



Contrôle vibratoire des planchers

Document de référence



Background_Floors_FR00.doc – 03.12.2008

Table des matières

| | |
|--|----|
| Résumé | 4 |
| 1. Considérations relatives au dimensionnement | 5 |
| 1.1. Charges | 5 |
| 1.2. Perception et classes de perception | 5 |
| 1.3. Evaluation | 7 |
| 2. Méthode <i>OS-RMS</i> | 9 |
| 2.1. Introduction | 9 |
| 2.2. Méthode par fonction de transfert | 10 |
| 2.3. La valeur efficace de la réponse sous l'effet de la marche d'une personne | 11 |
| 2.3.1. Charge de marche normalisée | 11 |
| 2.3.2. Pondération | 12 |
| 2.4. Calcul de la valeur <i>OS-RMS₉₀</i> | 12 |
| 2.5. Méthode par calcul manuel | 13 |
| 3. Autres méthodes d'analyse | 15 |
| 3.1. Superposition modale | 15 |
| 3.1.1. Réponse forcée | 15 |
| 3.1.2. Réponse transitoire | 16 |
| 3.1.3. Coefficients de pondération | 16 |
| 3.1.4. Cartes d'iso-réponse | 16 |
| 3.1.5. Procédure détaillée | 17 |
| 3.2. Autres considérations relatives aux vibrations | 17 |
| 3.3. Approche simplifiée | 17 |
| 4. Amélioration des structures | 18 |
| 4.1. Augmentation de la masse modale | 18 |
| 4.2. Ajustement de la fréquence | 19 |
| 4.3. Augmentation de l'amortissement | 19 |
| 4.4. Moyens structuraux | 19 |
| 4.5. Mesures correctives | 19 |
| 5. Références | 22 |

Résumé

Ce document contient des informations de base accompagnant l'ouvrage « Contrôle vibratoire des planchers – Guide ». Il présente des méthodes alternatives et plus générales pour la détermination de la réponse des planchers aux forces dynamiques induites par la présence humaine.

Les méthodes théoriques présentées ici ainsi que dans le guide ont été élaborées / étudiées dans le cadre du projet FRCA « Vibration des Planchers (VoF : Vibrations of Floors, en anglais) ». Le guide ainsi que le document de base sont diffusés avec le soutien financier du Fonds de Recherche du Charbon et de l'Acier dans le cadre du projet « HIVOSS ».

1.Considérations relatives au dimensionnement

1.1. Charges

La masse présente dans la structure a un effet très significatif à la fois sur la fréquence de la dalle de plancher et sur la magnitude des vibrations. Il est donc important que la masse répartie utilisée dans l'analyse des vibrations soit représentative de la masse réelle en service, car une masse supérieure réduirait la magnitude de la vibration du plancher à une fréquence donnée. Dans le dimensionnement, il convient de prendre la masse par unité de surface égale au poids propre non pondéré de la structure plus les charges permanentes comme le poids des plafonds et des équipements techniques. En outre, lorsque le concepteur peut être sûr de l'existence de ces charges dans la structure finie, les charges semi-permanentes peuvent être prises en compte de façon additionnelle. En général, il est recommandé que cette prise en compte n'excède pas 10% des charges permanentes nominales. La masse des personnes présentes sur le plancher n'est habituellement pas prise en compte explicitement, mais dans le cas de structures très légères, cette masse supplémentaire est très significative et elle peut être prise en compte.

1.2. Perception et classes de perception

Tout comme l'oreille humaine, la perception humaine des vibrations varie avec la fréquence : l'oreille humaine ne peut détecter les sons de basse fréquence ou de fréquence élevée, et, de même, le corps humain ne peut détecter des vibrations de très haute fréquence. Pour atténuer une réponse aux vibrations afin de prendre en compte cette réponse, on utilise des coefficients de pondération dépendants de la fréquence. Le niveau de vibration qui peut être perçu dépend également de la direction d'incidence sur le corps humain, et pour cela, on utilise le système de coordonnées illustré dans la Figure 1.1 (l'axe z correspond à la direction de la colonne vertébrale humaine). Le seuil de perception (le niveau de vibration au-dessous duquel l'être humain moyen ne peut percevoir aucun mouvement) est plus élevé pour une vibration selon l'axe z que pour une vibration selon l'axe x ou y, ce qui indique qu'une vibration selon l'axe x ou y est plus facilement perçue.

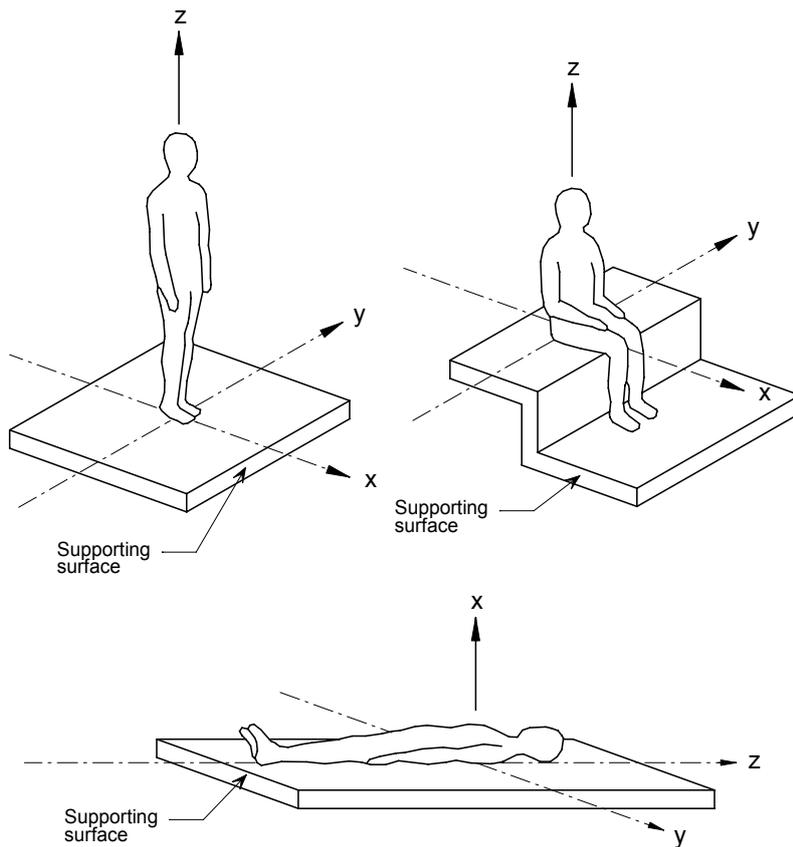


Figure 1.1 Directions pour les Vibrations définies dans l'ISO 10137

Les valeurs de pondération des fréquences sont données dans les normes telles que l'ISO 10137 [4]. Diverses courbes de pondération sont données, selon la direction de la vibration et l'activité. Les courbes de pondération sont également spécifiques au paramètre considéré : vitesse ou accélération. Dans la plupart des cas, l'objectif de l'analyse de vibration est de réduire ou éliminer l'inconfort, mais dans des circonstances particulières, comme les salles d'opération, le niveau de vibration doit être tel qu'il ne puisse être perçu et n'affecte ni la stabilité de la main ni la vision. La perception et l'inconfort utilisent les mêmes pondérations mais habituellement la perception présente un seuil admissible plus faible (c'est-à-dire qu'un sujet peut détecter une vibration sans en ressentir d'inconfort), tandis qu'il existe différentes courbes de pondération pour prendre en compte le contrôle de la main et de la vision. Les courbes de pondération pour la perception selon l'axe z (W_b) ainsi que selon l'axe x et y (W_d) sont données dans la Figure 1.2.

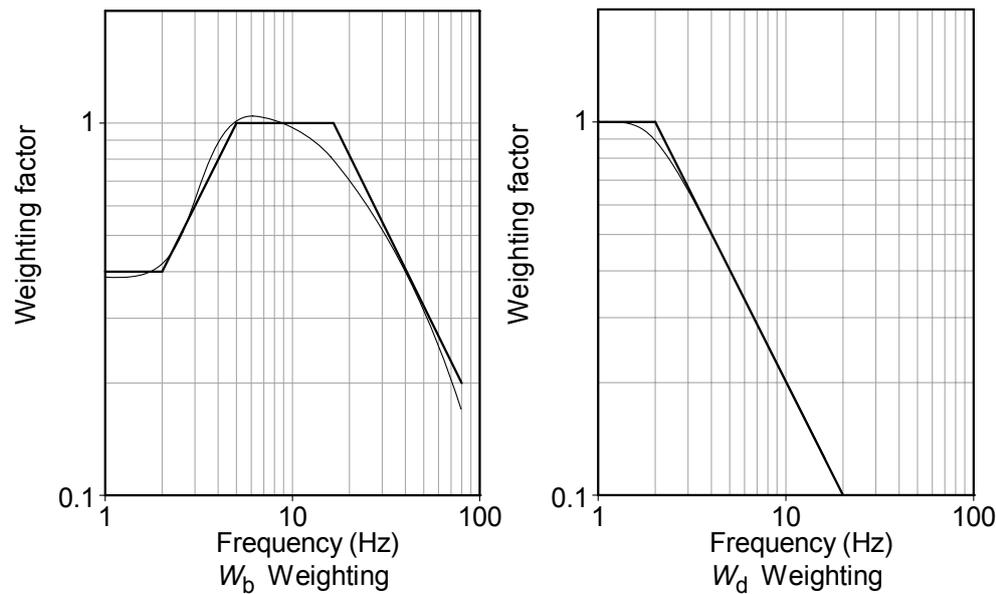


Figure 1.2 Courbes de pondération fréquence-accélération W_b et W_d

Pour illustrer l'utilisation des courbes, en utilisant la courbe W_b pour l'inconfort pour la vibration selon l'axe z, une onde sinusoïdale de 8 Hz donne la même impression qu'une onde sinusoïdale à 2,5 Hz ou 32 Hz avec une amplitude double.

1.3. Evaluation

La réponse d'un système à une excitation régulière prend habituellement la forme de l'un des tracés illustrés dans la Figure 1.3, selon la comparaison entre la fréquence d'excitation et la fréquence propre du système.

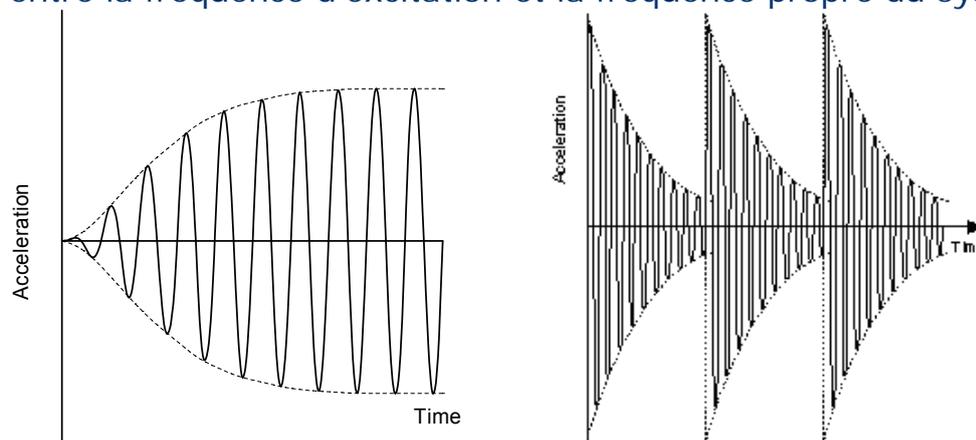


Figure 1.3 Enveloppes de réponse

Lorsque la fréquence de l'excitation (ou les harmoniques supérieures de l'excitation) est proche de la fréquence propre du plancher, la réponse qui en résulte prend la forme indiquée sur la partie gauche de la Figure 1.3 – une montée graduelle de l'enveloppe de réponse à partir de zéro jusqu'à un niveau stable. Cette réponse est connue sous le nom de réponse résonnante (parce que le plancher résonne avec l'excitation) ou réponse forcée. Pour l'excitation résultant d'activités de marche, cette sorte de réponse se produit

habituellement pour des planchers dont la fréquence propre fondamentale est inférieure à 9-10 Hz.

Lorsque la fréquence d'excitation est sensiblement inférieure à la fréquence propre du plancher, la forme d'enveloppe de réponse indiquée sur la partie droite de la Figure 1.3 est une forme typique, connue sous le nom de réponse transitoire. Dans ce cas, la plaque de plancher répond à l'excitation comme s'il s'agissait d'une série d'impulsions, la vibration provoquée par un pas disparaissant avant le pas suivant. Ces types d'excitation peuvent être observés sur les tracés des $OS-RMS_{90}$ car les lignes d'iso-valeurs deviennent moins dépendantes de la fréquence spécifique lorsque la fréquence de plancher s'élève au-delà de 9 Hz, montrant que la réponse forcée devient une réponse transitoire.

2. Méthode *OS-RMS*

2.1. Introduction

La méthode par valeur efficace de la réponse sous l'effet de la marche d'une personne (*OS-RMS*) est basée sur les résultats d'un projet de recherche financé par la CECA et consacré aux vibrations des planchers, voir [1]. Ce chapitre décrit brièvement la méthode *OS-RMS* qui constitue la base de la procédure de vérification du dimensionnement.

La valeur *OS-RMS* représente la réponse d'un plancher mis en vibration par une personne marchant sur ce plancher. Elle est obtenue à partir de caractéristiques de plancher mesurées ou simulées et d'une fonction de charge de marche normalisée pour une personne possédant un poids et un rythme de marche donnés.

Dans le calcul de la valeur *OS-RMS*, le point d'excitation et les points de réponse ne doivent pas nécessairement coïncider. En outre, on suppose que le point d'excitation reste fixe, c'est-à-dire que l'itinéraire de la marche n'est pas pris en compte. En général, les points d'excitation et de réponse sont choisis à l'emplacement où l'on prévoit les amplitudes de vibration maximales (dans les planchers courants, il s'agit habituellement du milieu de la portée du plancher).

Dans la vérification du dimensionnement, le fractile 90 % des valeurs *OS-RMS* obtenues pour les poids et rythmes de marche (ou fréquence de pas) de différentes personnes doit être calculé. Ce fractile 90 % est désignée comme la valeur *OS-RMS₉₀* et devra normalement rester inférieur aux valeurs recommandées dans le Tableau 1 du guide.

Une seule valeur *OS-RMS* pour une fréquence de pas et un poids de personne donnés peut être obtenue au moyen de l'une des trois méthodes suivantes :

1. Méthode par calcul manuel
2. Méthode par fonction de transfert utilisant des valeurs mesurées
3. Méthode par fonction de transfert utilisant une analyse du plancher par éléments finis

La méthode par calcul manuel est la méthode couverte par ce guide et elle est applicable aux planchers pouvant être aisément décrits comme systèmes amortis à un degré de liberté. A la base de la méthode par calcul manuel, on trouve la méthode par fonction de transfert. Une vue d'ensemble de la procédure de dimensionnement, comparant les trois méthodes, est donnée à la Figure 2.1.

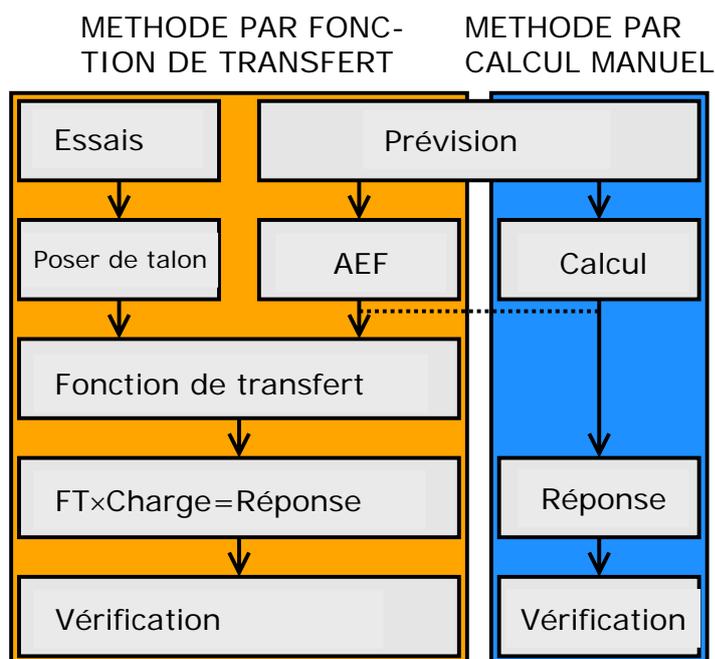


Figure 2.1 : Aperçu simplifié du dimensionnement au moyen de la méthode OS-RMS.

2.2. Méthode par fonction de transfert

Dans la méthode par fonction de transfert, les caractéristiques du plancher sont décrites en termes de fonction de transfert. La fonction de transfert représente la réponse d'une structure lorsqu'elle est soumise à une charge harmonique (fonction de charge sinusoïdale variant en fonction du temps) avec une fréquence et une amplitude données égales à l'unité.

Lorsqu'on utilise cette fonction en combinaison avec la charge de marche normalisée, on peut déterminer la valeur OS-RMS.

La méthode par fonction de transfert peut être appliquée lorsque la réponse du plancher est obtenue soit par des mesures soit par des calculs par éléments finis.

L'utilisation de la méthode par fonction de transfert implique que le calcul de la réponse du plancher soit effectué dans le domaine fréquentiel.

Une autre possibilité, lorsqu'on utilise un calcul aux éléments finis, est d'obtenir la réponse dans le domaine temporel. Ceci peut prendre un temps assez long car la détermination de la valeur OS-RMS₉₀ exige de nombreux calculs de réponses.

2.3. La valeur efficace de la réponse sous l'effet de la marche d'une personne

La valeur *OS-RMS* est obtenue à partir de la réponse d'un plancher à une charge de marche normalisée. Elle est définie comme la valeur moyenne quadratique des maxima de vitesses pondérées sur un intervalle donné en un point du plancher. L'intervalle est choisi en partant du pic le plus haut de la réponse et du pic précédent ou suivant de la réponse, voir Figure 2.2.

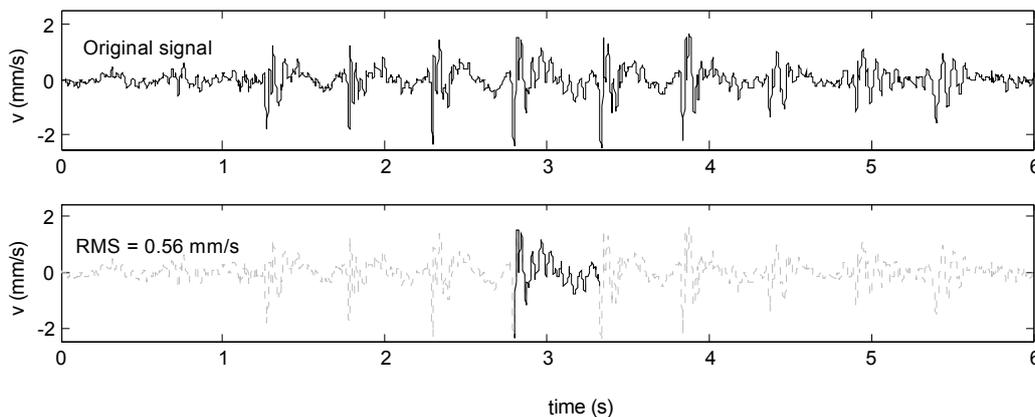


Figure 2.2 : Choix de l'intervalle pour la réponse en termes de vitesse, pour le calcul de la valeur OS-RMS.

Sur la base de cette définition, l'intervalle au cours duquel on obtient la valeur *OS-RMS* correspond à la durée d'un seul pas. Ceci assure une mesure cohérente pour le niveau de vibration¹.

2.3.1. Charge de marche normalisée

La charge de marche normalisée est considérée comme une série de pas consécutifs dans laquelle chaque charge de pas (ou de poser de pied) est décrite par un polynôme. La charge de pas normalisée est donnée par l'expression :

$$\frac{F(t)}{G} = K_1 t + K_2 t^2 + K_3 t^3 + K_4 t^4 + K_5 t^5 + K_6 t^6 + K_7 t^7 + K_8 t^8$$

où *G* est la masse de la personne. Les coefficients *K*₁ à *K*₈ dépendent de la fréquence de pas (*f*_s) et sont donnés dans le Tableau 2.1. La durée de charge, *t*_s, est donnée par la formule suivante :

$$t_s = 2.6606 - 1.757 \cdot f_s + 0.3844 \cdot f_s^2$$

Pour *t* > *t*_s, *F*(*t*) = 0.

¹ Les valeurs *OS-RMS* ainsi définies peuvent être comparées sans ambiguïté les unes aux autres. Si, en revanche, on utilisait un intervalle constant supérieur à la durée d'un seul pas, alors la valeur *RMS* au-delà de cet intervalle dépendrait de la fréquence de pas et de la durée de l'intervalle.

Tableau 2.1 : Coefficients K_1 to K_8 pour une fréquence de pas donnée (f_s)

| | $f_s \leq 1,75$ | $1,75 < f_s < 2$ | $f_s \geq 2$ |
|-------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| K_1 | $-8 \times f_s + 38$ | $24 \times f_s - 18$ | $75 \times f_s - 120.4$ |
| K_2 | $376 \times f_s - 844$ | $-404 \times f_s + 521$ | $-1720 \times f_s + 3153$ |
| K_3 | $-2804 \times f_s + 6025$ | $4224 \times f_s - 6274$ | $17055 \times f_s - 31936$ |
| K_4 | $6308 \times f_s - 16573$ | $-29144 \times f_s + 45468$ | $-94265 \times f_s + 175710$ |
| K_5 | $1732 \times f_s + 13619$ | $109976 \times f_s - 175808$ | $298940 \times f_s - 553736$ |
| K_6 | $-24648 \times f_s + 16045$ | $-217424 \times f_s + 353403$ | $-529390 \times f_s + 977335$ |
| K_7 | $31836 \times f_s - 33614$ | $212776 \times f_s - 350259$ | $481665 \times f_s - 888037$ |
| K_8 | $-12948 \times f_s + 15532$ | $-81572 \times f_s + 135624$ | $-174265 \times f_s + 321008$ |

La fonction de charge de marche normalisée est construite à partir de la charge de pas définie ci-dessus, en ajoutant la charge de pas à cette fonction de manière répétée à intervalles de $1/f_s$. Des exemples de charge de pas normalisée et de fonctions de charge de marche sont donnés dans la Figure 2-3.

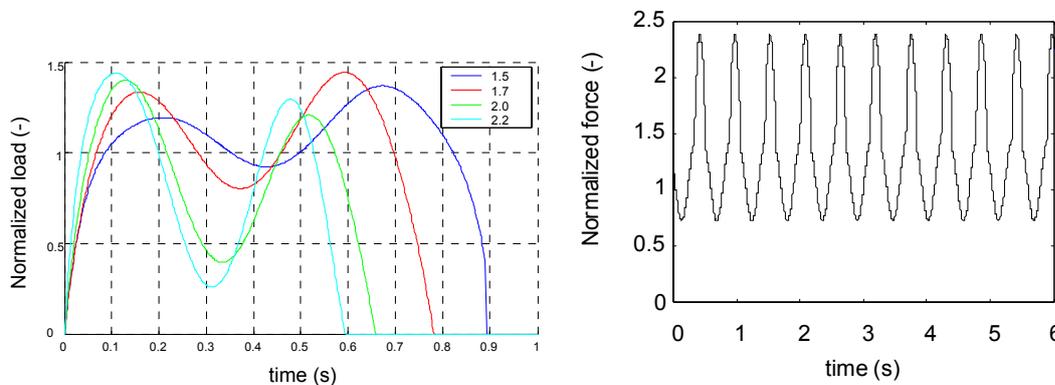


Figure 2-3 : Charge de pas pour quatre fréquences de pas différentes (gauche) et exemple de fonction de charge de marche (droite).

2.3.2. Pondération

La valeur *OS-RMS* est déterminée à partir de la réponse pondérée en termes de vitesse en un point du plancher. On obtient la réponse pondérée en appliquant la fonction de pondération suivante :

$$|H(f)| = \frac{1}{v_0} \frac{1}{\sqrt{1+(f_0/f)^2}}$$

où $f_0=5.6$ Hz et v_0 est la vitesse de référence égale à 1,0 mm/s. En raison de la division par une vitesse de référence, la réponse pondérée est adimensionnelle.

2.4. Calcul de la valeur *OS-RMS*₉₀

Comme il a été dit précédemment, la vérification finale du dimensionnement est basée sur la valeur *OS-RMS*₉₀. Cette valeur est obtenue en calculant la valeur *OS-RMS* pour toutes les combinaisons possibles de rythmes de marche et de poids de personnes définies dans le Tableau 2-2. Selon ce tableau, il est nécessaire de calculer un total de $35 \times 20 = 700$ valeurs *OS-RMS* correspondant à chaque combinaison possible. A partir de la fréquence relative

(probabilité) de chaque combinaison, on obtient la fréquence cumulative de la valeur *OS-RMS*. La valeur *OS-RMS* correspondant à une fréquence cumulative de 90 % définit la valeur *OS-RMS*₉₀ recherchée².

Tableau 2-2 : Fonction de répartition de probabilité cumulative pour le rythme de marche et la masse de personnes

| Probabilité cumulative | Fréquence de pas f_s (Hz) | Probabilité cumulative | Masse (kg) |
|------------------------|-----------------------------|------------------------|------------|
| 0,0003 | 1,64 | 0,0000 | 30 |
| 0,0035 | 1,68 | 0,0002 | 35 |
| 0,0164 | 1,72 | 0,0011 | 40 |
| 0,0474 | 1,76 | 0,0043 | 45 |
| 0,1016 | 1,80 | 0,0146 | 50 |
| 0,1776 | 1,84 | 0,0407 | 55 |
| 0,2691 | 1,88 | 0,0950 | 60 |
| 0,3679 | 1,92 | 0,1882 | 65 |
| 0,4663 | 1,96 | 0,3210 | 70 |
| 0,5585 | 2,00 | 0,4797 | 75 |
| 0,6410 | 2,04 | 0,6402 | 80 |
| 0,7122 | 2,08 | 0,7786 | 85 |
| 0,7719 | 2,12 | 0,8804 | 90 |
| 0,8209 | 2,16 | 0,9440 | 95 |
| 0,8604 | 2,20 | 0,9776 | 100 |
| 0,8919 | 2,24 | 0,9924 | 105 |
| 0,9167 | 2,28 | 0,9978 | 110 |
| 0,9360 | 2,32 | 0,9995 | 115 |
| 0,9510 | 2,36 | 0,9999 | 120 |
| 0,9625 | 2,40 | 1,0000 | 125 |
| 0,9714 | 2,44 | | |
| 0,9782 | 2,48 | | |
| 0,9834 | 2,52 | | |
| 0,9873 | 2,56 | | |
| 0,9903 | 2,60 | | |
| 0,9926 | 2,64 | | |
| 0,9944 | 2,68 | | |
| 0,9957 | 2,72 | | |
| 0,9967 | 2,76 | | |
| 0,9975 | 2,80 | | |
| 0,9981 | 2,84 | | |
| 0,9985 | 2,88 | | |
| 0,9988 | 2,92 | | |
| 0,9991 | 2,96 | | |
| 0,9993 | 3,00 | | |

2.5. Méthode par calcul manuel

Dans la méthode par calcul manuel, le calcul de la réponse et le traitement statistique consécutif effectué pour obtenir la valeur *OS-RMS*₉₀ ont été faits

² En effet, la valeur *OS-RMS* est traitée comme une variable aléatoire et on recherche sa fractile 90 %.

au préalable. Dans cette méthode, on suppose que la structure est un système amorti à un degré de liberté aisément modélisé par un ensemble masse-ressort-amortisseur. Des valeurs $OS-RMS_{90}$ correspondant à diverses combinaisons d'amortissement, de rigidité et de masse de plancher ont été calculées et sont présentées dans les graphiques données dans ce guide. Dans ce cas, il suffit de déterminer les paramètres modaux (masse, rigidité et amortissement) pour la structure examinée, puis de relever la valeur $OS-RMS_{90}$ correspondante dans les graphiques.

3. Autres méthodes d'analyse

3.1. Superposition modale

Comme alternative à la méthode probabiliste avec la fonction de transfert donnée par l'approche *OS-OMS*, on peut utiliser également des techniques de superposition modale pour déterminer la réponse d'un plancher aux vibrations induites par l'activité humaine. Ces vibrations peuvent être provoquées par la marche ou par des activités plus mouvementées, comme l'aérobic ou la danse. Dans cette approche, le plancher est modélisé par éléments finis et les propriétés modales, comme les fréquences, les masses modales et les formes de mode, sont extraites.

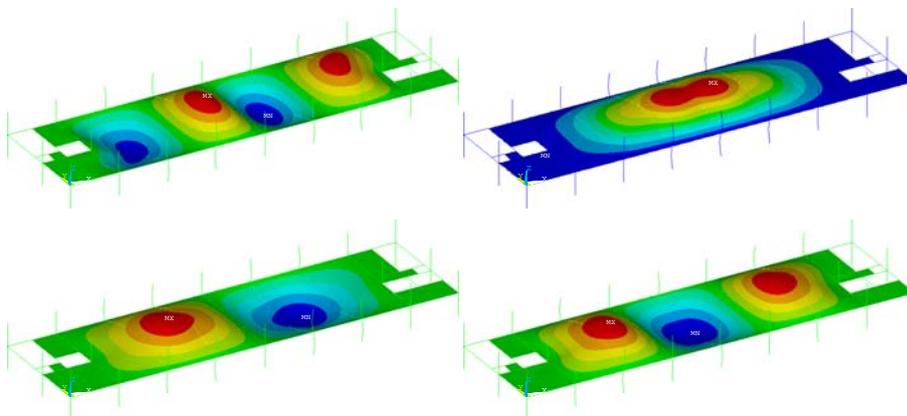


Figure 3.1 : Formes de mode pour un plancher typique

Une fois que les réponses modales ont été extraites, on effectue une analyse de réponse pour déterminer les accélérations du plancher. Les forces d'entrée sont déterminées en décomposant les forces d'excitation en composantes fréquentielles au moyen de séries de Fourier. En utilisant les valeurs de calcul des coefficients de Fourier, on élimine l'exigence de prise en compte de la variabilité de la fréquence de pas et de la masse corporelle, et une accélération de calcul peut être obtenue simplement par une analyse de la fréquence de pas dans le cas le plus défavorable.

Les accélérations sont calculées de deux façons différentes, selon que l'on prévoit une réponse forcée ou transitoire.

3.1.1. Réponse forcée

Pour ce cas, on calcule les accélérations au moyen d'une théorie dynamique simple, où l'accélération de chaque mode résultant de chaque harmonique de l'excitation est égale au rapport de la force appliquée à la masse modale, multiplié par un coefficient ou facteur d'amplification dynamique (FAD). Ce coefficient prend en compte le taux d'amortissement présent dans la structure et le rapport entre la fréquence de pas (ou l'harmonique considérée) et la fréquence modale. Pour le cas le plus défavorable, l'harmonique de la fréquence de pas est égale à la fréquence modale, et le FAD est égal à $1 / 2\xi$,

où ξ est le taux d'amortissement. Dans les planchers courants $\xi = 3 \%$, et le coefficient d'amplification se situe donc dans la région de 17. Le calcul prend également en compte la magnitude de la déformée modale aux points d'excitation et de réponse considérés (qui peuvent coïncider ou être distincts). Ceci signifie que l'effet de toutes les déformées modales considérées peut être combiné sans surestimer les niveaux de vibration. Une fois que les niveaux d'accélération pour chaque déformée modale et chaque harmonique d'excitation ont été calculés, ils sont combinés pour produire une accélération efficace en un point sous l'effet de l'excitation en un autre point.

3.1.2. Réponse transitoire

Pour le cas de vibration transitoire, on applique une charge d'impulsion à chaque déformée modale au point d'excitation, et on calcule l'accélération de pointe correspondante en comparant cette impulsion à la masse modale, à la fréquence modale et à la déformée modale. La décroissance de l'accélération est gouvernée par l'amortissement ; on peut calculer l'accélération efficace en sommant sur les différents modes.

3.1.3. Coefficients de pondération

Au cours du calcul de l'accélération, les coefficients de pondérations indiqués dans la Figure 1.2 sont pris en compte pour s'assurer que l'accélération calculée se situe dans le domaine de la perception humaine. L'accélération pondérée peut alors être comparée à des valeurs limites telles celles données dans l'ISO 10137 ou autres normes ou guides.

3.1.4. Cartes d'iso-réponse

En effectuant cette analyse pour les points d'excitation et de réponse coïncidents sur la totalité de la plaque de plancher, on peut établir le comportement de vibration de différentes zones de plancher, comme indiqué dans la Figure 3.2. Ceci permet à l'architecte ou au maître d'ouvrage de positionner les parties du bâtiment sensibles aux vibrations (comme les salles d'opération, les laboratoires, etc.) dans les zones susceptibles de présenter un bon comportement aux vibrations, et, inversement, de situer les parties moins sensibles (comme les ateliers, les cantines, etc.) dans les zones les moins stables du plancher.

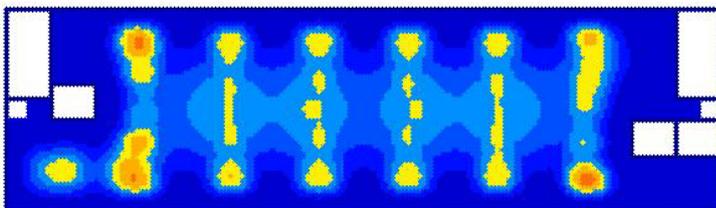


Figure 3.2 : Variation du comportement vibratoire sur un plancher typique

3.1.5. Procédure détaillée

Une procédure de calcul plus complète, comprenant des valeurs d'entrée comme les coefficients de Fourier pour les activités de marche et de danse, ainsi que des critères d'acceptabilité définis dans des normes, est donnée dans la publication SCI 354, intitulée « Dimensionnement des Planchers pour la Vibration : Une Nouvelle Approche (Design of Floors for Vibration: A New Approach, en anglais) » [2]. Cette publication comprend également un guide sur la modélisation des planchers avec les logiciels de calcul aux éléments finis.

La méthode P354 donne des résultats similaires à ceux obtenus par la méthode $OS-RMS_{90}$, mais elle donne une valeur qui est plus directement comparable aux limites données dans les normes telles que l'ISO 10137. L'effet du déplacement de la vibration sur la dalle de plancher, comme le déplacement entre un couloir fréquenté et une salle d'opération sensible, peut être pris en compte, et différents coefficients de pondération peuvent être utilisés pour différents scénarios. Cela permet également de prendre en compte différentes excitations, qu'elles proviennent d'activités de marche ou de danse ou du fonctionnement de machines, et d'étudier l'effet de la vibration sur différents récepteurs (comme les équipements de mesure sensibles).

3.2. Autres considérations relatives aux vibrations

Un autre aspect important du calcul des vibrations examiné dans la méthode P354 est l'amplification des charges au cours des activités rythmiques. Les activités humaines pouvant induire des vibrations soumettent toujours le plancher à une charge supérieure à la charge statique, mais dans le cas de la marche, cette augmentation est peu significative et fait certainement bien partie des charges imposées prises en compte pour le dimensionnement. Toutefois, lorsqu'un groupe de personnes se livre à une activité rythmique combinée (habituellement sur de la musique, comme dans le cas de l'aérobic ou de la danse, par exemple) la charge additionnelle provoquée par l'activité peut être supérieure aux charges prises en compte pour le dimensionnement, et elle doit être prise en compte explicitement. Dans les cas extrêmes, elle peut également entraîner des problèmes de fatigue dans la structure.

3.3. Approche simplifiée

Comme alternative à la production d'un modèle de la structure par éléments finis, la méthode P354 présente une approche de calcul manuel simplifiée. Cette approche est basée sur une étude paramétrique d'un certain nombre de modèles au moyen de l'approche de superposition modale, et elle calcule aussi une accélération qui peut être comparée aux valeurs limites des normes.

4. Amélioration des structures

On peut constater les trois façons les plus efficaces d'améliorer la réponse d'un plancher en examinant les tracés *OS-RMS*₉₀. Deux de ces tracés, effectués à différents niveaux d'amortissement, sont reproduits dans la Figure 4.1.

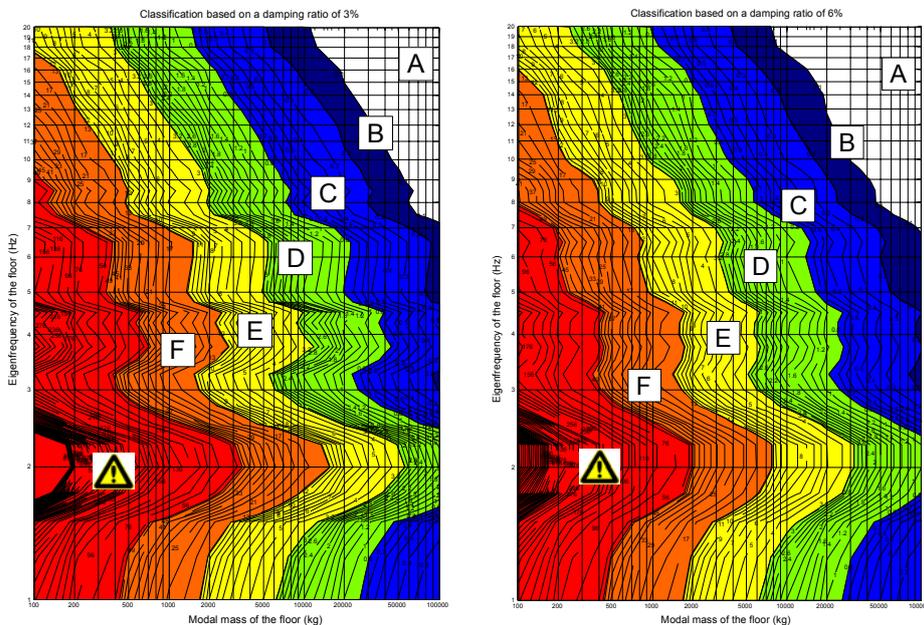


Figure 4.1 : Tracés OS-RMS pour un amortissement de 3% (à gauche) et un amortissement de 6% (à droite)

Ces tracés montrent clairement que le comportement de vibration du plancher peut être amélioré de trois façons différentes : augmentation de la masse modale (c'est-à-dire un déplacement de gauche à droite dans un tracé); ajustement de la fréquence (c'est-à-dire un déplacement vertical dans un tracé); ou augmentation de l'amortissement (c'est-à-dire un déplacement depuis le même point sur le tracé de gauche vers le point équivalent sur le tracé de droite). Lorsqu'on utilise des méthodes d'analyse plus sophistiquées, il est également possible d'ajuster le tramage afin d'isoler des zones du plancher : par exemple, lorsqu'on examine la vibration de salles d'opération dans les hôpitaux.

4.1. Augmentation de la masse modale

Habituellement, la façon la plus efficace d'améliorer le comportement de vibration d'une structure consiste à augmenter la quantité de masse participant au mouvement. Ceci peut être fait en augmentant la masse répartie du plancher (en augmentant la hauteur de la dalle, en ajoutant une chape, etc.), ou en ajustant les rigidités de la structure en acier pour qu'une aire plus grande du plancher participe à la déformée modale. Une aire de plancher supérieure possède naturellement une masse modale supérieure, et ceci contribue à réduire la réponse du plancher. Cependant, l'augmentation de la masse de la structure affecte également la fréquence, et il faut donc pren-

dre soin de s'assurer que la réponse de structure n'augmente pas, même si la masse additionnelle abaisse la fréquence.

4.2. Ajustement de la fréquence

La fréquence de la dalle de plancher peut être aisément augmentée en augmentant la rigidité des poutres ou, pour les structures existantes, en ajoutant des renforts sur les semelles de la structure en acier. Les avantages de cette pratique ne sont pas nécessairement significatifs, car jusqu'à ce que la fréquence du plancher soit supérieure à 9-10 Hz, le comportement vibratoire dépend peu de la fréquence et seul « l'accord » de la structure entre les harmoniques de la fonction d'excitation améliore la réponse.

4.3. Augmentation de l'amortissement

En théorie, le moyen le plus efficace de réduire la réponse aux vibrations d'un plancher est d'augmenter l'amortissement existant, car la magnitude de la réponse du plancher diminue environ de moitié lorsque l'amortissement est doublé. Cependant, il est difficile d'augmenter l'amortissement des planchers, car les systèmes d'amortissement nécessitent en général d'être connectés en des points où les mouvements sont importants afin d'être pleinement efficaces. Ceci impliquerait la fixation des amortisseurs entre les planchers au centre des poutres ou des dalles, et ce n'est pas pratiquement réalisable dans la plupart des cas. On peut ajouter un amortissement significatif en utilisant des amortisseurs dynamiques accordés, mais ceci ne constitue généralement pas un souci au stade du dimensionnement, car il s'agit plutôt d'une mesure corrective.

4.4. Moyens structuraux

Pour les parties de plancher particulièrement sensibles, comme les salles d'opération, il peut être préférable d'isoler la partie concernée du reste du plancher plutôt que de tenter de dimensionner la totalité de la dalle de plancher pour qu'elle satisfasse les exigences strictes de la partie sensible. Ceci peut être obtenu en réalisant des zones possédant des dispositions de trames différentes (différentes portées, par exemple), en utilisant des poutres possédant des rigidités sensiblement supérieures à celles des poutres courantes, ou en ajoutant des poteaux supplémentaires autour des zones sensibles. Le moyen le plus facile d'évaluer ces modifications consiste à modéliser le plancher par les éléments finis, et d'ajuster la disposition jusqu'à ce que les déformées modales montrent l'isolation des zones sensibles.

4.5. Mesures correctives

Les actions correctives sont souvent coûteuses et parfois impossibles à réaliser dans le cadre de contraintes physiques réalistes. Dans certaines situations, il peut être possible d'adopter des mesures qui ne feront que réduire les désagréments associés à la vibration au lieu de modifier la nature ou l'importance de la vibration elle-même. Ces mesures comprennent l'élimination ou la réduction des facteurs de désagrément associés, tels le bruit provenant des composants qui vibrent, la modification du moment de l'activité à

l'origine du problème, ou la modification de la disposition architecturale pour éloigner les occupants des zones problématiques.

En général, les méthodes d'amélioration des structures détaillées ci-dessus s'appliquent également aux mesures correctives après construction. La modification de la masse du plancher après la construction peut être efficace, mais il faut prendre soin de ne pas réduire la fréquence du plancher à un niveau qui annulerait les effets bénéfiques de l'augmentation de la masse. La fréquence elle-même peut être augmentée en soudant des renforts sur les semelles des poutres existantes et, en utilisant cette solution combinée à une augmentation de la masse (au moyen d'une chape, par exemple), on peut améliorer sensiblement la réponse aux vibrations.

L'amortissement de la structure peut également être amélioré, et les méthodes habituelles pour ce faire sont les suivantes :

- ❖ Modification de l'emplacement des composants non structuraux comme les cloisons
- ❖ Installation d'amortisseurs dynamiques accordés
- ❖ Installation de matériaux d'amortissement spécialisés

La modification de la position ou l'augmentation du nombre de composants non structuraux améliore l'amortissement d'un système de plancher. Malheureusement, étant donné que l'amortissement est une caractéristique éminemment variable, il est impossible de quantifier précisément l'amélioration exacte qui sera obtenue en modifiant ces composants. En général, des essais de comportement sont nécessaires pour établir l'efficacité de ces mesures correctives, et il peut être indispensable d'effectuer plusieurs essais avant d'obtenir des améliorations.

Les amortisseurs dynamiques accordés, qui permettent un contrôle passif des mouvements du plancher, peuvent être utilisés pour réduire la réponse du plancher aux actions forcées comme le poser de pied. Un amortisseur dynamique accordé (ADA) est constitué d'une masse fixée à la structure du plancher par l'intermédiaire d'un ressort et d'un dispositif d'amortissement. Un ADA n'est toutefois efficace que si la fréquence propre de l'ADA est étroitement corrélée avec celle du mode de vibration du plancher posant problème. Les ADA qui sont initialement accordés sur les modes de vibration du plancher peuvent se désaccorder à la suite de modifications des fréquences propres du plancher résultant d'altérations des caractéristiques du plancher ou de mouvements locaux de matériaux. Il convient de noter que les ADA sont efficaces dans une plage de fréquences limitée. Par conséquent, un plancher possédant plusieurs fréquences problématiques peut nécessiter l'utilisation de plusieurs ADA pour réduire sa réponse. Habituellement, la masse d'un ADA se situe entre 2 % et 5 % de la masse modale pour chaque mode nécessitant un accord et ceci peut entraîner des problèmes de résistance au chargement supplémentaire.

Des matériaux spécialisés sont en général utilisés dans les systèmes d'amortissement de type sandwich. Des matériaux à forte dissipation d'énergie sont intercalés entre la structure existante et une tôle métallique ajoutée, et les déformations qui sont par la suite induites dans cette couche (à la fois traction / compression et cisaillement) dissipent l'énergie par hystérésis. Il convient de solliciter un avis spécialisé pour déterminer si cette méthode d'amortissement est appropriée et bénéfique (par exemple, l'efficacité du matériau peut dépendre de la température ou de l'amplitude des déformations).

5. Références

- [1] Commission Européenne – Recherches Techniques sur l'Acier : “Généralisation des critères concernant les vibrations des planchers pour les bâtiments industriels, administratifs, résidentiels et publics, et les gymnases”, Rapport RFCS EUR 21972 EN, ISBN 92-79-01705-5, 2006, <http://europa.eu.int>
- [2] A.L. Smith, S. J. Hicks, P. J. Devine: “Design of Floors for Vibration: A New Approach”. SCI 2007, ISBN 1-85942-176-8
- [3] Waarts, P. *Trillingen van vloeren door lopen: Richtlijn voor het voorspellen, meten en beoordelen*. SBR, Septembre 2005.
- [4] ISO 10137 – Bases pour le dimensionnement des structures – Aptitude au service des bâtiments et passages piétonniers, relative aux vibrations, International Organization for Standardization, 2007

