

### VIBRATION EN EXPERTISE

#### *Enjeux des techniques d'auscultation*

19 juin 2026

**Société Française d'Architecture**

247 rue Saint-Jacques – 75005 Paris

**Intervenants** (de gauche à droite) :



- **Patrick DUGAST**, expert judiciaire spécialisé dans l'analyse des nuisances liées aux vibrations, LCF Acoustique
- **Matthieu BOURDON**, ingénieur en matériaux du Génie Civil, consultant en auscultation géotechnique et structurelle, RINCENT BTP Services Recherche Expertise
- **Guillaume LABRIE**, Responsable de marchés Monitoring, Engineering & Infrastructures chez Leica Geosystems
- **Nicolas GARDERES**, avocat spécialisé en droit public, droit de l'urbanisme et droit de l'environnement. Docteur en droit public et enseignant à Sciences Po Paris

## Sommaire :

|                                                                                             |           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Accueil.....</b>                                                                         | <b>3</b>  |
| Nicolas BUAL .....                                                                          | 3         |
| <b>De l’onde au dommage : comprendre et mesurer les vibrations.....</b>                     | <b>4</b>  |
| Patrick DUGAST .....                                                                        | 4         |
| <b>Comprendre la vibration avant d’en mesurer les effets .....</b>                          | <b>4</b>  |
| ↳ De l’oscillation à la longueur d’onde .....                                               | 4         |
| ↳ Célérité, amortissement et spectre décrivent le phénomène .....                           | 4         |
| ↳ Dans le sol, la longueur d’onde devient une donnée constructive .....                     | 5         |
| <b>Mesurer impose de choisir la bonne grandeur.....</b>                                     | <b>5</b>  |
| ↳ L’accéléromètre couvre une gamme de mesures très étendue .....                            | 5         |
| ↳ Le géophone mesure une vitesse et impose une orientation .....                            | 6         |
| ↳ Accélération, vitesse et déplacement doivent pouvoir être convertis.....                  | 6         |
| <b>Des vibrations ressenties aux seuils admissibles .....</b>                               | <b>7</b>  |
| ↳ La nuisance dépend d’abord de ce qui est exposé .....                                     | 7         |
| ↳ Mines, constructions et durée d’exposition appellent des seuils différents .....          | 7         |
| ↳ Le séisme change radicalement l’échelle de référence.....                                 | 8         |
| ↳ Le capteur doit suivre l’échelle du phénomène .....                                       | 8         |
| <b>Questions de la salle .....</b>                                                          | <b>8</b>  |
| <b>Instrumenter les vibrations : de la mesure au diagnostic .....</b>                       | <b>10</b> |
| Matthieu BOURDON .....                                                                      | 10        |
| <b>Mesurer juste : le capteur ne vaut que par la question posée .....</b>                   | <b>10</b> |
| ↳ Objectiver, localiser et corréler avant de choisir l’instrumentation .....                | 10        |
| ↳ Fréquence et seuils donnent son sens à la mesure .....                                    | 10        |
| ↳ Du positionnement des capteurs à l’interprétation des données.....                        | 11        |
| <b>Les « bâtiments fantômes » : reconstituer le mécanisme du craquement.....</b>            | <b>11</b> |
| ↳ Une toile d’araignée pour retrouver l’origine des chocs.....                              | 11        |
| ↳ Les temps d’arrivée permettent de remonter à la source.....                               | 12        |
| ↳ Le gradient thermique révèle un phénomène de fatigue.....                                 | 13        |
| <b>Échanges avec la salle.....</b>                                                          | <b>14</b> |
| <b>Tchernobyl et Millau : chaque dossier reste un prototype.....</b>                        | <b>15</b> |
| ↳ À Tchernobyl, la mesure guide le choix des fondations .....                               | 15        |
| ↳ À Millau, la balançoire devient méthode de réception.....                                 | 16        |
| <b>Surveiller un ouvrage : le besoin de mesure avant le choix de l’instrument .....</b>     | <b>17</b> |
| Guillaume LABRIE .....                                                                      | 17        |
| <b>De l’optique à l’auscultation : cadrer le besoin avant de choisir l’outil .....</b>      | <b>17</b> |
| ↳ Deux siècles d’instruments de précision .....                                             | 17        |
| ↳ Mesurer le phénomène utile, en relatif ou en absolu .....                                 | 17        |
| ↳ Criticité, temporalité et conditions de site forment un même système .....                | 18        |
| <b>Un éventail de technologies dont les performances ne sont pas interchangeables .....</b> | <b>19</b> |
| ↳ Du monitoring environnemental à l’observation satellitaire .....                          | 19        |
| ↳ La station totale mesure l’absolu, à condition de disposer de références stables .....    | 19        |
| ↳ Les capteurs connectés privilégient l’autonomie et la mesure relative .....               | 20        |
| <b>Les cas d’usage ramènent chaque instrument à sa juste fonction .....</b>                 | <b>20</b> |
| ↳ Du château menacé à l’église fissurée : adapter la cadence au risque .....                | 20        |
| ↳ Tassomètres, lasers et jauges : des réponses ciblées et parfois économiques.....          | 21        |
| ↳ La matrice de choix n’abolit ni l’expertise ni la gestion du risque.....                  | 21        |
| <b>Vibrations : l’expertise au cœur de la preuve juridique .....</b>                        | <b>23</b> |
| Nicolas GARDÈRES .....                                                                      | 23        |
| <b>Transformer un phénomène physique en objet juridique.....</b>                            | <b>23</b> |
| ↳ Entre droit et technique, l’expert doit trouver sa place .....                            | 23        |
| ↳ Un « droit mou » pourtant déterminant .....                                               | 23        |
| ↳ L’expert sert de médiateur entre la norme technique et le juge .....                      | 24        |
| <b>Le trouble anormal de voisinage : prouver sans avoir à démontrer une faute .....</b>     | <b>24</b> |
| ↳ Une responsabilité de plein droit .....                                                   | 24        |
| ↳ L’antériorité oblige à reconstituer précisément la chronologie .....                      | 24        |
| ↳ Pour apporter la preuve, le riverain est « totalement démuné » .....                      | 25        |
| ↳ Le juge ne cherche pas seulement à savoir si « cela vibre » .....                         | 25        |

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| Le lien de causalité, point décisif de la démonstration.....          | 26        |
| ↳ « Très certainement » n'équivaut pas à une preuve .....             | 26        |
| ↳ Une cause peut être déterminante sans être exclusive .....          | 26        |
| ↳ Pour les travaux publics, le raisonnement technique change peu..... | 27        |
| ↳ Qualifier le préjudice plutôt que le chiffrer .....                 | 27        |
| <b>Sigles et abréviations .....</b>                                   | <b>28</b> |

## Accueil



**Nicolas BUAL**

*Architecte expert, membre du CNEAF, co-organisateur des TRNTJ*

Les vibrations sont partout, y compris là où l'on ne les attend pas. L'effondrement du pont de la Basse-Chaîne à Angers, le 18 avril 1850, lors du passage d'un régiment d'infanterie légère, fit ainsi plus de 200 morts. Longtemps attribuée à la marche cadencée des soldats, entrée en résonance avec le mouvement du pont, la catastrophe serait en réalité liée notamment à un manque d'entretien de l'ouvrage.

La vibration est le mouvement, ou l'état de ce qui vibre, et l'effet qui en résulte sous forme de son ou d'ébranlement. Physiquement, elle correspond à une oscillation périodique, un va-et-vient autour d'une position de référence, caractérisé par sa fréquence, son amplitude et son énergie.

Le phénomène dépasse largement la construction. Dans certaines traditions religieuses, la création du monde est associée à un souffle, donc à une vibration; la vibration s'invite aussi dans les sentiments puisque chacun peut « vibrer d'amour ».

Si les vibrations sont partout, elles restent cependant souvent imperceptibles. Tout dépend de leur fréquence : les très basses fréquences peuvent ne pas être ressenties, tandis que les plus élevées échappent également à la perception humaine, à l'image des ultrasons. Elles se transmettent dans les matériaux comme dans l'air.

Qu'elle soit perçue de manière sonore ou solidienne, la vibration constitue une excitation. Elle peut stimuler, notamment dans la musique, et agit également sur le corps, l'esprit et les capacités physiques, psychologiques, voire cognitives. Elle peut ainsi prendre un caractère pathologique.

La diversité des phénomènes concernés interdit d'en dresser un panorama complet. Cette table ronde se concentre donc sur le domaine rencontré quotidiennement par les experts : la vibration dans la construction. Comment appréhender la vibration et ses effets? Comment les mesurer? Où se situe le seuil critique à partir duquel les vibrations altèrent leur environnement?

**Patrick Dugast** abordera l'analyse des nuisances vibratoires et de leurs seuils. **Matthieu Bourdon** présentera les méthodes d'auscultation permettant de sécuriser bâtiments et opérations de construction. **Guillaume Labrie** exposera les performances et les limites des matériels de mesure et de monitoring, avant que **Nicolas Gardères** n'apporte l'éclairage juridique sur ces problématiques.

# De l'onde au dommage : comprendre et mesurer les vibrations



**Patrick DUGAST**

*Expert judiciaire spécialisé dans l'analyse des nuisances liées aux vibrations, LCF Acoustique*

Les vibrations se propagent dans l'air, les structures et les sols, puis rencontrent des ouvrages qui leur opposent leur propre réponse. Leur analyse impose de comprendre fréquence, longueur d'onde et amortissement avant de choisir les instruments et les seuils pertinents. Entre perceptions humaines, protection des constructions, séisme et machines sensibles, les niveaux considérés varient dans des proportions considérables.

## Comprendre la vibration avant d'en mesurer les effets

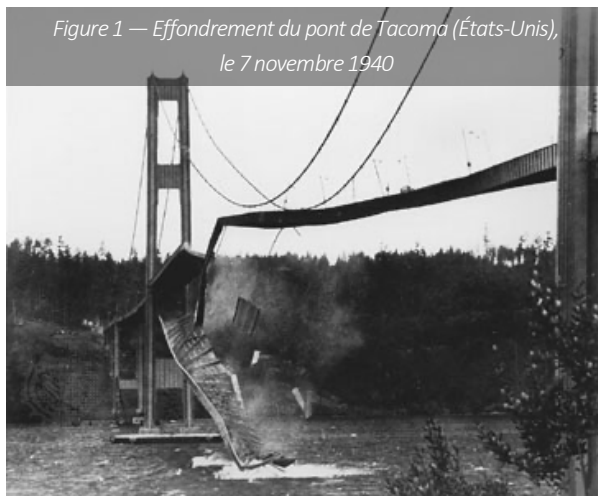
### ➔ De l'oscillation à la longueur d'onde

Un caillou jeté dans l'eau suffit à représenter les principales caractéristiques d'une vibration. L'oscillation observée à la surface possède une période  $T$ , tandis que sa fréquence  $F$  correspond à l'inverse de cette période. La longueur d'onde désigne la distance séparant deux maxima positifs successifs.

Le même phénomène se retrouve dans différents milieux. Dans l'air, il relève de l'acoustique; dans

les solides et les structures, de la mécanique ondulatoire; dans les sols, de la sismique et de la mécanique des fondations.

Une vibration peut alors se propager sous forme d'onde ou «s'installer» dans une structure sous forme de modes propres de déformation élastique. Dans ce dernier cas, l'onde ne traverse plus simplement l'ouvrage : c'est l'ensemble de la structure qui vibre selon ses fréquences propres. L'effondrement du pont de Tacoma (*fig.1*) en fournit une illustration spectaculaire : le couplage aéroélastique entre le vent et un mode propre du pont a amplifié son mouvement jusqu'à la rupture.



### ➔ Célérité, amortissement et spectre décrivent le phénomène

Lorsqu'elle se propage, l'onde se déplace à une célérité dépendant du milieu : environ 340 m/s dans l'air, 1500 m/s dans l'eau, 5000 m/s dans l'acier, mais seulement 150 m/s dans certains sols meubles. La rigidité et la densité du matériau déterminent largement cette vitesse.

**Trois grandeurs deviennent donc essentielles : la célérité, la longueur d'onde liée à la fréquence, et l'amortissement.** Ce dernier traduit la capacité d'un sol ou d'une structure à dissiper progressivement l'énergie vibratoire. L'image du diapason est particulièrement parlante : après avoir été frappé, il oscille puis finit par s'arrêter.

L'analyse doit simultanément considérer le signal dans le temps et son spectre. Un signal apparemment simple peut contenir plusieurs fréquences. Une succession régulière de chocs produit, par exemple, une signature spectrale en forme de peigne. Signal temporel et spectre apportent donc deux informations complémentaires.

Il faut également distinguer le choc isolé ou répété de la vibration continue produite par une machine tournante. Dans tous les cas, le phénomène s'analyse suivant la même chaîne : **une source, un milieu de propagation — sol, air ou canalisations — puis une construction qui répond à la sollicitation**. Cette réponse peut exciter les nombreux modes propres des poteaux, dalles, planchers et autres éléments de l'ouvrage.

➔ Dans le sol, la longueur d'onde devient une donnée constructive

Deux grandes familles d'ondes se propagent dans les sols : les ondes de compression P et les ondes de cisaillement S. Les secondes, davantage présentes en surface, intéressent particulièrement les bâtiments courants.

Leur vitesse varie fortement selon les terrains : environ 150 m/s dans une argile molle, 250 m/s dans une argile dure, 300 m/s dans un limon sablo-argileux et jusqu'à 5000 m/s dans certains calcaires.

La relation entre vitesse, fréquence et longueur d'onde permet alors d'apprécier les effets possibles sur une construction. Une dameuse vibrant à 10 Hz dans un sol où les ondes se propagent à 300 m/s génère une longueur d'onde de 30 m.

| Ondes S                            | Argile molle ou remblai de surface | Argile dure        | Limon sablo-argileux | Calcaire           |
|------------------------------------|------------------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| Vitesse de propagation des ondes S | (150 m/s)                          | (250 m/s)          | (300 m/s)            | (5000 m/s)         |
| Fréquence de propagation           | Longueurs d'onde $\lambda$         |                    |                      |                    |
| 1 Hz                               | 150 m                              | 250 m              | 300 m                | 5000 m             |
| 10 Hz                              | 15 m                               | 25 m               | 30 m                 | 500 m              |
| 50 Hz                              | 3 m                                | 5 m                | 6 m                  | 100 m              |
| Amortissement                      | Fort                               | Moyen              | Faible               | Très faible        |
| Distance de propagation            | $3 \times \lambda$                 | $4 \times \lambda$ | $5 \times \lambda$   | $5 \times \lambda$ |

Figure 1 — La nature du sol modifie fortement la célérité, la longueur d'onde et l'amortissement

La dimension de l'ouvrage devient déterminante : un bâtiment long et rigide ne réagira pas comme une tour dont l'emprise ne mesure qu'une dizaine de mètres. Le premier peut, dans certaines configurations, se comporter « comme un bateau qui supporterait les vagues », tandis qu'une construction plus étroite peut être davantage sollicitée par la courbure du sol.

L'amortissement intervient enfin dans la distance de propagation. Il est généralement important dans les sols meubles superficiels et beaucoup plus faible dans des matériaux tels que le calcaire : à faible amortissement, la vibration peut se propager sur plusieurs longueurs d'onde.

## Mesurer impose de choisir la bonne grandeur

➔ L'accéléromètre couvre une gamme de mesures très étendue

Deux familles d'appareils dominent la mesure vibratoire : les accéléromètres et les géophones. L'accéléromètre piézoélectrique repose sur une masse appliquée sur un élément sensible. Soumise à une accélération, la masse exerce une force proportionnelle à cette dernière ; la contrainte produit alors une charge électrique transformée en tension. Cette technologie présente une très grande étendue fréquentielle, depuis les basses fréquences jusqu'aux fréquences très élevées utilisées pour la mesure des chocs.

D'autres technologies complètent ce dispositif. Les capteurs piézorésistifs utilisent des jauges de

contrainte et permettent notamment de mesurer jusqu'au continu, donc à 0 Hz. Les capteurs MEMS — *Micro-Electro-Mechanical Systems* — sont miniaturisés, peuvent également mesurer le continu et atteignent plusieurs centaines de hertz, ce qui les rend adaptés à de nombreuses applications courantes.

➔ Le géophone mesure une vitesse et impose une orientation

Le géophone fonctionne différemment. Une masse magnétique suspendue par un ressort se déplace dans une bobine; le courant induit par son mouvement fournit un signal proportionnel à la vitesse de déplacement. L'accéléromètre mesure donc une accélération, le géophone une vitesse : deux grandeurs différentes pour qualifier la même vibration.

La suspension mécanique du géophone limite toutefois son fonctionnement aux basses fréquences et impose des précautions d'orientation.

**De Thomas BONNENFANT, architecte à Grenoble (Isère)**

Un géophone permet-il également de déterminer l'orientation de la vibration ?

**Patrick DUGAST**

Les accéléromètres peuvent mesurer simultanément trois axes. Le géophone est plus contraignant en raison de sa masse suspendue : il est conçu pour travailler verticalement ou horizontalement et sa réponse n'est pas identique dans toutes les directions. Sa suspension génère également des limites en basse fréquence et des modes parasites aux fréquences plus élevées.

Ces contraintes expliquent une plage de fonctionnement généralement adaptée aux fréquences rencontrées dans les réglementations relatives aux constructions.

➔ Accélération, vitesse et déplacement doivent pouvoir être convertis

Une difficulté pratique apparaît lorsqu'un constructeur de machines spécifie un déplacement, qu'un autre impose une accélération et que l'entreprise chargée de l'instrumentation dispose d'un géophone mesurant une vitesse. Accélération, vitesse et déplacement décrivent pourtant le même mouvement et peuvent être reliés par dérivation ou intégration, en faisant intervenir la fréquence et le facteur  $2\pi$ .

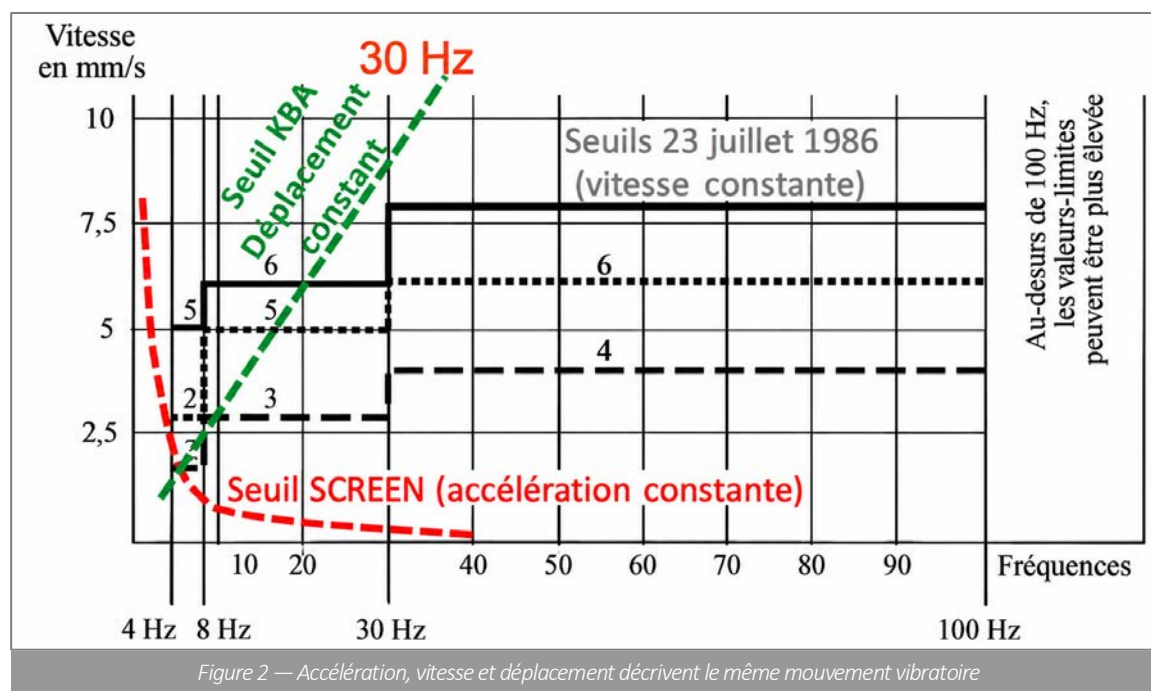


Figure 2 — Accélération, vitesse et déplacement décrivent le même mouvement vibratoire

Une « petite astuce » permet d'en saisir immédiatement l'ordre de grandeur : à environ 150 Hz, un déplacement d'un micromètre correspond approximativement à une vitesse de 1 mm/s.

La conversion spectrale fonctionne correctement pour un signal sinusoïdal établi. Elle devient en revanche inadaptée à un choc impulsif, qui associe de nombreuses fréquences pendant un temps très court. Il faut alors procéder à une intégration temporelle réelle du signal, réalisée électroniquement pas à pas. La précision de cette opération constitue en elle-même une difficulté métrologique.

## Des vibrations ressenties aux seuils admissibles

➔ La nuisance dépend d'abord de ce qui est exposé

Les vibrations peuvent affecter le corps humain, les constructions, le voisinage ou des machines sensibles. Dans les bâtiments, les vibrations réellement ressenties restent relativement rares. Dans une grande majorité des expertises acoustiques, une personne affirmant « entendre » ou « sentir » une vibration perçoit en réalité un bruit de basse fréquence qui produit une sensation corporelle. Les machines posent une problématique différente. Une rotative d'imprimerie, par exemple, peut faire l'objet d'exigences propres au constructeur afin de conserver un alignement extrêmement précis des rouleaux.

Le corps humain présente pour sa part une sensibilité maximale aux très basses fréquences, particulièrement entre 4 et 10 Hz. Lorsque la fréquence augmente, cette sensibilité diminue fortement. Les basses fréquences puissantes diffusées dans une discothèque illustrent le phénomène : autour de 30 Hz, la cage thoracique entre en vibration et la sensation peut se manifester jusqu'aux yeux dans leur orbite.

Pour le corps humain, la référence est la norme NF 90-400. Concernant la gêne de voisinage, s'il n'existe pas de norme générale en France, en Allemagne la norme DIN 4550 définit notamment un seuil de perception des vibrations.

➔ Mines, constructions et durée d'exposition appellent des seuils différents

Les tirs de mines et de carrières constituent un cas particulier de sollicitations impulsives isolées. La réglementation de septembre 1994 retient un niveau de référence de 10 mm/s pour les constructions concernées.

**La conception parasismique répond déjà à une logique différente : il ne s'agit pas de fixer une vibration maximale autorisée, mais de dimensionner un ouvrage pour résister à une sollicitation sismique imposée.** Cette distinction posée, l'analyse revient aux vibrations susceptibles d'affecter les constructions ordinaires.

La circulaire du 23 juillet 1986<sup>1</sup> distingue les vibrations continues des impulsions répétées et fait varier les limites selon les fréquences. Les basses fréquences sollicitent principalement les éléments lourds et le comportement global de la structure ; lorsque la fréquence augmente, les éléments plus légers puis les doublages deviennent davantage concernés.

Trois catégories de constructions sont distinguées selon leur sensibilité. Les niveaux admissibles sont par ailleurs plus élevés pour les impulsions répétées que pour une vibration continue, la durée de sollicitation faisant intervenir la notion de fatigue.

Pour le corps humain, une norme britannique prend en compte le temps d'exposition. Dans un cabinet dentaire installé sous une salle de danse, au sein d'un bâtiment entièrement métallique, les accélérations mesurées ont ainsi pu être comparées à des seuils dépendant de la durée : une

---

<sup>1</sup> <https://aida.ineris.fr/reglementation/circulaire-230786-relative-vibrations-mecaniques-emises-lenvironnement-installations>

sollicitation acceptable pendant une minute ne peut être appréciée comme une exposition permanente.

➡ Le séisme change radicalement l'échelle de référence

Le calcul sismique repose sur un spectre de sollicitation ou de réponse et non sur un spectre de limites. Celui-ci doit être établi pour chaque bâtiment en fonction de ses caractéristiques : matériau de construction, capacité d'amortissement, fréquence ou période propre, accélération imposée par la zone sismique, catégorie de sol (du plus dur au plus mou), importance de l'ouvrage et coefficient de comportement lié notamment à sa ductilité<sup>2</sup>.

D'autres solutions peuvent isoler directement une construction. Une chambre acoustique destinée aux essais de satellites a ainsi été constituée d'une très lourde enveloppe de béton reposant sur vingt boîtes à ressorts. L'objectif était de filtrer les vibrations extérieures tout en empêchant les niveaux produits pendant les essais de se transmettre au voisinage. Le principe d'isolation sur ressorts se révèle à cet égard particulièrement efficace pour protéger les bâtiments.

La comparaison graphique entre vitesse, déplacement et accélération fait apparaître le changement d'échelle. Alors que la circulaire de 1986 conduit à des valeurs maximales de l'ordre de 10 mm/s, un spectre sismique peut atteindre plusieurs centaines de millimètres par seconde, des déplacements de plusieurs centimètres et, pour certains calculs de sûreté particulièrement exigeants, des accélérations pouvant atteindre plusieurs fois l'accélération de la pesanteur.

➡ Le capteur doit suivre l'échelle du phénomène

À l'autre extrémité se trouvent les machines optiques, de gravure ou d'imagerie de très haute précision rencontrées dans l'industrie. Leurs exigences vibratoires peuvent descendre jusqu'à des niveaux extrêmement faibles, très inférieurs à ceux admis pour des machines d'imprimerie.

Entre ces niveaux de l'ordre de  $10^{-6}$  m/s<sup>2</sup> et les accélérations sismiques pouvant atteindre environ 2 g, l'étendue de mesure devient considérable. **Un capteur ne peut pas couvrir toute cette plage : il faut sélectionner l'instrument en fonction de ce que l'on cherche effectivement à mesurer.**

## Questions de la salle

**De Chahrazad TOMA VASTRA, architecte experte à AULNAY-SOUS-BOIS (Seine–Saint-Denis)**

Peut-on mesurer sur le même spectre la déformation d'un bâtiment et sa récupération élastique, notamment pour déterminer un éventuel tassement avant et après des travaux de tunnel ?

**Patrick DUGAST**

Le tassement ne relève plus de la vibration, mais d'un phénomène statique. Sa mesure fait appel à d'autres instruments, notamment au théodolite ou à l'inclinomètre, ce dernier permettant des mesures angulaires extrêmement précises. Des techniques satellitaires permettent désormais également de suivre des tassements de l'ordre du millimètre sur des territoires très étendus, par exemple à la suite de pompages. Il convient donc de distinguer clairement la mesure dynamique des vibrations du suivi statique des déplacements.

---

<sup>2</sup> La ductilité est la capacité à se déformer plastiquement avant rupture.

**De Jean-Pierre PISSARRA, architecte expert à PONTOISE (Val-d'Oise)**

Dans le cadre d'un référé préventif portant sur la démolition d'anciens silos à l'explosif, des capteurs avaient été installés plusieurs semaines avant les tirs. Ces appareils se rapprochent-ils des instruments présentés ?

**Patrick DUGAST**

Il s'agit très probablement de géophones, couramment employés pour les tirs de mines et de carrières. Si un seuil de 10 mm/s peut constituer la référence générale, des constructions particulièrement sensibles ou des études spécifiques peuvent justifier d'autres valeurs. La difficulté essentielle consiste précisément à déterminer le bon seuil.

La circulaire de 1986 distingue à cet égard une **méthode de contrôle**, fondée sur l'application des seuils prescrits, et une **méthode d'expertise**, qui nécessite une analyse plus approfondie, des calculs et une instrumentation adaptée.

Les technologies actuelles permettent enfin de prolonger cette surveillance dans le temps. Un petit accéléromètre capacitif triaxial peut mesurer de faibles niveaux d'accélération, y compris jusqu'au continu, et transmettre ses données à distance. Alimenté par panneau solaire et associé à un dispositif de communication, il peut rester plusieurs mois sur site.



*Une vibration dans l'air, c'est de l'acoustique. Dans une structure solide, c'est de la mécanique ondulatoire. Dans un sol, c'est de la science sismique.*



***Patrick Dugast, expert en vibrations***

# Instrumenter les vibrations : de la mesure au diagnostic



**Matthieu BOURDON**

*Ingénieur en matériaux du Génie civil, consultant en auscultation géotechnique et structurelle, RINCENT BTP Services Recherche Expertise*

L'instrumentation vibratoire transforme un ressenti, un bruit ou un désordre en données exploitables par l'expert. Pour autant, la sophistication des capteurs ne garantit rien à elle seule : la mesure n'a de sens qu'en fonction de la question posée, du chemin de propagation des ondes et des incertitudes. Deux expertises illustrent cette démarche, de l'immeuble qui « craque » au sarcophage de Tchernobyl.

## Mesurer juste : le capteur ne vaut que par la question posée

➔ Objectiver, localiser et corrélérer avant de choisir l'instrumentation

L'instrumentation peut rapidement conduire à des dispositifs complexes, mobilisant des capteurs très sensibles et une masse considérable de données, sans que les résultats puissent ensuite être interprétés ou comparés à ce qui est acceptable. La première étape consiste donc à revenir aux objectifs de l'expertise.

La mesure doit d'abord objectiver : donner une valeur à ce qui était jusque-là ressenti ou observé et fournir des éléments factuels susceptibles d'être discutés. Elle doit ensuite contribuer à trouver l'origine du phénomène, à en comprendre les conséquences et, le cas échéant, les imputabilités. Enfin, elle doit permettre de dater et corrélérer les événements avec les antécédents, l'histoire de l'ouvrage ou son environnement. Le capteur doit donc être défini à partir de cette mission plutôt que par reproduction d'un dispositif employé ailleurs.

Une vibration se caractérise principalement par sa fréquence et sa vitesse particulière, mesurée suivant trois axes. Accélération et déplacement peuvent également être recherchés. S'y ajoutent la durée et le nombre d'occurrences : la répétition participe directement à la gêne. Les effets peuvent être directs sur l'humain ou la structure — résonance, fissuration par excès de traction, déformations — ou indirects, par exemple lorsqu'une vibration provoque une densification et un tassement du sol.

➔ Fréquence et seuils donnent son sens à la mesure

La résonance peut être assimilée au mouvement d'une balançoire : une impulsion appliquée au bon moment augmente progressivement son amplitude ; à une fréquence inadaptée, elle produit peu d'effet. Il en va de même d'une structure. Une même vitesse vibratoire n'a donc pas la même signification selon sa fréquence.

Il faut également distinguer **les effets sur la construction de la gêne ressentie par l'occupant**. Il en va ainsi du bruit solidien : une onde reçue par les soubassements ou un ouvrage adjacent se propage dans la structure avant d'être réémise sous forme sonore par un mur ou une cloison. Ces cheminements peuvent être complexes, et le lieu où le bruit est entendu ne correspond pas nécessairement à sa source.

Les repères normatifs restent limités. La circulaire du 23 juillet 1986 précédemment évoquée est ainsi utilisée bien au-delà de son champ initial, qui concerne les installations classées. Les seuils varient notamment selon le caractère impulsionnel ou continu de la source et selon la fréquence. La difficulté apparaît surtout lorsqu'aucune valeur réglementaire ne correspond au phénomène

étudié. Des équipements sensibles tels qu'une IRM disposent de seuils fournis par leur fabricant. Pour une construction particulière, inscrite dans un environnement et une histoire propres, se raccrocher à un seuil générique ne suffit plus. Il faut alors davantage instrumenter afin de comprendre les tenants et les aboutissants du phénomène.

➤ Du positionnement des capteurs à l'interprétation des données

Géophones et accéléromètres constituent les deux principales familles de capteurs. Leur implantation est déterminante : ils doivent être placés sur les chemins de propagation et correctement couplés au matériau. Un capteur posé sur du sable alors que l'onde chemine principalement dans un substratum rigide sous-jacent risque ainsi de manquer l'information essentielle.

Sur un bâtiment, les mesures peuvent être effectuées au pied, sur l'élément porteur, ainsi qu'en partie haute. La proximité de la source n'est pas nécessairement synonyme d'exposition maximale : dans un immeuble, des ralentisseurs installés dans un parking ont ainsi provoqué une gêne essentiellement ressentie dans un appartement situé au dernier étage.

Le maillage doit éviter les zones aveugles et les capteurs ne doivent pas être placés sur des revêtements atténuant l'onde ou à proximité d'éléments susceptibles d'entrer eux-mêmes en résonance. Une fois les capteurs posés, il faut échantillonner, enregistrer, analyser puis corréler les informations. Cette dernière étape relève davantage de l'expertise : une vibration survenant aux heures de fonctionnement d'une climatisation constitue un indice, sans pour autant établir une causalité.

À ces principes s'ajoutent les réalités du terrain : accès nécessitant parfois des cordistes ou des spécialistes des espaces confinés, câblage pour synchroniser les acquisitions, seuils de déclenchement susceptibles d'être perturbés par l'activité du chantier et caractérisation du bruit de fond. L'étalonnage est essentiel : **contrairement à une mesure relative de fissure ou de déplacement, la mesure vibratoire doit fournir une valeur absolue fiable.**

## Les « bâtiments fantômes » : reconstituer le mécanisme du craquement

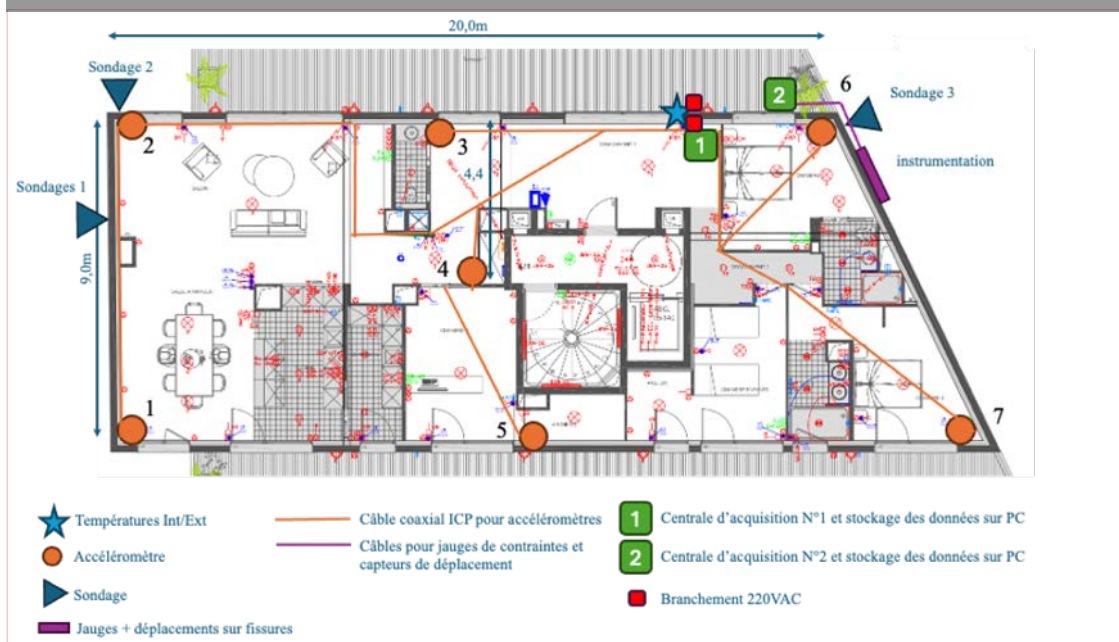
➤ Une toile d'araignée pour retrouver l'origine des chocs

Certains bâtiments émettent des craquements suffisamment violents pour être décrits comme des morceaux de béton tombant sur le plancher haut. Ils surviennent principalement après des journées ensoleillées, et se poursuivent parfois la nuit, à différents endroits d'un même appartement, sans être ressentis de la même manière par tous les occupants.

Dans le cas étudié, un bureau d'études acoustiques puis un sapiteur acousticien avaient déjà confirmé le phénomène et identifié plusieurs zones actives sans parvenir à localiser précisément son origine. Ces investigations préliminaires avaient conduit à considérer l'appartement comme impropre à sa destination. L'enjeu consistait donc à comprendre globalement le phénomène et à rechercher une solution réparatoire.

Sept accéléromètres ont été disposés au plancher haut, aux différents angles de l'appartement, selon une véritable toile d'araignée. Des sondes ont mesuré les températures intérieures et extérieures et les gradients thermiques. Les fissures du pignon ont été équipées de capteurs de déplacement et de jauges de microdéformation afin d'apprécier les contraintes et leurs éventuels relâchements (*fig.2 ci-après*).

Figure 2 — Implantation des capteurs d'accélération : une « toile d'araignée » en plancher haut



Des sondages structurels ont par ailleurs révélé, dans certaines zones fissurées, une absence de continuité des aciers susceptible de réduire la raideur de la structure et d'encourager ses mouvements.

➔ Les temps d'arrivée permettent de remonter à la source

L'originalité de la méthode a consisté à ne plus localiser les événements par leur seule intensité, mais par le temps d'arrivée de l'onde sur chacun des capteurs. Dès que le premier détectait un événement, toute la chaîne enregistrerait simultanément, avec une mémoire tampon conservant le signal précédant le déclenchement (fig.2).

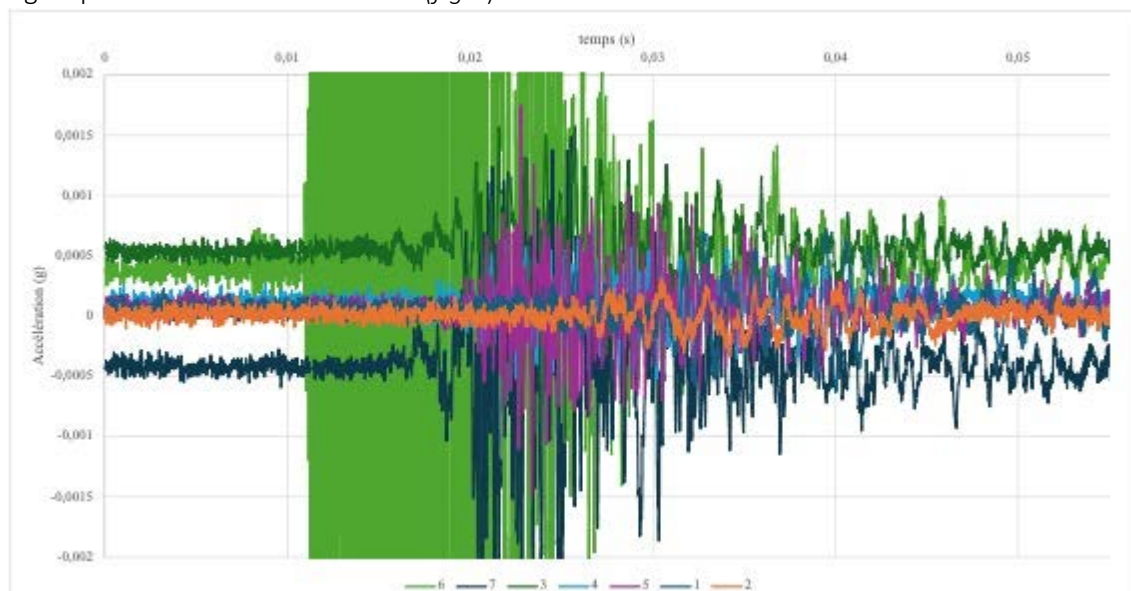
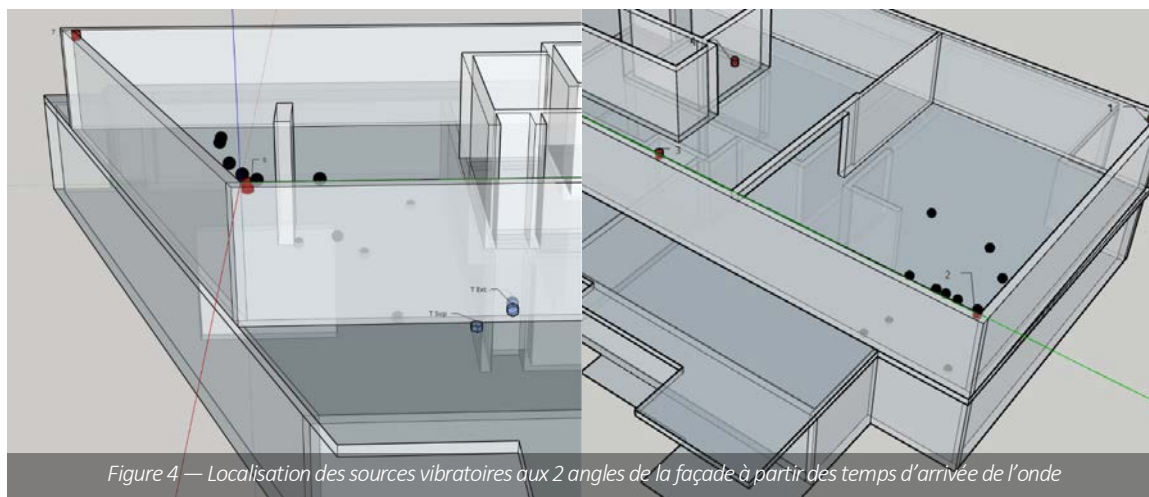


Figure 3 — Exemple d'un événement proche du capteur 6 se propageant aux autres capteurs

Avec une acquisition supérieure à 50000 Hz, les infimes décalages entre les fronts d'onde devenaient mesurables. La structure a ensuite été étalonnée en produisant des impacts répétables

au scléromètre<sup>3</sup>. La vitesse équivalente de propagation obtenue in situ était d'environ 2300 m/s. Une inversion tridimensionnelle a alors permis de rechercher la source correspondant aux différents temps d'arrivée. Le calcul devait intégrer les chemins réels de propagation et être contraint par la géométrie des murs, planchers et éléments porteurs : une solution située arbitrairement au milieu d'une pièce n'aurait eu aucun sens. Un algorithme fondé sur les moindres carrés a recherché la meilleure solution et réparti les erreurs, tandis que des outils statistiques permettaient d'en apprécier l'incertitude.

Les événements se sont finalement concentrés sur deux angles de la façade (*fig. 4*), donc un résultat différent des localisations précédemment proposées. Une limite demeure cependant : cette campagne avait été réalisée en automne, alors que les premières mesures dataient du printemps, sans possibilité de déterminer précisément l'effet de cette saisonnalité.



#### ➤ Le gradient thermique révèle un phénomène de fatigue

Sur une journée type, les événements diurnes suivent nettement la température extérieure : l'effet de façade domine. Une deuxième vague apparaît en début de soirée et au milieu de la nuit, alors que l'ensoleillement a disparu. Le bâtiment « *recraque* », vraisemblablement sous l'effet des cycles d'expansion et de rétraction.

La corrélation avec le gradient entre températures intérieure et extérieure confirme le mécanisme : lorsque l'écart est faible, les événements sont rares ; ils se multiplient lorsqu'il augmente. L'une des deux zones localisées présente précisément un rebond nocturne et correspond à la chambre.

Les capteurs installés sur le pignon ont parallèlement mis en évidence un phénomène de fatigue. Les sollicitations cycliques modifient progressivement les propriétés du matériau, favorisent la fissuration et les déplacements entre éléments. Alors qu'une zone saine de façade présente une relation régulière entre température et déformation, le pignon fissuré change de comportement selon les périodes. Les fissures elles-mêmes ne s'ouvrent et ne se referment pas linéairement avec la température.

Deux voies de réparation se dessinent. Une intervention thermique peut réduire ou retarder les phénomènes, mais probablement pas les supprimer : un bâtiment voisin, initialement noir puis repeint en blanc, continue à craquer. Une intervention structurelle pourrait rétablir la raideur manquante, au risque qu'un renforcement local crée un point dur et reporte les contraintes ailleurs.

<sup>3</sup> Appareil permettant d'évaluer la dureté superficielle du béton par mesure de son rebond après un impact mécanique calibré.

## Échanges avec la salle

### De la salle

La composition du béton pourrait-elle expliquer la persistance du phénomène ?

### Matthieu BOURDON

Cette piste n'a pas été étudiée. Les investigations ont d'abord mis en évidence un problème de liaisonnement ainsi que des modes constructifs mixtes, associant préfabrication et béton coulé en place, susceptibles de réagir différemment aux variations thermiques. La persistance du bruit pourrait également conduire à s'interroger sur la dureté des granulats.

### De Thomas BONNENFANT, architecte expert à Grenoble (Isère)

Le gradient thermique pourrait-il être réduit en augmentant l'espace entre le bardage et l'extérieur ?

### Matthieu BOURDON

Il n'y a pas de bardage extérieur sur ce bâtiment. Il faudrait donc ajouter un dispositif en façade.

### Patrick DUGAST

Des joints de fractionnement sont normalement prévus sur les grandes longueurs de béton, notamment les terrasses exposées au soleil, afin de maîtriser les contraintes thermiques.

### Matthieu BOURDON

La propagation observée est surtout verticale, le long de pignons continus, et moins importante sur la façade. La question se poserait donc plutôt en termes de joint vertical.

### Nicolas BUAL

Les résultats correspondent-ils à 450 coups par heure ?

### Matthieu BOURDON

Cette valeur est cumulée sur l'ensemble de la campagne. Les périodes les plus actives atteignent néanmoins huit, voire douze occurrences par demi-heure.

### De Hervé RODRIGUEZ, architecte expert à Toulouse (Haute-Garonne)

Quel est le coût d'une telle instrumentation ?

### Matthieu BOURDON

Le ticket d'entrée était de l'ordre de 40000 euros et l'étude a finalement atteint environ 60000 euros. En tout état de cause, l'enjeu dépasse la valeur d'un seul appartement : c'est le devenir de l'immeuble qui est posé.

### De Faïza BENABADJI RIMBOEUF, architecte experte à Lille (Nord)

Lorsqu'un bruit est perçu très loin de sa source, par exemple depuis le sous-sol jusqu'au septième étage, quels chemins de propagation faut-il rechercher ?

### Matthieu BOURDON

Les matériaux les plus denses, rigides et massifs conduisent préférentiellement les ondes. Les cages d'ascenseur ou d'escalier et le noyau structural constituent souvent des chemins privilégiés; la continuité des aciers peut former une véritable « autoroute » pour les vibrations.

### Patrick DUGAST

Un phénomène comparable a été rencontré dans un immeuble où le passage des véhicules sur un joint de fractionnement du parking faisait claquer deux dalles. La vibration remontait jusqu'au dernier étage. Plus la hauteur augmente, plus le mouvement de la structure peut prendre de l'amplitude et exciter les doublages légers à leur fréquence propre. Ceux-ci rayonnent alors le son comme un haut-parleur, tandis que quelques étages plus bas les cloisons ne sont pas suffisamment excitées pour produire le même effet.

## Tchernobyl et Millau : chaque dossier reste un prototype

➔ À Tchernobyl, la mesure guide le choix des fondations

À Tchernobyl, la question était géotechnique : fallait-il recourir à des pieux battus ou forés pour les fondations de la nouvelle arche de confinement? Le battage générant d'importantes vibrations, il fallait s'assurer qu'il ne risquait pas d'endommager davantage le réacteur.

Des géophones ont été disposés suivant une ligne à différentes distances afin de mesurer l'atténuation des vibrations. Le terrain superficiel étant sableux, ils ont dû être profondément enfoncés pour assurer leur couplage avec le sol (fig. 5).



Figure 5 — Les pieux battus servant de fondations ont fait l'objet de mesures vibratoires au moyen de géophones  
Source : D. Durot, Pile tests in nuclear area: case of Chernobyl, Proceedings of the 21st ICSMGE, Vienne, 2026

L'étude devait en outre composer avec des normes ukrainiennes différentes des référentiels utilisés en France. L'analyse a donc nécessité un traitement fréquentiel des données, notamment par transformée de Fourier<sup>4</sup>, afin de déterminer les niveaux acceptables. Cette expérience confirme quelques principes : identifier les autres sources vibratoires, constater l'état initial et les

---

<sup>4</sup> Transformée de Fourier : méthode mathématique permettant de décomposer un signal vibratoire en ses différentes composantes fréquentielles afin d'identifier les fréquences qui le caractérisent.

fissures avant travaux, connaître les incertitudes de mesure et ne pas s'accrocher aux seuls seuils normatifs. Les accès et les occupants conditionnent également le dispositif, tout comme la saison.

➔ À Millau, la balançoire devient méthode de réception

Les haubans du viaduc de Millau étant équipés de systèmes hydrauliques d'amortissement contre les effets du vent, leur efficacité devait être caractérisée avant la mise en circulation.

Depuis une nacelle, un hauban d'environ 150 mètres a été excité manuellement au rythme d'un métronome. En appliquant l'impulsion à la bonne fréquence, son déplacement augmentait et ses différents modes propres devenaient perceptibles. Un accéléromètre enregistrait ensuite la décroissance du mouvement après l'arrêt de l'excitation, permettant de qualifier l'amortissement hydraulique et de réceptionner le dispositif.

#### Nicolas BUAL

En expertise, notamment préventive, des instrumentations produisent souvent des données brutes très détaillées que l'expert n'est pas nécessairement capable d'interpréter. Il faudrait donc prévoir, dès la mise en place du suivi, qu'en cas d'apparition d'une anomalie ces données soient immédiatement analysées par un professionnel compétent, afin d'en apprécier les conséquences éventuelles sur le bâtiment.

«

*Il n'y a pas de « meilleur » capteur : il y a le capteur adapté à la question posée.*

»

**Matthieu Bourdon, consultant en auscultation**

## Surveiller un ouvrage : le besoin de mesure avant le choix de l'instrument



**Guillaume LABRIE**

*Responsable de marchés Monitoring, Engineering & Infrastructures chez Leica Geosystems*

La surveillance d'un ouvrage ne commence pas par le choix d'un capteur, mais par la définition de la grandeur à mesurer, du risque, de la temporalité et de la réaction attendue. Stations totales, capteurs connectés, fibre optique, InSAR ou fissuromètres répondent ensuite à des besoins distincts, avec leurs contraintes propres.

### De l'optique à l'auscultation : cadrer le besoin avant de choisir l'outil

#### → Deux siècles d'instruments de précision

L'histoire de Leica Geosystems réunit plusieurs traditions suisses de mécanique et d'optique de précision. Kern fabrique dès 1819 des instruments de dessin, puis des théodolites. Leitz développe des microscopes, des solutions optiques et des appareils photographiques; Leica naît de la contraction de «Leitz Camera». À Heerbrugg, Wild conçoit des niveaux de précision et des théodolites. Leur rapprochement conduit à la création de Leica en 1990, puis à la séparation des métiers entre 1996 et 1998. Leica Geosystems rejoint le groupe Hexagon en 2005.

Cette filiation explique la place de la mesure dans les activités actuelles : topographie, scanners 3D, guidage d'engins, détection de réseaux, cartographie mobile et monitoring. Si Leica Geosystems fournit instruments et support technique, l'entreprise n'est pas une société de prestations. La définition du besoin et l'interprétation des résultats demeurent du ressort des acteurs du projet et des spécialistes concernés.

#### → Mesurer le phénomène utile, en relatif ou en absolu



Figure 6 — La mesure de l'inclinaison suffit à la surveillance de la mise en place des palplanches

Devant un ouvrage fissuré ou déformé, l'accumulation de technologies ne constitue pas une réponse. La première question porte sur la grandeur physique réellement utile : déplacement en X, Y et Z, tassement, inclinaison, rotation, convergence, ouverture de fissure, pression, contrainte, température ou vibration. La nature et l'origine présumée du mouvement, son amplitude, sa vitesse d'évolution et une éventuelle saisonnalité complètent cette définition. Une demande initiale peut ainsi être surdimensionnée.

Pour surveiller des têtes de palplanches lors du chargement d'un talus, une mesure tridimensionnelle avait d'abord été prescrite. Elle aurait nécessité une station totale, des prismes et des lignes de visée difficilement compatibles avec la circulation des engins. L'échange avec le donneur d'ordre a montré que le seul risque recherché était le basculement des palplanches : une mesure d'inclinaison suffisait (fig. 6). Négocier la

grandeur mesurée réduit alors le coût et simplifie l'installation sans diminuer la pertinence du suivi. Il convient également de distinguer mesure relative et mesure absolue. **Un capteur relatif indique comment un élément évolue par rapport à lui-même ou à un point voisin. Une mesure absolue rattache le déplacement à un référentiel extérieur stable**, par exemple des coordonnées géographiques partageables. Un inclinomètre détecte un basculement gravitaire, pas nécessairement le glissement horizontal de l'ensemble auquel il est fixé.

Est-il fréquent de devoir ramener une prescription à la seule grandeur réellement nécessaire ?

**Matthieu BOURDON**

Oui, particulièrement lorsque l'enjeu financier est important. La négociation doit toutefois préserver l'information nécessaire à l'évaluation du risque.

➡ Criticité, temporalité et conditions de site forment un même système

**Guillaume LABRIE**

La précision doit être proportionnée à la criticité. Un talus isolé et peu exposé peut être suivi au centimètre, tandis qu'un ouvrage nucléaire, un bâtiment historique, un chantier urbain occupé ou une carrière en exploitation peuvent imposer une précision millimétrique, une redondance des mesures et des seuils plus exigeants. Le budget est directement lié à ces risques humains, économiques, patrimoniaux ou environnementaux. La définition de la précision et des seuils appartient aux spécialistes compétents.

L'auscultation consiste à mesurer le même point à des moments différents pour analyser son évolution et prendre des décisions fondées sur des données. Sa temporalité s'étend de plusieurs années à la milliseconde. Le sommet du mont Blanc est ainsi mesuré tous les deux ans ; à l'inverse, l'analyse vibratoire s'exprime en hertz. Entre ces extrêmes, la bonne fréquence dépend de la vitesse attendue, du risque et de la finalité. Une fissure qui s'ouvre et se referme selon un cycle saisonnier stable n'a pas la même signification qu'un glissement passant d'un centimètre par mois à un centimètre par semaine.

Les contraintes extérieures peuvent devenir déterminantes : alimentation électrique, accessibilité, besoin de cordistes, nucléaire ou ferroviaire, couverture radio, lignes de visée et évolution du chantier. À Angoulême, une alimentation solaire a compensé l'absence de réseau électrique. Il fallait également anticiper la montée des futurs bâtiments, susceptible de masquer les prismes. Enfin, la finalité doit être explicite : simple rapport d'observation, alarme, évacuation, fermeture d'un chantier, d'une route ou d'un accès. La fréquence de mesure ne doit pas être confondue avec la fréquence de transmission et de mise à disposition des données.

**Patrick DUGAST**

Les mesures au théodolite permettent-elles de suivre des phénomènes rapides ?

**Guillaume LABRIE**

Une station totale effectue des mesures successives, point par point. Une mesure précise d'un prisme peut demander environ quinze secondes, alors qu'un même prisme peut être suivi en continu jusqu'à une mesure par seconde. Si cette cadence convient notamment à certaines épreuves de chargement, elle n'est pas adaptée à l'analyse vibratoire instantanée.

## Un éventail de technologies dont les performances ne sont pas interchangeables

### ➔ Du monitoring environnemental à l'observation satellitaire

Le monitoring environnemental répond à des prescriptions réglementaires, à la santé des travailleurs ainsi qu'à l'acceptabilité des chantiers urbains. Il porte sur le bruit, les poussières, les polluants, les odeurs ou encore la qualité de l'eau. L'analyse vibratoire contrôle, au moyen de géophones, le comportement dynamique d'une structure et le confort des personnes : amplitude, fréquence, vitesse, accélération, déplacement, spectre ou pics. L'installation des capteurs est souvent simple, quand l'analyse exige une compétence spécifique.

La fibre optique permet une mesure distribuée de température, de déformation, de contrainte ou de pression sur de grands linéaires. Une fibre de 30 km peut ainsi être interrogée à chaque mètre. Résistante aux environnements difficiles et insensible aux perturbations électromagnétiques, elle convient aux ponts, viaducs, barrages, tunnels, canalisations ou installations nucléaires. En revanche elle ne se justifie pas vraiment pour une façade isolée.

Les capteurs géotechniques couvrent une famille très large : fissuromètres, extensomètres, sondes de température, jauges de déformation, tassomètres, cellules de charge ou sondes piézométriques. Leur raccordement à des nœuds radio facilite la transmission et limite le câblage. L'InSAR, fondé sur l'interférométrie radar satellitaire, observe quant à lui des affaissements, glissements ou mouvements de structures sur de vastes territoires et permet, lorsque c'est possible, de remonter aux données acquises depuis 1992.

### Matthieu BOURDON

L'emploi de cette technologie dépend de la géologie, de la vitesse des mouvements, de la flotte satellitaire et de la taille du pixel, qui peut varier d'environ vingt à trois mètres. Des réflecteurs artificiels peuvent matérialiser le point observé.

### ➔ La station totale mesure l'absolu, à condition de disposer de références stables

### Guillaume LABRIE

Une station totale robotisée mesure en X, Y et Z avec une précision millimétrique jusqu'à plusieurs centaines de mètres (*fig. 7, ci-contre*). Elle peut fonctionner automatiquement et suivre des dizaines, voire des centaines de prismes. **Son principal intérêt réside dans la mesure absolue, rattachée à des points de référence réputés stables et situés hors de la zone d'influence du chantier.**

Cette performance suppose cependant une implantation rigoureuse. Il faut préserver les lignes de visée malgré la végétation, les panneaux, les constructions ou les engins, assurer l'alimentation électrique et protéger un matériel exposé au vol. Les visées de référence doivent en outre présenter une géométrie suffisamment robuste. À Monaco, une station semblait produire une erreur angulaire lors de travaux d'extension sur la mer. En réalité, son propre support avait légèrement reculé sous l'effet des terrassements; des références mal réparties n'avaient pas permis d'identifier immédiatement ce mouvement. Sans référentiel stable, le système entier peut basculer tout en donnant l'illusion d'une erreur instrumentale.



Figure 7 — Une station totale mesure en X, Y et Z et suit des centaines de prismes

➔ Les capteurs connectés privilégient l'autonomie et la mesure relative

Les capteurs connectés sont autonomes, communiquent sans fil et peuvent constituer un réseau maillé autour d'un ouvrage. Les données transitent de capteur en capteur jusqu'à une passerelle, même lorsque certains n'ont pas de liaison directe avec celle-ci. Leur fréquence se règle à distance, de quelques secondes à plusieurs heures. Un inclinomètre alimenté par une pile peut atteindre plusieurs années d'autonomie à raison d'une mesure par heure.

Leur simplicité d'installation a pour contrepartie une mesure le plus souvent relative. Ils conviennent aux inclinaisons, ouvertures, déplacements entre deux points ou grandeurs fournies par des capteurs tiers, **mais ne remplacent pas une station totale lorsqu'un déplacement tridimensionnel absolu est requis.**

## Les cas d'usage ramènent chaque instrument à sa juste fonction

➔ Du château menacé à l'église fissurée : adapter la cadence au risque

Sur un château dont une partie s'était effondrée, dix inclinomètres (*fig. 8*) ont été installés sur des poutrelles en aluminium franchissant les fissures. Le dispositif traduisait l'inclinaison de chaque poutrelle en déplacement vertical relatif et surveillait également le basculement des pans de mur. Installé en six heures, il mesurait chaque minute pendant les travaux d'étaieement, chaque heure la nuit et plus lentement le week-end. Les seuils commandaient une alarme sonore et des courriels. Le système, pour un budget d'environ 13000 euros, a fonctionné deux mois sans changement de piles, malgré une cadence très consommatrice.

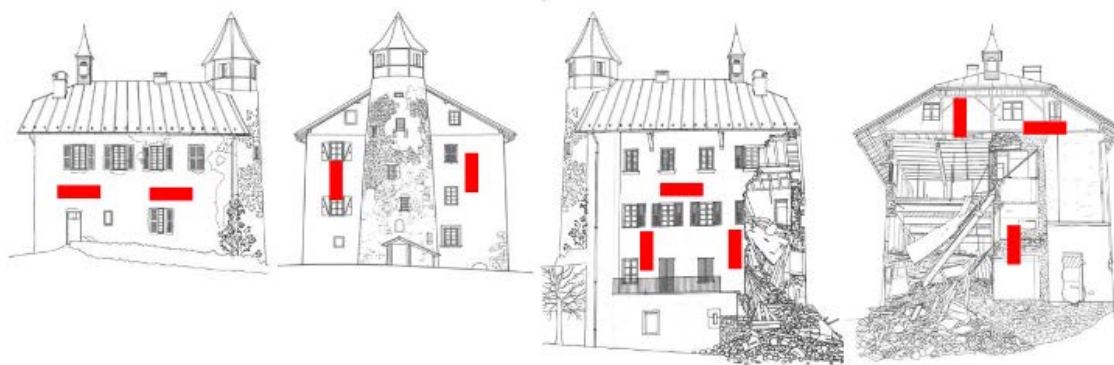


Figure 8 — 10 inclinomètres positionnés pour surveiller les mouvements du bâtiment et alerter en permanence

Dans une église présentant des fissures majeures à proximité d'habitations, huit fissuromètres connectés ont remplacé les lectures manuelles mensuelles. Trois mesures quotidiennes assuraient le suivi courant; la fréquence pouvait être augmentée à distance lors d'une tempête ou de pluies prolongées. Les services du patrimoine disposaient d'une interface web, de rapports mensuels et d'alertes en cas de franchissement de seuil. Le projet représentait environ 11000 euros.

**De Chahrazad TOMA VASTRA, architecte experte à AULNAY-SOUS-BOIS (Seine-Saint-Denis)**

Les alertes peuvent-elles être reçues sur un téléphone mobile ?

### Guillaume LABRIE

Oui. Le système peut envoyer des SMS, généralement complétés par des courriels afin de conserver une diffusion et une traçabilité plus larges.

→ Tassomètres, lasers et jauges : des réponses ciblées et parfois économiques

Dans une usine de machines à laver, les mouvements d'une dalle déréglèrent les convoyeurs entre leur réglage et la mise en production. Quatre pots de nivellement, fondés sur le principe des vases communicants, ont mesuré les déplacements verticaux relatifs au dixième de millimètre. La solution était précise, mais ses tuyaux ne devaient être ni écrasés par des personnes ou des véhicules ni exposés au soleil, qui aurait dilaté le liquide. L'installation, délicate, a demandé six heures et représenté un coût d'environ 12 000 euros.

Après l'effondrement d'un immeuble à Bordeaux en 2021, trois capteurs laser ont surveillé les façades voisines pendant le déblaiement, sans qu'il soit nécessaire d'y fixer des cibles. Installés en trois heures, ils ont mesuré toutes les quinze minutes durant un mois, puis toutes les heures, avec alertes par SMS et courriel et analyse de l'accélération éventuelle des mouvements.

Pour le diagnostic lent d'une fissure, une jauge connectée constitue une solution plus économique, notamment lorsque la hauteur rend impossible la lecture d'une jauge papier. Elle mesure l'ouverture et le désaffleurement chaque heure, mais ne transmet les données qu'une fois par jour : elle n'est donc pas adaptée à une surveillance critique. Son autonomie peut atteindre environ sept ans dans cette configuration.

### De Jean-Pierre PISSARRA, architecte expert à PONTOISE (Val-d'Oise)

Quelle est l'autonomie d'une jauge connectée ?

### Guillaume LABRIE

Environ sept ans à raison d'une mesure par heure et d'un envoi quotidien. Les événements de la journée ne deviennent donc visibles qu'au moment de la transmission des données.

→ La matrice de choix n'abolit ni l'expertise ni la gestion du risque

Le choix peut se résumer par quelques correspondances. Un déplacement tridimensionnel absolu au millimètre appelle une station totale. Une ouverture de fissure suivie sur le long terme relève d'une jauge manuelle ou connectée. Les capteurs connectés répondent à des projets courants ou sensibles exigeant autonomie, multipoints et alertes rapides, sous réserve de la nature relative de la mesure. Le prix, la temporalité, les contraintes du site et la réactivité attendue doivent toujours être examinés ensemble.

### Nicolas BUAL

À quoi ressemble une jauge de contraintes et que mesure-t-elle réellement ?

### Matthieu BOURDON

Il existe notamment des jauges résistives et des jauges à corde vibrante. Elles mesurent une microdéformation, ensuite convertie en contrainte par analogie avec la loi de Hooke.

### Guillaume LABRIE

Sur le métro de Rennes, des jauges soudées par points sur le rail central de guidage ont permis de suivre ses compressions et dilatations sans altérer son intégrité. Des capteurs de température scellés dans le béton et de grands extensomètres placés au droit des joints ont complété l'analyse du viaduc.

**Nicolas BUAL**

Dans un référé préventif portant sur la démolition d’un immeuble parisien en site très dense, un système d’alarme avait été posé afin de déclencher l’évacuation des locaux voisins en cas de déformation subite. Comment déterminer le dispositif approprié ?

**Guillaume LABRIE**

Lorsqu’un risque réel existe, le fournisseur de matériel ne fixe pas seul la stratégie. Le choix des points critiques, des capteurs et des seuils doit associer géomètre-expert et spécialistes de l’ouvrage.

**De Claude LE BIGOT, architecte expert à Paris (13e)**

Quel dispositif envisager, dans le cadre d’un référé préventif, pour suivre un échangeur autoroutier déjà soumis à des travaux et à la circulation ?

**Guillaume LABRIE**

La réponse dépend du phénomène recherché : mouvements des piles, comportement des appareils d’appui, ouverture des joints ou déplacements verticaux sous le passage des véhicules lourds. Prismes, niveaux, capteurs laser, extensomètres, Géolocalisation et navigation par système de satellites (GNSS) ou inclinomètres de forage peuvent être combinés. Un radar interférométrique terrestre compact, installé sous l’ouvrage, peut également mesurer sa réponse au trafic à une fréquence pouvant approcher 200 Hz. Il exige un recul correspondant à environ un septième de la portée observée.

**Matthieu BOURDON**

Il s’agit avant tout d’une gestion du risque. Les guides du Centre d’études et d’expertise sur les risques, l’environnement, la mobilité et l’aménagement (CEREMA), les données de suivi déjà disponibles et la stratégie propre à l’ouvrage doivent orienter la réflexion avant la mise en œuvre.

**Patrick DUGAST**

La difficulté majeure réside dans la fixation d’un seuil ni trop bas, pour éviter les déclenchements intempestifs, ni trop haut, pour conserver le temps de réagir. Les calculs, la modélisation et, si possible, des essais préalables avec les engins de chantier doivent permettre d’anticiper la réponse de l’ouvrage.



*Le budget est très souvent lié à la criticité du projet.*



**Guillaume Labrie, Leica Geosystems**

## Vibrations : l'expertise au cœur de la preuve juridique



**Nicolas GARDÈRES**

*Avocat spécialisé en droit public, droit de l'urbanisme et droit de l'environnement. Docteur en droit public et enseignant à Sciences Po Paris*

Les vibrations ne constituent pas une catégorie juridique autonome. Leur contentieux repose largement sur des régimes de responsabilité sans faute, qui déplacent le débat vers la preuve du trouble et surtout du lien de causalité. Face à un phénomène physique difficile à appréhender juridiquement, l'expertise fournit au juge les éléments techniques indispensables à sa décision.

### Transformer un phénomène physique en objet juridique

→ Entre droit et technique, l'expert doit trouver sa place

L'expert judiciaire se trouve régulièrement confronté à une difficulté de positionnement : il lui est parfois reproché de « faire du droit », ce qui ne relèverait pas de sa mission, et parfois, à l'inverse, de ne pas avoir suffisamment pris en compte un contrat ou une question juridique. En matière de vibrations, cette frontière est particulièrement délicate.

Il est pourtant essentiel que l'expert ait en tête le cadre juridique général dans lequel ses constatations seront utilisées. Le juge n'est pas en mesure d'appréhender seul un phénomène aussi technique. Sur une question telle que le rapport entre les vibrations générées par un chantier et l'apparition de fissures sur un bâtiment, **sans rapport d'expertise exploitable, le juge ne dispose pas d'éléments décisifs**. Pour autant, l'expertise ne suffit pas à elle seule : encore faut-il qu'elle fournisse une démonstration suffisamment claire du phénomène, du dommage et surtout du lien qui les unit.

La vibration n'a, en droit, aucune définition propre distincte de sa définition physique. Elle est appréhendée comme un phénomène, c'est-à-dire un fait ou une manifestation observables par les sens ou susceptibles d'être constatés à travers ses effets.

Le droit s'intéresse donc moins à toutes les vibrations qu'aux « mauvaises vibrations » : celles qui peuvent occasionner une gêne aux personnes, présenter un risque pour leur santé ou provoquer des désordres sur les constructions.

→ Un « droit mou » pourtant déterminant

La particularité de la matière tient à la faiblesse relative du droit contraignant qui l'encadre.

La circulaire du 23 juillet 1986 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement constitue le texte de référence. Une circulaire ministérielle n'est pourtant pas, en principe, une norme juridique comparable à une loi, un décret ou un arrêté. Elle est destinée à indiquer à l'administration la manière d'interpréter ou d'appliquer le droit.

Cette circulaire présente cependant une particularité : elle fixe des valeurs techniques. Sans constituer véritablement du « droit dur », elle permet donc d'objectiver un phénomène qui, à l'origine, est largement subjectif.

La norme ISO 2631-2 remplit une fonction comparable pour l'exposition des personnes aux vibrations globales du corps. D'autres références existent, notamment les normes allemandes DIN. Le Code du travail identifie par ailleurs, à travers l'article R. 4444-1, les risques que les vibrations peuvent provoquer pour les travailleurs.

Ces références techniques ne fondent pas nécessairement, en elles-mêmes, la décision judiciaire. Elles permettent cependant de sortir du seul ressenti pour disposer de valeurs mesurables auxquelles le phénomène peut être confronté.

➡ L'expert sert de médiateur entre la norme technique et le juge

L'arrêt de la cour d'appel de Pau du 5 mai 2015 (n° 13/03765) illustre directement cette articulation.

L'expertise avait établi que, du point de vue de la structure d'une habitation, toutes les valeurs mesurées étaient largement inférieures aux valeurs limites définies par la circulaire du 23 juillet 1986. Aucun trouble affectant le bâti ne pouvait donc être objectivé.

Il en allait différemment pour les occupants : les valeurs relevées pouvaient être confrontées aux amplitudes prévues par la norme ISO 2631-2 pour caractériser une situation de gêne dans les locaux à usage de résidence.

Le rôle de l'expertise apparaît alors clairement. Le juge n'a pas vocation à acquérir lui-même « l'intelligence fine » de valeurs techniques issues d'une circulaire ou d'une norme ISO. L'expert constitue en quelque sorte le médiateur entre le juge et ces normes techniques : il mesure ou fait mesurer, compare les résultats aux références disponibles, puis traduit leur signification.

La norme ne décide donc pas. Elle fournit à l'expertise les moyens d'objectiver le phénomène et, au juge, ceux de le qualifier juridiquement.

## Le trouble anormal de voisinage : prouver sans avoir à démontrer une faute

➡ Une responsabilité de plein droit

Le trouble anormal de voisinage, longtemps construit par la jurisprudence, a été intégré au Code civil par la loi du 15 avril 2024. L'article 1253 du Code civil prévoit désormais que le propriétaire, le locataire, l'occupant, le maître d'ouvrage ou celui qui en exerce les pouvoirs est responsable de plein droit du dommage résultant d'un trouble qui excède les inconvénients normaux du voisinage. Ce régime ne concerne pas seulement les nuisances sonores, olfactives ou les pertes d'ensoleillement. En matière de vibrations, il couvre aussi bien la gêne ressentie par les occupants que les atteintes au bâtiment lui-même.

Il peut ainsi fonder une demande portant sur un préjudice de jouissance, un préjudice moral ou une perte de valeur vénale, mais également sur des fissures et autres dégradations du bien.

Son principal intérêt réside dans son caractère de responsabilité sans faute. **La victime doit démontrer un dommage et son lien avec le trouble, sans avoir à rechercher une faute de l'auteur.**

Le respect des normes ou de la réglementation constitue un indice, parfois important, mais il n'est pas exonératoire. Comme le rappelle notamment la cour d'appel d'Angers dans un arrêt du 23 février 2021 (n° 18/00534), l'absence de faute ou d'infraction aux règles en vigueur n'exclut pas, en elle-même, l'existence d'un trouble anormal.

➡ L'antériorité oblige à reconstituer précisément la chronologie

L'article 1253 reprend également le principe dit de « pré-occupation » : la responsabilité n'est pas engagée lorsque l'activité à l'origine du trouble existait avant l'acquisition ou l'entrée en jouissance du bien par la victime, sous réserve que cette activité respecte les lois et règlements et qu'elle se poursuive dans les mêmes conditions.

La première tâche est donc chronologique : déterminer quand le demandeur est entré dans les lieux et depuis quand existe l'activité génératrice des nuisances.

La difficulté apparaît lorsque cette activité, notamment dans les Installations classées pour la

protection de l'environnement (ICPE), existait auparavant, mais qu'elle a été modifiée ou amplifiée. Il faut alors rechercher si les conditions d'exploitation ont évolué : nouveaux arrêtés préfectoraux, mises en demeure, extensions, modifications des installations ou tout autre élément permettant d'établir une aggravation du trouble.

Pour les atteintes au bâti, l'apparition de fissures sur une construction ancienne jusque-là indemne constitue un indice particulier. Même si l'activité était préexistante, l'apparition d'un désordre nouveau peut traduire une aggravation.

La situation est plus délicate lorsqu'une construction nouvelle est édifiée à proximité d'une source vibratoire déjà connue. Le droit à indemnisation n'est pas nécessairement écarté, mais le juge pourra intégrer dans son appréciation le choix de construire dans cet environnement et les dispositions constructives éventuellement mises en œuvre pour se prémunir contre les vibrations.

➡ Pour apporter la preuve, le riverain est « totalement démuni »

La responsabilité est sans faute, mais elle n'est pas présumée. Celui qui se prétend victime doit prouver la réalité du trouble. Or, seul, le riverain est largement démuni. Il peut expliquer que « ça vibrait comme dans *Jurassic Park* », filmer un verre d'eau tremblant, produire des photographies ou faire intervenir un commissaire de justice. Celui-ci pourra constater que « cela vibre », photographier les fissures, éventuellement décrire leur apparence. Il ne pourra cependant ni mesurer techniquement le phénomène ni déterminer avec certitude l'âge ou la cause d'une fissure. Les constats et témoignages ne sont cependant pas dépourvus de valeur. Un ensemble d'attestations concordantes peut contribuer à établir la réalité d'une gêne ou la chronologie d'apparition d'un désordre. La cour d'appel de Riom, le 14 février 2024 (n° 23/00458), a ainsi retenu plusieurs témoignages directs, concordants et circonstanciés pour établir que des fissures étaient apparues à une période déterminable.

Cette preuve reste néanmoins fragile sans expertise. D'où l'importance, pour les projets d'envergure susceptibles de générer des vibrations, du référé préventif : disposer d'un état des avoisinants avant les travaux évite d'avoir à reconstruire *a posteriori* une situation ancienne.

➡ Le juge ne cherche pas seulement à savoir si « cela vibre »

Si le respect des valeurs techniques compte, il n'est qu'un des critères d'appréciation.

Le juge tient également compte du ressenti des occupants. Celui-ci reste subjectif, sans pouvoir être écarté d'un revers de main. Lorsque plusieurs témoins décrivent de manière concordante le même phénomène, cette accumulation de ressentis individuels peut former une certaine « intersubjectivité » et contribuer ainsi à objectiver le trouble.

S'y ajoutent le constat des fissures, les mesures réalisées et différents facteurs aggravants : durée cumulée des vibrations, survenue pendant la nuit, perception accrue en position allongée, bruit accompagnant le démarrage d'une installation.

**L'expert ne peut donc pas se limiter à fournir une valeur. Il lui faut qualifier la gêne.** Dire seulement que la vibration atteint telle vitesse ou telle fréquence ne donne pas au juge tous les éléments dont il a besoin. Le rapport doit préciser si le phénomène est continu ou intermittent, diurne ou nocturne, ponctuel ou répété, accompagné d'autres nuisances, et ce qu'il représente concrètement pour les occupants.

À cet égard l'arrêt de la cour d'appel de Douai du 14 décembre 2017 (n° 16/05061) montre les conséquences d'une analyse insuffisante. L'expertise avait bien établi une corrélation entre le fonctionnement d'un pulpeur industriel et les vibrations ressenties par les occupants. Pourtant, les investigations n'avaient pas montré de vibrations constantes; elles étaient aléatoires, variables et pas toujours perceptibles.

Le lien avec la machine était donc établi, mais pas l'anormalité de la nuisance. En quelque sorte, constater que « cela vibre à cause de la machine » ne suffisait pas : encore fallait-il dire si cela vibrait assez, assez longtemps et assez souvent pour dépasser les inconvénients normaux du voisinage.

## De la salle

Existe-t-il des seuils permettant de déterminer ce qui relève d'une nuisance urbaine normale ?

### Nicolas GARDÈRES

Il n'existe pas de seuil général, notamment pour les vibrations. L'appréciation dépend des circonstances locales. Les nuisances normalement tolérables à Paris ne sont pas nécessairement celles qui le seraient dans un village ou en pleine campagne. L'anormalité demeure donc largement contextuelle.

La jurisprudence exige en conséquence un phénomène suffisamment grave et répété. Une vibration ressentie au cours d'une seule soirée ne suffit généralement pas : le trouble doit s'inscrire dans une certaine durée et dépasser ce que la vie collective impose normalement de supporter.

## Le lien de causalité, point décisif de la démonstration

➡ « *Très certainement* » n'équivaut pas à une preuve

La question la plus délicate reste celle du lien de causalité entre les vibrations et le dommage.

L'arrêt de la cour d'appel d'Aix-en-Provence du 17 octobre 2024 (n° 21/05230) en donne une illustration particulièrement nette. L'expert considérait que la cause de microfissures apparues sur une façade était « très certainement » l'utilisation d'un brise-roche hydraulique lors de travaux réalisés sur le terrain voisin. Il indiquait même que les ondes vibratoires « *n'avaient pu que* » provoquer ces fissures.

Il reconnaissait parallèlement que des investigations complémentaires permettraient « *peut-être* » d'établir cette relation avec une pleine certitude et que leur résultat n'était lui-même pas garanti. Pour le juge, cette conclusion demeure hypothétique.

La difficulté ne tient donc pas seulement à la prudence du vocabulaire scientifique. **Si l'expert considère qu'une cause est de loin la plus probable, il doit expliquer pourquoi et surtout rechercher les hypothèses concurrentes.**

### Patrick DUGAST

La formulation selon laquelle les ondes vibratoires « *n'ont pu que provoquer* » les fissures relève en effet d'une conviction personnelle si aucune démonstration technique ne vient la prouver.

### Nicolas GARDÈRES

L'enjeu est précisément là : il convient d'apporter la preuve. Affirmer qu'une fissure est due au chantier ne suffit pas davantage dans la bouche d'un expert que dans celle du riverain si cette affirmation n'est pas techniquement démontrée. Et si la certitude absolue n'est pas possible, il faut au minimum avoir examiné et écarté les autres causes envisageables.

### Patrick DUGAST

Les vibrations, à elles seules, provoquent d'ailleurs rarement des fissures. Il faudrait pour cela qu'elles atteignent des niveaux considérables. Beaucoup de désordres attribués aux vibrations proviennent en réalité d'un tassement ou d'un mouvement statique du sol.

➡ Une cause peut être déterminante sans être exclusive

Le lien de causalité n'exige cependant pas toujours que les vibrations constituent l'unique origine du dommage.

Une construction peut présenter des fragilités préexistantes demeurées jusque-là latentes. Les vibrations peuvent alors jouer le rôle d'événement déclencheur.

La cour d'appel de Riom, dans son arrêt du 14 février 2024, a ainsi retenu qu'une maison présentait une fragilité structurelle antérieure, alors que celle-ci ne s'était révélée par l'apparition des fissures

qu'à la suite de tirs de mines. Le lien causal avec les vibrations demeurait donc certain, même s'il n'était pas exclusif.

L'expertise doit dès lors distinguer l'état du bâtiment, ses éventuelles vulnérabilités et le phénomène ayant effectivement déclenché le dommage. Le juge doit pouvoir comprendre non seulement quand la fissure est apparue, mais comment le mécanisme invoqué a pu la provoquer.

➡ Pour les travaux publics, le raisonnement technique change peu

Lorsque les vibrations résultent de travaux ou d'un ouvrage public, le régime juridique relève du droit des dommages de travaux publics.

Pour les tiers, il s'agit également d'un régime largement fondé sur la responsabilité sans faute. Selon les situations, la victime doit établir le lien de causalité et, lorsque le dommage n'est pas accidentel, son caractère grave et spécial.

Pour l'expert, la différence de fondement juridique ne modifie cependant guère le cœur de la démarche : relever les désordres, effectuer ou faire effectuer les mesures, reconstituer la chronologie, rechercher les causes possibles et fournir une démonstration suffisamment solide pour que le juge puisse exploiter ses conclusions.

➡ Qualifier le préjudice plutôt que le chiffrer

Lorsque la responsabilité est reconnue, plusieurs postes peuvent être indemnisés : les travaux réparatoires, le préjudice de jouissance lié directement aux vibrations, celui résultant de la dégradation du lieu de vie ou des travaux nécessaires, le préjudice moral et, éventuellement, la perte de valeur vénale.

Les montants accordés au titre des préjudices immatériels restent généralement limités à quelques milliers d'euros. Le rôle de l'expert n'est pas de déterminer lui-même la somme à allouer.

En revanche, il doit donner au juge les moyens d'évaluer concrètement la nuisance. Là encore, il faut qualifier : préciser la durée des vibrations, leur répétition, leurs horaires, les pièces affectées, les conséquences sur l'utilisation du logement ou encore l'importance des dégradations.

Le juge est beaucoup plus à l'aise lorsqu'un élément a été objectivé et chiffré par un professionnel compétent : coût de réparation validé, dépréciation estimée par un expert foncier, lien causal clairement établi. Pour les préjudices plus subjectifs, l'expertise doit donc fournir autant d'éléments concrets que possible.

Les vibrations ne constituent finalement pas une catégorie juridique autonome. Les principaux régimes mobilisés n'imposent pas non plus, le plus souvent, de rechercher une faute. **Le véritable enjeu est donc la preuve : preuve de la réalité et de l'anormalité du trouble, et surtout preuve du lien entre les vibrations et les désordres allégués.** Sur ce terrain, le juge dépend étroitement du travail de l'expert : mesurer ne suffit pas ; il faut interpréter, qualifier et démontrer.

## Sigles et abréviations

**CEREMA** : Centre d’études et d’expertise sur les risques, l’environnement, la mobilité et l’aménagement

**DIN** : *Deutsches Institut für Normung* / Institut allemand de normalisation

**GNSS** : Géolocalisation et navigation par système de satellites

**Hz** : hertz

**ICPE** : Installations classées pour la protection de l’environnement

**InSAR** : *Interferometric Synthetic Aperture Radar* / interférométrie radar satellitaire

**IRM** : imagerie par résonance magnétique

**ISO** : Organisation internationale de normalisation

**MEMS** : *Micro-Electro-Mechanical Systems* / systèmes microélectromécaniques

---

© CNEAF – 19 juin 2026

**Crédits photographiques et iconographiques :**

*Sauf mention contraire, les visuels et photographies sont issus des supports des intervenants ou du CNEAF  
Tous droits réservés au profit de leurs auteurs et ayants droit*

Rédaction et mise en page :

**rediger.**  
création et gestion de contenus