

Compactage des remblais et des couches de forme

Prise en compte des nuisances vibratoires liées aux travaux

Chaussées
Dépendances

121

Les nuisances vibratoires provoquées par les travaux de minage sont connues et souvent appréhendées, par contre, les vibrations liées à l'utilisation de compacteurs vibrants lors d'un projet de terrassement (réalisation de remblais et couches de forme) sont rarement considérées. Elles sont pourtant à l'origine de nombreuses plaintes, de désordres sur les structures (bâti, ouvrages enterrés) et entraînent parfois une impossibilité de poursuivre les travaux (ou avec d'importantes conséquences financières) lorsque des équipements sensibles sont situés à proximité du projet.

L'objectif de la présente note d'information est de proposer des éléments méthodologiques aux concepteurs de projets routiers pour recenser, en phase amont et pendant le projet de terrassement, dans l'environnement du projet, tout ce qui pourrait être sensible aux vibrations liées à l'utilisation de compacteurs vibrants, et ceci afin de développer une stratégie dans la gestion de ces nuisances et au besoin modifier les modalités de compactage pendant les travaux (enquêtes, besoins d'études spécifiques, de communication, de contrôles).

La présente note définira dans une première partie descriptive l'origine du phénomène vibratoire lié à l'utilisation de compacteurs vibrants, les effets possibles des vibrations sur les structures et les personnes, le contexte réglementaire et normatif pour la prise en compte de cette nuisance.

La seconde partie de la note guidera le concepteur d'un projet pour considérer cette nuisance vibratoire (environnement du projet, méthodes de mesure des vibrations, fixation des seuils, contrôles en phase travaux).

Sommaire

I - Origine et description du phénomène vibratoire lié à l'utilisation de compacteurs vibrants.	2
II - Conséquences des vibrations liées aux compacteurs sur les structures et les personnes.....	3
III - Contexte réglementaire et normatif.....	4
IV - Prise en compte des contraintes vibratoires au niveau du projet	5
V- Prise en compte des contraintes vibratoires au niveau des travaux.....	8
Conclusion.....	9
VI- Exemples commentés.....	10
Bibliographie.....	13

I - Origine et description du phénomène vibratoire lié à l'utilisation de compacteurs vibrants

Les compacteurs essentiellement concernés par cette note sont les engins affectés au compactage des remblais et couche de forme dont les caractéristiques en terme d'amplitude et de fréquence de vibration sont les plus nocives. Les compacteurs vibrants utilisés pour les chaussées présentent une nocivité moindre du fait de leurs caractéristiques propres et de la nature des matériaux sur lesquels ils circulent qui absorbent les vibrations par déformations élastiques.

D'autres travaux ou engins mécaniques (circulation de poids lourds, battage de palplanches, etc) peuvent générer des nuisances vibratoires mais les phénomènes sont différents et ne seront pas abordés dans cette note.

Les vibrations émises sur un compacteur vibrant sont relativement bien connues, contrairement à leur mode de propagation et la façon dont elles affectent leur environnement. Des modèles permettant de prévoir les vibrations ressenties à une distance donnée de la source, même pour un terrain homogène manquent encore.

Cette onde vibratoire complexe s'atténue par absorption avec la distance et avec le milieu environnant. Par ailleurs, les caractéristiques des sols rencontrés sont très variables, ce qui peut avoir des répercussions sur la transmission de l'onde vibratoire.

La majeure partie de l'énergie émise est utilisée pour le travail de la machine et se trouve dissipée près de la source. L'autre partie se propage dans le sol ou dans l'eau sous forme d'ondes élastiques.

Les vibrations induites par les compacteurs peuvent être classées dans la catégorie des sources continues à durée limitée. Il existe pour les compacteurs une classification qui permet de choisir la machine à utiliser en fonction du type de terrain, des épaisseurs des couches à compacter et de l'état hydrique lors de leur mise en œuvre [1]. Cette classification est décrite par la norme NF-P98 736 [2] et repose pour les compacteurs vibrants sur deux paramètres, la masse linéique statique (M/L en kg/cm) et l'amplitude nominale à vide (A_0 en mm), paramètre pris en compte uniquement pour les gros compacteurs ($L \geq 1.3m$). Cette classification évalue l'efficacité d'un matériel pour compacter une structure donnée, mais n'est pas destinée à prévoir le niveau de vibrations transmises à l'environnement, même si on constate une tendance à utiliser la classification dans ce sens.

Des essais expérimentaux réalisés au Centre d'Expérimentation Routière (CER) conduisent aux observations suivantes :

- la densité en place d'un matériau et le niveau vibratoire augmentent avec le nombre de passes ;
- il est important de différencier le régime entretenu du régime transitoire (arrêt/démarrage de la machine) d'un compacteur. Néanmoins, il n'est pas possible de dire qu'un régime est plus défavorable que l'autre, ceci dépend de la machine ;
- des compacteurs plus faiblement classés peuvent conduire à des niveaux vibratoires plus élevés que des compacteurs de classe supérieure (d'où l'importance de la vérification des compacteurs sur chantier). Ce phénomène s'atténue néanmoins avec la distance ;
- les niveaux vibratoires peuvent différer suivant que le compacteur avance ou recule ;
- il apparaît que le niveau vibratoire est plus élevé dans les faibles vitesses d'avancement du compacteur.



Figure 1 : compacteur et capteurs de vibrations lors d'une expérimentation au CER (photo : CER de Rouen)

II - Conséquences des vibrations liées aux compacteurs sur les structures et les personnes

Les vibrations émises par un compacteur vont se propager dans le sol et être transmises aux structures environnantes. Elles peuvent alors être une source de désordres pour les structures et de gêne pour les personnes.

Effets sur les structures

Les principales études concernant l'apparition de désordres sur les structures liés à l'intensité des vibrations ont été menées pour les travaux à l'explosif [3]. Ces études, ainsi que les suivis de chantiers réalisés par les LRPC, permettent de définir trois classes de dommages :

- **classe 1** : seuil d'apparition des dommages, caractérisé par l'écaillage de peinture, l'allongement de fissures existantes, la formation de fissures très fines dans les plâtres, etc. ;
- **classe 2** : dégâts légers n'affaiblissant pas les structures et caractérisés par l'apparition de fissures fines dans les maçonneries, la chute de morceaux de plâtres, etc. ;
- **classe 3** : dégâts importants affaiblissant la structure et caractérisés par la formation de fissures ouvertes, la chute d'éléments de maçonnerie, etc.

Ces classes ont été établies à partir d'études de bâtiments de type habitation et on notera que les niveaux de vibrations susceptibles de provoquer ces dommages vont dépendre aussi du type de structure. Ainsi, on peut distinguer pour les constructions :

- les **structures très sensibles** (bâtiments classés monuments historiques, constructions en mauvais état, etc.) ;
- les **structures courantes** (habitation, bureaux, etc.) ainsi que les ouvrages d'infrastructure anciens (pont en maçonnerie, etc.) ;
- les **structures résistantes** (ouvrages en béton armé, etc.).

Les amplitudes de vibration exprimées en vitesse au-delà desquelles des dommages peuvent apparaître vont de quelques mm.s^{-1} pour les structures sensibles à quelques dizaines de mm.s^{-1} pour les constructions résistantes et varient en fonction de la fréquence des vibrations transmises. Ainsi, les basses fréquences s'avèrent plus nocives car :

- à vitesse égale, le déplacement subi par une structure est inversement proportionnel à la fréquence ;
- les structures tendent à amplifier les phénomènes vibratoires autour de leur fréquence propre, généralement inférieure à 20 Hz.

Cette influence de la fréquence rend indispensable la caractérisation d'une vibration à partir de la réponse d'une structure et non de la source afin d'intégrer l'influence du sol, l'interaction sol-structure et la réponse de la structure.

Il n'existe pas d'études concernant les ouvrages en terre (digues, remblais de grande hauteur, etc.) et les structures naturelles (falaises notamment) pouvant être affectées par les vibrations (déclenchement de glissement, chute de blocs). Pour ces structures, des études spécifiques doivent être menées afin d'apprécier leur sensibilité aux vibrations même si la probabilité d'apparition de désordres liés aux vibrations générées par les compacteurs est faible.

Enfin, on notera que les bâtiments peuvent abriter des équipements sensibles aux vibrations. L'implication du fabricant et de l'utilisateur de cet équipement est alors nécessaire pour fixer des valeurs de vibrations acceptables, afin de se prémunir :

- de la détérioration du matériel ;
- de l'incapacité d'utilisation pendant les phases de compactage.

Effet sur les personnes

Les études menées sur l'effet des vibrations sur les personnes montrent que le corps humain est un capteur de vibration extrêmement sensible. Le seuil de perception pour des vibrations transmises à l'ensemble du corps est de l'ordre de quelques dixièmes de mm.s^{-1} et le seuil de gêne de l'ordre de quelques mm.s^{-1} .

Ces seuils varient en fonction :

- de la fréquence prépondérante des vibrations ;
- de la durée d'exposition ;
- de la période d'exposition (activité/repos) ;
- de l'état psychologique du plaignant ;
- du contexte du chantier.

Les plaintes de riverains peuvent apparaître dès que le seuil de perception est franchi, à des niveaux de vibrations sans risque pour la santé et les structures. Au contraire, des niveaux de vibrations relativement élevés peuvent être acceptés si il y a eu une information des riverains et une prise en compte de leur présence et de leurs activités.

L'évaluation de la gêne nécessite des mesures à l'emplacement où le riverain se plaint de l'inconfort. Ces mesures, souvent réalisées au niveau de plancher, prennent alors en compte les modifications du signal imposées par la structure avec généralement une amplification du signal.

On notera que tout être vivant est sensible aux vibrations, ce qui peut amener à réaliser des études sur des bâtiments abritant des animaux représentant un enjeu fort (perte de production d'un élevage ou perturbation d'expérimentation en laboratoire par exemple).

III - Contexte réglementaire et normatif

Il n'existe pas, à ce jour, de réglementation spécifique applicable aux vibrations émises dans l'environnement d'un chantier. Cette nuisance relève des textes généraux sur le respect du droit des tiers et de l'environnement. Aucun texte réglementaire n'impose, par exemple, de mesurer ces phénomènes, ne définit de mode opératoire et encore moins de valeurs limites.

En l'absence de règle, la pratique montre que les problèmes de vibration sont généralement traités selon les dispositions contenues dans la circulaire du 23 juillet 1986 [4] du Ministère de l'Environnement relative « aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement ». Ce document, au champ d'application initial limité (« installations classées »), s'est imposé, par défaut, comme référence pour les études vibratoires associées aux travaux ou pour les expertises judiciaires. Cette circulaire contient un mode opératoire de la mesure, une méthode de classification des structures en fonction de leur sensibilité aux vibrations et des seuils préconisés.

La normalisation est par contre plus importante et en pleine évolution. Elle comporte plusieurs textes susceptibles de se juxtaposer en fonction de la source émettrice et des récepteurs à préserver dans l'environnement des travaux et notamment :

- la norme NF E90-020 de juillet 2007 [5], « vibrations et chocs mécaniques - Méthode de mesurage et d'évaluation des réponses des constructions, des équipements sensibles et des occupants », s'applique à toutes les sources vibratoires et tous les récepteurs. Elle pose comme principe d'évaluation des effets des vibrations le mesurage des phénomènes in situ, ce qui constitue de fait une obligation de mesure ;
- la norme NF ISO 8569 de septembre 1996 [6], « vibrations et chocs mécaniques - Mesurage et évaluation des chocs et des vibrations sur les équipements sensibles dans les bâtiments », s'applique à toutes les sources vibratoires affectant un équipement sensible. Elle comporte une définition et une liste non exhaustive des appareillages considérés comme « équipements sensibles » aux vibrations ainsi qu'un mode opératoire de la mesure et de son interprétation ;
- les normes ISO 2631 [7, 8, 9, 10] « vibrations et chocs mécaniques - évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps » traitent des effets des vibrations sur les personnes.

Bien que non homologués NF, ces textes, uniques en leur genre, constituent la référence technique utilisée pour analyser la gêne provoquée par des vibrations. Ils comportent une description générale des effets des vibrations sur les personnes ainsi qu'une méthode de mesurage et d'interprétation des données. La normalisation ne traite pas des seuils de vibration compte-tenu du champ d'application très large de ces documents et pour les textes internationaux (ISO) des tolérances variables aux vibrations dépendant de facteurs économiques, sociaux et environnementaux propres à chaque pays.

IV - Prise en compte des contraintes vibratoires au niveau du projet

IV - 1- Environnement du projet

Il sera nécessaire en premier lieu que le concepteur analyse précisément l'environnement de son projet en recensant tout ce qui peut être sensible aux nuisances vibratoires.

Éléments à prendre en compte

Cette enquête devra tenir compte que les vibrations provoquées par des compacteurs sont continues et exposent donc considérablement l'environnement « vivant » (personnes et animaux) à un phénomène de gêne à la limite du supportable (cf. chapitre II). L'enquête devra également déterminer si des structures ou des équipements dans l'environnement du projet peuvent être endommagés ou perturbés dans leur fonctionnement par les vibrations liées au compactage. Les désordres provoqués par le compactage sur le bâti restent minimes mais les conséquences financières peuvent être importantes si des équipements sensibles sont présents dans l'environnement (arrêts de machines industrielles, pertes de production, etc).

Le périmètre à considérer (hors équipements sensibles) varie en fonction du contexte géologique et de la qualité des structures existantes (cf. chapitres I et II), mais le concepteur pourra considérer en première approximation :

- **bâti situé entre 0 et 10 m des travaux** : risque important de gêne et de désordres sur les structures ou les réseaux enterrés (eau, gaz, fibre optique, etc). Étude de vibration recommandée et contrôles en phase travaux nécessaires. Risques importants de modification des modalités de compactage pendant les travaux selon les résultats des mesures ou impossibilité de gérer la gêne occasionnée ;
- **bâti entre 10 et 50 m des travaux** : risque de gêne et de désordres sur les structures à considérer. Sauf particularité du site, les contraintes de vibrations liées aux compacteurs peuvent être prises en compte en phase travaux par des mesures adaptées ;
- **bâti entre 50 et 150 m** : risque de désordres réduit. Exceptionnellement, la particularité des structures ou le contexte géologique peuvent être à l'origine de nuisances. Le risque de gêne demeure dépendant notamment de la durée du compactage sur un même site et de l'activité des riverains (établissements hospitaliers ou d'enseignement, activités requérant une grande concentration, etc).

Pour les équipements sensibles (à fortiori pour les équipements sensibles exceptionnels) il est recommandé de considérer un périmètre très large et d'étudier en amont la contrainte vibratoire apportée par le compactage.

Impacts sur le projet

Une fois le recensement des structures et des équipements sensibles établi, le concepteur du projet devra définir le besoin d'études spécifiques (cas des équipements sensibles ou bâti très proche).

A l'issue de l'enquête et des résultats d'études, la prise en compte des vibrations liées à l'utilisation des compacteurs conduira le concepteur du projet à définir une stratégie pour gérer cette contrainte :

- « stratégie vibration » en limitant la durée d'exposition si on considère la gêne ou compactage lors des phases d'arrêt des équipements sensibles ;
- adaptation des moyens de compactage tout en respectant les exigences du GTR [1], soit par l'utilisation de compacteurs vibrants puissants (V5) afin de réduire les durées d'émissions de vibration, soit par l'utilisation de compacteurs vibrants de faible puissance ou de compacteur à pneu pour la protection d'équipements sensibles ;
- contrôles en phase travaux ;
- achats du bâti ;
- dédommagements d'industriels ou d'exploitants agricoles.

IV - 2- Mesure des vibrations et études préalables

La mesure consiste généralement à enregistrer en continu, en fonction du temps, les vitesses particulières (ou vitesses d'oscillation d'un point) au moyen de capteur dans trois directions orthogonales (H, V, T). De ces mesures, il est possible de déterminer les paramètres caractérisant chaque oscillation : la fréquence, l'amplitude et la durée du signal (figures 2 et 3). Il convient d'enregistrer la totalité du trajet de l'engin y compris les phases transitoires.

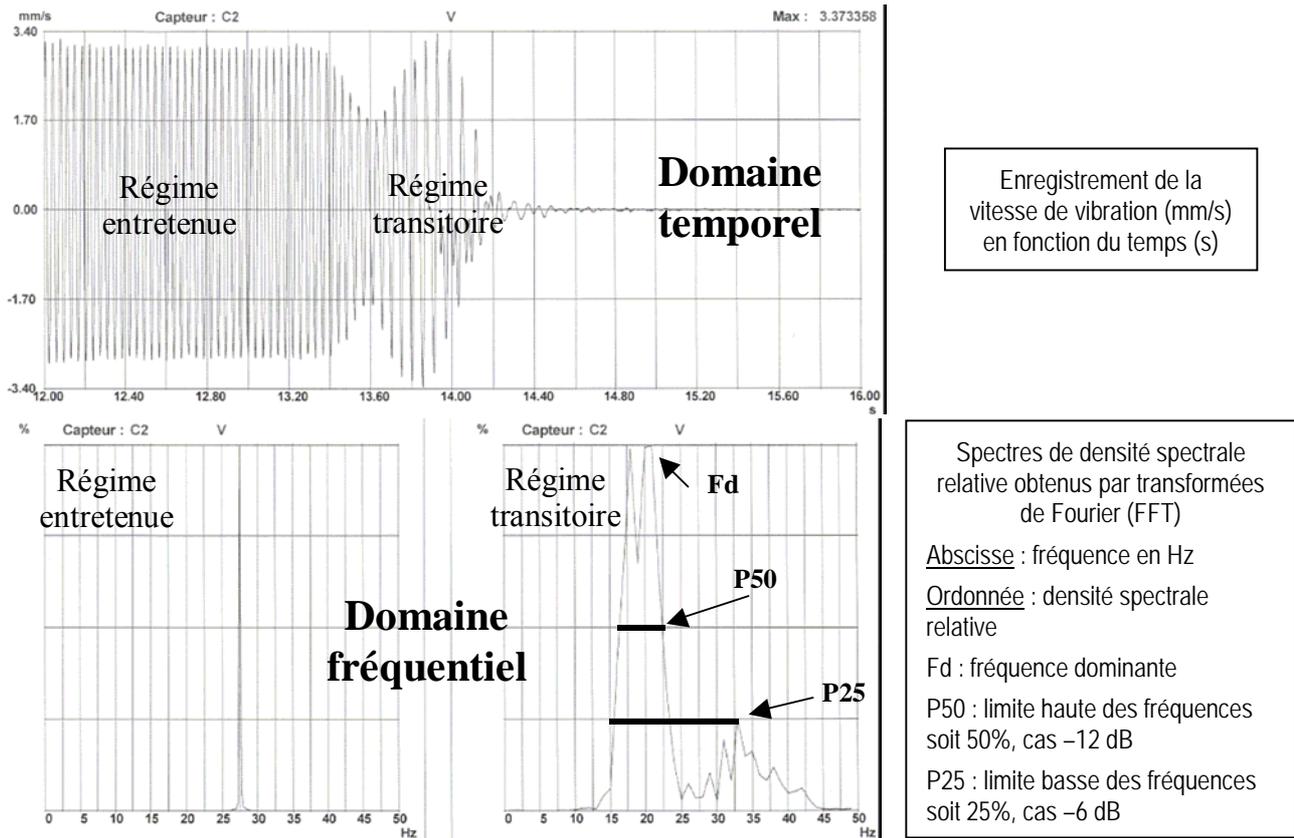


Figure 2 : restitution de la trace temporelle et des spectres de fréquence d'un enregistrement des vibrations provoquées par un compacteur



Figure 3 : exemple de chaîne de mesure (photo : CER de Rouen)

Le choix de l'emplacement des capteurs dépend des objectifs et du niveau de l'étude :

- si elle concerne la préservation des dommages, un capteur doit être implanté sur un élément porteur au niveau des fondations, associé à des points de mesure répartis sur des éléments porteurs en élévation. Les dimensions et la complexité de la construction (hauteur, longueur) impliquent un nombre de capteurs plus ou moins important ;
- si elle concerne la gêne, les capteurs doivent être positionnés dans la construction, à l'endroit où se trouvent les occupants.

Les emplacements de mesure et la fixation des transducteurs sont décrits dans les normes NF E 90-020 [5]. La mesure des vibrations d'équipements sensibles doit être conforme à la norme NF ISO 8569 [6].

Il peut être utile de réaliser des mesures simultanément sur la fondation et le sol extérieur en vue d'établir une fonction de transfert. De plus, le phénomène peut être amplifié. C'est pourquoi, il est nécessaire de faire plusieurs mesures à l'intérieur du bâtiment. Pour l'étude de la réponse du bâtiment par rapport aux vibrations du sol, il est nécessaire d'orienter ces capteurs dans les axes majeurs et mineurs du bâtiment.

IV - 3- Fixation des seuils et conséquences sur le projet

L'amplitude des vibrations conduisant à l'endommagement d'une structure ou à l'émission d'une plainte d'un riverain est propre à chaque structure et à chaque personne et ne peut pas être établie individuellement. L'impossibilité pratique de déterminer cette valeur individuellement impose d'aborder ce choix à travers une approche probabiliste fondée sur l'expérience des chantiers antérieurs et les résultats d'une éventuelle étude de vibration in situ, limitée à quelques points de mesure. Le choix de ces seuils implique d'accepter un niveau de risque exprim e par une probabilité. Cela ne signifie pas que le franchissement d'un seuil fix e provoque un dommage ou une plainte inéluctable, mais plutôt que sur un grand nombre de constructions ou de riverains, on risque d'en trouver quelques-uns qui seront affect es par cette vibration.   l'inverse, le respect des seuils ne garantit pas l'absence de dommage ou de plainte mais plutôt la limitation du risque de leur apparition.

La variabilité des caractéristiques des vibrations au sein d'une structure en terme d'amplitude comme de fréquence impose par ailleurs de toujours associer au seuil en amplitude (généralement exprim e en vitesse de vibration) la plage de fréquence et l'emplacement précis du point de la structure sur lequel il s'applique (exemple : 2 mm/s sur la plage 1-80 Hz sur fondations). Le choix de l'emplacement doit par ailleurs intégrer les n ecessit es pratiques d'accès au dispositif en phase travaux.

Les seuils de vibration peuvent être impos es par le propriétaire de la structure sollicitée. C'est par exemple le cas de la SNCF ou de GDF Transports qui disposent de consignes techniques précises dans ce domaine, d'établissements sensibles (centre de recherche, défense nationale, industrie nucléaire, etc.), ou d'activités utilisant des équipements sensibles soumis à des seuils établis par le fabricant (informatique, usinage, métrologie, etc). En l'absence de prescriptions émanant du tiers concern e, les seuils sont définis par le maître d'ouvrage ou ses représentants au titre du respect de l'environnement de son projet ou par l'entreprise réalisant les travaux au titre de ses obligations de respect du droit des tiers, limitées toutefois aux dommages. Les incertitudes techniques et financières associées à une définition de ces seuils en phase d'exc ecution militent pour une fixation de ces valeurs préalablement aux travaux.

La préservation des constructions est une préoccupation ancienne, objet d'études et de retours d'expérience nombreux permettant de disposer d'un référentiel technique reconnu et retranscrit dans la circulaire de 1986 [4]. Les seuils de vibration pr econis es par ce texte sont définis à partir des courbes de la figure 4 en fonction de leur sensibilité et des fréquences associées aux sollicitations. Ces seuils s'appliquent pour des capteurs fix es sur un élément porteur à l'un des étages supérieurs de la construction.

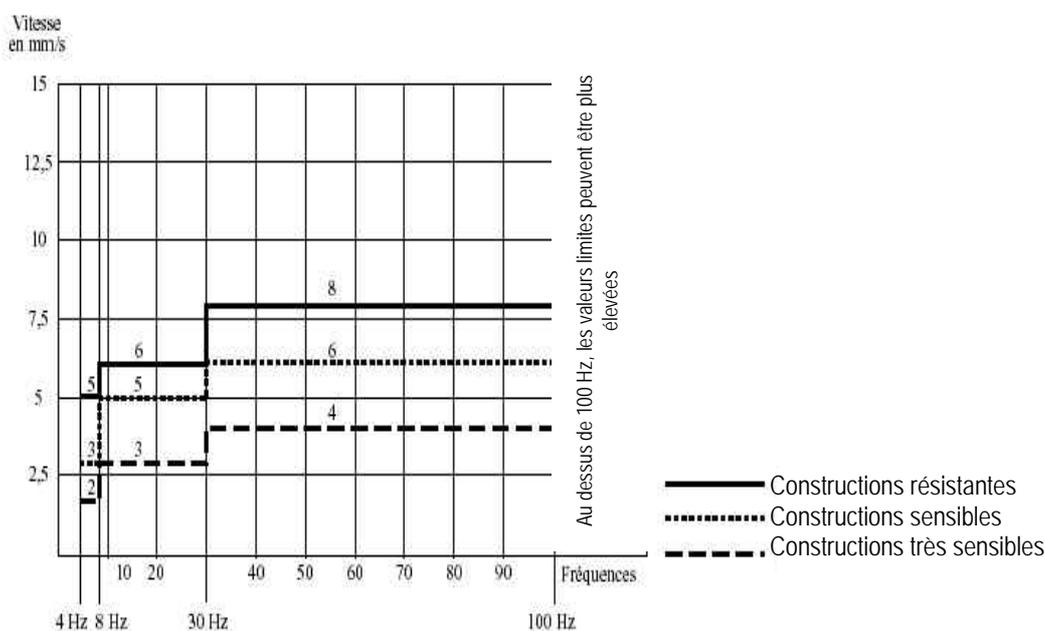


Figure 4 : courbes définissant les valeurs limites de la vitesse partielle en fonction de la fréquence observée
(extrait de la circulaire du 23-07-86)

Les seuils généralement appliqu es aux compacteurs vibrants utilis es en terrassement varient de 3 mm/s (constructions très sensibles entre 8 et 30 Hz)   6 mm/s (constructions sensibles entre 30 et 100 Hz) pour des habitations. La courbe « constructions résistantes » est fr equentment utilisée pour les ouvrages d'art et les bâtiments industriels (hors équipements sensibles et béton « frais »).

  l'exception d'équipements à diffusion large comme les micro-ordinateurs (seuil en accélération de 3 m/s² généralement prescrit par les fabricants), les seuils concernant les équipements sensibles sont définis par étude spécifique, les critères de dimensionnement étant plus li es aux conditions d'utilisation de ces matériels qu'à leur sensibilité intrinsèque aux vibrations. La prise en compte de ces équipements peut comprendre la fixation de seuils parfois variables en fonction de l'utilisation du matériel, mais également la définition d'horaires de compactage fix es en fonction de cette utilisation.

Les bétons en cours de prise appel es « bétons frais » (date de coulage comprise entre 2 et 24 h ou 12 MPa de résistance en compression pour un béton classique) constituent enfin un récepteur particulièrement sensible aux vibrations qui peuvent provoquer :

- des modifications de sa structure et de sa texture lorsque les contraintes exercées sont supérieures à sa déformabilité et sa résistance mécanique qui croissent progressivement en cours de prise ;
- des défauts d'adhérence béton-acier par vibrations différentielles.

Le compactage à proximité de ces bétons doit être soit interdit, lorsque le phasage des travaux le permet, soit soumis à des seuils très stricts voisins de 1 mm/s.

Concernant la gêne occasionnée aux riverains, le choix d'un seuil dépend fortement de la durée des travaux, du contexte général du chantier et des riverains à l'égard du projet. Ce choix r el eve du maître d'ouvrage et d'une stratégie globale d'intégration du chantier dans son environnement. L'expérience montre que :

- pour des chantiers de courte durée (une semaine), des niveaux voisins des seuils de dommage sont généralement bien support es s'ils sont associ es à une communication préalable ;
- pour des chantiers de durée moyenne (quelques mois), les plaintes restent isolées pour des vibrations n'excédant pas 2 mm/s ;
- pour des chantiers longs (1 an et plus), les plaintes apparaissent à partir de 0.5 mm/s et leur nombre augmente en fonction de la durée des travaux plus que de l'amplitude des vibrations.

Ces niveaux sont en valeur crête mesur es dans la construction à l'emplacement où le riverain se sent le plus g en e (par exemple en milieu de plancher), et intègrent donc les amplifications internes des structures.

V- Prise en compte des contraintes vibratoires au niveau des travaux

La prise en compte des vibrations au niveau des travaux comprend diverses actions dépendant à la fois de l'environnement du chantier et du niveau de connaissance des problèmes vibratoires issu des études préalables.

Communication – démarche préalable au démarrage des travaux

L'expérience montre que la mise en place d'un programme de relations publiques adapt e au chantier permet de rassurer les riverains en évitant notamment des amalgames entre g ene et dommage. L'information des riverains doit être initiée préalablement aux travaux puis poursuivie durant tout le chantier. Son formalisme dépend de l'importance des travaux et des problèmes vibratoires à traiter mais elle doit permettre dans tous les cas d'informer les riverains sur le déroulement des travaux (interlocuteurs, délais, horaires, phases critiques, etc.), les contraintes qu'ils auront à supporter et les mesures prises pour les limiter. Il convient ensuite de veiller, en cours de travaux, à la mise en œuvre effective des dispositions annoncées et à être attentif aux éventuelles plaintes de riverains.

Préalablement aux travaux, il convient de prévoir un état des lieux initial des structures les plus exposées. Pour des ouvrages g er es par des services publics ou assimil es, il s'agit généralement d'une visite contradictoire de l'ouvrage. Pour des bâtiments appartenant à des personnes privées, cet état des lieux peut être effectu e par huissier ou mieux par expert nomm e par r ef er e du tribunal administratif. Cette démarche peut être effectuée par le maître d'ouvrage ou confiée à l'entreprise. Pour clore l'opération, il convient de prévoir un état des lieux final en fin de travaux r ealis e dans des conditions identiques. Le choix des constructions à expertiser dépend du contexte du chantier et des caractéristiques géotechniques des sols. On pourra toutefois retenir en première approximation que :

- les critères de choix doivent être la distance au compacteur et la durée du compactage sur un même site (privilégier les remblais les plus hauts) ;
- l'expertise doit être systématique sur un même site selon une règle de distance afin d'éviter des discussions ultérieures sur la sélection effectuée ;
- toute construction à moins de 10 m est à expertiser ;
- le premier rang de construction situ e à moins de 50 m est à expertiser.

 tudes

En début de travaux ou en cas de plaintes d'un riverain en cours de travaux, des planches d'essai doivent être r alis es   proximité des structures sensibles identifi es ou concern es par la plainte selon des dispositions dépendant du niveau des études préalables :

- dans tous les cas, ces planches d'essai ont pour objet de valider le matériel de compactage présent sur site et le mode opératoire de l'entreprise (localisation des phases transitoires, orientation et géométrie des passes, limite d'emploi en fonction de l'énergie de compactage, etc.). La réception du compacteur au vibromètre est conseill e car elle permet de caractériser la source vibratoire indépendamment du terrain ou des structures ;
- en l'absence d'étude vibratoire, ces planches d'essai doivent être men es selon la méthode d'étude de la norme NF E90-020 [5] et doivent permettre de définir ou confirmer les seuils et le programme de contrôle ;
- en présence d'une étude vibratoire, elles doivent être men es selon la méthode contrôle de la norme NF E90-020 [5] et permettent de valider le dispositif de contrôle.

Les conclusions de ces planches d'essai doivent permettre d'apporter des solutions à toutes les situations susceptibles d'être rencontr es ou de mettre en évidence d'éventuelles incompatibilités entre le projet, les contraintes vibratoires et le matériel de compactage présent, indépendamment du programme de contrôle dont le but principal est d'apporter la preuve tangible du respect des seuils. L'étude peut conclure à l'absence de contrôle si les vibrations constat es sont suffisamment faibles pour garantir qu'elles ne sont pas susceptibles d'atteindre les seuils.

Contrôles

Le plan de contrôle, dimensionné par l'étude, doit être simple de mise en œuvre et opérationnel durant tout le compactage. Ce contrôle peut s'effectuer en continu. Il requiert alors la définition d'un mode d'alerte en cas de dépassement des seuils afin d'éviter d'endommager des structures ou de perturber un équipement sensible (opérateur permanent, alarmes sonores ou visuelles, etc). Il peut être ponctuel selon un rythme régulier ou aléatoire, selon des modalités définis par l'étude.

L'atteinte d'un seuil en phase contrôle impose de modifier le mode opératoire ou le matériel de mise en œuvre selon des dispositions qui, si elles n'ont pas été anticip es lors des planches d'essai, se traduisent par un arrêt du chantier.

Conclusion

Les nuisances vibratoires g n r es par les compacteurs vibrants doivent être prises en compte par les concepteurs d'infrastructures. En effet, la g ne et les d gats occasionnés sur les structures et équipements sensibles environnants constituent aujourd'hui la principale source de contentieux dans le domaine des travaux publics. Dans certains cas, l'absence de prise en compte au préalable de ces contraintes vibratoires, peut se traduire par une interruption des travaux et des surcoûts importants.

Cette note d'information doit permettre aux concepteurs d'infrastructures, aux maitres d'œuvre et maitres d'ouvrage, de les aider à identifier d'éventuelles contraintes vibratoires et de définir des moyens d'études et de contrôles.

VI - Exemples commentés

EXEMPLE 1 : comment une absence d'information des riverains conduit à une concertation impossible

Description des travaux :

Compactage d'une substitution rocheuse de 3 m d'épaisseur pour la fondation d'un bâtiment de 500 m² en zone urbaine à 80 m des habitations les plus proches.

Nature du sol support : coulée basaltique

Compacteur utilisé : V5

Matériau mis en œuvre : matériaux rocheux bruts d'abattage

Prise en compte des vibrations : Aucune

Problèmes rencontrés :

Plaintes immédiates de quelques riverains, dès le premier jour, justifiées par la gêne, puis progressivement de l'ensemble des riverains avec extension au dommage. Occupation du chantier par les riverains sans réponse à leurs plaintes au bout de 5 jours de compactage avec article de presse et arrêt des travaux.

Traitement du problème :

Réunion à l'initiative du maître d'ouvrage avec les riverains concluant à l'arrêt du compactage vibrant.

Caractéristiques des vibrations provoquées :

Inconnues, refus d'accès aux propriétés par les riverains

Conséquences sur les travaux :

Arrêt de 1 semaine et allongement des délais de 15 jours lié au changement de méthode.

Réalisation de la substitution en 0/31.5 au compacteur à pneus.

EXEMPLE 2 : prise en compte des vibrations dans le dimensionnement du projet

Description des travaux :

Voie routière à créer en déblai sur une plate-forme commune avec une ligne ferroviaire existante. Travaux prévus en plusieurs phases, avec notamment une exploitation du déblai pour emprunt en phase initiale.

Compactage de la partie supérieure des terrassements (PST) et de la couche de forme en parallèle à la voie ferrée à 2.75 m des poteaux support caténaire.

Prise en compte des vibrations :

Préalablement aux travaux : concertation avec la SNCF et définition d'une méthode d'étude.

Dans le cadre de la première phase de travaux (emprunt de matériaux) : réalisation de planches d'essai de compactage avec étude de vibration sur l'arase du déblai.

Intégration des conclusions de l'étude dans le projet et le dossier de consultation des entreprises (DCE) de la phase principale des travaux :

- Traitement différencié de la bande d'arrêt d'urgence (BAU) proche de la voie ferrée (couche 0.2 m compactage V3) du reste du projet (compactage V5) ;
- Localisation des phases transitoires à distance des points singuliers de la ligne (ouvrages, armoires électriques...);
- Définition d'un programme de contrôle à charge de l'entreprise ;
- Mise en œuvre effective des dispositions issues de l'étude lors des travaux de la phase principale.

Problèmes rencontrés : Aucun problème rencontré en cours de travaux

Caractéristiques des vibrations provoquées :

Position V3 à 2.75 m des supports caténaire : 6 mm/s

Position V5 à 5 m des supports caténaire : 6 mm/s

Seuil absolu fixé par la SNCF sur toutes leurs infrastructures suite à l'étude : 10 mm/s

Conséquences sur les travaux :

L'étude vibratoire a été incluse dans le marché préparatoire sans en modifier les délais pour un coût inférieur à 8 000 € (2002).

Les travaux de la phase principale se sont déroulés conformément aux conditions techniques et financières du marché, sans aléa dû aux vibrations.

EXEMPLE 3 : prise en compte d'un équipement sensible dans un projet

Description des travaux :

Voie routière à créer à 10 m d'une scierie équipée d'une affûteuse de lames de grande longueur.
Compactage de la PST et de la couche de forme à proximité du bâtiment et de l'équipement.

Prise en compte des vibrations :

Préalablement aux travaux : concertation avec l'industriel et définition de la démarche à mettre en œuvre.
Intégration dans le DCE d'une planche d'essai de compactage au droit de la scierie avec étude de vibration sous responsabilité du maître d'œuvre.
Information de l'entreprise sur d'éventuelles contraintes techniques à respecter à l'issue de cette étude (limitation des énergies de compactage et contrôle des vibrations).

Caractéristiques des vibrations constatées lors de la planche d'essai :

Position V2 à 10 m de l'équipement : 1.6 mm/s en phase entretenue, 2.8 mm/s en phase transitoire à 30 Hz
Position V5 à 10 m de l'équipement : 2.1 mm/s en phase entretenue, 4 mm/s en phase transitoire à 29 Hz
Vibrations internes générées par l'équipement en fonctionnement : 5 mm/s entre 10 et 100 Hz

Conséquences sur les travaux :

Maintien du compactage en V5 en définissant un mode opératoire permettant d'éviter toute phase transitoire à moins de 25 m de l'affûteuse. Contrôle des vibrations sur un capteur lors du compactage à moins de 25m du bâtiment.
Les travaux ont été réalisés dans les conditions techniques et économiques prévues. Aucun problème n'a été signalé par le propriétaire de la scierie.

EXEMPLE 4 : prise en compte d'un équipement sensible dans le cadre des travaux

Description des travaux :

Ligne de tramway à créer en déblai à 40 m d'un centre de recherche utilisant des équipements très sensibles (spectrophotomètre, microscope électronique, etc).
Compactage de la PST et de la couche de forme à proximité du bâtiment et des équipements.

Prise en compte des vibrations dans les études :

aucune vis à vis du compactage.
Etude de vibration dans le cadre des terrassements du déblai à l'explosif conduisant à l'impossibilité de compacter.
appareils en fonctionnement (pas de risque d'endommagement mais perturbations des mesures effectuées sur ces appareils)

Caractéristiques des vibrations constatées lors de la planche d'essai :

Vibrations estimées à 0.5 mm/s soit des déplacements de l'ordre de 10 microns sur des appareils perturbés à partir d'1 micron.

Conséquences sur les travaux :

Réalisation du compactage en dehors des périodes d'utilisation des équipements.

EXEMPLE 5 : réponse particulière d'une structure

Description des travaux :

Construction d'un giratoire en remblai en fond de vallée.
Matériaux fins traités nécessitant des énergies élevées de compactage (V5).
Constructions les plus proches à 50 m.

Prise en compte des vibrations :

Etat des lieux initial réalisé sur les constructions les plus proches.

Difficultés rencontrées en cours de travaux :

Plainte pour gêne et dommages émanant du propriétaire d'une habitation située à 100 m du remblai sur le versant de la vallée, sans manifestation identique de la part des propriétaires des constructions plus proches.
Le bâtiment concerné était une demeure du XIX^{ème} siècle en pierre et plancher bois de grande portée sur 4 niveaux dont 1 de cave et 1 mansardé.
Les nuisances décrites variaient dans le temps sans corrélation avec l'énergie mise en œuvre constante (V5) ni la position du compacteur sur le giratoire.

Suites données:

Visite sur site et état des lieux.
Suite à l'évolution des dommages, mesures de vibrations en différents points de la construction.

Caractéristiques des vibrations enregistrées :

Vitesse sur fondations : 0.2 mm/s
Vitesse sur cheminée 3^{ème} niveau : 6.3 mm/s soit une amplification dans un facteur de 31.
Vitesse sur plancher 4^{ème} niveau : 3.4 mm/s soit une amplification dans un rapport de 17.
Variation de la fréquence du compacteur de 17 à 24 Hz sur 2 heures de mesure (correspondant à une anomalie de fonctionnement de l'engin) se traduisant par une variation des facteurs d'amplification.

Conclusions de l'étude :

La structure est sollicitée dans une gamme de fréquences proche des fréquences propres de certains éléments porteurs provoquant des amplifications très importantes des vibrations dans le bâtiment.
Les amplifications varient en fonction de la fréquence du compacteur vis à vis notamment des fréquences propres de la structure, justifiant la variabilité des vibrations ressenties par les occupants.
Les niveaux mesurés sont susceptibles de provoquer un inconfort sévère des occupants notamment en partie haute de la construction et des dommages aux éléments non porteurs de la structure (fissuration des plâtres et enduits, décollements des poutres, etc.).

Conséquences sur les travaux :

Maintien du compactage en V5, le chantier étant en cours d'achèvement et les dommages déjà provoqués. Procédure en cours en vue d'indemniser le propriétaire pour les dommages causés

Bibliographie

- [1] Réalisation des remblais et des couches de forme (GTR) - Guide technique - Fascicule I : Principes généraux - Fascicule II : Annexes techniques - Setra, LCPC, septembre 1992 - Réfer. D9233.
- [2] NF-P98-736: Matériel de construction et d'entretien des routes - Compacteurs - Classification. Septembre 1992.
- [3] Terrassements à l'explosif dans les travaux routiers - Guide technique - Sétra, janvier 2002 - Réfer. D0126
- [4] Circulaire du 23/07/86 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement – JORF du 22/10/1986.
- [5] NF E90-020: Vibrations et chocs mécaniques - Méthode de mesurage et d'évaluation des réponses des constructions, des matériels sensibles et des occupants. Juillet 2007
- [6] NF ISO 8569: Vibrations et chocs mécaniques - Mesurage et évaluation des effets des chocs et des vibrations sur les équipements sensibles dans les bâtiments. Septembre 1996.
- [7] ISO 2631-1: Vibrations et chocs mécaniques. Évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps. Partie 1 : spécifications générales. Mai 1997
- [8] ISO 2631-2: Vibrations et chocs mécaniques - Évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps - Partie 2 : vibrations dans les bâtiments (1 Hz à 80 Hz). Avril 2003.
- [9] ISO 2631-4: Vibrations et chocs mécaniques - Évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps - Partie 4 : lignes directrices pour l'évaluation des effets des vibrations et du mouvement de rotation sur le confort des passagers et du personnel dans les systèmes de transport guidé. Février 2001.
- [10] ISO 2631-5: Vibrations et chocs mécaniques - Évaluation de l'exposition des individus à des vibrations globales du corps - Partie 5 : méthode d'évaluation des vibrations contenant des chocs répétés. Février 2004.

Rédacteurs

Reynald FLAHAUT – CETE Normandie Centre – LRPC Rouen
téléphone : 33 (0)2 35 68 89 16 – télécopie : 33 (0)2 35 68 81 72
mél: reynald.flahaut@developpement-durable.gouv.fr

Delphine JACQUELINE – CETE Normandie Centre – CER
téléphone : 33 (0)2 35 68 82 09 – télécopie : 33 (0)2 35 68 81 21
mél: delphine.jacqueline@developpement-durable.gouv.fr

Jean-Jacques LEBLOND – CETE Lyon – LRPC Clermont-Ferrand
téléphone : 33 (0)4 73 42 10 14 – télécopie : 33 (0)4 73 42 10 01
mél: jean-jacques.leblond@developpement-durable.gouv.fr

Jérôme VARILLON – CETE Lyon – LRPC Clermont-Ferrand
téléphone : 33 (0)4 73 42 10 31 – télécopie : 33 (0)4 73 42 10 01
mél: jerome.varillon@developpement-durable.gouv.fr

Renseignements techniques

Sabine CAVELLEC – Sétra / CSTR
téléphone : 33 (0)1 46 11 34 03 – télécopie : 33 (0)1 45 36 85 03
mél : mailto:sabine.cavellec@developpement-durable.gouv.fr

AVERTISSEMENT

La collection des notes d'information du Sétra est destinée à fournir une information rapide. La contre-partie de cette rapidité est le risque d'erreur et la non exhaustivité. Ce document ne peut engager la responsabilité ni de son rédacteur ni de l'administration.

Les sociétés citées le cas échéant dans cette série le sont à titre d'exemple d'application jugé nécessaire à la bonne compréhension du texte et à sa mise en pratique.

Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements
46, avenue Aristide Briand – BP 100 – 92225 Bagneux Cedex – France
téléphone : 33 (0)1 46 11 31 31 – télécopie : 33 (0)1 46 11 31 69

Document consultable et téléchargeable sur les sites web du Sétra :
• Internet : <http://www.setra.developpement-durable.gouv.fr>
• Intranet (Réseau ministère) : <http://intra.setra.l2>

Ce document ne peut être vendu. La reproduction totale du document est libre de droits.
En cas de reproduction partielle, l'accord préalable du Sétra devra être demandé.
Référence : 0920w – ISSN : 1250-8675

Le Sétra appartient
au Réseau Scientifique
et Technique
du MEEDAT

