

# Outils de modélisation de la propagation couplée sol-structure

**Philippe Jean, Michel Villot**

CSTB

Département Acoustique et Éclairage

24, rue Joseph Fourier

38400 Saint Martin d'Hères

Tél : 04 76 76 25 25

E-mail : philippe.jean@cstb.fr et michel.villot@cstb.fr

**L**e problème de la transmission des vibrations aux bâtiments au travers des sols peut être abordé par la modélisation. S'il est traditionnel d'introduire tout travail de modélisation par l'annonce de sa complexité cela semble particulièrement justifié dans le cas présent. Qu'il s'agisse :

- de la description des excitations (ferroviaires, chantiers de surface ou de profondeur,...),
- de la propagation dans des sols mal connus (propriétés mécaniques, composition, mono ou biphasiques,...),
- des interactions sols/structures (type de contact, variance dans le temps,...),
- de la propagation dans les bâtiments,
- et enfin du rayonnement acoustique dans les volumes, on s'aperçoit aisément qu'une description complète et fine de ce type de problèmes dépasse le raisonnable. Un compromis doit être trouvé entre la précision et les moyens à mettre en œuvre (temps de modélisation, de calculs et capacités des ordinateurs). Le choix des approches est également lié aux plages de fréquences étudiées et aux tailles des géométries : du sismique (inférieur ou de l'ordre de quelques Hz), au ferroviaire (de 20 à 250 Hz) les problèmes autorisent divers degrés de finesse de maillage dans le cas des approches FEM et BEM.

Les recherches menées au Département Acoustique et Éclairage du CSTB sont liées à des problématiques Bâtiment pour des excitations de type ferroviaire ou de type chantier. La description de la source est généralement obtenue à partir de données expérimentales. Les sols sont simplifiés à une description stratifiée à couches solides homogènes. Les contacts sols/structure sont supposés parfaits (continuité des déplacements et contraintes). La description des bâtiments a été menée avec différents outils basés sur divers degrés de simplification : approches énergétiques, par ondes, mixtes, par FEM (éléments finis) 2D ou 2,5D ou 3D.

Enfin un travail important d'hybridation des modèles a été entrepris au travers de l'application de l'approche Source-Récepteur par mobilités qui permet de coupler une description BEM/FEM (2D ou 2,5D) de l'ensemble sol+fondations (outils CSTB) avec une description purement structurale des bâtiments par FEM (logiciel NASTRAN par exemple).

Les paragraphes suivants reprennent les principaux modèles et techniques employées. Des exemples d'application illustrent les études menées avec ces outils.

## Les modèles

### Les méthodes FEM/BEM

La montée en puissance des moyens de calculs informatiques a permis d'accroître le champ d'application des modèles reposant sur une discrétisation fine des géométries. Ces techniques sont supposées donner des solutions précises à des problèmes bien posés dans la limite des moyens et des temps de calculs disponibles. Ces techniques sont bien connues et sont ici résumées à leurs caractéristiques essentielles.

La méthode des éléments finis (FEM) repose sur une décomposition des domaines physiques en sous-domaines appelés éléments alors que l'approche intégrale (BEM) consiste à discrétiser les frontières des domaines (surfaces en 3D et contours en 2D et 2,5D).

L'approche FEM permet aisément de prendre en compte des variations spatiales des propriétés alors que l'approche BEM employée au Département Acoustique et Éclairage du CSTB (DAE) suppose les milieux homogènes isotropes par sous-domaine.

Contrairement aux structures (bâtiments, fondations, plateformes,...), les sols sont des milieux non bornés. Avec la FEM cela suppose un maillage terminé par des éléments particuliers (absorbants ou «infinis») qui absorbent ou intègrent de façon approchée le non retour des ondes atteignant la périphérie. Avec la BEM, le caractère infini est exactement appréhendé. Le modèle développé au CSTB - nommé MEFISSTO - est fondé sur une approche mixte FEM/BEM [1,2] : généralement les sols sont décrits par leurs frontières (BEM) alors que les fondations et bâtiments sont modélisés par FEM.

Toutefois, certaines portions de sol plus complexes peuvent être décrites par FEM et les fondations massives sont mieux modélisées par BEM [1]. MEFISSTO a été développé en 2D puis en 2,5D. Une version 3D est en cours de développement. Le terme 2,5D [2] fait référence à une géométrie invariante selon une direction  $z$  (parallèle par exemple aux voies de chemin fer) mais prenant en compte une excitation pouvant varier selon  $z$  (e.g. forces ponctuelles décorrélatées) ce qui s'est avéré essentiel pour bien prendre en compte les incidences à angles variables des ondes excitatrices. Dans ce cas, le résultat 2,5D est obtenu par une intégration a posteriori de type Fourier d'une série de calculs 2D ; chaque calcul 2D correspondant à une excitation pour une composante  $k_z$  donnée.

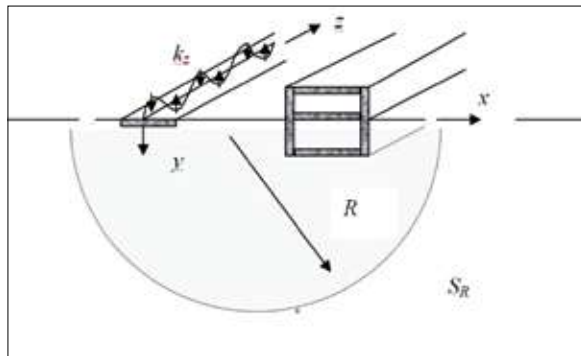


Fig. 1a : Problème 2.5 D  
Géométrie 2D, excitation par onde  $k_z$  selon  $z$

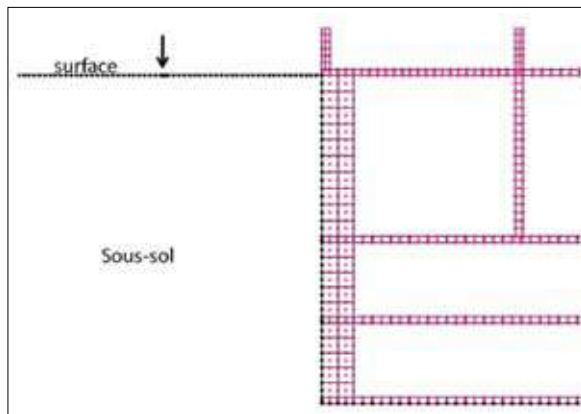


Fig. 1b : Exemple de maillage FEM/BEM en 2D. En noir le maillage BEM (sol), en rouge le maillage FEM (structure)

## Les approches semi-analytiques

### Sol-multicouche

L'approche par matrices de transfert a été appliquée à la modélisation de la propagation des sols multi-couches (logiciel ACOUSYS). Cette approche permet de modéliser la propagation au travers d'un empilement de couches infinies parallèles complexes grâce à une description des influences (matrices de transfert) entre interfaces. L'aspect bi-phasique (poreux) des sols peut être pris en compte. Cette approche peut permettre de modéliser la propagation dans les sols, rapidement, et avec précision. Par contre les structures perpendiculaires (fondations) ou de taille finie (plateforme) ne peuvent être étudiées.

Une application [3] a été menée en 2000 afin d'analyser les différents types d'ondes se propageant dans une configuration de paroi infinie de béton en contact avec un sol.

### Rayonnement acoustique dans les locaux (bruit solide)

Le calcul du rayonnement acoustique dans les locaux a pu être mené [5], [9], en couplant divers logiciels.

L'approche employée est basée sur l'écriture découplée de la pression acoustique  $P$  dans le local faisant intervenir le champ de vitesse  $V$  de la paroi excitée et la réponse acoustique  $G_V$  du local à parois bloquées :

$$p(M) = \int_{S_V} j\omega\rho_0 \times v(Q) \times G_V(M, Q) \times dS(Q) \quad (1)$$

La partie acoustique des volumes ( $G$ ) est étudiée grâce à une approche modale analytique [10] pouvant intégrer les répartitions de vitesse  $V$  des surfaces rayonnantes, elles-mêmes pouvant être issues de calculs FEM. Le calcul de  $P$  qui se résume à une simple sommation est relié à la puissance rayonnée avec les hypothèses habituelles de Sabine en champ diffus.

## Les approches énergétiques

L'approche SEA (Statistical Energy Analysis) permet de modéliser un bâtiment en le décomposant en éléments physiques (plaques, volumes, poteaux,...) que l'on décrit par leurs énergies moyennes par bandes de fréquences (flexion, longitudinales, transversales,...). Dans le cas du logiciel CATRAS développé au CSTB, les transferts énergétiques (facteurs de couplage) entre éléments sont calculés analytiquement à partir des équations d'équilibre mécanique aux jonctions. La validité de ce modèle suppose des densités modales suffisantes afin de pouvoir décrire les systèmes physiques par des énergies moyennes par bandes. Dans le cas de fréquences ferroviaires, cela peut s'avérer problématique particulièrement pour les ondes longitudinales. Aussi la SEA n'est actuellement utilisée au CSTB que pour des excitations en flexion, mais en prenant en compte tous les types d'onde dans les équations d'équilibre des jonctions ; dans ce cas, des résultats acceptables peuvent être obtenus jusque vers 50 Hz [8].

## L'approche Source-Récepteur par mobilités

Un calcul 3D complet par approche couplée (FEM/BEM par exemple) est souvent trop ambitieux au regard des capacités informatiques disponibles si l'on s'intéresse à la problématique ferroviaire.

Du fait des fréquences ferroviaires basses (habituellement la partie significative du spectre est inférieure à 150 Hz) le système Source-Récepteur illustré sur la figure 2 peut être approché en 2D par deux points de contact entre les parties inférieures et supérieures avec 3 degrés de liberté par contact (composantes horizontale (en x) et verticale des vitesses, ainsi que la rotation autour de z).

La Source est caractérisée par :

- un vecteur vitesse libre ( $v_f$ ) ayant 6 composantes (2 points de contact) et
- une matrice  $6 \times 6$  [ $Y_S$ ] de mobilité de la source incluant les termes de mobilité de transfert d'un contact à l'autre (la mobilité est le rapport entre la vitesse et la force appliquée).

Le Récepteur est également caractérisé par une matrice de mobilité [ $Y_R$ ].

Les forces de contact ( $f_C$ ) et les vitesses de contact ( $v_C$ ) ainsi que la puissance transférée  $\Pi$  entre la source et le récepteur peuvent être estimées à partir des quantités définies précédemment à l'aide des expressions :

$$(f_C) = ([Y_S] + [Y_R])^{-1} (v_L) \quad (2)$$

$$(v_C) = [Y_R]([Y_S] + [Y_R])^{-1} (v_L) \quad (3)$$

$$\Pi = 1/2 \operatorname{Re} \{ (f_C)^T (v_C)^* \} \quad (4)$$

Toutes les quantités employées dans les équations (2) à (4) sont complexes et peuvent être exprimées en termes d'une amplitude et d'une phase. Il convient de remarquer que les forces de contact, les vitesses et la puissance peuvent être calculées séparément pour chaque point de contact et pour chaque type d'onde (longitudinale et flexion en combinant les composantes horizontales et angulaires).

Les caractéristiques de la Source (vitesse libre et mobilités des fondations) sont estimées par calcul avec les modèles FEM/BEM décrits précédemment ; les mobilités du Récepteur (le bâtiment déconnecté de ses fondations) sont estimées par le modèle purement structural choisi pour le bâtiment.

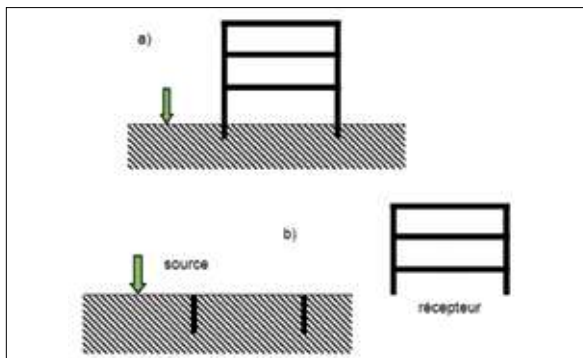


Fig. 2 : Séparation d'un problème (a) en deux parties (b) : source/récepteur

Une description plus complète de cette approche est donnée en [4].

Cette approche permet l'emploi de deux logiciels séparés pour la partie sol/fondation et la partie superstructure. Les équations (1)-(3) sont généralisables au 3D. Une approche intermédiaire entre 2D et 3D consiste à utiliser un calcul 2,5D pour les sols et les fondations qui permet d'accéder à tous les degrés de liberté nécessaire au calcul de l'interaction 3D en supposant toutefois que la fondation est infinie (les fondations de type pieux sont alors exclues).

## Applications

### Validation expérimentale ferroviaire

Une étude de la propagation des vibrations ferroviaires vers un bâtiment voisin a été menée à partir d'une campagne de mesures effectuée dans le cadre du projet PREDIT Vibsolfret [12], au cours de laquelle l'atténuation des ondes de surface en fonction de l'éloignement aux voies a permis une confrontation avec le calcul BEM. Les calculs ont montré que seul le modèle 2,5D permet de retrouver les bonnes atténuations (configuration de la figure 3a). Le modèle 2,5D est plus proche de la réalité puisqu'il permet de définir une ligne de sources incohérentes alors que le modèle 2D assimile les sources à des lignes infinies cohérentes. Des mesures vibratoires au sol en champ libre permettent alors de calibrer le modèle.

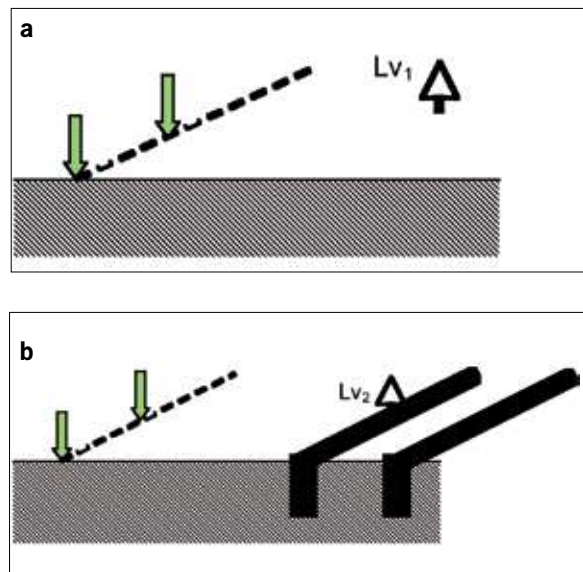


Fig. 3 a et b : Configuration 2D 1/2 de la Source (sol + fondations)

Les calculs 2,5D, bien que moins coûteux que les calculs 3D (maillage d'une section 2D au lieu du maillage complet 3D) demeurent bien plus gourmands en temps CPU que le calcul 2D. C'est pourquoi une fonction de recalage entre 2D et 2,5D a été définie comme suit.

Le modèle BEM a été appliqué en 2D puis en 2,5D au calcul de la perte par insertion d'une fondation  $IL=LV$  (avec)- $LV$  (sans fondation). Cette fonction  $IL$  est employée pour construire le terme de recalage  $H=IL(2D)-IL(2,5D)$ .

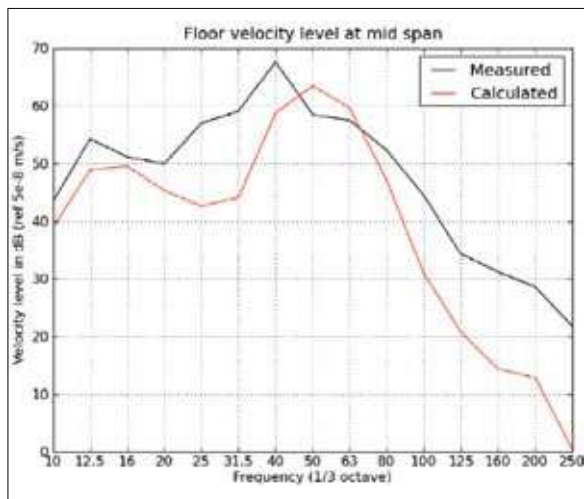


Fig. 4 : Comparaison calcul 2D (recalés) – mesures ; niveau vibratoire au centre du plancher d'un local

Cette méthode a permis des comparaisons entre mesures et calculs 2D (Figure 4) suffisamment satisfaisantes pour servir de base à une étude paramétrique. En effet, les ordres de grandeur de niveau vibratoire sont acceptables, mais bien sûr les réponses modales d'éléments de bâtiment obtenues en 2D ne sont pas nécessairement bien positionnées en fréquence.

Différents paramètres du bâtiment considéré ont été modifiés dans l'étude paramétrique : épaisseur du mur de façade, épaisseur et portée des dalles, distance de la structure à l'excitation ferroviaire. Le modèle a pu mettre en évidence les effets de ces modifications de structure sur les niveaux vibratoires des planchers des locaux. De plus, des calculs d'exposition vibratoire ont été intégrés au modèle sur la base de la norme norvégienne NS 8176 (prise comme exemple) permettant de classer les différents cas testés dans des catégories de gêne exprimées en termes de pourcentage de gens gênés. Les résultats vont être publiés dans le Noise Control Engineering Journal [6].



Fig. 5 : Simulation d'un bâtiment poteaux-poutres excité par un lâcher de masse (30 kg)

## Vibrations de chantier

L'approche Source-Récepteur par mobilités exposée plus haut a été appliquée au cas d'un bâtiment (Figure 5) sur lequel des validations expérimentales ont pu être menées. Cette étude visait à tester cette méthodologie dans le cas de bruit et vibrations de chantier, de caractère impulsif. À cette fin, une excitation par lâcher de masse sur le sol à proximité du bâtiment a été employée (Figure 6). Le sol et la base enterrée de l'immeuble (sous-sol) ont été calculés en BEM 2,5D, le modèle étant calibré à partir de niveaux vibratoires au sol mesurés séparément en champ libre à différentes distances de la source placée au milieu d'un terrain sans bâtiment. Le bâtiment en superstructure a été modélisé par une technique d'éléments finis (logiciel du commerce SAP2000). Les vitesses mesurées en différents points du bâtiment ont été comparées avec le calcul donnant des ordres de grandeur voisins ; toutefois même avec un modèle 3D, les réponses modales d'éléments des planchers ne sont pas nécessairement bien positionnées en fréquence. Ce travail va être publié dans les annales du congrès Eurodyn 2011 [7].

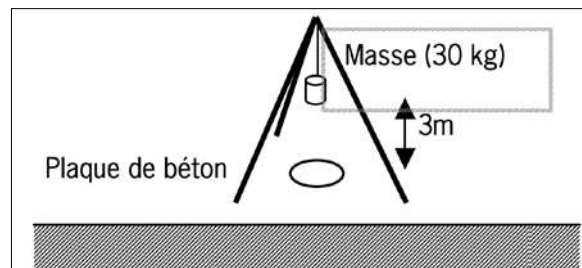
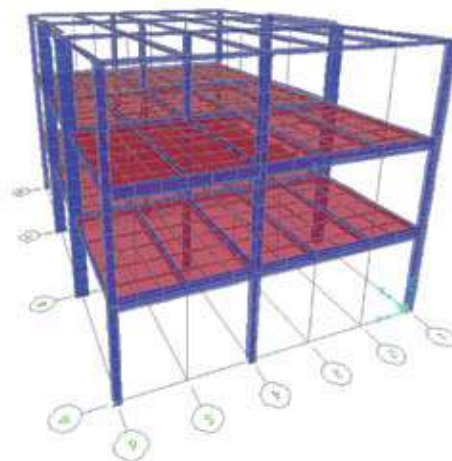


Fig. 6 : Source artificielle utilisée

## Sources internes aux bâtiments

La problématique des nuisances sonores générées lors de la construction de bâtiments a été à la base d'une collaboration Bouygues-CSTB. Divers outils numériques ont été employés afin de mettre en place une méthodologie et de construire un outil informatique simplifié dédié.



Plusieurs problèmes ont dû être abordés : propagation intérieure, extérieure, acoustique, vibratoire, gêne du compagnon, gêne du voisinage,... Au préalable, les différentes sources vibratoires et sonores de chantiers et des scénarii représentatifs ont été identifiés et caractérisés (bruit aérien et structural de marteau piqueur par exemple). La propagation des vibrations à distance et son rayonnement en bruit structural ont été estimés par la SEA, l'excitation primaire étant de la flexion. La figure 7 montre des résultats en termes de différence de niveaux vibratoires entre étages, validant l'utilisation de la SEA dans cette situation.

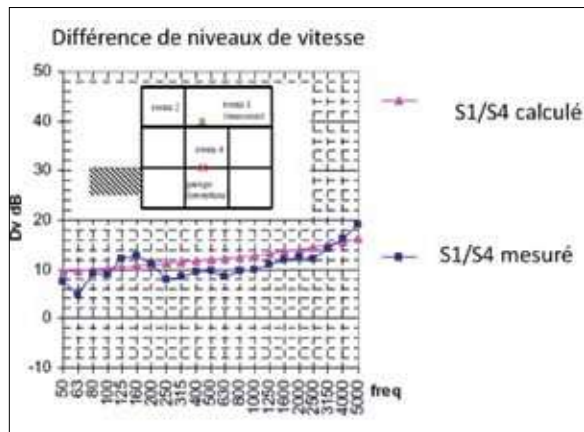


Fig. 7 : Différence de niveaux de vitesse entre étages ; comparaison calcul mesure

Une validation expérimentale sur le bruit solidien à distance a été également effectuée avec succès du niveau R+1 au sous-sol, la source étant la machine à choc ISO ; les résultats en termes de bruit solidien sont très satisfaisants, comme le montre la figure 8.

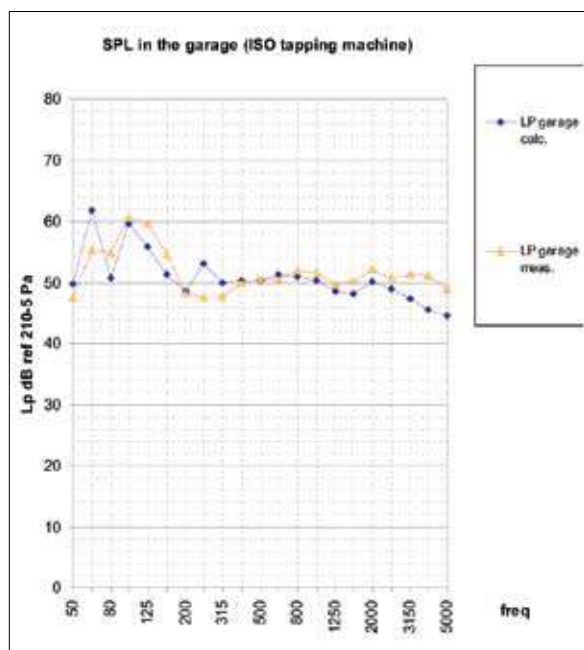


Fig. 8 : Bruit solidien rayonné en sous-sol (machine à choc au R+1) ; comparaison calcul mesure

### Rayonnement dans les volumes - Aspect statistique

Le rayonnement acoustique dans les volumes (habitations, bureaux, halls,...) constitue le « bout de chaîne » de la transmission des ondes issues des sols. Ces niveaux, aux (basses) fréquences ferroviaires, sont fortement influencés par les aspects modaux des surfaces rayonnantes et des volumes. Dans le cadre d'un travail de thèse RATP-CSTB [5], [11], une analyse des dispersions des niveaux de pression a pu être menée au moyen des logiciels évoqués plus haut, en faisant varier les conditions limites de parois, leurs épaisseurs, et la taille des volumes. Un local technique RATP a pu être employé afin de corréler calculs et mesures et tester diverses modifications du local (doublages, modification du volume...) ainsi que diverses méthodes de calcul du champ acoustique. La figure 9 montre le local testé et le modèle utilisé. La figure 10 montre le bruit solidien obtenu, calculé ou mesuré ; les résultats sont tout à fait acceptables.

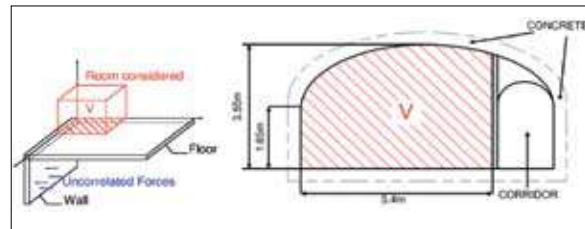


Fig. 9 : (a) Modélisation du rayonnement acoustique ; (b) Local technique RATP

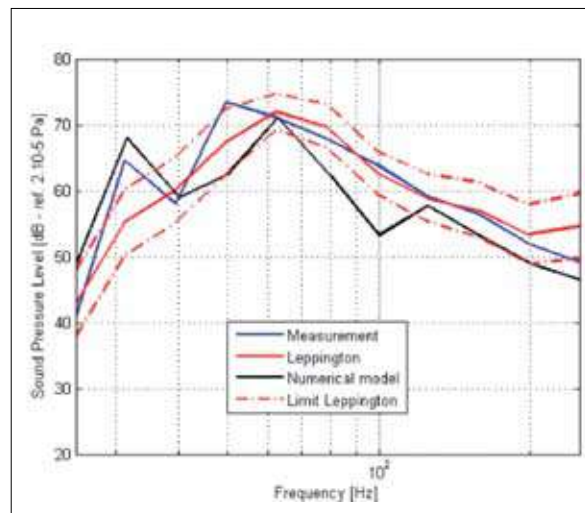


Fig. 10 : Estimation du bruit solidien ; calculs (divers modèles) et mesures

### Conclusion

Le calcul de la transmission aux bâtiments des vibrations issues des sols ou des travaux de chantier peut être réalisé en alliant divers logiciels et méthodes. Il convient de cerner les limites de chaque modèle et c'est souvent par hybridation des approches que la variété des problèmes peut être appréhendée.

Les parties souterraines peuvent être modélisées par des approches BEM/FEM en 2,5D. L'approche 2,5D (aspect 3D des sols et des sollicitations des fondations) permet de prendre en compte le caractère ponctuel ou incohérent des excitations généralement traitées ; toutefois, la prise en compte de l'aspect 3D des géométries s'avère nécessaire dans le cas de fondations par pieux. Une application originale de l'approche Source-Récepteur par mobilité est proposée ; elle permet de raccorder une description 3D des superstructures aux données issues des modèles de sols/fondations. Cette voie est toujours en cours de développement.

Enfin, dans certains cas, des techniques plus simples peuvent être employées pour décrire les superstructures, comme la SEA ou des modèles analytiques. Le rayonnement dans les locaux est estimé au travers d'approches analytiques ou énergétiques. Les validations expérimentales montrent que les ordres de grandeur des estimations par calcul sont corrects ; toutefois les réponses modales ne sont jamais très bien positionnées en fréquence, même en 3D.

À notre avis, une modélisation 2D à toute sa place dans ces problèmes vibratoires, sauf sur l'aspect propagation dans les sols et interaction vibratoire sol structures.

## Références bibliographiques

- [1] Jean P., Boundary and finite elements for 2D soil structure interaction problems, *Acta Acustica*, 87, pp 56-66, 2001
- [2] Jean P., Guigou C., Villot M., A 2.5D BEM model for ground structure interaction, *Building Acoustics* 11(3), pp 157-163, 2004
- [3] Villot M., Chanut J., Vibrational energy analysis of ground/structure interaction in terms of wave type *Journal of Sound and Vibration* 231, pp 711-719, 2000
- [4] Villot M., Ropars P., Jean P., Modeling a building response to railway vibration using a source-receiver approach, *Eurodyn* 2011, Leuven
- [5] Coquel G., Propagation et ré-émission du bruit solide d'origine ferroviaire. Application aux bâtiments riverains, Thèse Université Paris Est, 24 octobre 2008
- [6] Villot M., Ropars P., Jean P., Bongini E., Poisson F., Modeling the influence of building types on the building response to railway vibration, *Noise Control Engineering Journal* (en cours de publication)
- [7] Taillefer N., Villot M., Jean P., Nguyen H.H., Vibration due to construction: a case study, *Eurodyn* 2011 Leuven
- [8] Villot M., Jean P., Prediction method for structure borne noise generated in buildings by tools such as drills, *ACOUSTICS2008*, Paris
- [9] Jean P., Siwiak H., Joubert G., A decoupled vibro-acoustic extension of FEM. Application to laboratory modelling, *Building Acoustics* 12(6), pp 86-98, 2006
- [10] Jean P. and Rondeau J.-F., A model for the calculation of noise transmission inside dwellings. Application to aircraft noise, *Applied Acoustics* 65, pp 861-882, 2004.
- [11] Coquel G., Villot M., Jean P., Duée R., Prediction of re-radiated noise from structure born vibration due to railway, *ICA Madrid* 2007
- [12] PREDIT, Vibrations dans le sol générées par le transport ferroviaire de marchandises, convention 07-66-C0136, rapport final (2010), étude réalisée pour le compte de l'ADEME par le CSTB, SATEBA et la SNCF.