

Bibliographie

- [1] Die Empfindlichkeit des Menschen gegen Erschütterungen, H. Reiher & F. J. Meister, Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens, Band 2, S. 381–386 (1931).
- [2] Vibration Problems in Structures: Practical Guidelines, H. Bachmann et al., 2. Aufl., Basel: Birkhäuser Verlag, 1997.
- [3] DIN 4150-2 - 1999-06 Erschütterungen im Bauwesen Teil 2: Einwirkungen auf Menschen in Gebäuden (en cours de révision).
- [4] ISO 10137:2007 Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations.
- [5] Directive pour l'évaluation des vibrations et du bruit solidien des installations de transport sur rails (EVBSR), Office fédéral de l'environnement, 20 décembre 1999.
- [6] VSS 40 312:2019 (Association suisse des professionnels de la route et des transports) Ébranlements: Effets des ébranlements sur les constructions.
- [7] Generic Criteria for Vibration-Sensitive Equipment, Colin G. Gordon, SPIE Proceedings, vol. 1619, 1991.

Informations complémentaires

Société suisse du génie parasismique et de la dynamique des structures (SGEB): www.sgeb.ch
Office fédéral de l'environnement: www.ofev.admin.ch

Impressum

Par souci de lisibilité, la forme masculine est utilisée dans le texte pour désigner aussi bien les hommes que les femmes.

Éditeur | Fondation pour la dynamique des structures et le génie parasismique (www.baudyn.ch)

Rédaction | Dr Daniel Gsell, Prof. Dr Hugo Bachmann

Illustrations | Dr Martin Deuring, Winterthour (1), Marc Weiler, Rapperswil (2, 3), Heidi Hostettler, Département de physique de l'EPF Zurich (6)

Page de couverture | Clocher d'église élancé, sujet à des vibrations, à Hohtenn (VS)

Commande | Fondation pour la dynamique des structures et le génie parasismique, www.baudyn.ch, courriel: info@baudyn.ch. Ou téléchargement sous www.baudyn.ch bzw. www.sgeb.ch.

PROBLÈMES POSÉS AUX OUVRAGES PAR LES VIBRATIONS ET LES ÉBRANLEMENTS

POURQUOI ET COMMENT



POURQUOI LES VIBRATIONS ET LES ÉBRANLEMENTS CAUSENT-ILS DES PROBLÈMES AUX OUVRAGES?

Les ouvrages sont généralement perçus comme des structures rigides, statiques. Mais la plupart d'entre eux sont en réalité sujets à des vibrations mécaniques détectables.

Les vibrations affectant les ouvrages sont des mouvements variables dans le temps. Ce sont typiquement des mouvements périodiques autour d'une position de repos.

Les ébranlements sont des vibrations mécaniques pouvant provoquer des dommages ou des nuisances. Ils sont habituellement occasionnés par des événements sous la forme d'impulsions couvrant une large gamme de fréquences.

Ce dépliant s'adresse principalement aux maîtres d'ouvrages et aux mandants de projets de construction, ainsi qu'aux architectes, aux ingénieurs civils et aux professionnels spécialisés. Il traite – non exhaustivement – de nombreux problèmes posés par les vibrations et les ébranlements affectant des ouvrages.

On parle de problèmes posés par les vibrations et les ébranlements lorsqu'ils entravent l'usage d'un ouvrage. S'ils ont une grande ampleur, ils peuvent en outre menacer un élément de construction ou la totalité d'un ouvrage.

Les problèmes posés par les vibrations et les ébranlements sont assez rares, c'est pourquoi le maître de l'ouvrage et les concepteurs ne les identifient souvent que tardivement au cours de l'étude ou lorsque la construction est achevée.



Figure 1 | Pont de corde au Technorama de Winterthour, conçu pour ressentir des vibrations.

QUELLES SONT LES CAUSES TYPIQUES DES VIBRATIONS ET DES ÉBRANLEMENTS? QUELS OUVRAGES SONT TOUCHÉS?

Vibrations et ébranlements induits par des personnes

Les personnes qui marchent, courent ou sautent exercent des forces de fréquence presque constante sur les constructions qu'elles sollicitent. Si une de ces fréquences correspond à une des fréquences propres de l'ouvrage, même des composants supposés rigides peuvent entrer en résonance et osciller avec une grande amplitude. C'est ainsi que des planchers ou des passerelles piétonnes, de construction légère et de longue portée, entre autres, se mettent à osciller.

Lorsqu'une personne pose le pied sur un plancher, celui-ci subit un ébranlement de type impulsif. S'il s'agit d'un plancher léger en bois, bois-béton, acier ou acier-béton, cet ébranlement peut être perçu comme désagréable.



Figure 2 | Personnes sautant en synchronisation avec de la musique

Les vibrations et les ébranlements sont susceptibles d'importuner les autres personnes qui se trouvent simultanément sur le plancher ou sur la passerelle piétonne concernée.

Les vibrations et les ébranlements induits par des personnes qui évoluent en groupe de manière synchronisée, par exemple au son d'une musique rythmée, sont particulièrement sensibles. Cela concerne en particulier les salles de gymnastique, les centres de fitness et les salles de concert. Il faut en outre tenir compte des forces quasi statiques considérables que ces groupes exercent sur la dalle ou sur le plancher.

Ébranlements induits par le trafic

Les lignes de chemin de fer génèrent des émissions qui pénètrent dans le terrain et s'y propagent. Si un bâtiment est situé à proximité d'une voie ferrée (généralement à moins de 30 à 50 mètres) ou au-dessus d'un tunnel ferroviaire, ces émissions sont transmises dans sa structure. Elles peuvent provoquer des ébranlements perceptibles des planchers et générer des bruits solidiens, audibles comme des bruits aériens, à l'intérieur des locaux.



Figure 3 | Passage d'un train à côté d'un immeuble résidentiel

Les bâtiments peuvent aussi être sujets à des ébranlements inconfortables dus au trafic routier, lorsque des véhicules lourds passent sur une inégalité du sol (couvercle de regard, ornière, revêtement endommagé, arrêt de bus équipé d'une dalle en béton rigide). Les bâtiments comportant des planchers légers en bois ou hybrides sont particulièrement touchés.

Ébranlements induits par des engins de chantier

Les travaux de construction requièrent des engins qui génèrent des émissions sous la forme de vibrations et d'ébranlements. Autant l'enfoncement et le vibrofonçage de palplanches, profilés de parois berlinoises ou pieux que la compaction d'un terrain de fondation au moyen de rouleaux vibrants, compacteurs de colonnes ballastées ou plaques vibrantes provoquent des ébranlements du sol susceptibles d'endommager les bâtiments proches et de déranger notablement les voisins. Il faut également s'attendre à ce que les environs soient fortement ébranlés lors de l'extraction de roche par minage ou à la machine, ou lors de la démolition d'un ancien bâtiment.

Ébranlements induits par des machines

Les petits déséquilibres, qui affectent presque toujours les machines comportant des éléments en rotation rapide (tours, fraiseuses, turbines, génératrices, installations équipant des bâtiments ou autres), génèrent des vibrations et des ébranlements qui se propagent dans les bâtiments et dans le terrain de fondation. Ils peuvent produire des bruits solidiens désagréables dans des locaux ou des bâtiments avoisinants.



Figure 4 | Machine en train de retirer des rails de tram

Les machines de production comportant des éléments ou des opérations fortement accélérés (par exemple presses, perforatrices ou changements d'outils sur des fraiseuses) peuvent générer des vibrations et des ébranlements qui se propagent dans de vastes parties d'un bâtiment, voire à grande distance dans le terrain de fondation. Cela peut gêner des activités pratiquées dans les environs.

Ébranlements induits par le vent et par l'eau

Des éléments de constructions exposés frontalement ou latéralement au vent ou à l'eau peuvent être sujets à des vibrations et à des ébranlements. Le vent soufflant en rafales soumet les bâtiments élevés et les ponts élancés à des vibrations aléatoires parfois ressenties nettement par les utilisateurs. Les composants et les ouvrages élancés génèrent des traînées tourbillonnaires – causées par l'écoulement de l'air ou de l'eau – qui les soumettent à des forces périodiques. Des vibrations de résonance inconfortables risquent de se produire lorsque la fréquence de déclenchement de tourbillons coïncide avec une des fréquences propres de l'ouvrage. On ne peut en outre pas exclure l'apparition de problèmes de sécurité structurelle imputables aux vibrations autogénérées par des éléments de section particulière.

Les éoliennes émettent des vibrations de très basse fréquence qui se propagent dans le sol ou dans l'air et peuvent importuner des personnes.

Un écoulement turbulent dans un ouvrage hydraulique produit des ébranlements susceptibles d'affecter des bâtiments proches. Ces ébranlements peuvent générer, dans leurs locaux, des bruits solidiens audibles comme des bruits aériens et dérangeants pour les personnes. Ils sont même parfois perceptibles par des gens qui se trouvent sur un plancher.

Absence de vibrations souhaitée

Dans les bâtiments de laboratoires, les hôpitaux et les ateliers de finition précise en génie mécanique, des vibrations et des ébranlements minimes suffisent pour perturber des expériences et des processus. Cela s'appelle également aux postes de travail requérant une grande concentration. En sus des ébranlements provenant de l'extérieur, par exemple dus à une voie de communication proche ou à un processus générant de forts ébranlements sur une parcelle voisine, il faut aussi tenir compte de ceux qui proviennent de l'intérieur des bâtiments, notamment imputables à leurs installations, aux ascenseurs ou aux portes. La circulation de personnes et le transport de marchandises à l'interne sont d'autres sources de perturbations.



Figure 5 | Pompe à chaleur placée sur des ressorts pneumatiques près d'un laboratoire de physique quantique projeté

Autres problèmes connus

Les installations de transport par câble, les héliports, les clochers d'églises, les tours de plongeon, les tribunes, les liaisons entre éléments de construction au moyen de goujons de transmission des efforts tranchants, qui peuvent émettre des bruits solidiens très forts, sont aussi potentiellement concernés par la problématique des vibrations et des ébranlements.

QU'EST-CE QUI EST SUPPORTABLE ET ADMISSIBLE?

Aucun ouvrage n'est exempt de vibrations. La question qui se pose toujours est celle de l'ampleur supportable et admissible.

Que peuvent supporter les personnes?

Chaque personne a son propre ressenti vis-à-vis des vibrations et des ébranlements. En sus de sa position (debout, assise, couchée), de son activité (course, travail, sommeil) et de la direction des vibrations et des ébranlements par rapport à l'axe de son corps, son environnement, son rapport à la source des secousses, sa condition physique et sa disposition psychologique ont une incidence cruciale sur sa perception. Cette complexité empêche presque de poser des critères simples et généraux à la sensibilité de l'être humain.

Hannes Reiher et Franz Josef Meister [1] ont réalisé à ce sujet une première étude systématique, portant sur un grand nombre de personnes, qu'ils ont publiée en 1931. Ils ont défini des classes de sensibilité aux ébranlements et les ont assorties d'amplitudes de vibrations. Hugo Bachmann et des collègues [2] ont synthétisé ces résultats et les ont présentés sous une forme aisément lisible pour un usage pratique.

DESCRIPTION	FRÉQUENCE DE 1 À 10 Hz a_{max} [m/s ²]	FRÉQUENCE DE 10 À 100 Hz v_{max} [mm/s]
À peine perceptible	0.034	0.5
Nettement perceptible	0.1	1.3
Incommodant	0.55	6.8
Insupportable	1.8	13.8

Vibration harmonique en direction verticale agissant sur une personne debout. Valeurs moyennes acceptées; dispersion jusqu'à un facteur 2 possible [2] (tiré de [Bac+97])

D'autres valeurs de référence peuvent être tirées des normes DIN 4150-2 [3] et ISO 10137 [4]. En ce qui concerne le trafic ferroviaire, la directive pour l'évaluation des vibrations et du bruit solidien des installations de transport sur rails (EVBSR) [5] fournit des valeurs indicatives à considérer comme une protection minimale.

Outre les effets directement perceptibles des vibrations et des ébranlements, on observe régulièrement des effets secondaires susceptibles de déranger des personnes. Mentionnons notamment les écrans qui tremblent, les plantes qui oscillent, les verres qui s'entrechoquent et les vitres dans lesquelles la lumière réfléchie vacille.

Tant qu'aucune force physique extrême n'agit sur l'être humain, les ébranlements n'ont pas de conséquences immédiates sur sa santé.

Le stress qu'ils occasionnent a plutôt des effets éventuels sur le long terme, tels que troubles cardio-vasculaires ou altération de la santé mentale.

Que peuvent supporter les ouvrages?

Ce sont l'amplitude, la fréquence et la durée de l'action exercée sur un ouvrage, ainsi que les caractéristiques de sa structure porteuse, qui déterminent si des vibrations et des ébranlements lui causent des dommages. La norme VSS 40 312 [6] fournit des valeurs indicatives décrivant les ébranlements admissibles, pour lesquels l'apparition de dommages structurels est improbable.

Les vibrations et les ébranlements peuvent aussi provoquer des tassements de terrain. Les tassements différentiels subis par un bâtiment sont susceptibles de l'endommager. Les valeurs limites figurant dans la norme VSS 40 312 [6] n'englobent pas la problématique du tassement.

Que peuvent supporter les appareils sensibles?

Les microscopes à haute résolution, les microbalances, les équipements d'imagerie, les accélérateurs linéaires, les ordinateurs quantiques, les rectifieuses de précision et d'autres équipements peuvent réagir de manière extrêmement sensible aux ébranlements provenant de l'extérieur. Comme tous ces appareils ont une construction spécifique, et répondent donc différemment aux ébranlements d'origine externe, l'application de critères d'évaluation généraux est souvent insuffisante pour les traiter. Les exigences particulières aux divers appareils doivent être connues pour être à même d'évaluer leur sensibilité aux ébranlements. Outre l'amplitude, la direction, les fréquences prépondérantes, la durée d'action et les modifications des ébranlements au cours du temps (continus ou par impulsions) jouent un rôle crucial.

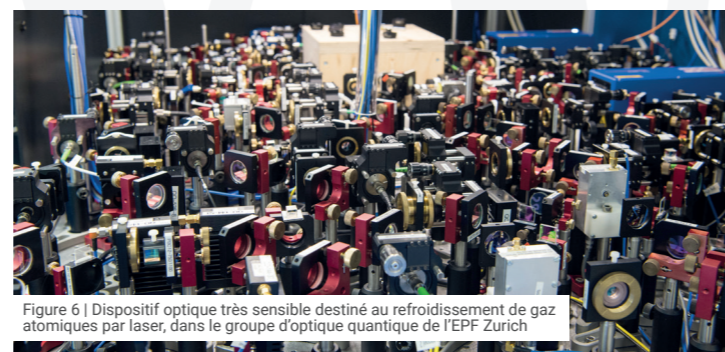


Figure 6 | Dispositif optique très sensible destiné au refroidissement de gaz atomiques par laser, dans le groupe d'optique quantique de l'EPF Zurich

Au début des années 1990, Colin G. Gordon a publié des critères internationalement reconnus pour évaluer les faibles niveaux de vibrations aux emplacements de laboratoires [7]. Ces critères doivent être appréhendés de manière différenciée. L'évaluation effective et la méthode d'analyse seront fixées en accord avec l'utilisateur ou le fabricant des installations sensibles.

COMMENT ÉVITER LES PROBLÈMES POSÉS PAR LES VIBRATIONS ET LES ÉBRANLEMENTS?

Le maître de l'ouvrage, l'architecte, l'ingénieur civil, les professionnels spécialisés et l'utilisateur collaborent d'emblée



Figure 7 | Passerelle de Schönau à Berne, avec un groupe de personnes impliqué dans une mesure des vibrations

Les problèmes posés par les vibrations et les ébranlements peuvent souvent être évités, ou contrôlés à un prix raisonnable, en agissant sur la conception de l'ouvrage dès le début de son étude. Si les problèmes ne sont identifiés qu'une fois l'ouvrage achevé, ils ne peuvent généralement être résolus qu'à grands frais – pour autant qu'ils soient solubles.

Le point crucial dans la phase de l'étude consiste à déceler précocement si un problème de vibration ou d'ébranlement est à craindre, ce qui nécessiterait une investigation approfondie.

Les exigences à satisfaire doivent être discutées très tôt dans le cadre d'une collaboration étroite entre le maître de l'ouvrage, l'architecte, l'ingénieur civil, les professionnels spécialisés et l'utilisateur, puis inscrites dans la convention d'utilisation. Outre l'ampleur admissible des vibrations et des ébranlements, il est habituellement judicieux de définir les secteurs du bâtiment dans lesquels ces exigences doivent être satisfaites au lieu de considérer des étages entiers. En appliquant des exigences trop élevées à de grandes surfaces, on risque de renchérir inutilement un projet de construction.

Dans la phase de l'étude, il y a lieu de prévoir et d'évaluer l'amplitude des vibrations et des ébranlements auxquels il faut s'attendre, en provenance de certaines sources significatives. Les modèles de simulation très simplifiés, mais physiquement compréhensibles et vérifiables, se prêtent généralement mieux aux prévisions que les modèles très complexes, qui considèrent chaque détail et donnent un semblant de précision.

Approches envisageables pour contrôler efficacement les problèmes posés par les vibrations et les ébranlements

L'amplitude des vibrations et des ébranlements diminue habituellement avec la distance au cours de leur propagation. Il faut s'efforcer de séparer la source et le récepteur sensible. Dans le cas idéal, ils ne se trouvent pas dans le même bâtiment, ou du moins pas sur le même étage.

Le radier (fondation d'un bâtiment) est un endroit approprié pour placer des sources d'ébranlements ainsi que des appareils et des équipements sensibles. S'agissant des sources, cette disposition permet de transmettre l'énergie des vibrations et des ébranlements dans le terrain de fondation, si bien que le bâtiment subit une énergie vibratoire moindre. Contrairement à un plancher, qui peut vibrer librement dans l'étendue de sa portée, le radier ne subit ni vibrations ni ébranlements, empêchés par le terrain de fondation. Il est donc aussi un endroit idéal pour placer des installations sensibles.

Les éléments de construction de grande rigidité et inertie sont typiquement moins sujets aux vibrations que les structures légères et élancées. Le choix d'une combinaison judicieuse de rigidité et de masse permet de fixer la fréquence de résonance d'un composant de manière à ce qu'elle soit nettement supérieure ou inférieure à la fréquence de l'excitation générée par la source, ce qui limite l'amplitude des vibrations et des ébranlements. On parle de « réglage haut » ou de « réglage bas » du composant.



Figure 8 | Appui élastique d'une structure en béton comportant des groupes de ressorts

Le découplage élastique entre une source d'ébranlement et/ou un récepteur sensible et son assise est une manière très simple et efficace de contrôler l'amplitude des vibrations et des ébranlements. L'installation est alors posée sur des ressorts en acier ou

sur des éléments en caoutchouc. La rigidité des éléments doit être harmonisée soigneusement avec la masse de l'installation ainsi qu'avec les fréquences des vibrations et des ébranlements perturbateurs. Les mouvements d'une installation placée sur un appui élastique sont limités en augmentant la masse reposant sur cet appui. Les ressorts peuvent être remplacés par des éléments actifs, qui compensent les vibrations et les ébranlements. C'est la méthode usuellement appliquée aujourd'hui dans la construction de laboratoires (par exemple pour réaliser l'appui de microscopes très sensibles).

Sur les ouvrages quasi unidimensionnels, tels que passerelles piétonnes, bâtiments élevés et tours de plongeon, l'installation d'un absorbeur de vibrations permet de limiter celles-ci. Ce dispositif se compose essentiellement d'une masse (de quelques pour-cent de la masse de l'ouvrage), d'un ressort et d'un amortisseur. Le ressort est choisi de manière à posséder, conjointement avec la masse, une fréquence propre proche de celle de l'ouvrage. Un absorbeur de vibrations est un système mécanique très simple et efficace pour diminuer les vibrations subies par une construction, dans une gamme de fréquences relativement étroite. Mais une mauvaise configuration peut avoir un effet contreproductif. Les passerelles piétonnes élancées sont souvent construites de telle manière que seules des mesures pratiquées sur l'ouvrage achevé permettent de savoir s'il y a lieu de poser un absorbeur de vibrations. Il faut alors prévoir des points de fixation de l'amortisseur.

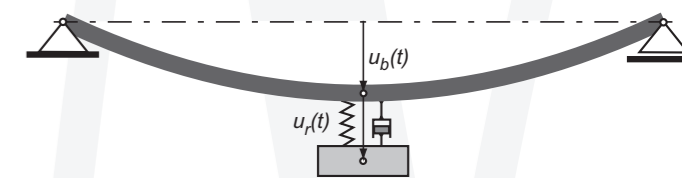


Figure 9 | Représentation schématique d'un absorbeur de vibrations

À proximité immédiate d'un chantier, il est souvent recommandé de surveiller les ouvrages exposés de manière à prévenir les dommages. Ainsi, les travaux générant de forts ébranlements peuvent être arrêtés ou adaptés lorsque les secousses avoisinent les valeurs limites.

L'effet des mesures mentionnées précédemment est toujours limité. Lors de l'étude d'un ouvrage, on ne peut pas avoir la certitude qu'il existe toujours une solution pour réduire suffisamment toutes les vibrations et tous les ébranlements. C'est pourquoi il est essentiel que le maître de l'ouvrage, l'architecte, l'ingénieur civil, les professionnels spécialisés et l'utilisateur collaborent d'emblée. Il y a lieu d'examiner les solutions envisageables pour diminuer les vibrations et les ébranlements dans le détail lors de la phase de l'étude et de vérifier qu'il est possible d'obtenir une diminution suffisante.