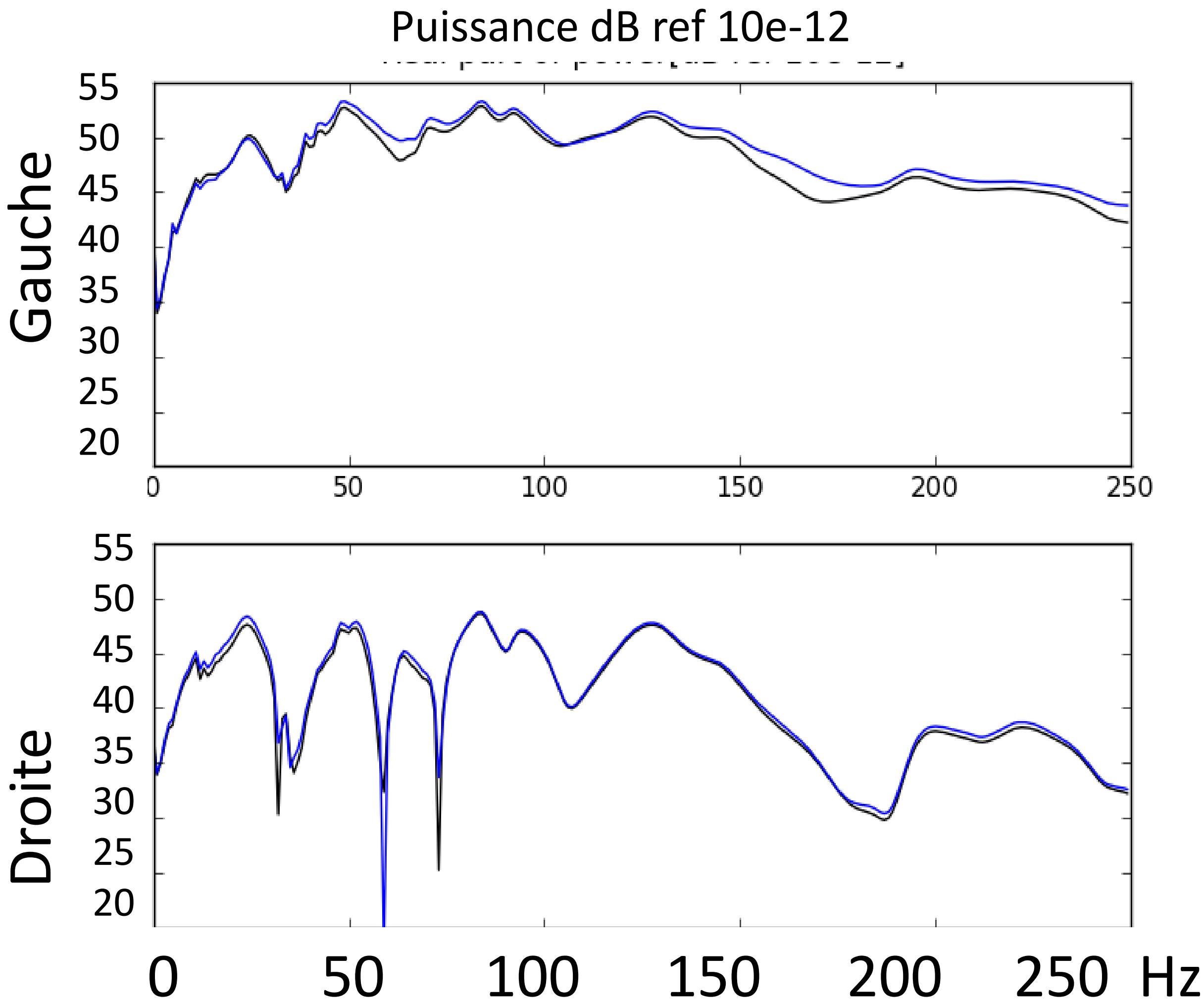



10 m

Puissance totale injectée :

**méthode des mobilités**

**MEFISSTO**



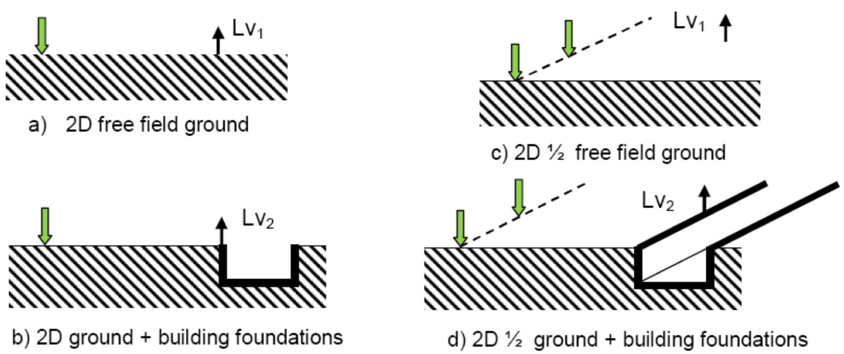
Immeuble proche
De voies
Mesures / calculs
Extrapolation

SNCF/CSTB

# 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(sol seul) – LV(sol+fondation)
   supposée indépendante de la distance aux voies



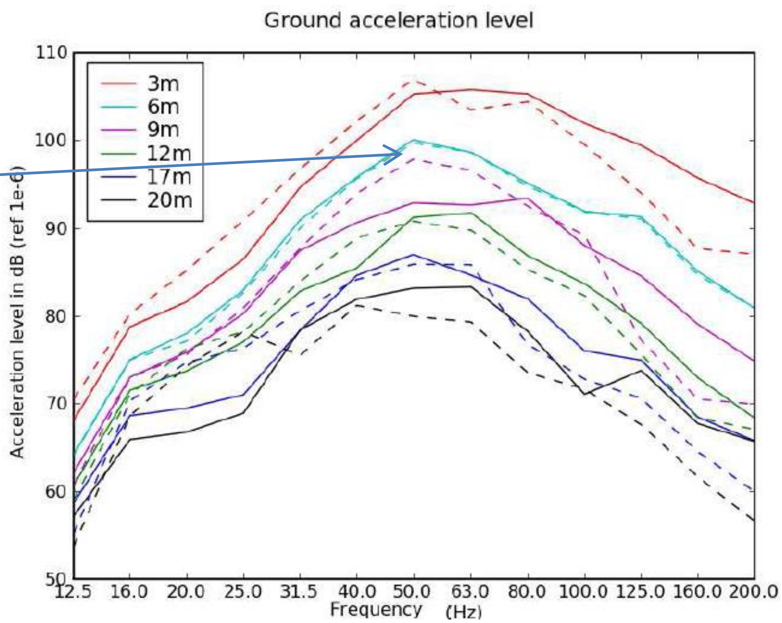

3. Extrapolation à d'autres cas: calculs BEM2D: recalage des calculs 2D avec:

   H(2D) / H(2.5D)

# Propagation en champ libre

*SNCF/CSTB/SATEBA*

Accélération en surface à d m de la voie
Calculs BEM2.5D recalés sur d=6 m

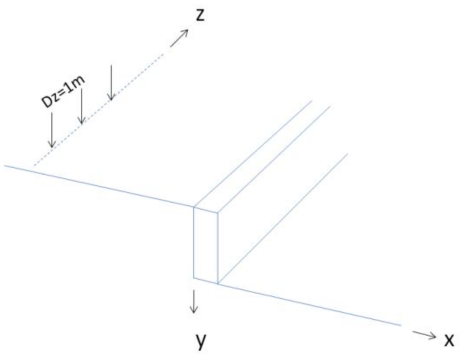



3 sols types homogènes au CSTB :

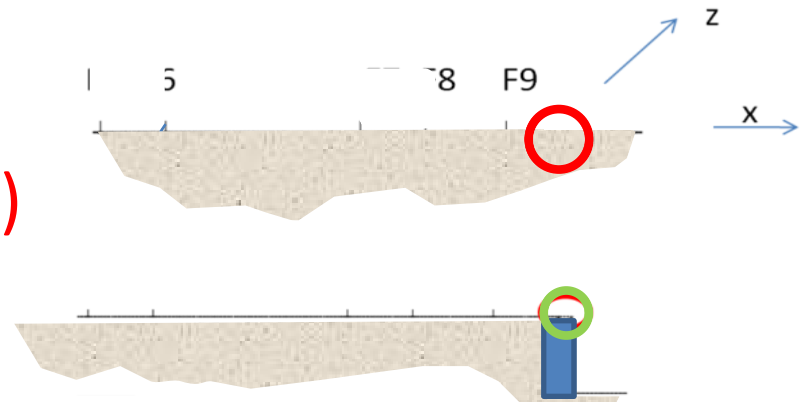
- standard
- plutôt dur
- plutôt mou

Atténuation avec la distance:
MEFISSTO 2.5D (__) mesure (- - -)

# Importance du 2.5D / 2D



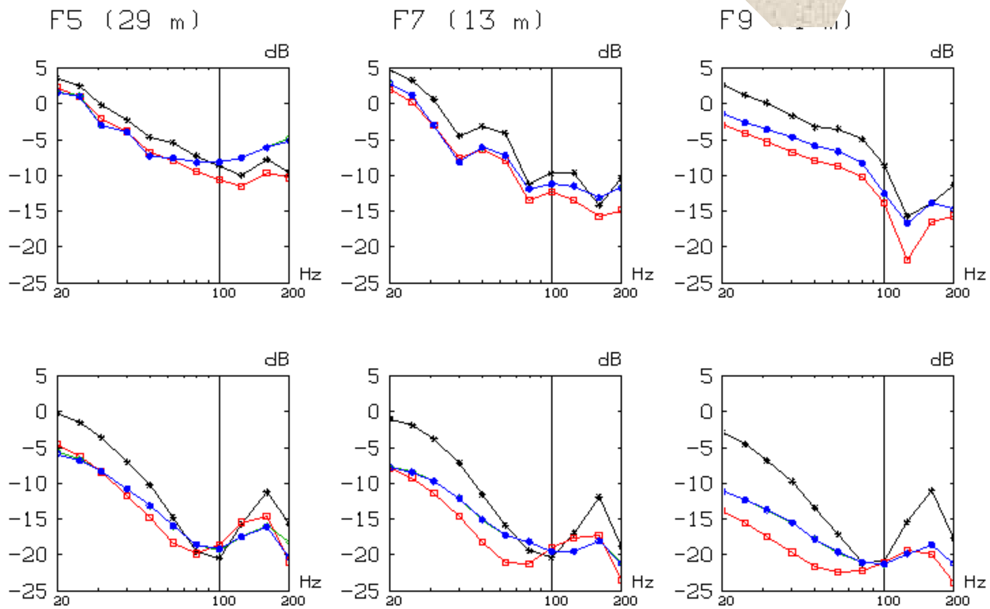

H=LV()-LV()



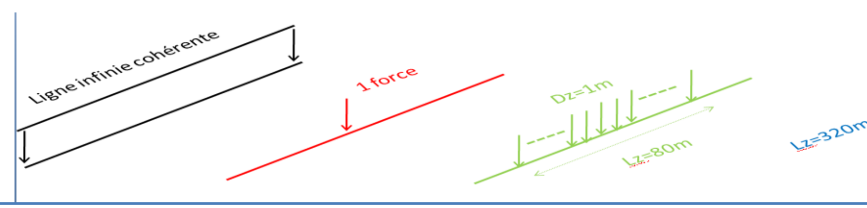

H=LV()-LV()

Horiz

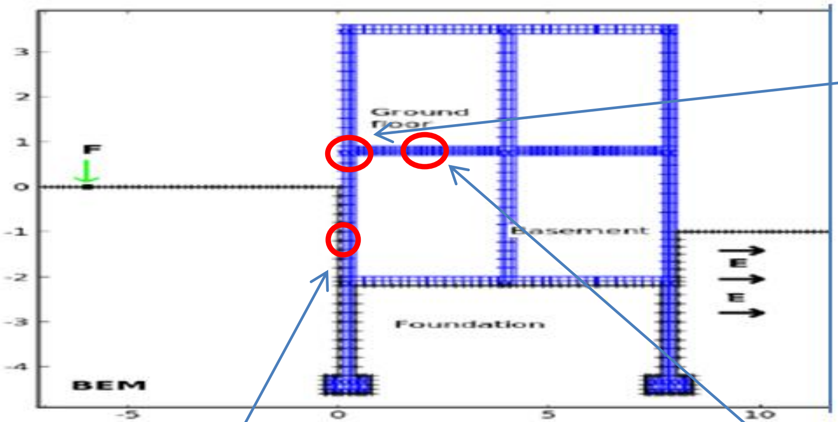
Vert



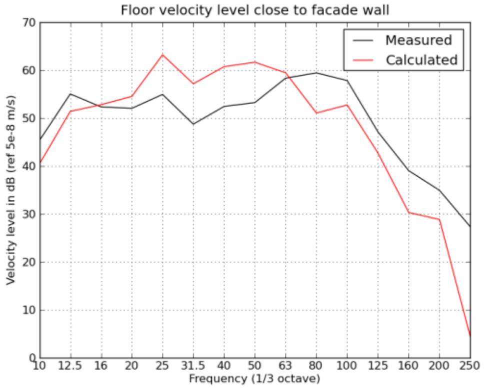

*ligne cohérente* , *source ponctuelle*, *répartition de forces (tous les m) sur 80 m*, *sur 320 m*



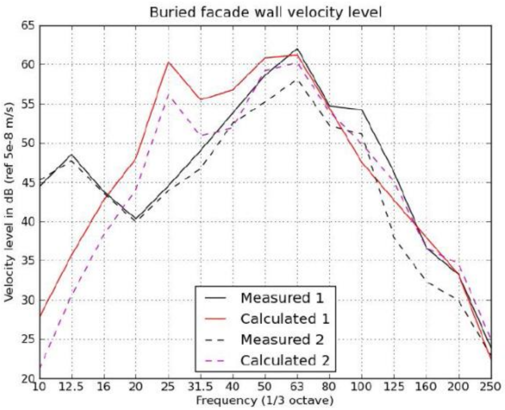
# Comparaison mesures/calculs



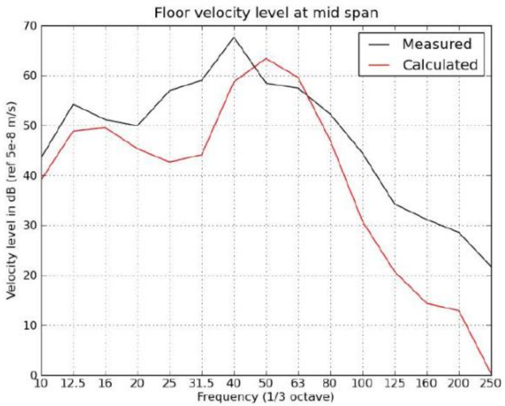

Mesure
Calcul




Vitesse verticale façade

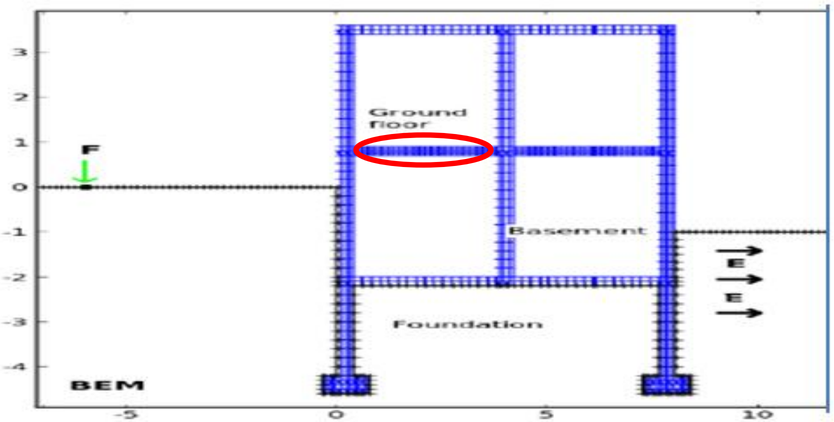


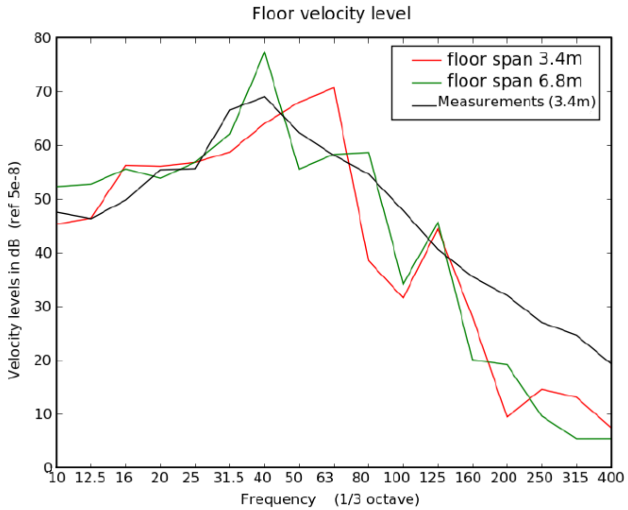

Vitesse horizontale: façade enterrée



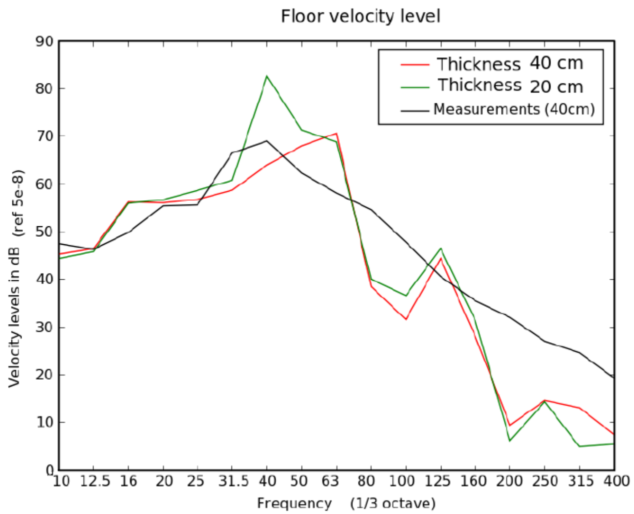

Vitesse flexion dalle (centre)

# Influence de données géométriques

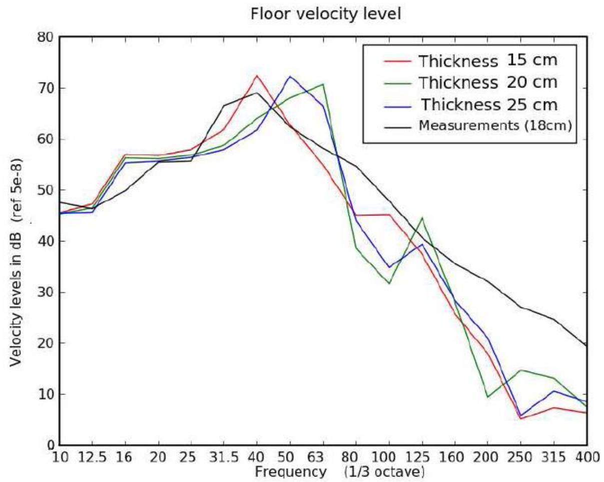



Influence de la portée des dalles




Influence de l'épaisseur de la façade




Influence de l'épaisseur des dalles

Indicateurs de gêne (exemple de la norme Norvégienne NS 8176) intégrés au modèle de calcul

Cas mesuré:

éloignement aux voies 6 m, h façade=40cm, h plancher=20 cm, portée 3.4 m

Indicateur $\boldsymbol{V}_{w,95}$ obtenu pour les cas simulés

| | **Bâti mesuré (6 m)** | **Même bâti à 20 m** | **h façade 20 cm** | **h plancher 15 cm** | **h plancher 25 cm** | **Portée de 6.80m** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| $v_{w,95}$ mm/s | 0.11 | 0.04 | 0.89 | 0.26 | 0.11 | 0.56 |

**Class A** ($v_{w,95} < 0.1$): vibrations non percues
**Class B** ($0.1 < v_{w,95} < 0.15$): faible pourcentage (<10%) de gens gênés probable
**Class C** ($0.15 < v_{w,95} < 0.3$): environ 15% de gens gênés probable (recommandé pour bâtiments neufs)
**Class D** ($0.3 < v_{w,95} < 0.6$): environ 25% de gens gênés probable (recommandé pour bâtiments existants si coûts d'amélioration pour passer en classe C prohibitifs)

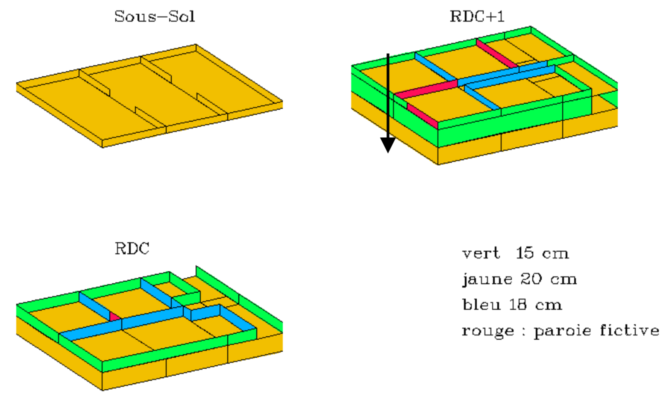
Sources internes aux bâtiments:

immeubles en construction

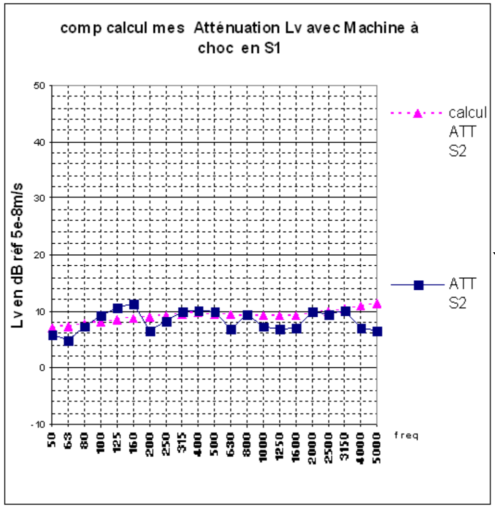
BOUYGUES/CSTB

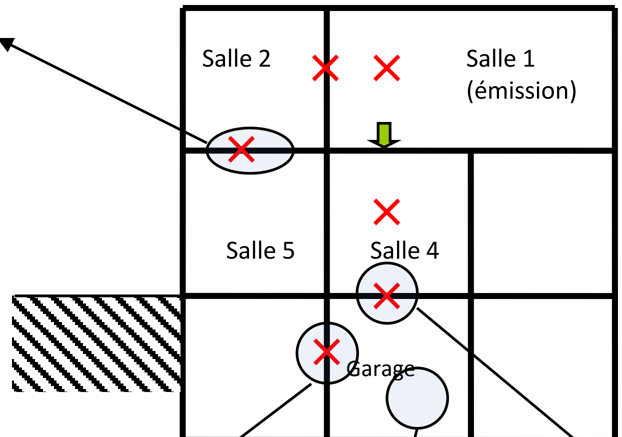
# Transferts vibratoires: SEA

## immeubles en construction

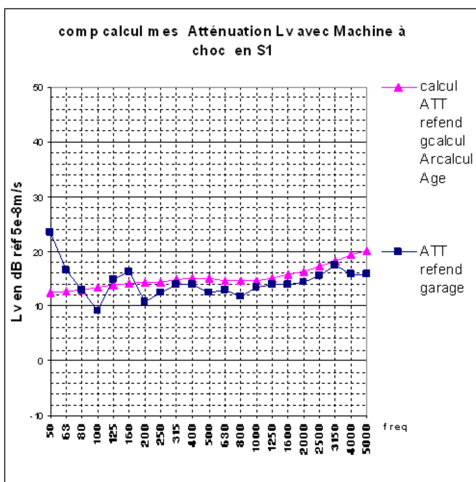



## Niveau de vitesse

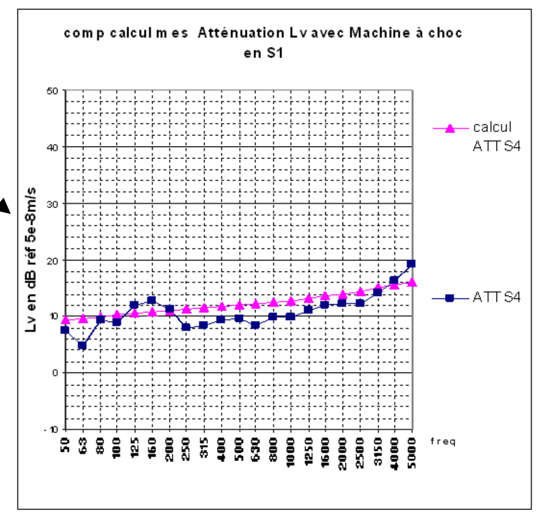


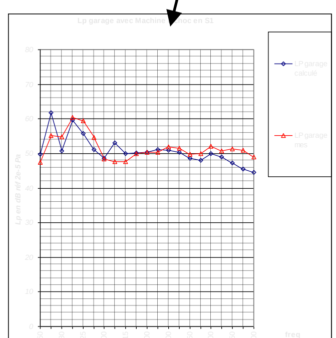




## Niveau de vitesse




## Niveau de vitesse



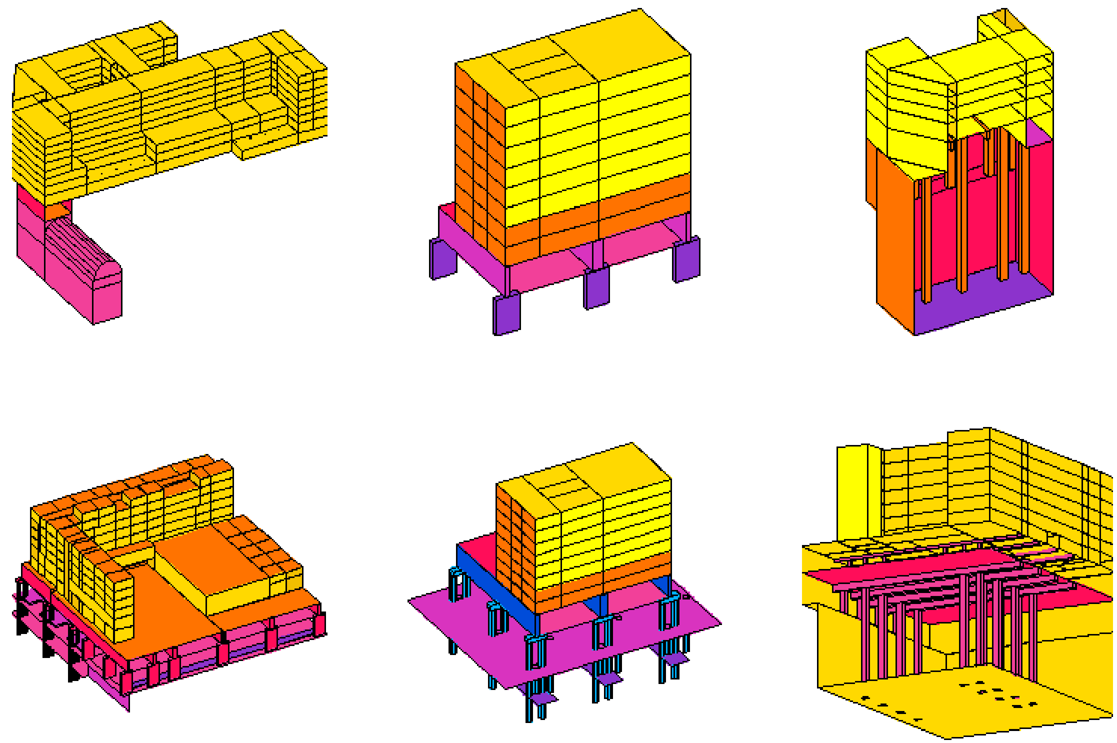



## Niveau de pression

# Grands Projets: gares Parisiennes

Eole

RERD

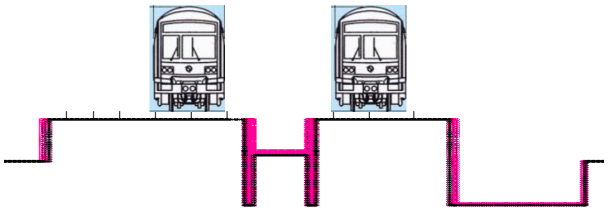


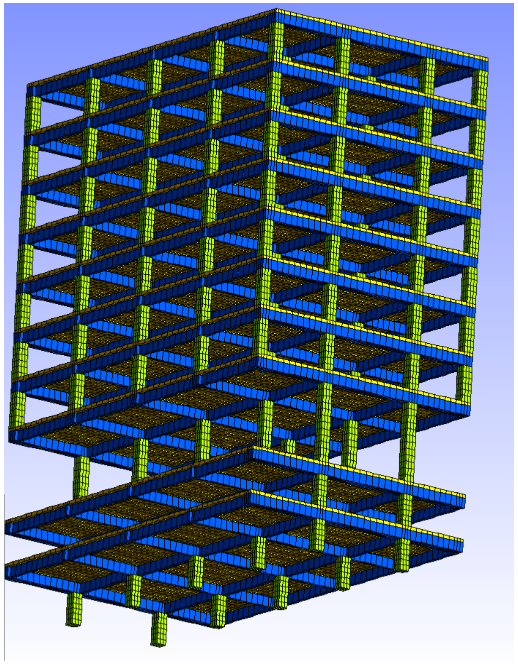
Dalle SEMAPA (Austerlitz)

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

# Grands Projets: Bâtiment voisin d'une gare ferroviaire

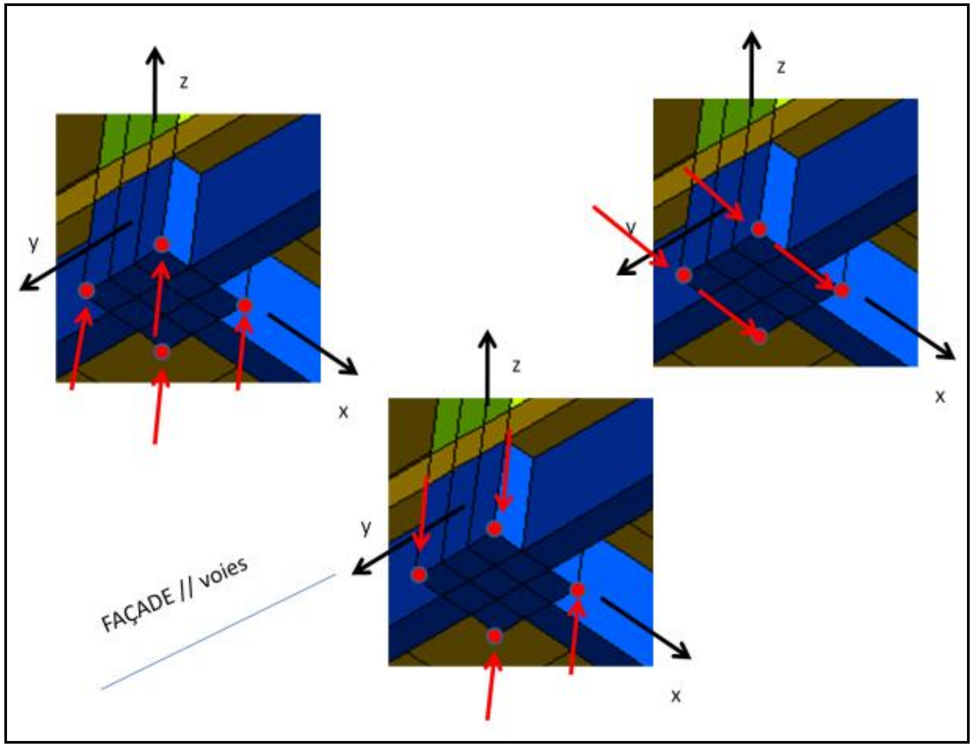
SNCF-Eole





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

# Calcul des mobilités



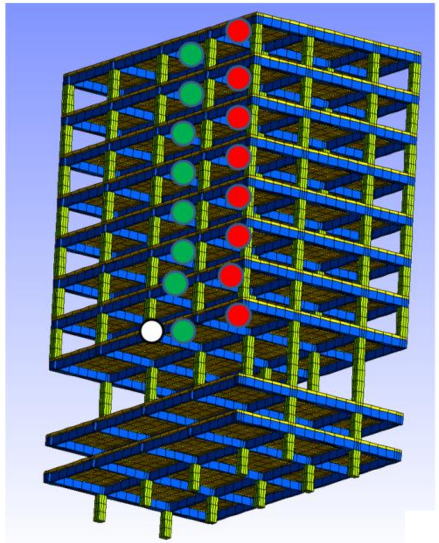

*Sollicitations en bas de superstructure permettant le calcul des mobilités*

# Réponse des dalles: flexion

Excitation

Colonne 1

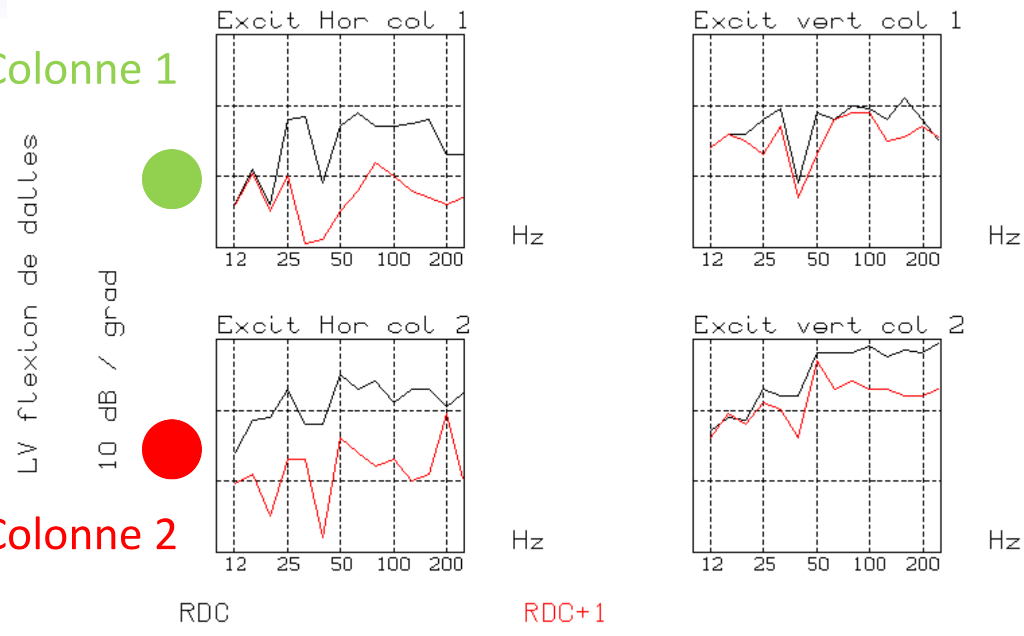
Colonne 2



Excitation horizontale verticale

Colonne 1

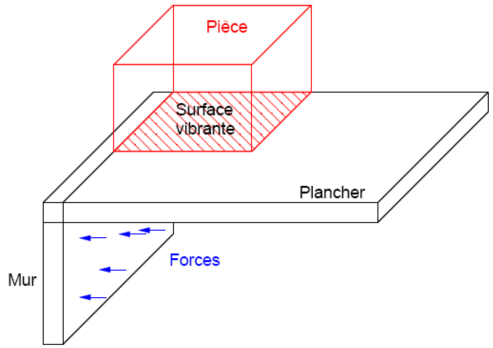
Colonne 2



# Rayonnement dans les volumes

## *Calculs*

*Thèse Guillaume COCQUEL (2005-2008) RATP/CSTB*




$$\sigma = \frac{\prod_{rad}}{\rho_0 c_0 S < v^2 >} \quad \text{where} \quad \prod_{rad} = \frac{< p^2 > A}{4 \rho_0 c_0}$$

*Modélisation du rayonnement acoustique*

Modèle analytique => vitesse V au sol

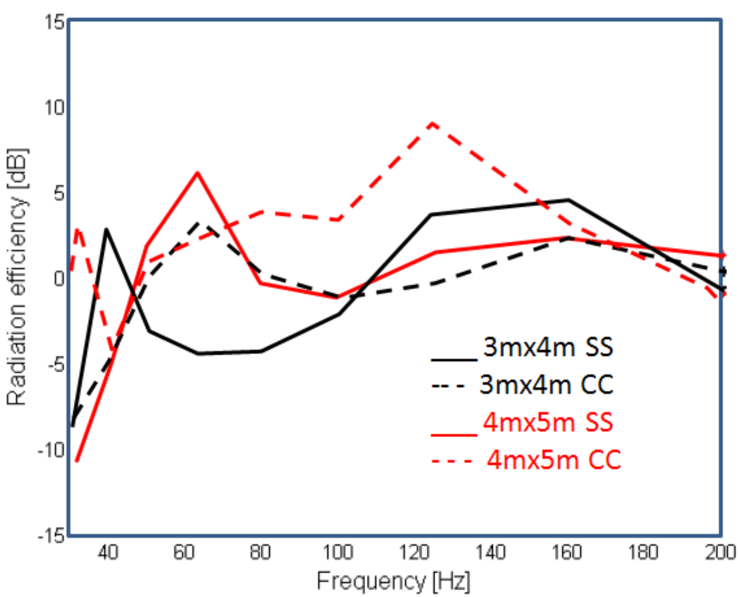
Rayonnement acoustique: Vsol, G réponse local => P

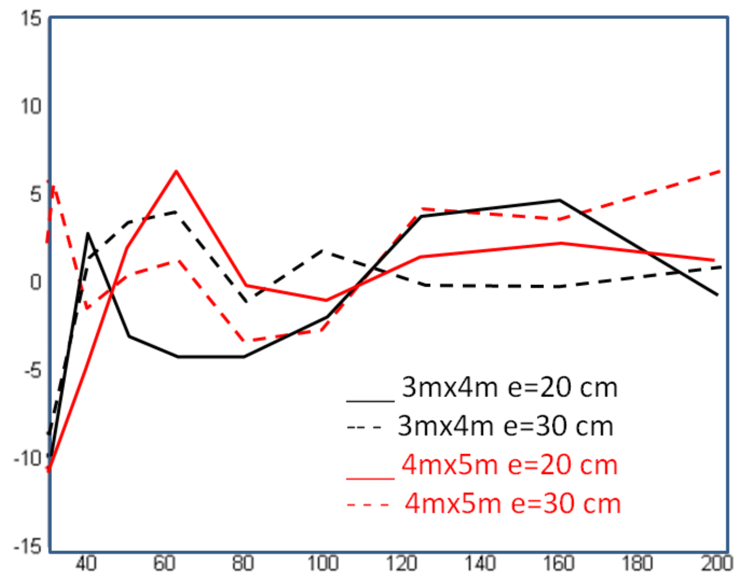
$$p(M) = \int_{S_v} j\omega\rho_0 \times v(Q) \times G_v(M,Q) \times dS(Q)$$

Tr => A     A et $P^2$ => $\prod_{rad}$ => $\sigma$

# Effet des caractéristiques sur le facteur de rayonnement

2 dimensions 3x4 m2 et 4x5 m2
2 conditions limites: appui (SS) et encastrement (CC)
2 épaisseurs : 20 cm et 30 cm

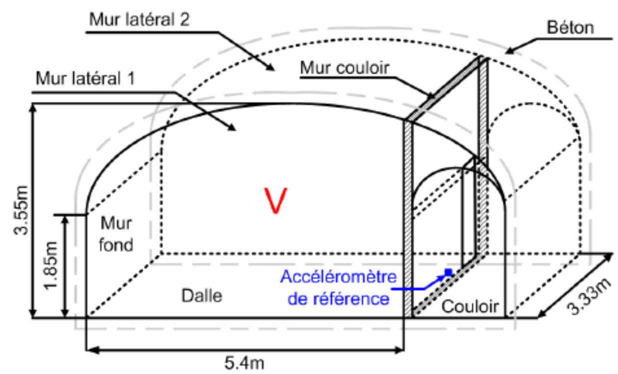



=> Estimation de plages d'incertitudes

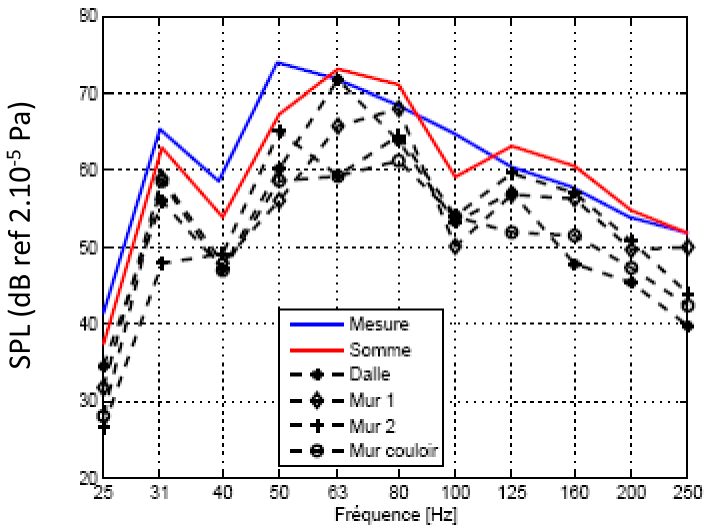
# Rayonnement dans les volumes - Mesures

*Local technique RATP*



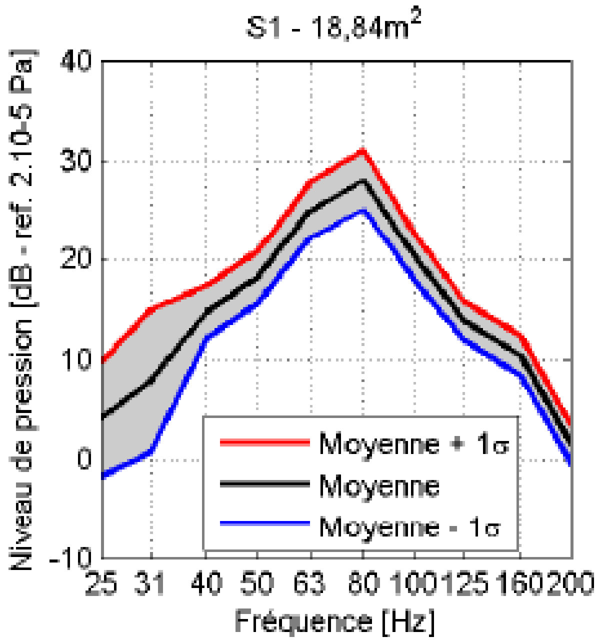

Mesures des vitesses

LV , σ et Tr => $\Pi_{rad}$ => LP

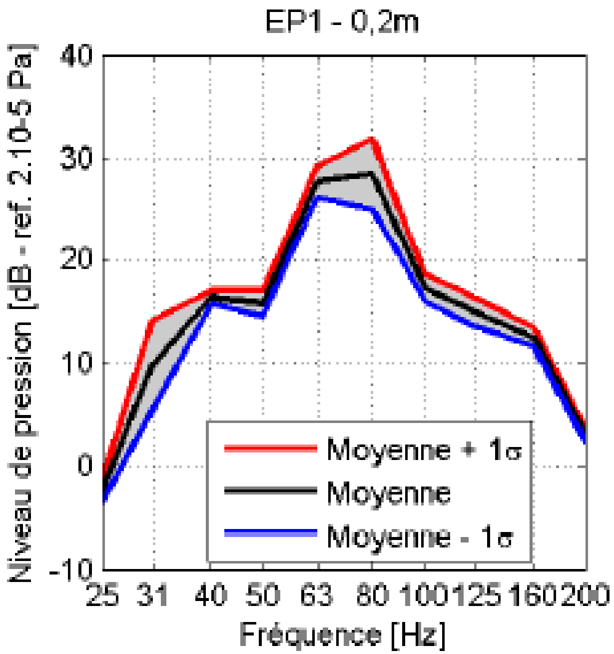


# Rayonnement dans les volumes - variabilité

## Incertitude issue des simulations




surface bloquée




épaisseur bloquée

- Salle de séjour : S1 = 18,24m$^2$, S2 = 19,11m$^2$, S3 = 20,00m$^2$, S4 = 20,91m$^2$, S5 = 21,84m$^2$,
- 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).

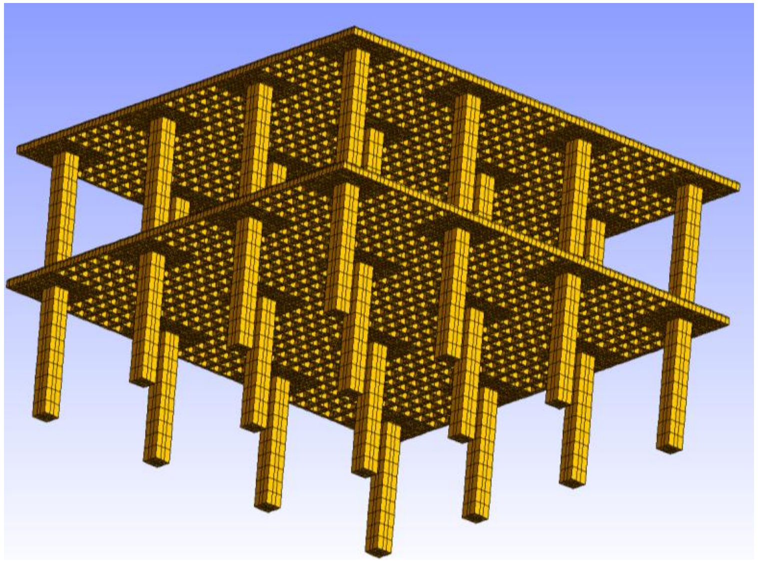
# Grand projet: Réhabilitation d'entrepôts *Etude CSTB/ACOUPHEN*

**Entrepôts** proches de voies ferrées: reconversion en logements (haut de dalle)

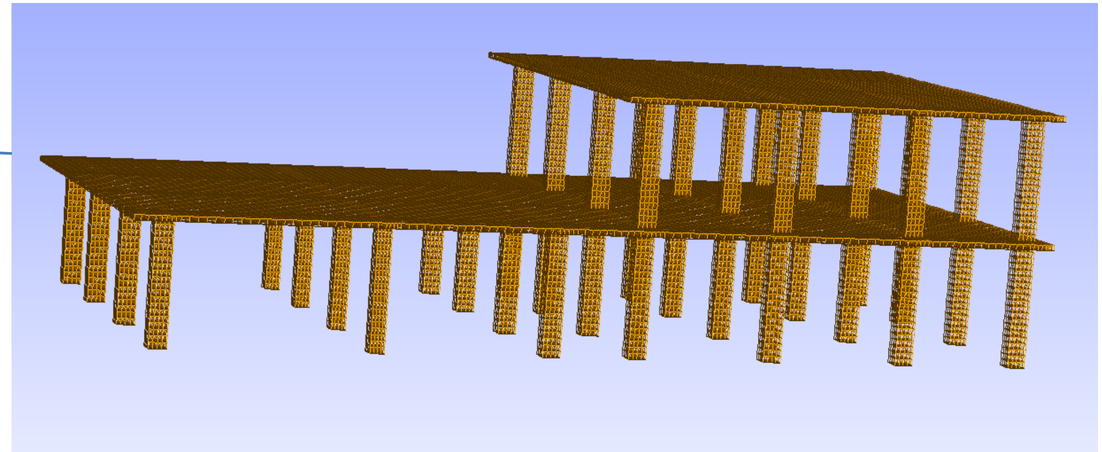
Réponse mesurée: **recalage du modèle**

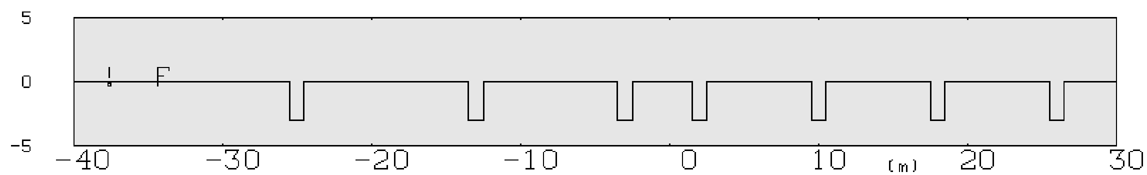
**Objectif**: prévoir l'effet des modifications structurales

*Portion d'un entrepôt en sous-structure d'une zone constructible*

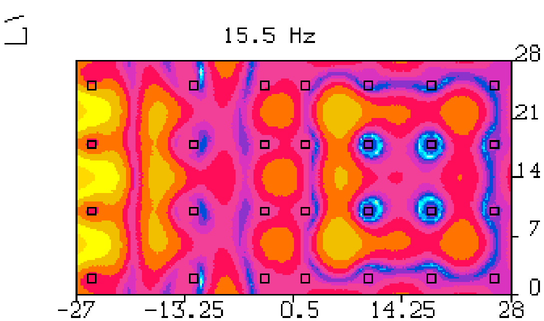


# Modèle FEM

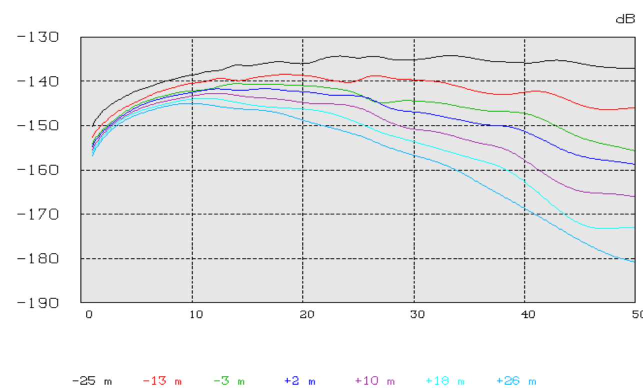




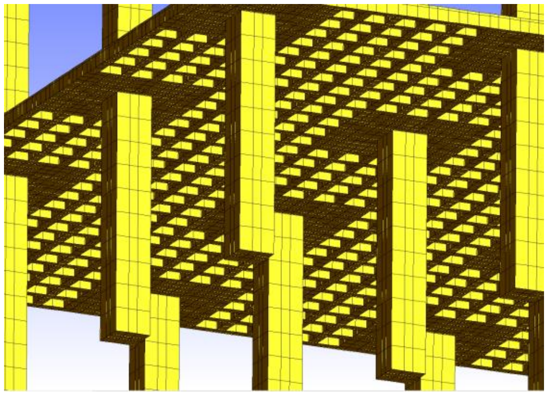

Calcul BEM de vitesses en haut de fondations

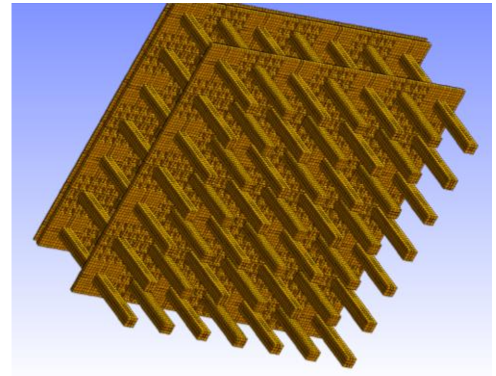


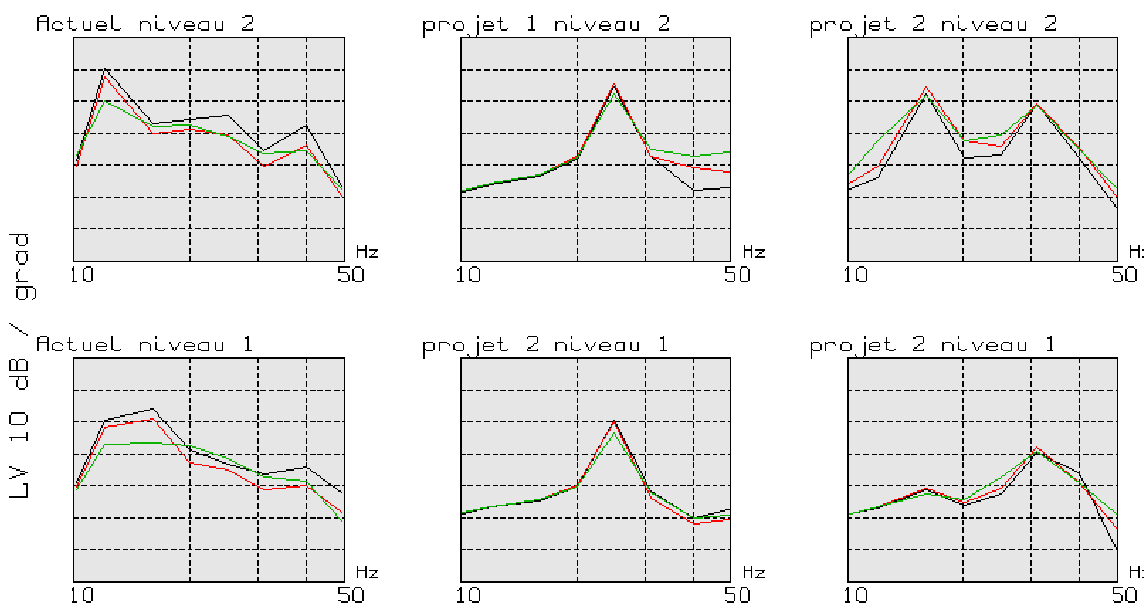

Niveaux de vitesse



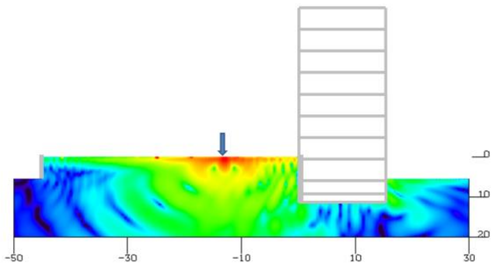
# Existant / projets







# 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 en cours)
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 des modifications structurales en terme de variation de la gêne