

Circulaire du 23/07/86 relative aux vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement

- Date de publication : 22/10/1986
 - Type : Circulaire
 - Date de signature : 23/07/1986
 - Etat : en vigueur
-

(JO du 22 octobre 1986)

Destinataires : Mme et MM. les Préfets,

Les vibrations mécaniques émises dans l'environnement par les installations classées pour la protection de l'environnement peuvent constituer un problème pour la protection des populations riveraines.

Les prescriptions édictées en application de la loi 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement, disposent en général que " l'installation sera construite, équipée et exploitée de façon que son fonctionnement ne puisse être à l'origine de bruits ou de vibrations susceptibles de compromettre la santé ou la sécurité du voisinage ou constituer une gêne pour sa tranquillité ".

L'évaluation des effets des vibrations mécaniques transmises dans l'environnement par ces installations est actuellement faite avec des moyens et des méthodes qui varient considérablement selon l'opérateur.

Il m'a paru nécessaire d'harmoniser ces moyens et méthodes et de fixer des normes pour éviter les gênes ressenties par les personnes ou les dommages subis par les constructions.

Tel est l'objet de la présente circulaire et des règles techniques annexées, que je vous adresse ci-joint, déterminant, d'une part, les normes d'émission de vibrations mécaniques que doivent respecter les installations classées pour la protection de l'environnement et, d'autre part, la méthodologie d'évaluation des effets sur l'environnement des vibrations mécaniques émises par une ou plusieurs sources appartenant à ces installations.

Je vous demande d'appliquer ces dispositions pour les installations classées nouvelles ainsi que pour les modifications et extensions d'installations classées existantes.

Pour les installations classées existantes qui se révèlent à l'origine de nuisances engendrées par des émissions de vibrations mécaniques, il vous appartient de définir, le cas échéant, les prescriptions complémentaires nécessaires. Votre arrêté, pris dans les formes de [l'article 18 du décret n° 77-1133 du 21 septembre 1977](#), précisera les délais impartis à l'exploitant et les normes d'émission de vibrations mécaniques à respecter aux termes des travaux d'aménagement. Il définira, en outre, les conditions fixées pour la surveillance des effets de l'installation classée dans l'environnement.

A l'issue d'un délai d'un an à compter de l'envoi de la présente circulaire, je vous serais obligé de bien vouloir m'adresser un compte rendu de l'application qui en est dite en mentionnant les difficultés que vous aurez rencontrées et les améliorations éventuelles que vous souhaiteriez y voir apporter. A l'expiration de ce délai, je souhaite informer le Conseil Supérieur des Installations Classées des résultats d'application de cette circulaire.

Règles techniques

Objets des règles techniques

Les présentes règles techniques ont pour objet :

1° La définition des méthodes de mesure à mettre en oeuvre pour l'évaluation des effets, sur l'environnement, des vibrations mécaniques émises par une ou plusieurs sources appartenant à une installation classée en vue de la protection de l'environnement ;

2° L'évaluation des effets des vibrations mécaniques transmises dans l'environnement. Cette évaluation concerne :

- la sécurité des constructions,
- les effets sur les occupants de ces constructions.

Les présentes règles ont pour finalité la recherche de la protection des riverains des installations classées sans imposer pour autant aux exploitants des prescriptions qui seraient irréalisables.

Ces règles techniques comprennent deux parties :

1° Une première partie précisant les informations fondamentales concernant les phénomènes de vibrations mécaniques, leur origine et leurs effets sur l'environnement et sur lesquelles doit être basée la méthode d'"analyse fine" à définir ultérieurement.

2° Une seconde partie fixant les normes d'émission de vibrations mécaniques à respecter et la méthodologie d'évaluation des effets sur l'environnement, définies dans le cadre limité de la mise en oeuvre de la méthode de mesure de classe "contrôle".

Les présentes règles techniques constituent un outil permettant l'évaluation d'une situation, compte tenu des données obtenues sur le site par l'Inspecteur chargé du contrôle ou par la personne ou l'organisme qualifié qui l'appréciera suivant la diversité des cas rencontrés.

C'est donc en fonction des circonstances particulières aux cas d'espèces que l'appréciation des effets des vibrations mécaniques doit être faite.

Domaine d'application

Les présentes règles techniques s'appliquent aux installations relevant de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées en vue de la protection de l'environnement.

On entend par " constructions " :

- les immeubles à usage d'habitation ou de travail ou affectés à toute autre activité humaine (bureaux, hôpitaux, crèches, écoles, prisons, usines...)
- les édifices accueillant le public (lieux de culte, cinémas, théâtres, grands magasins, etc.) ;
- les constructions et ouvrages anciens, d'une valeur architecturale archéologique ou historique.

Sont exclus :

- les réacteurs nucléaires et leurs installations annexes ;
- les installations liées à la sûreté générale sauf les constructions qui les contiennent ;
- les barrages, les ponts ;
- les châteaux d'eau ;
- les installations de transport à grande distance de gaz ou de liquide autres que l'eau ainsi que les canalisations d'eau sous pression de diamètre supérieur à 1 m ;
- les réservoirs de stockage de gaz, d'hydrocarbures liquides ou de céréales ;
- les tunnels ferroviaires ou routiers et autres ouvrages souterrains d'importance analogue ;
- les ouvrages portuaires tels que digues, quais et les ouvrages se situant en mer, notamment les plates-formes de forage.

L'étude des effets des vibrations mécaniques sur les catégories de constructions ou ouvrages exclus doit être confiée à une personne ou à un organisme qualifié.

Annexe

Première partie

Exposé des informations fondamentales concernant les phénomènes de vibrations mécaniques, leur origine et leurs effets sur l'environnement et sur lesquelles sont basées :

- d'une part, la méthode de classe " contrôle ", objet de la présente réglementation, et,
- d'autre part, la méthode d'" analyse fine " de la réponse vibratoire des constructions, à définir ultérieurement.

Cette partie des règles techniques expose les informations fondamentales concernant les phénomènes de vibrations mécaniques, leur origine et leurs effets sur l'environnement, et sur lesquelles doit être basée la méthode d'" analyse fine " de la réponse vibratoire des constructions, à définir ultérieurement.

Éléments de base-Effets des vibrations

Les effets des vibrations mécaniques sur les constructions comprennent :

- les effets directs (fissuration...) résultant de la mise en résonance par les vibrations entretenues, ou bien d'excitations répétées ou non, mais à niveau élevé, par les sources impulsionnelles ;
- les effets indirects par densification du sol.

L'évaluation des effets des vibrations mécaniques sur les constructions est faite à partir :

- de mesures sismiques qui permettent de déterminer les paramètres des mouvements observés (fréquence,

déplacement, vitesse particulière, accélération, durée, périodicité, spectre et fonction temporelle) ;

- de mesures de nivellement de précision.

L'étude des effets des vibrations sur les constructions nécessite la définition préalable des différentes catégories de sources, compte tenu du type du signal reçu, et la classification des constructions en vue d'adapter à chaque classe la tolérance admise.

Catégories de sources

Les sources de vibrations mécaniques sont classées, compte tenu de leur nature et de leur cycle de fonctionnement, en deux catégories principales.

1° Sources continues ou assimilées

La première catégorie comprend :

- toutes les machines émettant des vibrations continues ;
- les sources émettant des impulsions à intervalles assez courts sans limitation du nombre d'émissions.

2° Sources impulsionnelles à impulsions répétées

La deuxième catégorie comprend les sources émettant des impulsions à intervalles assez courts, mais dont la durée d'une émission est inférieure à 500 millisecondes.

L'espacement de temps entre deux émissions successives est supérieur à une seconde.

Le nombre d'émissions est limité.

Classification des constructions pour la méthode d'" analyse fine "

Cette classification comprend quatorze classes qui tiennent compte du type de la construction, des fondations, de la nature du terrain et des facteurs d'importance architecturale ou historique. Le système dynamique considéré dans cette application est en effet composé du terrain, des fondations (s'il en existe) et de la construction elle-même.

1. Définition des classes

Les classes sont définies en se référant à des constructions en bon état et correctement entretenues.

Ces constructions ne doivent pas présenter de défauts de réalisation, ni avoir subi des dommages par tremblements de terre.

Dans le cas où une construction ne répond pas à ces exigences, il faut lui attribuer la classe immédiatement inférieure.

L'ordre dans lequel les constructions sont classées dépend de leur résistance aux vibrations ainsi que de la tolérance que l'on peut accepter quant aux effets des vibrations en raison de la valeur architecturale, archéologique ou historique des constructions.

Trois éléments importants interviennent dans la réaction d'une construction sous les effets des vibrations mécaniques :

- la catégorie de la construction ;
- les fondations ;
- la nature du terrain.

2. Catégories de constructions

Huit catégories de constructions sont définies ; elles sont numérotées de I à VIII en distinguant, dans chaque catégorie, deux groupes selon le mode de construction. Dans chacun de ces groupes, on doit tenir compte de l'âge de la construction.

1er groupe : Bâtiments anciens ou traditionnels

Les bâtiments inclus dans le premier groupe comprennent les constructions anciennes et tous les bâtiments modernes construits en utilisant des types de matériaux et des méthodes de travail traditionnels.

Ce sont généralement des constructions massives à grand amortissement. Ce groupe comprend aussi les constructions souples traditionnelles des zones sismiques. Les constructions considérées ont rarement plus de six étages.

2e groupe : Bâtiments et constructions modernes

Ce groupe comprend toutes les constructions modernes utilisant des matériaux relativement durs, reliés entre eux, généralement légers et de faible amortissement, les constructions à ossature aussi bien que celles dont les murs sont calculés pour supporter des charges. Tous les types de remplissage sont inclus. On y trouve également quelques bâtiments plus anciens à ossature qui sont construits avec des matériaux modernes. La hauteur peut varier d'un seul à de nombreux étages.

A numéro de catégorie identique, on considère que les constructions du premier et du deuxième groupe présentent une égale résistance aux vibrations mécaniques.

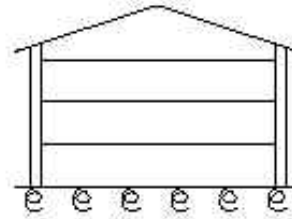
Premier groupe

PREMIER GROUPE

I

Bâtiments industriels lourds, à plusieurs niveaux (deux ou trois), y compris les formes résistant aux tremblements de terre.

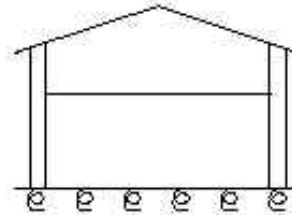
Ouvrages massifs, incluant les ponts, les forteresses, les remparts, les quais et les jetées.



II

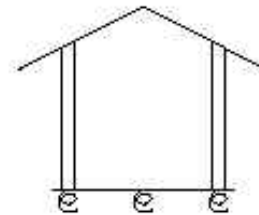
Grands édifices publics à ossature rigide, couverts d'une charpente, y compris les formes résistant aux tremblements de terre.

Immeubles à murs porteurs en pierre de taille ou en pierres bien cimentées.



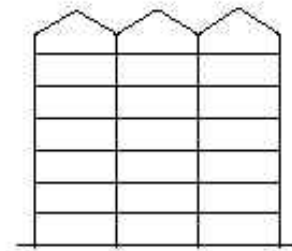
III

Maisons à un ou deux niveaux et bâtiments à usage mixte, en bois, résistant aux tremblements de terre.



IV

Groupe d'immeubles d'une certaine importance, généralement en pierres, utilisés comme bureaux ou locaux d'habitation, allant de cinq à sept niveaux.



VULNÉRABILITÉ CROISSANTE

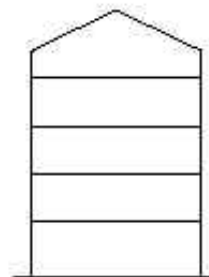


Deuxième groupe

V

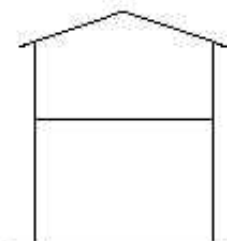
Maisons de quatre à six niveaux et bâtiments urbains à usage mixte, construits en moellons ou en briques.

Constructions massives dont les murs supportent des charges importantes.

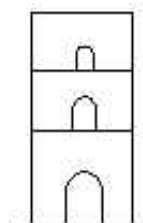


VI

Maisons et constructions à deux niveaux, en moellons ou en briques, avec planchers et charpente en bois.

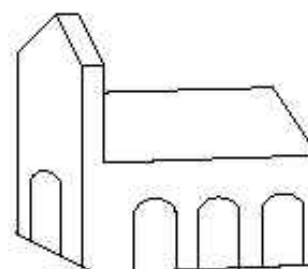


Tours et minarets en pierres ou en briques.

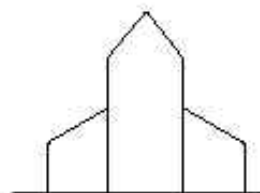


VII

Constructions à baies ou comportant plusieurs corps de bâtiments, en pierres ou en briques, avec ou sans voûtes telles que les grandes églises et autres bâtiments similaires.



Eglises à charpente en bois et constructions du type grange, basses et bâties avec de grandes ouvertures (sans chaînage), ainsi que les écuries, garages, halles, marchés couverts, bâtiments industriels bas.



VIII

Ruines.

Toutes les constructions de la catégorie VII qui ont une valeur historique.

VULNÉRABILITÉ CROISSANTE



3. Catégories de fondations

A.

- pieux liaisonnés en béton armé ou en acier ;

4	-	-	-	-	A c	-	-	-
	-	A c	B b	A c	B a	-	-	-
	-	B b	-	-	B b	-	-	-
5	-	B c	A c	-	B c	B a	-	-
6	-	A f	-	A d	B d	B d	B a	-
	-		-	-	-	C a	-	-
7	-	-	A f	A e	B e	B c	B b	-
	-	-	-	-	-	C b	C a	-
8	-	-	-	-	-	B e	B c	-
	-	-	-	-	-	C c	C b	-
9	-	B f	-	-	-	C d	B d	A a
	-	-	-	-	-	-	C c	-
10	-	-	B f	-	-	C e	B e	A b
	-	-	-	-	-	-	C d	-
11	-	-	-	C f	C f	-	C e	B a
12	-	-	-	-	-	C f	-	B c
	-	-	-	-	-	-	-	C a
13	-	-	-	-	-	-	-	B d
	-	-	-	-	-	-	C f	C b
	-	-	-	-	-	-	-	C c
14	-	-	-	-	-	-	-	C d
	-	-	-	-	-	-	-	C e
	-	-	-	-	-	-	-	C f

Acquisition des données pour la méthode d'" analyse fine "

I. Effets directs

1.1. Principes de base

Les principaux paramètres caractérisant une oscillation sont la fréquence, le déplacement et la durée. Les vibrations enregistrées peuvent présenter un petit nombre de fréquences dominantes qui apparaissent sous forme de bandes plus ou moins étroites dans les spectres relatifs aux sources continues et aux phénomènes de résonance, tandis que les spectres correspondant aux oscillations émises par des sources impulsionnelles se présentent sous forme d'une large bande.

Les données expérimentales peuvent se présenter sous les diverses formes suivantes :

- enregistrement, en fonction du temps, du déplacement, de la vitesse ou de l'accélération ;
- spectre de Fourier, dans un intervalle de temps donné, de l'amplitude, de la vitesse, de l'accélération ou de l'énergie ;
- réponses temporelles d'oscillateurs simples de fréquence et d'amortissement donnés, à partir desquelles on peut calculer un spectre de réponse.

L'enregistrement continu en fonction du temps est indispensable.

L'enregistrement direct, sur le terrain, de la vitesse particulière présente l'avantage de permettre l'évaluation rapide de l'énergie, qui est proportionnelle au carré de la vitesse ; il facilite le calcul des autres paramètres sans beaucoup de risques de déformation du signal d'origine.

Les fréquences propres des constructions étant comprises dans une bande de basses fréquences, les appareils de mesure bien adaptés à cet enregistrement sont ceux qui comportent des capteurs de vitesse de fréquence propre 1 Hz, lesquels présentent, en outre, l'avantage de fournir une tension de sortie importante.

Les spectres apportent des informations complémentaires sur les domaines de fréquences dans lesquels sont comprises les grandes valeurs de déplacement, de vitesse, d'accélération ou d'énergie, mais ils ne permettent pas d'avoir une représentation complète des effets résultant de la durée du phénomène.

D'une manière générale, les grandes valeurs de déplacement, de vitesse ou d'accélération ne sont pas forcément liées à de grandes énergies à la source. Elles sont fréquemment observées à proximité de sources impulsionnelles faibles, la principale condition de leur existence étant la faible distance à la source.

Ces grandes valeurs de paramètres ne signifient pas nécessairement que le phénomène doive causer des dommages aux constructions ; cela dépend de sa durée.

La répétition de phénomènes présentant des valeurs modérées du déplacement, de la vitesse et de l'accélération peut être la cause de fissurations résultant d'une fatigue des éléments fragiles des constructions.

Ainsi trois paramètres sont indispensables pour caractériser les vibrations : à côté de la fréquence et de la durée, on retient généralement la vitesse comme le paramètre le plus significatif mais, selon les domaines de résonance des récepteurs concernés, il peut être plus important de considérer la vitesse ou le déplacement. La connaissance de la fréquence propre et de l'amortissement du récepteur est essentielle à cet égard.

D'une façon générale, le mouvement en chaque point de mesure doit être enregistré dans trois directions rectangulaires dont une verticale, les deux autres étant définies par rapport à la source ou par rapport aux axes des ouvrages étudiés.

Dans le cas de phénomènes reproductibles, si le nombre de capteurs tri-directionnels dont on dispose est inférieur au nombre de points de mesure, ces points de mesures pourront être occupés en plusieurs fois en maintenant des points de référence communs à tous les enregistrements.

Dans le cas de phénomènes non reproductibles, les enregistrements aux différents points de mesure doivent être effectués simultanément.

1.2. Appareillage de mesure

La chaîne de mesure doit permettre l'enregistrement en fonction du temps des phénomènes vibratoires dans la bande de fréquence allant de 1 à 150 Hz avec des amplitudes en vitesses comprises entre : 0,1 mm/s et 50 mm/s.

La dynamique de la chaîne doit être au moins égale à 66 dB.

1.3. Précautions opératoires

Tous les capteurs doivent être complètement solidaires de leur support.

Il faut veiller à ne pas poser les capteurs sur les revêtements (zinc, plâtre, carrelage, ...) qui peuvent agir comme filtres de vibrations ou bien provoquer des vibrations parasites si ces revêtements ne sont pas solidaires de l'élément principal de la construction.

Il faut éviter également d'installer les capteurs sur les balcons, les dalles d'entrée ou les paliers d'escaliers, où l'on risque de n'enregistrer que les modes propres de vibration de ces éléments.

Dans les constructions, les capteurs doivent être orientés selon les axes de la construction sans tenir compte de l'azimut de la source par rapport à la construction.

Il faut effectuer une mesure des agitations existantes en dehors du fonctionnement de la source. Cela peut aider à définir l'incidence du fonctionnement de la source sur l'environnement vibratoire.

Des études systématiques ont permis d'obtenir un grand nombre d'enregistrements en faisant varier, d'une part, la vitesse ou la fréquence nominale de la source et, d'autre part, les conditions d'enregistrement, près de la source, sur le sol (en champ libre et en zone de réaction) et dans des immeubles différents par leur géométrie, par le type de construction et par leur situation par rapport à la source.

Ces nombreux enregistrements ont mis en évidence la complexité des phénomènes vibratoires à toutes les étapes de la transmission : émission, milieu de propagation et réception.

1.4. Méthodologie

La méthode d'analyse fine des effets directs a pour objet d'étudier les réponses des constructions aux vibrations transmises à celles-ci quels que soient les types de sources, de sols ou de constructions. Cela implique des mesures en différents points de la construction et, éventuellement, entre celle-ci et la source (en champ libre et en zone de réaction) et autour de la source même. Toutes ces mesures doivent être faites lors des différents modes de fonctionnement de la source.

a) Étude de la source

Il s'agit d'étudier :

- la polarisation des vibrations ;
- la répartition de l'énergie vibratoire suivant la direction de propagation ;
- les bandes de fréquences dominantes près de la source ;
- les cycles de fonctionnement ;

- la variation des paramètres en fonction de la vitesse de fonctionnement de la source et de la nature des matériaux fabriqués ou traités par cette installation.

b) Étude du milieu de propagation

Cette étude de la propagation est effectuée au moyen de profils où les espacements entre les différents points de mesures sont à apprécier par la personne ou l'organisme qualifié en fonction des caractéristiques de la source ainsi que de la distance entre celle-ci et la zone de réaction de la construction. Cela permet d'étudier la variation de l'énergie en fonction de la distance pour le milieu de propagation considéré.

c) Études des vibrations des constructions

L'étude des vibrations des constructions doit se faire dans les conditions suivantes :

- avoir le contrôle du fonctionnement de la source pendant la durée des essais afin d'effectuer des mesures systématiques tenant compte de la variation du fonctionnement de la source et éventuellement de la distance ;
- avoir libre accès dans les différentes parties des constructions à étudier afin de pouvoir y installer des séismographes en différents points en vue d'étudier les différentes fonctions de transferts et les réactions des différents éléments des constructions.

L'étude des vibrations d'une construction doit tenir compte des caractéristiques de cette dernière et de son site :

- type de la construction et son âge ;
- méthode de construction et matériaux utilisés ;
- forme de la construction et nombre d'étages ;
- type de la fondation ;
- type de terrain.

La distance entre la construction et la source doit également être prise en considération.

La détermination des emplacements des points de mesure se fait en fonction des dimensions de la construction sur la base des principes suivants :

- pour les constructions comportant au maximum un rez-de-chaussée et trois étages (ou environ 12 mètres), les mesures doivent être faites au moins entre deux points (bas et haut de la construction) ;
- pour les constructions comportant plus de trois étages et le rez-de-chaussée, on effectue une série d'enregistrements au moins tous les quatre étages (ou environ 12 mètres), plus une série d'enregistrements au sommet de la construction ;
- à chacun des niveaux où seront effectuées les mesures (fondation ou étages), le nombre et l'emplacement des points de mesure seront choisis de façon qu'aucun point du niveau considéré ne soit à plus de 10 mètres d'un emplacement de mesure.

Des points de mesure supplémentaires pourront éventuellement être définis pour tenir compte des observations

présentées par les occupants de la construction.

1.5. Valeurs limites

Dans l'attente de la parution de règles techniques concernant les valeurs limites à retenir dans le cadre de la mise en œuvre de la méthode d'" analyse fine ", ces valeurs sont déterminées par la personne ou l'organisme qualifié.

Ces valeurs limites s'appuient notamment sur :

- les données résultant d'un nombre suffisant d'enregistrements sismiques ;
- l'analyse complète de ces données ;
- l'interprétation des résultats en prenant en considération les conditions de fonctionnement de la source, la classe du récepteur et les emplacements des points de mesure.

1.6. Cas des installations existantes

L'évaluation par la méthode d'" analyse fine " des vibrations mécaniques engendrées par une installation existante se fait sur la base de la méthodologie de mesure décrite au paragraphe [1.4](#).

1.7. Cas des installations nouvelles

Dans le cas d'une installation nouvelle pouvant engendrer des vibrations d'une certaine importance, deux phases d'exécution sont conseillées :

- évaluation prévisionnelle des vibrations susceptibles d'être provoquées par cette installation ;
- enregistrement des vibrations observées à la mise en route de l'installation.

1.7.1. Évaluation prévisionnelle

L'évaluation prévisionnelle consiste à estimer l'énergie propagée à partir de la source en différents points situés en dehors de la zone de réaction du ou des récepteurs proches de la source à installer, à partir de mesures effectuées dans l'environnement de la source, en tenant compte de la distance et de l'azimut.

Une bonne connaissance du milieu de propagation constitue un élément indispensable et sûr en vue de la protection de l'environnement.

Les mesures systématiques sur le terrain, dans différents cas de sources et de milieux de propagation, doivent être effectuées au moyen de profils où les espacements entre les différents points de mesure dépendent des caractéristiques de la source ainsi que de la distance entre celle-ci et la zone de réaction de la ou des constructions.

Lorsque les conditions locales le justifieront (énergie reçue et dimensions de la ou des constructions), d'autres points de mesure seront implantés dans la zone probable de réaction et dans les constructions, en vue de déterminer les fonctions de transfert correspondantes.

Seule cette méthode peut permettre valablement une évaluation prévisionnelle de vibrations.

L'utilisation d'abaques, de formules préétablies ou de représentations mathématiques trop simplifiées doit être proscrite en raison de la complexité du phénomène. Ces formules ne peuvent pas tenir compte du couplage source-sol et sol-construction, ni du milieu de propagation.

Les nombreuses vérifications, effectuées in situ, ont confirmé ce jugement.

Les précautions opératoires, exposées dans le cas d'installations existantes sont à prendre en considération.

On conçoit les effets d'une erreur de prévision pour l'exploitant.

1.7.2. Phase expérimentale (à la mise en route de l'installation)

Au cours de cette phase, les effets directs des vibrations émises dans l'environnement sont étudiés notamment en faisant varier certains paramètres de fonctionnement de la source (type et épaisseur des matériaux traités, vitesse de fonctionnement, etc.).

Sur la base des résultats de mesure, il est alors possible :

- soit de déterminer les conditions limites de fonctionnement de la source ;
- soit d'apporter des corrections à l'installation de la source.

II. Effets indirects

Les vibrations transmises par le sol peuvent avoir deux conséquences sur les constructions proches de la source.

1° Par effets directs, les vibrations imposent à la construction implantée sur un sol rigide des mouvements alternés susceptibles, dans certains cas, de l'endommager.

2° Par effets indirects, les vibrations mécaniques peuvent tasser le sol sous la construction, s'il est meuble (densification). Si cette densification est différentielle, la construction peut se fissurer.

2.1. Principes de base

Dans le cas de la densification, il s'agit d'un tassement résultant d'un effet secondaire de l'émission vibratoire qui peut concerner des surfaces importantes du sol.

Ainsi la " densification " ne vise notamment pas le compactage local entrepris volontairement ni la stabilisation du sol exécutée par exemple préalablement à la réalisation de constructions.

Les vibrations mécaniques entretenues peuvent parfois engendrer à la longue, par effets directs, des désordres dans les constructions. Mais il faut, dans ce cas, que l'énergie des vibrations soit suffisamment importante et que la durée des vibrations soit suffisamment grande.

Par contre, une conjugaison des effets directs des vibrations et d'une densification du sol peut provoquer des désordres dans les constructions bien avant que le seuil limite des paramètres ne soit atteint.

Des phénomènes de liquéfaction comportant une perte significative de résistance peuvent être observés sous l'effet de vibrations continues de bas niveaux dans des sols tels que des limons, des sables, des limons argileux, des argiles sensibles, avec une teneur en eau variant de 30 à 45 p. 100. Ils peuvent être la cause de glissements

lorsque la couche de terrain concernée est en pente.

Pour cette raison, ne faire intervenir, pour apprécier les effets des vibrations mécaniques sur une construction, que les effets directs peut conduire à sous-estimer ou à surestimer les effets de ces vibrations.

2.2. Appareillages de mesure

Les effets indirects des vibrations mécaniques sont appréciés par des nivellements de précision effectués sur des points matérialisés en surface sur les constructions ou leur environnement proche. Ces points du nivellement devront être rattachés à une base de référence située en dehors de la zone possible de densification.

Pour l'étude de l'évolution des fissures, on peut valablement utiliser, par exemple, des appareils de mesure de déplacements des lèvres des fissures (comparateur, extensomètre, fissuromètre à bille, etc.).

2.3. Précautions opératoires

Pour l'évaluation de la densification pouvant résulter d'une ou de plusieurs séries d'émissions de vibrations, il conviendra d'effectuer des nivellements de précision juste avant la première série d'émissions et juste après la dernière série d'émissions de vibrations.

La périodicité des nivellements de précision est fonction des conditions d'environnement.

2.4. Cas des installations existantes

En général, les effets indirects sont pratiquement nuls dans le cas d'une installation existante.

En effet, le tassement par densification est assez rapide ; mais il est possible que les désordres soient constatés sur une construction un certain temps après le début du fonctionnement de la source vibratoire bien que les résultats des mesures sismiques ou des nivellements de précision antérieurs n'aient fait apparaître aucune anomalie.

L'origine de ce problème peut être recherché :

- soit dans une modification du fonctionnement de la source ;
- soit dans une modification de la construction ;
- soit dans une modification du terrain sous-jacent, notamment du fait des conditions climatiques (ruissellement d'eau de pluie, ou gel de la surface du sol, par exemple).

L'examen des désordres observés et l'exécution d'une nouvelle série de mesures (mesures sismiques et éventuellement nivellements de précision) permettra de résoudre le problème.

2.5. Cas des installations nouvelles

La probabilité de constater des effets indirects est plus grande dans le cas des installations nouvelles, d'où l'importance de tenir compte de ces phénomènes en prenant les précautions suivantes :

1. Mesure de nivellement de précision avant la mise en route et pendant la phase expérimentale (voir paragraphe [2.2](#)) ;

2. Si possible, relevés des fissures existantes sur les constructions proches de la source. L'inventaire peut être effectué par des photographies, des relevés graphiques ou, dans certains cas, avec l'intervention d'un huissier de justice.

Il appartiendra à l'exploitant d'apprécier le caractère que doit avoir ce relevé préalable ;

3. Éventuellement, la surveillance de ces fissures.

Deuxième partie

Normes d'émission de vibrations mécaniques à respecter et méthodologie d'évaluation des effets sur l'environnement, définies dans le cadre de la mise en œuvre de la méthode de mesure de classe " Contrôle " de la réponse vibratoire des constructions.

Méthode de mesure de classe " contrôle " de la réponse vibratoire des constructions

Cette partie des règles techniques fixe les normes d'émission de vibrations mécaniques à respecter et la méthodologie d'évaluation des effets sur l'environnement, dans le cadre limité de la mise en œuvre de la méthode de mesure de classe " Contrôle " de la réponse vibratoire des constructions.

Éléments de base

Les principaux paramètres qui interviennent dans l'évaluation des effets sur les constructions des vibrations mécaniques transmises dans l'environnement sont les suivants :

1. La fréquence ;
2. Le déplacement, la vitesse ou l'accélération ;
3. La durée du phénomène.

Le déplacement, la vitesse et l'accélération sont liés entre eux par l'intermédiaire de la fréquence.

L'expérience montre que la vitesse particulière est souvent le paramètre le plus significatif des effets des vibrations sur les constructions.

Dans ces règles techniques, qui ne concernent que la méthode de mesure de classe " Contrôle ", la vitesse et la fréquence seront utilisées comme critères, compte tenu de la durée du phénomène.

Catégories de sources

Les catégories de sources sont définies dans la première partie des présentes règles.

Classification des constructions Méthode de mesure de classe " Contrôle "

Pour la mise en œuvre de la méthode de mesure de classe " Contrôle ", on définit comme suit trois ensembles de constructions par simplification de la méthode donnée dans la première partie des règles techniques.

I. Ensemble de constructions résistantes

Classes 1 à 4.

II. Ensemble de constructions sensibles

Classes 5 à 8.

III. Ensemble de constructions très sensibles (I).

Classes 9 à 13.

(I) Ces ensembles ne comprennent pas les catégories et les groupes pour lesquels la méthode de mesure de classe " Contrôle " ne peut être valablement utilisée.

Le tableau de la page suivante donne une classification simplifiée, imposée par les limites de mise en œuvre de la méthode de mesure de classe " Contrôle ".

Classification simplifiée des constructions selon la tolérance admise aux effets des vibrations mécaniques -
Méthode de mesure de classe " contrôle "

Ensembles	Classes reprises dans la première partie	Catégories de constructions (vibrations acceptables décroissantes)					
		I	II	III	IV	VI	VII
		1er et 2e groupes	1er et 2e groupes	1er groupe	2e groupe	1er et 2e groupes	2e groupe
I	1	Aa	-	-	-	-	-
-	2	Ab	Aa	Aa	Aa	-	-
-	-	Ab	Ab	-	-	-	-
-	-	Ba	Ba	-	-	-	-
-	4	-	Ac	Bb	Ae	-	-
-	-	-	Bb	-	-	-	-
II	5	-	Bc	Ac	-	Ba	-
-	6	-	Af	-	Ad	Bb	Ba
-	-	-	-	-	-	Ca	-
-	7	-	-	Af	Ae	Bc	Bb
-	-	-	-	-	-	Cc	Ca
-	8	-	-	-	-	Be	Bc
-	-	-	-	-	-	Cc	Cb
III	9	-	Bf	-	-	Cd	Bd
-	-	-	-	-	-	-	Cc
-	10	-	-	Bf	-	Ce	Be

-	-	-	-	-	-	-	Ce	
-	11	-	-	-	Cf	-	Ce	
-	12	-	-	-	-	Cf	-	
-	13	-	-	-	-	-	Cf	

Acquisition des données méthode de mesure de classe " contrôle "

I. Effets directs

1.1. Éléments de base

D'une façon générale, le mouvement en un point donné d'une construction doit être enregistré dans trois directions rectangulaires dont une verticale, les deux autres directions étant définies par rapport aux axes horizontaux de l'ouvrage étudié sans tenir compte de l'azimut.

Les capteurs seront placés sur l'élément principal de la construction le plus accessible (appui de fenêtre d'un mur porteur, point d'appui sur l'ossature métallique ou en béton dans le cas d'une construction moderne), à l'un des étages supérieurs de la construction, de préférence à l'étage du plaignant.

1.2. Appareillage de mesure

La chaîne de mesure à utiliser pour la méthode de mesure de classe " Contrôle " comporte un seul ensemble de capteurs de vitesse.

Elle doit permettre l'enregistrement, en fonction du temps, de la vitesse particulière dans la bande de fréquences allant de 4 Hz à 150 Hz pour les amplitudes de cette vitesse comprises entre 0,1 mm/s et 50 mm/s.

La dynamique de la chaîne doit être au moins égale à 54 dB.

Cette chaîne a la même précision que " la chaîne d'analyse fine " ; son emploi est plus simple, mais ses possibilités d'utilisation sont plus restreintes.

1.3. Précautions opératoires

Les capteurs doivent être complètement solidaires de leur support.

Il faut veiller à ne pas installer les capteurs sur les revêtements (zinc, plâtre, carrelage ...) qui peuvent agir comme filtres de vibrations ou provoquer des vibrations parasites si ces revêtements ne sont pas bien solidaires de l'élément principal de la construction.

Il faut éviter également d'installer les capteurs sur les balcons, les dalles d'entrée ou les paliers d'escaliers, où l'on risque de n'enregistrer que les modes propres de vibration de ces éléments.

Il ne faut pas placer le capteur sur un sol en terre battue.

Il convient d'effectuer, si faire se peut, une mesure des agitations existantes en dehors du fonctionnement de la source. Cela peut aider à définir l'incidence du fonctionnement de la source sur l'environnement vibratoire.

1.4. Limites de la mise en œuvre de la méthode de classe " contrôle "

Dans les cas donnés ci-dessous, la méthode de classe " Contrôle " ne doit plus être mise en œuvre. Il convient alors de faire appel à une personne ou un organisme qualifié qui appliquera la méthode d' " analyse fine " de la réponse vibratoire de la construction :

- la construction comporte plus de trois étages et le rez-de-chaussée ;
- il s'agit de la sécurité d'objets de valeur historique (oeuvres d'art) à l'intérieur d'une construction ;
- il s'agit de monuments historiques ;
- si, après examen des résultats de mesures effectuées avec la méthode de classe " Contrôle ", on note que les valeurs observées de la vitesse particulière sont proches des valeurs-limites à 10 p. 100 près.

Le choix de la personne ou de l'organisme qualifié doit être approuvé par l'inspecteur chargé du contrôle.

L'intervention s'effectue dans les conditions prévues à [l'article 40 du décret n° 77-1133 du 21 septembre 1977](#) pris pour l'application de la loi n° 76-663 du 19 juillet 1976.

1.5. Valeurs-limites de la vitesse particulière en fonction de la fréquence observée (méthode de mesure de classe " Contrôle ")

On entend par valeurs limites, les valeurs au-dessous desquelles la probabilité de désordres dans la construction est pratiquement négligeable dans la bande des fréquences considérées.

Sur chaque enregistrement effectué, seules sont prises en compte, pour la comparaison avec les valeurs-limites, les vitesses particulières qui correspondent sur l'enregistrement à plusieurs oscillations de même fréquence.

Les vitesses particulières, correspondant sur l'enregistrement à des oscillations très occasionnelles peu nombreuses, ne sont pas prises en compte.

Pour les ensembles de constructions I, II et III définis à la page 48, les valeurs de la vitesse particulière (2) observée lors des mesures sismiques ne devront pas dépasser les valeurs-limites suivantes :

Cas des vibrations continues ou assimilées.

Les valeurs-limites figurent au tableau 1. Elles tiennent compte de la fréquence dominante observée.

Cas des vibrations impulsionnelles à impulsions répétées.

Les valeurs-limites sont données au tableau 2 où entre en compte également la fréquence dominante observée.

Si on observe que les fréquences correspondant aux vitesses particulières couramment observées pendant la période de mesure approchent de 0,5 Hz près les fréquences de 8,30 et 100 Hz, la valeur-limite à retenir est celle correspondant à la bande fréquence immédiatement inférieure.

(2) Il s'agit de l'amplitude simple de la vitesse particulière d'une oscillation.

Tableau 1 : Vibrations continues ou assimilées

Valeurs limites de la vitesse particulière en fonction de la fréquence observée Méthode de mesure de classe "

Contrôle "Ces valeurs limites sont valables pour chacune des trois composantes du mouvement.

TABLEAU 1
VIBRATIONS CONTINUES OU ASSIMILÉES
Valeurs limites de la vitesse particulière en fonction de la fréquence observée
Méthode de mesure de classe « Contrôle »

Ces valeurs limites sont valables pour chacune des trois composantes du mouvement.

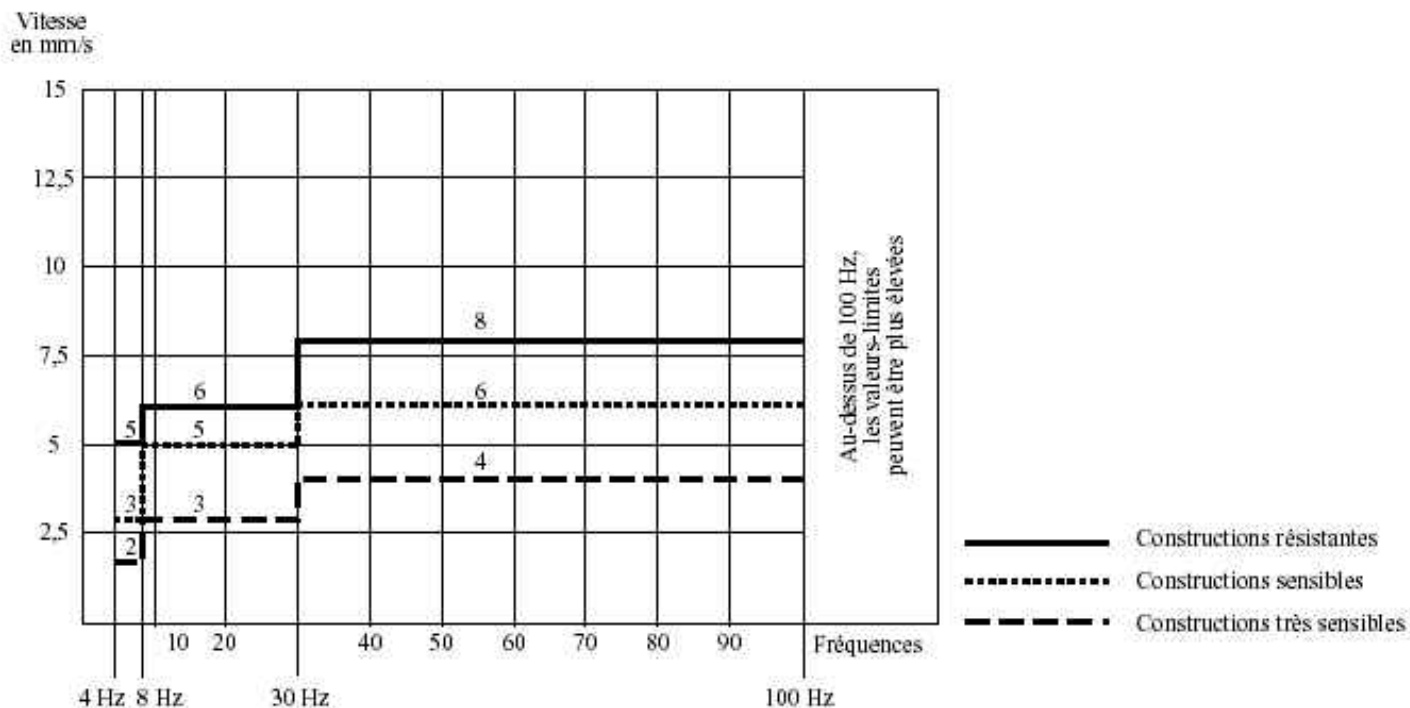
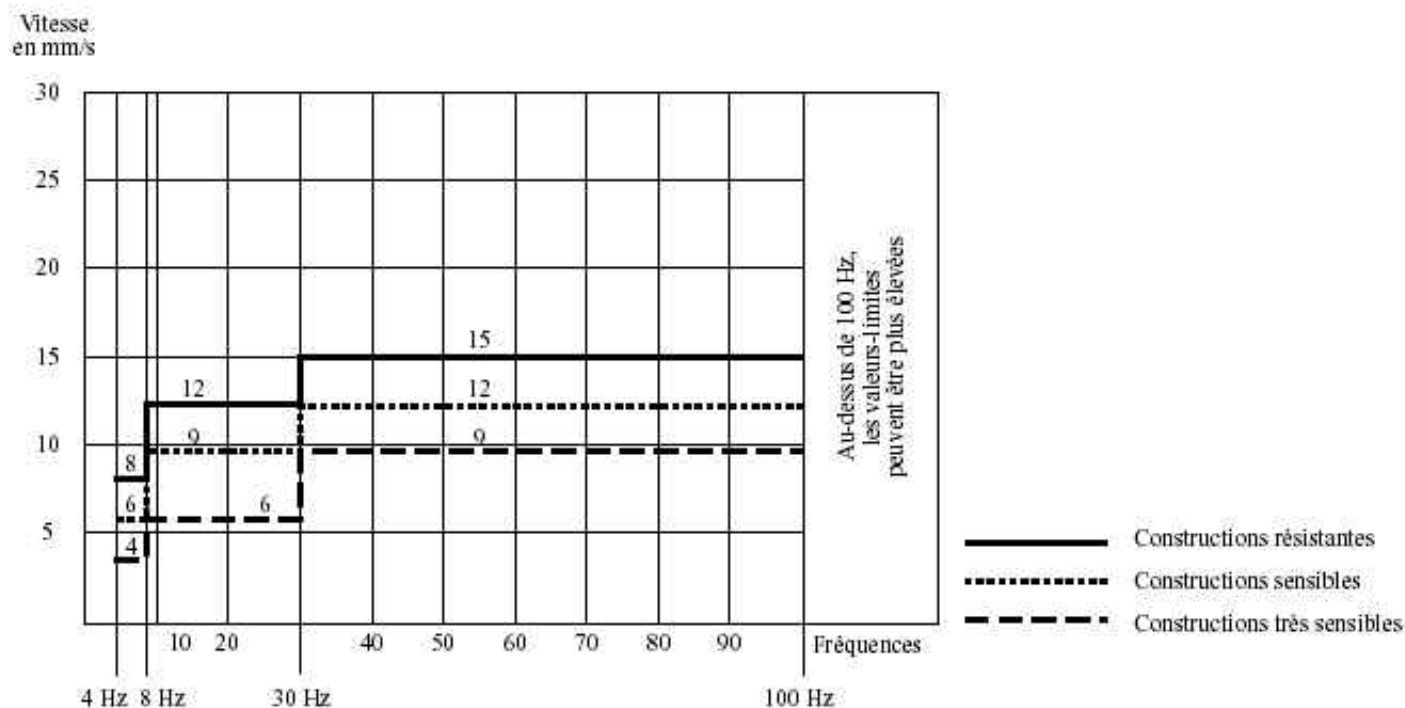


Tableau 2 : Vibrations impulsionnelles a impulsions répétées

Valeurs limites de la vitesse particulière en fonction de la fréquence observée
Méthode de mesure de classe " Contrôle "Ces valeurs limites sont valables pour chacune des trois composantes du mouvement.

TABEAU 2
VIBRATIONS IMPULSIONNELLES À IMPULSIONS RÉPÉTÉES
Valeurs limites de la vitesse particulière en fonction de la fréquence observée
Méthode de mesure de classe « Contrôle »

Ces valeurs limites sont valables pour chacune des trois composantes du mouvement.



1.6. Cas des installations existantes

La méthode de mesure de classe " Contrôle " permet uniquement d'évaluer la réponse vibratoire des constructions en un seul point de mesure.

Ce point de mesure est situé sur l'élément principal de la construction (voir § 1.1 et 1.3, 2e partie).

Les résultats de mesure obtenus avec cette méthode permettent l'évaluation d'une situation vibratoire dans les limites de mise en œuvre de la méthode (voir § 1.4., 2e partie).

Rappelons qu'en dehors de ces limites, il faut avoir recours à la méthode d'" Analyse fine ".

La méthode de mesure de classe " Contrôle " ne peut pas être utilisée pour l'étude de la source vibratoire ou du milieu de propagation.

1.7. Cas des installations nouvelles

La méthode de mesure de classe " Contrôle " ne peut pas être utilisée pour l'évaluation prévisionnelle de l'émission vibratoire dans le cas des installations nouvelles.

Seule la méthode d'" Analyse fine " peut permettre cette approche.

II. Effets indirects

Le processus des effets indirects pouvant résulter des vibrations mécaniques émises dans l'environnement est

décrit dans la première partie des règles techniques.

La mise en œuvre de la méthode de mesure de classe " Contrôle " ne comporte pas l'étude des effets indirects.

Troisième partie

Dispositions communes à la méthode d'" Analyse fine " et à la méthode de mesure de classe " Contrôle "

I. Approches complémentaires

L'étude des effets directs ou indirects des vibrations mécaniques transmises dans l'environnement ne constitue quelquefois que l'un des aspects du problème à résoudre.

Il conviendra parfois d'étudier la perception au point de mesure des bruits aériens pouvant accompagner les vibrations mécaniques.

Les bruits aériens peuvent avoir pour origine :

- une transmission directe par l'air des bruits de la source ;
- une transmission par voie solidienne pouvant engendrer un rayonnement acoustique de certains éléments de la construction excités par les vibrations.

Les bruits aériens peuvent dans certains cas :

- créer une contrainte supplémentaire pour les riverains ;
- engendrer une confusion quant à l'importance des vibrations mécaniques effectivement transmises aux constructions.

Pour l'appréciation des effets des bruits aériens émis dans l'environnement, il convient de se rapporter à l'arrêté du 20 août 1985 du ministre de l'Environnement.

II. Effets des vibrations sur les riverains

En règle générale, on observe que, lorsque l'étude sismique a réglé le problème de la sécurité des constructions, celui des autres nuisances des occupants de ces constructions se trouve résolu.

III. Correction de situations existantes

La réduction de l'émission de vibrations mécaniques, dans le cadre de l'amélioration d'une situation existante, est une opération délicate qu'il convient de confier à des personnes ou des organismes qualifiés.

Lors du choix des solutions techniques pour la réduction des effets des vibrations mécaniques, il conviendra de rechercher des solutions économiquement réalistes.

L'inspecteur indiquera à l'exploitant la fin en lui laissant le choix des moyens. Dans certains cas, une étude sismique après " Correction " de la situation pourra être exigée par lui.

[Commentaires](#)

Domaine d'application

Dans le cas de constructions et ouvrages exclus, la personne ou l'organisme qualifié interviendra et conclura en fonction de règles adaptées aux types de constructions. Ces règles peuvent être différentes des présentes règles techniques.

[Première partie](#)

Exposé des informations fondamentales concernant les phénomènes de vibrations mécaniques, leurs origines et leurs effets sur l'environnement, sur lesquelles sont basées :

- d'une part, la méthode de classe " Contrôle ", objet de la présente réglementation et,
- d'autre part, la méthode d'" Analyse fine " de la réponse vibratoire des constructions, à définir ultérieurement.

[Éléments de base](#)

L'énergie émise par des installations industrielles se partage en deux parties :

- la plus importante est utilisée pour le travail de la machine ou dissipée près de la source (forgeage ou emboutissage de métaux, frottements, échauffements, etc.) ;
- l'autre partie se propage dans le sol ou dans l'eau (milieu de propagation) sous forme d'ondes élastiques. Ces dernières excitent les constructions (récepteurs). Dans certains cas, une partie de l'énergie peut être transmise par l'air.

[Acquisition des données pour la méthode d'" analyse fine "](#)

[I. Effets directs](#)

[1.1. Principes de base](#)

Pour ce type de mesures, l'utilisation des accélérographes est, dans l'état actuel des techniques, à déconseiller car certains matériels sont insuffisamment sensibles aux basses fréquences, souvent observées, qui sont les plus nuisibles aux constructions (bande de 1 Hz à 15 Hz).

[1.3. Précautions opératoires](#)

Par " agitations existantes ", on entend notamment :

- l'action du vent ;
- l'action des vagues en bordure de mer ;
- les activités normales de la vie, externes ou internes à la construction (par exemple la circulation, les ascenseurs...).

[1.4.a. Méthodologie](#)

L'étude de la source permet de définir les caractéristiques de celle-ci : son mode et son cycle de fonctionnement, la part d'énergie transmise au sol (laquelle est fonction du découplage entre la source et le sol), ainsi que la répartition de cette énergie autour de la source.

Elle peut également permettre de préciser la nature et la polarisation des ondes émises dans le sol dont les paramètres dépendent du couplage de la source avec le sol et des propriétés mécaniques de ce dernier.

Ces mesures peuvent permettre de vérifier éventuellement les effets des systèmes de découplage.

L'interprétation de ces résultats pourrait aboutir à définir des moyens permettant de diminuer les vibrations provoquées par différents types de sources.

[1.4.b. Étude du milieu de propagation](#)

L'étude du milieu de propagation peut permettre une meilleure compréhension de la propagation de l'énergie transmise par le sol. Elle permet, en particulier, de déterminer la variation des paramètres de vibrations en fonction de la distance. Or, en champ libre (c'est-à-dire en dehors des zones de réaction des constructions), l'atténuation des ondes sismiques dépend de la fréquence des ondes émises à la source, de la nature des ondes transmises et des propriétés mécaniques du milieu de propagation.

Dans un milieu hétérogène, les ondes subissent des réfractions et des réflexions ; mais elles peuvent aussi être amplifiées par des phénomènes de résonance de couches ou propagées à des distances anormalement grandes par une couche superficielle formant guide d'ondes (ondes guidées).

[1.4.c. Étude des vibrations des constructions](#)

Les vibrations qui constituent l'excitateur sont déterminées par les conditions de fonctionnement de la source et par le milieu de propagation.

Une construction ne peut pas être assimilée à un oscillateur simple. Elle forme, avec le sol sur lequel elle est bâtie et, éventuellement avec les constructions voisines, un système couplé complexe.

Sa réponse comprend :

- les oscillations forcées transmises par le sol à la construction pendant le fonctionnement de la source ;
- les oscillations de l'ensemble de la construction ou de certains de ses éléments avec leur fréquence propre sous l'effet d'une excitation continue avec une fréquence voisine de cette fréquence propre ou sous l'effet d'une impulsion d'énergie suffisante. Ces oscillations propres peuvent se prolonger après l'arrêt de la source ; leur amplitude décroît alors plus ou moins rapidement selon l'amortissement de la construction ou de l'élément concerné ;
- lorsqu'une construction, ou un ensemble de constructions, entre ainsi en oscillations avec une fréquence propre, ces dernières peuvent atteindre de grandes amplitudes (phénomène de résonance). La construction (ou l'ensemble de constructions) excite alors des oscillations dans le sol (zone de réaction).

Les grandes valeurs de paramètres correspondent le plus souvent à une oscillation propre du bâtiment.

Au phénomène de résonance dans une direction horizontale correspond un minimum d'amplitude dans la direction horizontale perpendiculaire.

Le rapport entre les valeurs de la vitesse particulière à un étage et au niveau du sol est très variable selon la nature du sous-sol et selon les constructions.

La composante verticale du mouvement, en général plus petite que les composantes horizontales, peut atteindre de grandes valeurs par suite de la résonance de certains éléments de la construction (planchers).

[1.5. Valeurs limites](#)

Les échelles d'intensité macroséismiques, établies pour les séismes naturels, ne peuvent pas être appliquées aux vibrations mécaniques d'origine industrielle.

Ces errements ont survécu pendant longtemps et refont surface sporadiquement.

En définitive, l'enregistrement des vibrations, à l'aide d'une chaîne séismique, est la seule méthode précise pour l'étude des mouvements du sol et de la réponse des constructions.

[1.7. Cas des installations nouvelles](#)

Une source artificielle de vibrations pour l'évaluation prévisionnelle peut être constituée notamment par un vibreur lourd ou par un générateur de chocs.

[2.1. Principes de base](#)

Rappelons qu'il n'existe pas de maisons sans fissures. Cela tient aux modes de constructions utilisés.

Rappelons aussi que l'agitation normale du sol (agitation microséismique) ainsi que les effets du climat (chaleur, vent, pluie, gel...), les activités normales de l'occupant ou du voisinage (vibrations domestiques normales) et le vieillissement sont autant de facteurs susceptibles de provoquer ou de favoriser des fissurations dans une construction. Comme autre cause susceptible de favoriser la fissuration, on peut citer le retrait des bétons et des mortiers.

Il en est, bien entendu, de même dans le cas où la construction ou la finition de celle-ci ont été défectueuses.

Néanmoins, des informations importantes sur l'origine du phénomène peuvent être obtenues par l'examen :

- de la forme des fissures ;
- des lèvres des fissures ;
- du fait que les fissures traversent le gros oeuvre ou seulement les revêtements.

L'emploi des témoins en plâtre, mis en place sur des fissures existantes pour contrôler les mouvements éventuels d'une paroi fissurée, est d'une signification très douteuse. L'interprétation de la rupture d'un tel témoin est très délicate car la pose de ces témoins est difficile.

[Deuxième partie méthode de classe " contrôle "](#)

[Éléments de base](#)

Certains auteurs proposent de retenir l'emploi comme critère de base, la valeur de la vitesse résultante, calculée

à partir de la formule :

$$V_r = \sqrt{V_{Z_{\max}}^r + V_{L_{\max}}^r + V_{T_{\max}}^r}$$

Elle est à proscrire. En effet, elle risque de pénaliser injustement l'exploitant car les valeurs maximales correspondent à des fronts d'ondes différents.

Les vibrations mécaniques, entretenues ou impulsionnelles, peuvent provoquer des dégâts aux constructions avoisinantes lorsque le mouvement particulaire présente certaines caractéristiques de fréquence, amplitude, vitesse, accélération et durée. Donc, se fonder sur la seule valeur maximale de la vitesse particulaire pour apprécier les effets éventuels des vibrations mécaniques dans l'environnement est insuffisant et dangereux.

C'est pourquoi, les appareils de mesure ne donnant que la valeur-crête ne peuvent pas être valablement retenus pour des interventions administratives ou judiciaires. En effet, leur utilisation peut dans certains cas, pénaliser sans raison l'exploitant dans le cas d'une oscillation de haute fréquence.

Ces appareils ne peuvent être utilisés que comme un dispositif d'alarme et uniquement après des mesures préalables effectuées par la méthode d'" Analyse fine " au cours desquelles il est procédé à un réglage, à un étalonnage et à la détermination d'un seuil d'alarme pour autant que les caractéristiques de la source et les emplacements de mesure demeurent inchangés. Ce seuil d'alarme, exprimé en vitesse particulaire ne saurait être assimilé à une mesure précise.

Ces appareils ne donnent pas la fréquence ; or, pour une même valeur de vitesse correspondant à des fréquences différentes, les amplitudes et les accélérations sont différentes :

- valeur de vitesse correspondant à une haute fréquence : pas de danger ;
- valeur de vitesse correspondant à une basse fréquence : précautions à prendre ;
- valeur de vitesse correspondant à la fréquence propre de l'immeuble : danger.

N'ayant qu'une seule valeur, on néglige, par ailleurs, le nombre de cycles de vibrations, donc on néglige la fatigue éventuelle du bâtiment.

Tableau I

Vibrations continues ou assimilées

Les bandes de fréquence 1-8 Hz, 8-30 Hz, 30-100 Hz et > 100 Hz ont été définies sur les bases suivantes résultant d'une longue expérience pratique :

1. Bande de 1 à 8 Hz

Cette bande correspond aux fréquences propres du gros oeuvre de la plupart des constructions françaises.

2. Bande de 8 à 30 Hz

Cette bande englobe les fréquences propres des éléments constitutifs des constructions (planchers, cloisons, etc.).

3. Bande de 30 à 100 Hz

Cette bande correspond aux réponses des différents éléments de la construction et du milieu de propagation à des chocs successifs.

4. Au-delà de 100 Hz

Au-dessus de 100 Hz, les déplacements sont très faibles et la probabilité de désordre est réduite.