

# La diversité des sources vibratoires : les vibrations liées aux engins de chantier

## Alexis Bigot

SolData Acoustic,  
Parc de l'Ile  
21, rue du Port  
92022 Nanterre CEDEX  
Tél : 01 55 17 00 57  
E-mail : alexis.bigot@soldata-acoustic.com

## Mansour Lassoued

Européenne de Géophysique  
Parc de l'Ile  
21, rue du Port  
92022 Nanterre CEDEX  
Tél : 01 41 44 46 40  
E-mail : edg@edg-sas.com

## Résumé

*Les chantiers de construction sont potentiellement sources de nuisances ou de risques vibratoires dans l'environnement. Le but de cet article est de présenter les spécificités liées aux chantiers (diversité des sources vibratoires), ainsi que les principales difficultés qui en découlent, notamment en termes de connaissance des émissions vibratoires. Une méthode de caractérisation des sources vibratoires, adaptée au contexte des chantiers, sera finalement proposée.*

## Abstract

*Construction sites can potentially be sources of nuisance or vibratory risks in the environment. The aim of this article is to present construction site specificity regarding, for example, vibration source diversity, as well as the main difficulties which can result due to the difficulty to identify the vibration spread. Finally, a method to characterise vibration sources, adapted to construction sites, will be proposed.*

## Le contexte des chantiers

Les chantiers de construction, du fait de l'utilisation d'engins, de machines ou de procédés sources de vibrations, peuvent être à l'origine de nuisances dans l'environnement, mais également présenter des risques de dommages sur les structures.

Une des difficultés majeures dans la gestion des chantiers de construction est que les sources vibratoires ainsi que les procédés évoluent en fonction de l'avancement du chantier : un chantier est par nature en évolution permanente ; ce qui rend complexe la maîtrise des risques vibratoires.

La seconde difficulté est liée à la prédiction des impacts vibratoires. Celle-ci nécessite la construction de modèles prévisionnels (ex : modèles éléments finis) ainsi que la connaissance des paramètres d'entrée (émissions vibratoires, caractérisation du sol, des interactions sols/structure, etc.). Seule une bonne connaissance de toute la chaîne «Source-Propagation solidienne-Interaction sol/structure-Propagation dans les structures» permettra des évaluations fiables, et donc une meilleure maîtrise du risque vibratoire.

Nous allons par la suite illustrer par quelques exemples la diversité des sources vibratoires rencontrées sur les chantiers, puis proposer une méthode de caractérisation, permettant de capitaliser des données d'émission, utilisables par la suite dans les modèles de prédiction.

## Diversité des sources vibratoires sur les chantiers

Une grande diversité d'émissions vibratoires peut être rencontrée sur les chantiers. Ces sources peuvent globalement être classées en différentes catégories :

- les machines émettant des vibrations entretenues (ex : vibrofonçage, foreuse, tunnelier...);
- les sources émettant des impulsions à intervalles plus ou moins courts (ex : brise roche hydraulique, battage de pieux, battage de palplanches...);
- les tirs d'explosifs, qui sont à considérer comme une catégorie spécifique.

A titre d'illustration, quelques exemples de sources vibratoires et leurs signaux temporels correspondants sont données dans les figures 1 à 4.

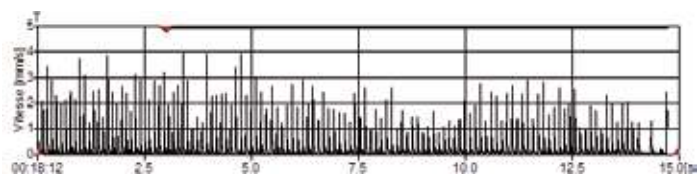


Fig. 1 : Exemple de source vibratoire : pelleuse équipée d'un BRH (vitesse particulière)

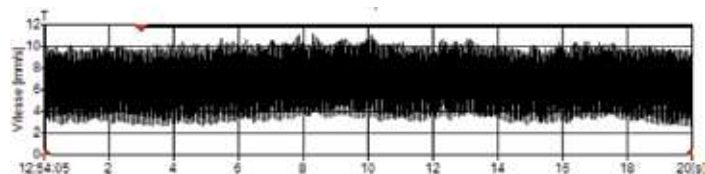


Fig. 2 : Exemple de source vibratoire : battage de palplanches (vitesse particulière)

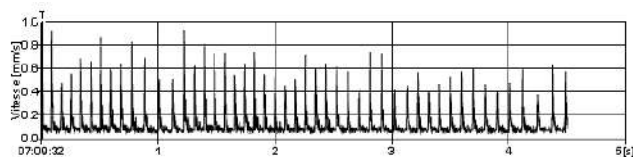


Fig. 3 : Exemple de source vibratoire : construction d'une tranchée (vitesse particulière)

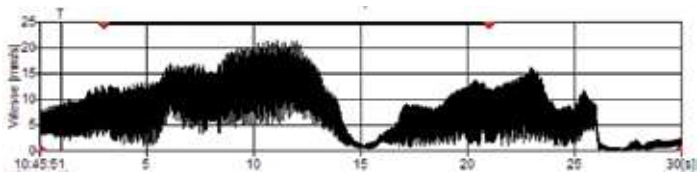


Fig. 4 : Exemple de source vibratoire : construction de colonne ballastée (vitesse particulière)

## Les risques induits par les vibrations

En termes de vibrations, le risque potentiel pour les structures est généralement considéré à partir de 2 mm/s (valeur la plus stricte issue de la circulaire du 23 juillet 1986, utilisée usuellement pour les chantiers). Cette valeur dépend toutefois du type de vibration, du type de construction, et des fréquences considérées.

En termes de gêne potentielle ressentie par les riverains, les vibrations sont généralement perceptibles par le corps humain à partir d'un seuil beaucoup plus faible, de l'ordre de 0,1 mm/s (seuil de perception).

Les vibrations engendrent également des émissions sonores par rayonnement des parois à l'intérieur des logements (bruit solidien). Une gêne acoustique est généralement ressentie avant même que la vibration ne soit perçue, dès que la vitesse particulaire est de l'ordre de 0,05 mm/s.

La confrontation de ces différents seuils est représentée sur la figure 5.

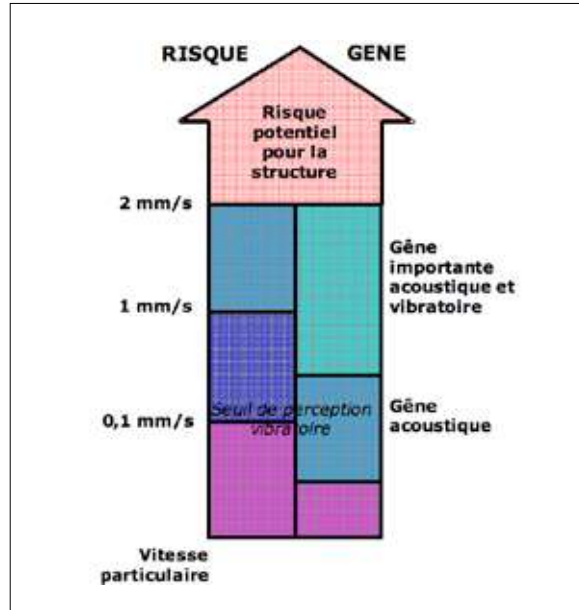


Fig. 5 : Echelle indicative de représentation des risques vibratoires potentiels sur les structures et sur la gêne ressentie

## Les signaux vibratoires et leurs différentes composantes

Les ondes sismiques (vibrations) génèrent des déplacements de structures qui peuvent être destructifs si les niveaux sont trop élevés. Les recommandations en termes de disposition des capteurs de vibrations sont généralement les suivantes :

- Placer les capteurs sur les éléments de fondation du bâtiment,
- S'assurer que les capteurs sont solidaires de la structure (fixation au plâtre ou vissée sur une platine),
- Orienter les capteurs afin de pouvoir analyser les différentes composantes des vibrations enregistrées (Cf. fig. 7).

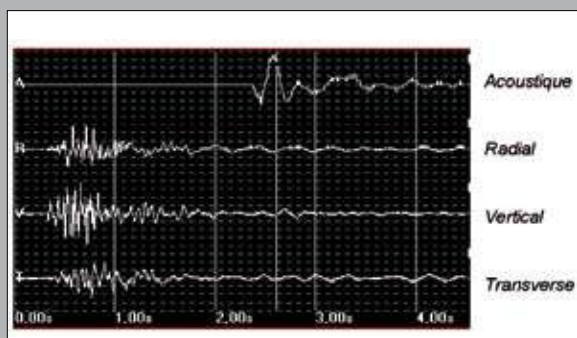


Fig. 7 : Exemple de signal vibratoire suivant les 3 directions (X,Y,Z) avec corrélation avec un capteur acoustique.

Les signaux sismiques acquis en surface se présentent généralement sous forme d'une onde dite de compression, puis d'une onde de surface, plus lente, et plus basse fréquence.

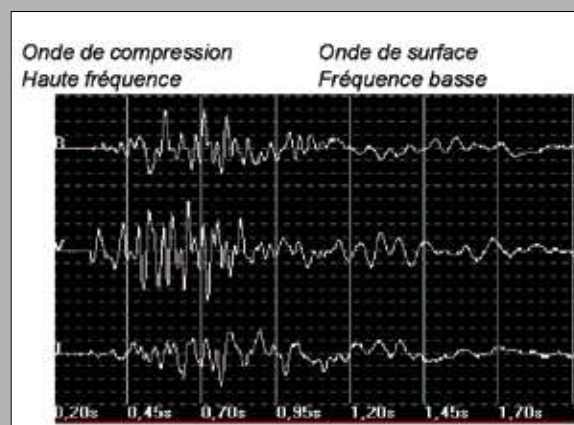


Fig. 8 : Signal montrant les trois composantes d'un événement vibratoire avec onde de compression et onde surface

## Les besoins en termes de caractérisation des sources vibratoires

Si l'on fait le parallèle avec l'acoustique, domaine dans lequel les fournisseurs ont l'obligation d'afficher la puissance acoustique émise par leurs machines (directive « Machines » 2006/42/CE), les exigences en vibrations sont essentiellement concentrées sur les émissions vibratoires transmises au corps humain (exposition des salariés).

Il est beaucoup plus rare de trouver, dans le domaine public, des données correspondant à des émissions dans le sol ou les structures.

Il y a donc un besoin fort de pouvoir disposer de bibliothèques de données d'émission, tant pour les entreprises de construction (pour la maîtrise de leurs émissions vibratoires dans l'environnement) que pour les scientifiques et bureaux d'études (pour utilisation dans leurs modèles prévisionnels). Ces besoins dépassent évidemment le cadre national, et se font également sentir sur de gros chantiers à l'international.

Il faut donc pouvoir disposer de méthodes de mesurage permettant de caractériser les sources vibratoires, adaptées au contexte des chantiers, sachant que ces mesures devront permettre de répondre aux besoins suivants :

- Les mesures vibratoires doivent pouvoir prendre en compte les différents modes opératoires liés aux spécificités et modes d'utilisation des machines.

- Les résultats de mesures doivent pouvoir être « incorporés » dans les modèles numériques de propagation des vibrations.

- En parallèle aux mesures vibratoires, il est nécessaire de mesurer les caractéristiques dynamiques du sol. En effet, les caractéristiques du sol ont un impact sur la propagation des vibrations, et plus particulièrement sur leur atténuation en fonction de la distance, voire même sur l'émission vibratoire elle-même. On ne peut donc pas dissocier la source vibratoire du milieu dans lequel il opère.

Nous proposons donc ci-après une méthode de caractérisation des sources vibratoires. Il s'agit de la méthode « cross-hole », qui, couplée avec des mesures vibratoires sur un terrain d'essai, permet de caractériser la source et le milieu de propagation.

## Une méthode de caractérisation de source vibratoire avec la méthode « cross-hole »

La méthode cross-hole (norme ASTM D4428) permet de déterminer les caractéristiques dynamiques des terrains en place (modules d'élasticité E et G).

Elle consiste à mesurer les temps de propagation d'ondes sismiques entre un forage émetteur et un forage récepteur, et de déduire, à partir des ondes de compressions (onde P) et des ondes de cisaillement (onde S), les modules d'Young (E) et de cisaillement (G). Les distances entre forages qui servent aux calculs des vitesses sont mesurées à l'aide d'une sonde inclinométrique.

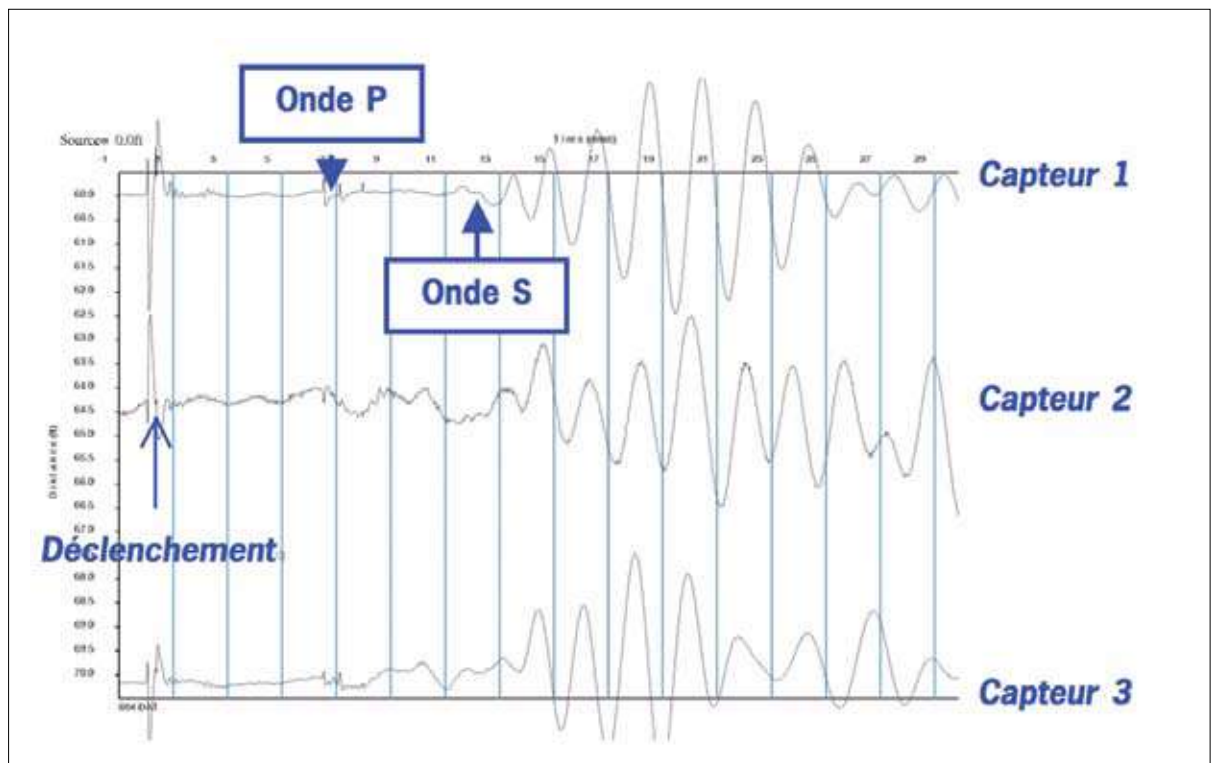


Fig. 11 : Exemple de signal reçu sur la sonde réceptrice

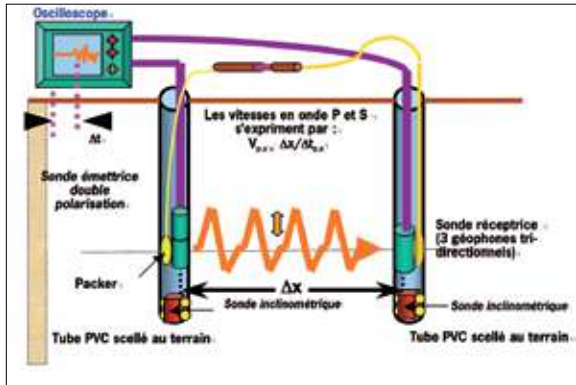


Fig. 10 : Principe des mesures cross-hole (Norme ASTM D-4428)

La figure 11 ci-dessous montre un exemple de signal enregistré sur la sonde réceptrice tridirectionnelle (1 capteur vertical et 2 capteurs horizontaux).

L'onde de cisaillement est généralement bien visible lorsque sa vitesse de propagation est faible (comportement basse fréquence caractéristique).

En parallèle aux essais cross-hole, des essais vibratoires sont réalisés sur la machine à caractériser. Des capteurs vibratoires (géophones) sont positionnés dans le sol à différentes distances de la machine (ex : 4 m, 8 m, 16 m, 32 m). Les tests sont réalisés pour différents modes de fonctionnement et/ou modes opératoires, et le cas échéant, pour différentes profondeurs de travail dans le sol.

Ces mesures de décroissances vibratoires, associées aux mesures des caractéristiques du sol, permettent ainsi de caractériser complètement les émissions vibratoires d'une machine, et ce, pour différentes conditions de fonctionnement. Les résultats peuvent ensuite être utilisés comme données d'entrée dans des modèles prévisionnels, par un simple recalage du modèle source / sol avec les mesures effectuées.

### Perspectives

Comment maîtriser les effets si l'on ne maîtrise pas les causes ? Démocrite, au Vème s. av. J.C., exprimait déjà que cause et effet doivent être définis sur le même plan... La maîtrise des nuisances et des risques vibratoires passe donc nécessairement par l'approfondissement de nos connaissances en termes d'émissions vibratoires, notamment pour le cas de chantiers, domaine où l'on peut trouver un nombre très important de configurations et d'équipements différents.

Dans l'attente d'évolutions réglementaires allant en ce sens, des besoins se font sentir en termes de fourniture de données d'émission fiables. L'élaboration de bibliothèques ou de bases de données d'émission pourrait être une perspective d'avenir utile pour améliorer la maîtrise des risques et réduire les nuisances vibratoires. Des travaux de collaboration entre fournisseurs, entrepreneurs et scientifiques seront probablement nécessaires pour mettre à disposition des méthodologies et des données.

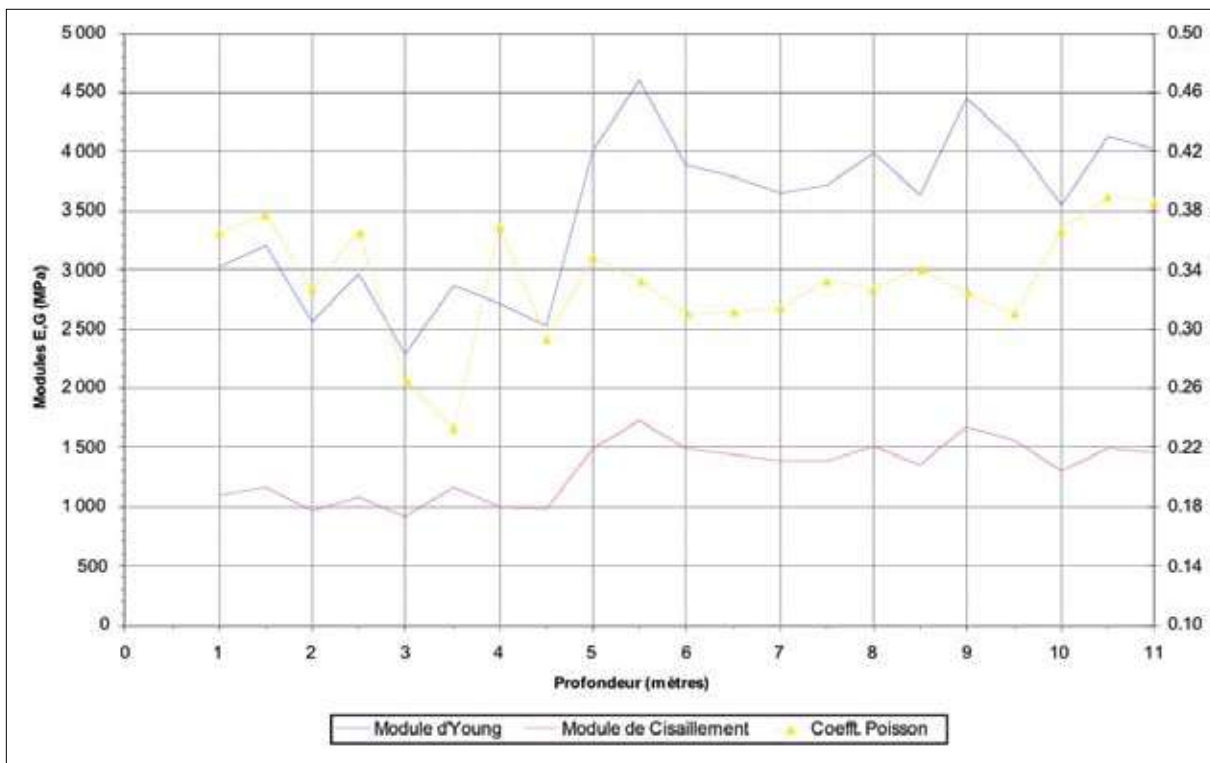


Fig. 12 : Exemple de présentation de résultats de mesures cross-hole



## La prévision des vibrations

Il est possible d'estimer de manière empirique la prévision des vibrations grâce à certaines lois, comme par exemple la loi dite de Chapot, dans le cas de tirs de mines.

Cette loi établit une relation entre la vitesse particulière et la distance à la source vibratoire :

$$V = K \cdot (D/Q^{0,5})^{(-b)}$$

Où :

V = vitesse en mm/s

D = Distance en m

Q = Charge unitaire (tir de carrière)

K = coefficient caractérisant le massif traversé et le type de tir pratiqué

b = coefficient caractérisant l'atténuation des ondes vibratoires

Le coefficient K moyen utilisé dépend du type de tir :

	Tir d'abattage	Tir bloqué (tranchée, tunnel)
Calcaire	1 000 à 2 000	2 000 à 4 000
Éruptif	2 000 à 5 000	3 000 à 6 000

## L'analyse des signaux vibratoires en temps et en fréquence

Les signaux vibratoires peuvent être traités dans le domaine temporel, en termes d'amplitude, mais aussi dans le domaine fréquentiel.

Ainsi le principe de l'analyse en série de Fourier est qu'un signal  $s(t)$  peut se décomposer en série de Fourier sous la forme de :

$$s(t) = \sum_j [A_j \cdot \cos(\omega_j \cdot t) + B_j \cdot \sin(\omega_j \cdot t)] \text{ avec } \omega_j = 2 \cdot \pi \cdot f_j$$

Où  $f_j$  sont les différentes fréquences caractéristiques issues de la décomposition en série de Fourier.

On appelle fréquence principale la fréquence majeure présente sur le spectre de Fourier.

On voit ainsi que sur la figure suivante que la fréquence principale est variable en fonction de la voie de mesure.

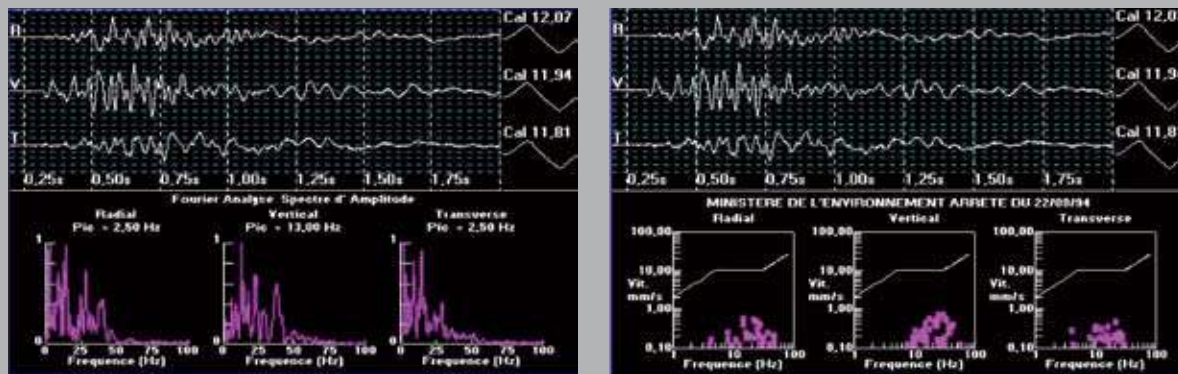


Fig. 9 : Signal montrant les trois composantes (X,Y,Z) d'un événement vibratoire avec onde de compression et onde de surface