

Nécessité et amorce de construction d'un utilitaire de prédiction de la propagation des vibrations dans un bâtiment

Gabrielle Viot, Eric Gaucher
Acoustique & Conseil
17/ 19, rue des grandes terres
92508 Rueil Malmaison CEDEX
Tél. : +33 (0)1 47 08 52 52
Fax : +33 (0)1 47 52 15 75
E-mail : gv@acoustique-conseil.com et eg@acoustique-conseil.com

Résumé
En région parisienne, la pression foncière étant toujours croissante, les bureaux d'études acoustiques sont de plus en plus souvent sollicités pour des bâtiments situés à proximité de voies ferrées, sources vibratoires importantes. L'exigence de qualité acoustique quelle que soit la destination des locaux augmentant, nous sommes parfois devant des situations difficiles qui peuvent même nous amener à insister pour l'abandon du projet. Le nombre de cas augmentant, nous pouvons confirmer que les comportements sont assez différents, selon les structures rencontrées d'un bâtiment à l'autre. Or la propagation des vibrations, que ce soit dans le sol ou dans le bâtiment, reste très difficile à évaluer avec précision et la méthode des éléments finis reste longue et trop chère dans la plupart des cas rencontrés.
Nous avons voulu imaginer la construction d'un modèle de propagation basé en partie sur la SEA (Statistical Energy Analysis) qui pourrait être utilisable en situation de chantier « normale » par un bureau d'études. Ceci semble réaliste mais les limites actuelles en fréquences le rendent inutilisable pour des vibrations liées aux trains. Nous pouvons néanmoins envisager de l'utiliser pour des équipements techniques tournant à des fréquences plus élevées. Que peut-on faire pour étendre le domaine de validité d'un tel modèle à des fréquences inférieures ?

Quelques exemples récents

De nombreux exemples montrent l'accroissement de la demande et la variabilité des situations.

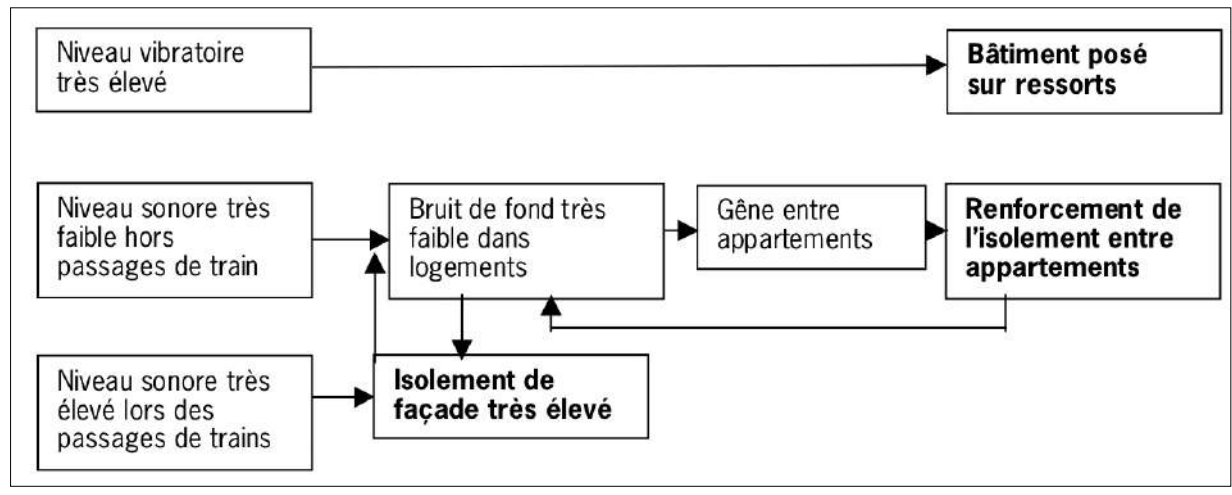
Un projet de logements : cas extrême!

Le maître d'ouvrage envisage la construction de logements dans une zone caractérisée par un bruit résiduel très faible hors passage des trains (30 dB (A) de nuit à 40 dB (A) de jour) et un passage de trains de marchandise jour et nuit

(Lp jusqu'à 90 dB(A) lors du passage des trains en façade des bâtiments prévus pour les points les plus exposés) soit une émergence d'environ 60 dB de nuit.

Sans traitement, nous constatons une gêne tactile manifeste (selon norme ISO 2631-2) lors du passage des trains et un niveau sonore de 38 à 45 dB(A).

Les coûts d'isolation sont alors très élevés si on veut respecter le schéma suivant :



et malgré tout, la situation reste médiocre en qualité car :

- La gêne entre appartement n'est pas totalement supprimée à cause du processus de bouclage (plus on isole, plus le bruit de fond diminue et plus il faut isoler entre appartements) ;
- La gêne lors du passage des trains n'est pas totalement supprimée à cause du processus de bouclage (plus on isole, plus le bruit de fond diminue et plus il faut isoler en façade) ;
- La situation à l'extérieur des bâtiments reste très pénible lors du passage des trains.

Dans ce cas, nous recommandons l'abandon du projet ou la requalification en tertiaire.

Un studio d'enregistrement professionnel

À environ 80 m du métro, nous avons pu montrer que l'objectif est atteignable sous réserve d'un traitement de désolidarisation très performant et parfaitement réalisé. Plus près, on ne peut pas garantir l'exigence la moins sévère qui correspond à NR 25 lors du passage des métros. Le projet a été finalement abandonné.

Un immeuble de bureaux au-dessus de nombreuses voies ferrées (métros, RER)

Des niveaux vibratoires élevés ont été mesurés lors de nombreux passages de trains et métros. Le maître d'ouvrage a souhaité mettre en place un traitement partiel (plots antivibratoires sur une partie du bâtiment). Le résultat en termes de niveau sonore estimé correspond aux prévisions dans les étages inférieurs, mais sans aucune atténuation voire une légère augmentation des vibrations lorsqu'on s'élève.

Un immeuble de bureaux haussmannien au-dessus de nombreuses voies ferrées (métros, RER)

Des niveaux vibratoires élevés ont été mesurés lors de nombreux passages de trains et métros. Le maître d'ouvrage n'a pas souhaité mettre en place les traitements antivibratoires envisagés dans les bureaux standard. Le résultat en termes de niveau sonore estimé correspond aux prévisions dans les étages inférieurs, mais l'atténuation des vibrations est assez importante lorsqu'on s'élève, ce qui dans le cas présent s'avère très favorable à l'ouvrage. Avons-nous été trop prudents ? Comment peut-on prévoir ce type de comportement de structure et s'engager compte tenu des enjeux ?

Amorce d'un modèle

Nous avons voulu imaginer la construction d'un modèle de propagation basé en partie sur la SEA (Statistical Energy Analysis) qui pourrait être utilisable en situation « normale » de chantier par un bureau d'études.

But et principe pratique

Le sujet que nous avons voulu étudier est la prédiction de la propagation des vibrations dans une structure quelconque. Le but est de prévoir, connaissant la structure du bâtiment et les niveaux d'accélération (3 directions) en un point, les niveaux d'accélération induits en un autre point du même bâtiment. Les données de départ de cette étude sont donc un niveau d'accélération (mesuré *in situ*), et une structure. La structure est divisée en sous-ensembles indépendants (plaque/poutre), reliés entre eux par des jonctions (changement de section/jonction en angle droit/jonction en croix/jonction en T...)

Principe théorique

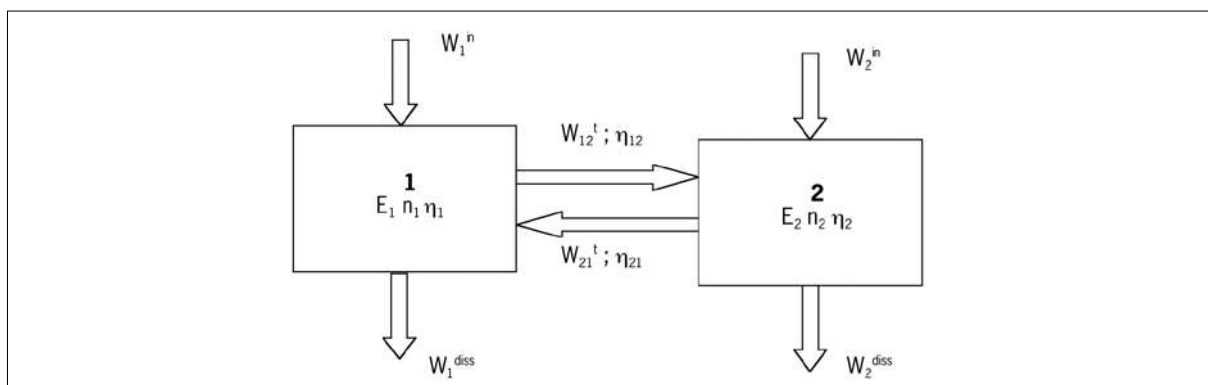
Ce modèle est construit sur la méthode SEA. Le chapitre suivant propose un résumé théorique de ce modèle de prédiction. A chaque changement d'éléments (paroi, poteau...), une partie de l'énergie du système est transmise par l'interface, une autre est réfléchiée. Les coefficients de transmissions aux jonctions sont calculés à partir de la théorie de CREMER (Structure Borne Sound).

SEA (Statistical Energy Analysis)

Cette méthode (SEA) se base sur la séparation d'un système (la structure) en plusieurs sous-systèmes (éléments). Cela permet d'étudier les échanges d'énergie entre les différents sous-systèmes.

Les variables utilisées sont les suivantes, elles sont exprimées pour une bande de fréquence donnée :

- **Énergie totale** contenue dans le système i (E_i)
- **Énergie modale** : énergie contenue dans chaque mode de vibration (E_{mi})
- **Puissance injectée** à la structure (W^{in})
- **Puissance dissipée** par la structure (W^{diss})
- **Densité modale** : nombre de modes par bandes de fréquence (n_i)
- **Facteur de perte intrinsèque** à un sous-système (η_i) (DLF = Damped Loss Factor)
- **Facteur de perte par couplage** (η_{ij}) (CLF = Coupled Loss Factor)



Nous avons deux systèmes couplés recevant chacun une puissance W^in . L'énergie contenue dans chaque système est notée E et la puissance transmise d'un système à l'autre est noté W^t .

Nous avons le rapport suivant :

$$W = E \square \eta$$

avec η le facteur de perte et \square la fréquence centrale de la bande considérée ($\square = 2\pi f$).

Une autre équation importante dans la SEA est le principe de réciprocité :

$$\eta_{12} \eta_{21} = \eta_{21} \eta_{12}$$

η_i est la densité modale du système i

η_{ij} est le facteur de perte du système i vers le système j .

Le bilan de puissance entre les deux sous-systèmes est posé, ce qui nous permet ensuite d'en extraire l'énergie contenue dans le deuxième sous-système.

Notre but est de déterminer l'énergie contenue dans la dernière structure. Pour cela, nous avons besoin de la puissance injectée et des facteurs de perte.

La puissance injectée peut être déduite de la mesure, ou de la connaissance de la source de vibration (machine tournante...).

Les facteurs de perte entre structures seront calculés à partir des coefficients de transmission au niveau des jonctions (cf chapitre suivant).

Détermination des facteurs de pertes (coefficients de transmissions)

Chaque fois que l'onde de vibrations rencontre un changement d'états (géométrique, matériaux...) une partie de l'onde est réfléchiée, l'autre est transmise à la deuxième structure. De plus, suivant la fréquence et le type de jonction, un type d'onde (longitudinale, flexion verticale, flexion horizontale) peut être convertie en un autre type.

Ces coefficients sont définis comme étant le rapport de la puissance transmise sur la puissance incidente et dépendent :

- Des matériaux ;
- Des ondes incidentes et transmises (conversions) ;
- Du type de jonction.

$$\tau = \frac{P_{trans}}{P_{inc}}$$

Il est important de noter que les conversions d'ondes apparaissent dans les hautes et moyennes fréquences. Pour chaque jonction, deux modèles sont donc élaborés : un pour les basses fréquences et un pour les plus hautes fréquences.

Nous avons défini 4 types de jonctions (voir tableau en bas de page).

Utilitaire de calcul

Nous avons programmé cette méthode en VBA, de manière à avoir un utilitaire utilisable par un maximum de personnes sur Excel.

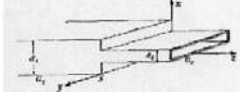
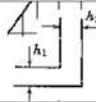
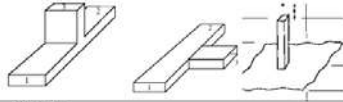
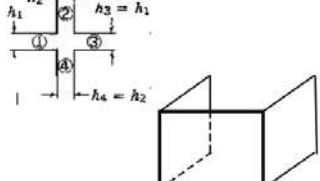
L'utilisateur renseigne les données d'entrées, à savoir :

- Les vibrations transmises au 1er élément (3 directions, issues de la mesure) ;
- La description des structures rencontrées les unes après les autres :
 - Type de structure (plaque/poutre),
 - Dimensions,
 - Module d'Young,
 - Masse volumique,
 - Coefficient de Poisson,
 - Amortissement (facteur de perte intrinsèque au matériau) ;
- Les jonctions reliant deux structures.

L'utilisateur peut donc étudier un chemin de transmission, celui qu'il juge le plus important.

En sortie, il est possible de retrouver le niveau d'accélération contenue dans chaque élément, et notamment celui du dernier élément.

Il peut également contrôler la validité des calculs en vérifiant la densité modale pour chaque fréquence, et chaque système.

Aligné	Pas de changement de direction dans la propagation de l'onde : - Changement de section - Changement de matériaux	
Angle droit	Changement de direction sans fuite	
En T	Jonction de 3 structures, avec ou sans changement de direction Poutre/plaque ou plaque/poutre avec angle	
En croix	Jonctions de 4 structures, avec ou sans changement de direction Plaque encadrée par des cloisons (perte d'énergie due à la présence d'autres chemins)	

Enfin, un onglet présente les courbes et résume ainsi le calcul.

Le graphe des ondes longitudinales n'est pas présenté car, étant donné que c'est une onde qui ne rayonne pas, il n'est pas utile de l'étudier.

Les deux graphes des ondes de flexions sont donc présentés. Nous trouvons :

- La courbe de niveau d'accélération vibratoire initial (mesuré) ;
- La courbe de niveau d'accélération vibratoire calculé, monovoie (un chemin de propagation) ;
- La courbe de niveau d'accélération vibratoire calculé, multivoie (modèle prenant en compte l'influence des autres chemins possibles).

Cet utilitaire de calcul fonctionne. Les limites rencontrées sont listées ci-après.

Limites

Ce modèle comporte plusieurs limites, liées aux théories utilisées.

La première concerne le cadre de validité de la SEA, la seconde concerne le calcul des coefficients de transmission.

Limite basse-fréquence des densités modales (validité SEA)

La SEA est une méthode «hautes fréquences». En effet, les calculs dépendent de la densité modale. Si celle-ci est inférieure à l'unité, les résultats ne peuvent être considérés comme étant valides.

La densité modale dépend des dimensions et du matériau du système considéré.

Dans la plupart des cas, dans le cadre du bâtiment, nous nous trouvons en dessous de la limite de validité.

À titre d'exemple, pour une poutre (de dimensions 0,5 x 0,5 x 15 m), le calcul est valide au-dessus de 250 Hz. Pour une plaque (de dimensions 20 x 20 x 0,3 m), le calcul est valide au-dessus de 125 Hz.

Nous pouvons constater que pour être dans le cadre de validité de la SEA, il faut être dans une configuration avec de très grandes dimensions.

Nous avons donc posé l'hypothèse qu'il y a au moins un mode de vibration dans chaque bande de fréquence, quelles que soient les dimensions ou le matériau de l'élément.

Limite des coefficients de transmission

Pour le calcul des coefficients de transmission, nous nous sommes essentiellement appuyés sur le livre Structure Borne Sound 2^{de} édition de Cremer qui décrit le comportement de chaque type d'onde en fonction de la fréquence et des jonctions. Nous n'avons cependant pas pu valider ce modèle par des expériences ou mesures.

Conclusion sur le principe de calcul

Le modèle ainsi construit comporte donc plusieurs limites :

Tout d'abord, dans les cas classiques du bâtiment, les vibrations avec lesquelles nous travaillons ont des fréquences trop basses pour rentrer dans le cadre de validité de la SEA (notamment les vibrations dues aux trains et métro qui se situent autour des bandes d'octave de 63 et 125 Hz).

Ensuite, l'utilisateur a la possibilité de ne rentrer qu'un seul chemin de propagation. Nous avons créé un modèle qui prend en compte l'influence des autres chemins sur le résultat, mais nous ne pouvons pas le généraliser à tous les cas.

Ce calcul donne une bonne approximation du niveau vibratoire induit. Il est aussi important pour comprendre les phénomènes et pour le suivi des vibrations dans les structures. Le travail de recherche effectué pour le développement de cet utilitaire a été très utile pour la compréhension de la propagation des vibrations dans les structures.

Afin d'avoir une meilleure précision sur les modèles, il sera nécessaire de mener une campagne d'expérimentation et de validation du modèle. Cela permettrait d'introduire des termes correctifs, et de quantifier les incertitudes de calcul.

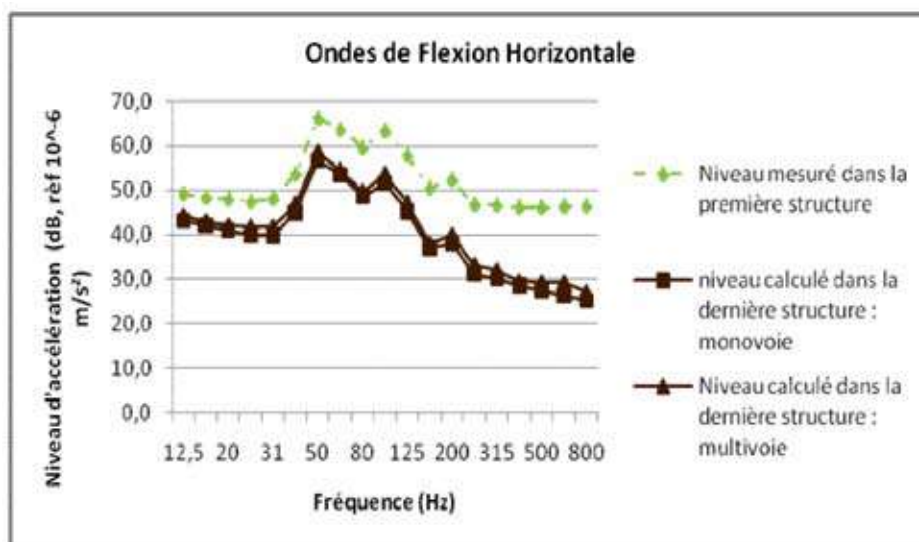


Fig. 1 : Exemple de graphe de résultats dans le cas d'un assemblage de 7 plaques en béton

Conclusion

La nécessité d'appréhender mieux que ce que nous savons faire aujourd'hui la propagation des vibrations dans les bâtiments se fait de plus en plus sentir.

Malgré les limites connues de la SEA, nous avons voulu examiner la possibilité de développer un utilitaire basé sur ce concept et utilisable par un bureau d'études avec les contraintes du marché (délais/coûts).

Un tel modèle est effectivement exploitable dans le cadre de missions d'ingénierie mais reste très limité en fréquence (valable au-dessus de 250 Hz, suivant les dimensions des structures). Il peut déjà être utilisé pour examiner la propagation des vibrations de certaines machines tournant à hautes fréquences, mais reste aujourd'hui non valide pour les trains.

Nos questions sont donc maintenant :

- Que peut-on faire pour étendre le domaine de validité d'un tel modèle à des fréquences inférieures, en particulier pour pouvoir parler des vibrations des trains ?
- Comment définir une notion de «puissance vibratoire» d'une machine ou d'un train qui pourrait être utilisée comme condition à la source du modèle.

Références bibliographiques

- [HAM] Hamayon L., Réussir l'acoustique d'un bâtiment, éd. Le Moniteur.
- [JOU] Jouhaneau J., Acoustique appliquée, éd. Technique & Documentation.
- [TEC1] Technique de l'ingénieur, Dossier : Vibration, BR 200, pp 39-71
- [LES] Lesueur C., Rayonnement acoustique des structures (vibrations : chap 1, méthodes de prédiction : Partie 4)
- [HAR] Harris C.M., Shock vibration handbook pp1-15
- [TEC2] Technique de l'ingénieur, Dossier : Analyse statistique énergétique SEA
- [VIG] Vigran T.E., Building Acoustics (Chapitre 7)
- [KOI] Koizumi, Prediction of the vibration in buildings using statistical energy analysis
- [BRO] Bron-van der Jagt G.S., Sound transmission pipe systems and into buildings structures (Thèse)
- [DAN] Dankowski J., Fabreka P.E., International USA : Vibration considerations when planning a facility
- [AMI-1] Amick H. and Gendreau M., Construction vibrations and their impact on Vibration-Sensitive facilities, ASCE Construction congress 6, Fév 2000
- [AMI-2] Amick H., A Frequency-Dependent soil propagation model, SPIE conference on current developments in vibration control for optomechanical systems, Juillet 1999
- [ROY] Royer D., Ondes élastiques dans les solides (tome 1) Éd Masson, p 235
- [CRE-1] Cremer, Structure Borne Sound, Springer Verlag, 1973
- [BER] Beranek, Noise and Vibration Control Chap 11, John Wiley & Sons, 2006
- [CRA-1] Craik R. JM, IUTAM Symposium on Statistical Energy Analysis
- [TAN] Tang S.K., Vibrational energy transmission through wall junctions in buildings, Journal of Sound and Vibration 286, pp 1048-1056, 2005
- [TSO] Tso Y.K., An investigation of the coupling loss factor for a cylinder/plate structure, Journal of Sound and Vibration 199 pp 629-643, 1997
- [CRA-2] Craik R. JM, Galbrun L., Vibration transmission through a frame typical of timber-framed buildings, Journal of Sound and Vibration 281, pp 763-782, 2005