

# Confort vibratoire des planchers : Etat de l'art

Youssef EL ASRI, Ingénieur doctorant, CTICM-INSA/ULG

Vincent DENOËL, Professeur, Université de Liège

Maël COUCHAUX, Maître de Conférences, INSA de Rennes

Mohammed HJIAJ, Professeur des Universités, INSA de Rennes

Mladen LUKIĆ, Chef de projets recherche, CTICM

## 1 Introduction

L'utilisation de structures métalliques et mixtes toujours plus élancées et flexibles a parfois engendré des problèmes vibratoires dans les ouvrages d'art (Millenium Bridge, passerelle Solférino) et même au niveau de planchers de bâtiments. Ces problèmes peuvent être causés par l'activité humaine, comprenant la marche, ainsi que les activités rythmiques qui se sont fortement développées ces dernières années (salles de sport, danse, etc.). Les occupants peuvent alors ressentir un certain degré d'inconfort.

L'Eurocode fournit peu d'éléments pour le dimensionnement d'une structure vis-à-vis du confort vibratoire [1]. Les limites de fréquence propre du mode fondamental de vibration selon l'usage du plancher ne s'avèrent pas toujours suffisantes en pratique, notamment en présence d'activités rythmiques. Des normes internationales, telles que l'ISO 2631 ([2], [3]) et l'ISO 10137 [4] ou nationales comme DIN 4150-2 [5], fournissent toutefois des éléments, afin d'évaluer le confort vibratoire des occupants d'une structure exposée à des vibrations. Ces normes sont basées sur une approche en accélération ou vitesse qui seront présentées dans la section 2 du présent article.

Suite aux retours d'expérience précédemment cités, des guides ont été proposés dans les années 2000 par l'AISC/CISC [12] et le SCI [11], avec l'objectif d'évaluer le niveau de performance vibratoire des planchers de construction. Ces guides sont basés sur une approche en accélération et se réfèrent aux normes ISO précitées. Le guide HiVoSS [7], basé sur un projet européen [6], adopte par contre une approche en vitesse et propose des abaques permettant d'évaluer le confort de planchers soumis aux vibrations verticales causées par la marche d'une seule personne. Les méthodes inhérentes à ces trois guides sont présentées dans la section 3 et leurs limitations sont également mises en évidence, afin de mettre en lumière leurs avantages et inconvénients et proposer des pistes d'amélioration dans les prochains guides traitant du confort vibratoire.

## 2 Normes d'appréciation du confort vibratoire

### 2.1 Introduction

Deux normes internationales permettent aujourd'hui de traiter du confort des utilisateurs d'une structure exposée à des vibrations, afin d'évaluer son niveau d'acceptabilité pour l'usage prévu. L'ISO 2631, présentée dans la section 2.2, fournit des grandeurs, exprimées en termes d'accélération, permettant d'apprécier le confort en tenant compte de la direction de vibration, de la sensibilité fréquentielle et des effets temporaires. L'ISO 10137 (voir section 2.3) propose quant à elle des critères d'acceptabilité et des limites de confort basées sur les grandeurs issues de la norme précédente. Enfin, la norme DIN 4150-2 (voir section 2.4) propose des critères de performance du confort vibratoire, non plus basés sur l'accélération, mais sur la vitesse.

### 2.2 Norme ISO 2631

#### 2.2.1 Généralités

La norme internationale ISO 2631 ([2], [3]) fournit une procédure détaillée pour la détermination analytique des grandeurs caractéristiques de la réponse vibratoire induite par l'homme (principalement en accélération). Ces grandeurs sont utilisées dans l'évaluation de l'impact de vibrations sur le corps humain (pour les récepteurs) vis-à-vis de certains critères (santé, mal de mer, perception, confort). Nous nous limitons ici au critère de confort vibratoire.

L'effet des vibrations dépend à la fois de leur direction d'incidence et de la position du corps humain qui peut être debout, assis ou allongé. Le système de coordonnées normalisé est présenté à la Figure 1 ; la perception humaine est généralement plus importante vis-à-vis des vibrations dans la direction x ou y.

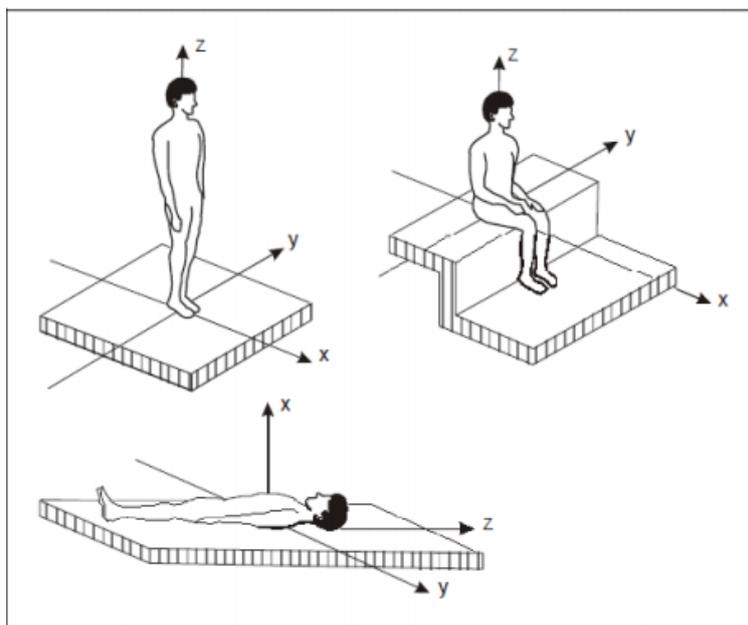
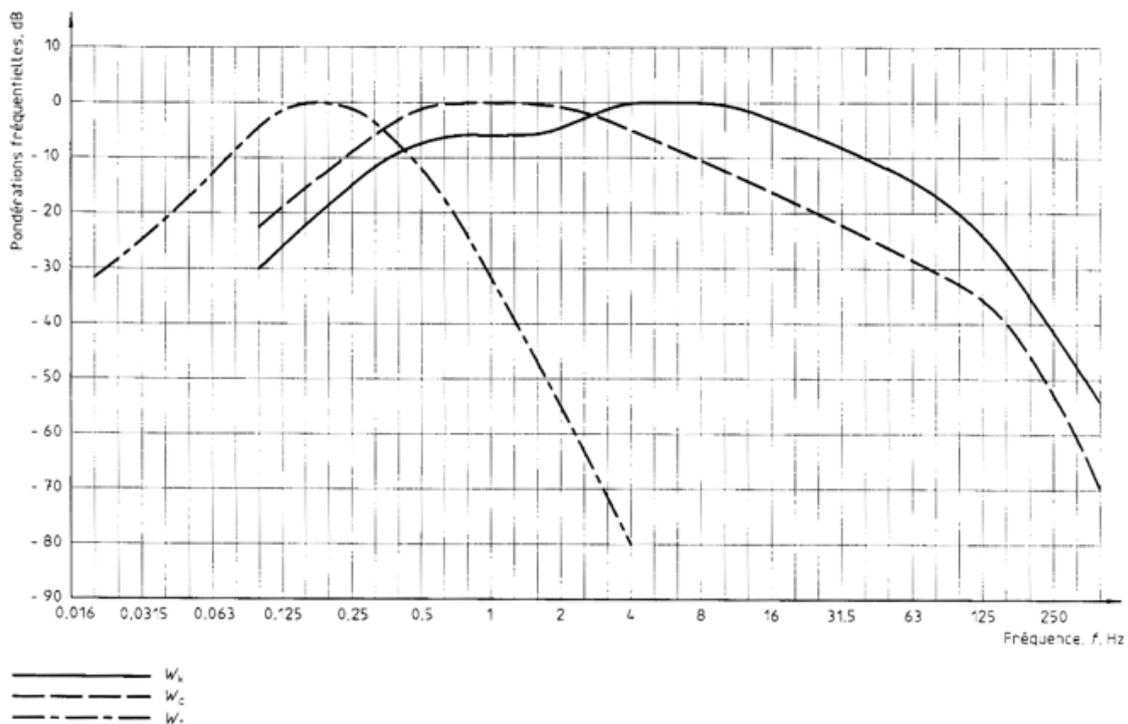


Figure 1 : Système de coordonnées selon les positions du corps humain [2]

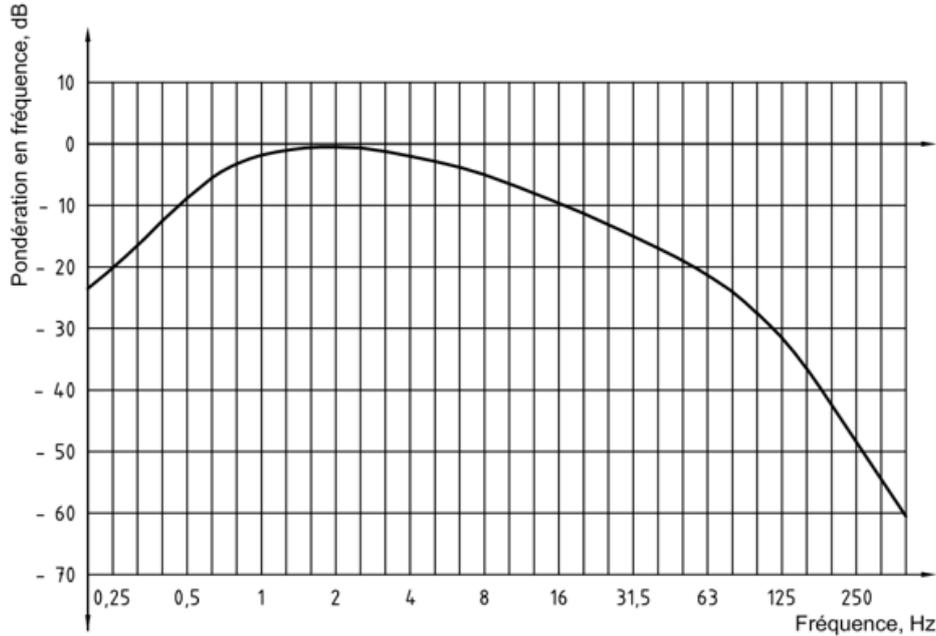
## 2.2.2 Pondérations fréquentielles

L'impact de la vibration sur les occupants d'une structure dépend de leur sensibilité vis-à-vis de cette vibration, étroitement liée à sa fréquence d'incidence. En général, il existe des plages de fréquences où la réponse associée doit être atténuée, car peu perceptible par l'être humain, et ceci est effectué à l'aide de coefficients dits de pondération fréquentielle, présentés sous forme de courbes, qui sont appliqués aux termes de réponse (voir section 2.1.3).

Ces courbes (exprimées en dB) sont présentées à la Figure 2. La courbe  $W_m$  (voir Figure 2-b) est obtenue par combinaison des deux courbes  $W_d$  et  $W_k$  (voir Figure 2-a).



a) Pondérations  $W_k$ ,  $W_d$  et  $W_f$



b) Pondération  $W_m$

Figure 2 : Courbes de pondération fréquentielle [2,3]

D'après ces courbes, la plage de fréquences la plus perceptible par l'homme se situe entre 4 et 8 Hz pour la direction z ( $W_k$ ) et entre 0,5 et 2 Hz pour les directions x et y ( $W_d$ ).

Le choix des courbes de pondération fréquentielle est effectué selon le Tableau 1, en fonction de la direction de la vibration présentée à la Figure 1.

| Axe | Pondération fréquentielle |                            | Coefficient multiplicatif |
|-----|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
|     | Position du corps connue  | Position du corps inconnue |                           |
| X   | $W_d$                     | $W_m$                      | $k_x = 1$                 |
| Y   | $W_d$                     | $W_m$                      | $k_y = 1$                 |
| Z   | $W_k$                     | $W_m$                      | $k_z = 1$                 |

Tableau 1 : Détermination des courbes de pondération fréquentielle [2,3]

La pondération fréquentielle diffère ainsi entre les axes d'incidence, puisque l'utilisateur perçoit plus facilement les vibrations selon les axes x et y que selon l'axe z.

### 2.2.3 Méthode de base (accélération efficace pondérée)

La méthode de base est appliquée dans le cas de vibrations continues. Elle consiste à calculer une accélération efficace pondérée, qui tient compte de la réduction de réponse dans les plages peu perçues par l'homme.

Cette accélération est calculée par direction de vibration selon deux cas :

- Si l'on dispose de  $N_f$  valeurs discrètes d'accélération dans le temps, un calcul cumulatif d'accélération est effectué comme suit :

$$a_{w,d} = \left[ \sum_{i=1}^{N_f} (W_i a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

- Si l'on dispose d'un enregistrement continu de l'accélération, on effectue une intégrale de celle-ci le long de la durée d'enregistrement  $T$  comme suit :

$$a_{w,d} = \left[ \frac{1}{T} \int_0^T a_{w,d}^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

L'accélération totale pourra également être obtenue comme suit :

$$a_v = \sqrt{k_x^2 a_{w,x}^2 + k_y^2 a_{w,y}^2 + k_z^2 a_{w,z}^2} \quad (3)$$

où :

$a_{w,d}$  est l'accélération efficace calculée pour chaque direction  $d$  ( $x, y$  ou  $z$ ) ;

$W_i$  est un coefficient de pondération fréquentielle (voir section 2.1.2) ;

$a_i$  est l'accélération incidente selon la direction du corps humain ;

$a_{w,d}(t)$  est l'accélération efficace intégrant les pondérations fréquentielles à chaque instant  $t$  ;

$k_x, k_y, k_z$  sont des coefficients multiplicatifs égaux à 1 pour notre cas (voir Tableau 1).

## 2.2.4 Méthodes additionnelles

Une première méthode consiste à déterminer une accélération mobile (Maximum Transient Vibration Value - *MTVV*), afin de prendre en compte les effets transitoires de la réponse, en effectuant un calcul d'accélération efficace  $a_{w,d}(t_0)$  pour de faibles intervalles de temps  $t_0$  tout en parcourant l'intégralité du signal comme suit :

$$a_{w,d}(t_0) = \left[ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} a_{w,d}^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (4)$$

$a_{w,d}(t)$  étant l'accélération temporelle pondérée par direction de vibration.

Par la suite, la valeur maximale de ces accélérations est évaluée :

$$MTVV = \max_{t_0} [a_{w,d}(t_0)]$$

Une seconde méthode permet de tenir compte du caractère intermittent du chargement, par le biais du cumul des réponses vibratoires, fournissant des résultats plus raisonnables pour l'évaluation du confort. Celui-ci est effectué par la détermination d'une grandeur vibratoire nommée valeur de dose de vibration (Vibration Dose Value - *VDV*, en  $m \cdot s^{-7/4}$ ), permettant d'avoir des réponses plus perceptibles, quoi que sur des durées plus limitées.

Elle est calculée à l'aide de la formule suivante :

$$VDV = \left[ \int_0^T a_{w,d}^4(t) dt \right]^{\frac{1}{4}} \quad (5)$$

## 2.3 Norme ISO 10137

L'ISO 10137 propose des critères d'acceptabilité en service pour des chargements vibratoires appliqués à des bâtiments et passerelles piétonnes, en utilisant les grandeurs caractéristiques de la norme ISO 2631 (accélération efficace,  $VDV$ ). Cette norme est limitée à l'analyse du confort vibratoire des occupants.

### 2.3.1 Méthode de base (accélération efficace)

La méthode de base est utilisée principalement dans le cas de vibrations continues, définies comme étant des excitations qui durent plus de 30 mn par jour. Pour chaque fréquence d'excitation, la norme présente des courbes d'acceptabilité de base, montrant les limites d'accélération au-delà desquelles la vibration est perçue par le récepteur, et qui dépendent de la fréquence d'excitation et de la direction de vibration selon la Figure 1. Ces courbes sont présentées à la Figure 3.

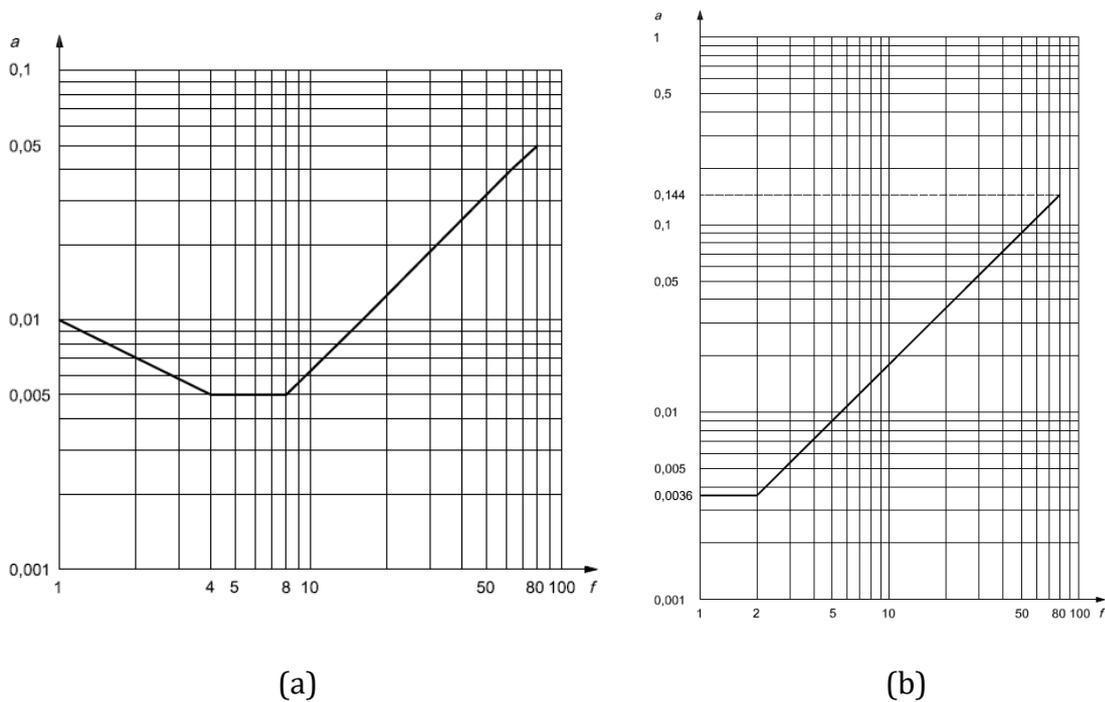


Figure 3 : Courbe d'acceptabilité de base : (a) selon l'axe z, (b) selon les axes x et y [4]

Afin d'évaluer l'acceptabilité des vibrations, un coefficient de réponse marquant le degré de dépassement de la limite de perception des vibrations, basé sur la détermination de l'accélération efficace  $a_{w,rms}$  selon la norme ISO 2631 (voir section 2.1.3), est calculé comme suit :

$$R = \begin{cases} \frac{a_{w,rms}}{a_z} & \text{pour l'axe } z \\ \frac{a_{w,rms}}{a_{x,y}} & \text{pour les axes } x \text{ et } y \end{cases} \quad (6)$$

Avec les limites de perception  $a_z = 0,005 \text{ m/s}^2$  et  $a_{x,y} = 0,00357 \text{ m/s}^2$ .

Le coefficient de réponse  $R$  doit rester inférieur aux valeurs limites fournies dans le Tableau 2, afin de garantir un niveau de confort acceptable pour les occupants.

| Utilisation  | Période de jour | Coefficients multiplicateurs de la courbe de base                |                     |
|--|-----------------|--|---------------------|
|  |                 | Vibration continue <sup>(1)</sup> / Intermittente <sup>(2)</sup> | Vibration impulsive |
| Travail de précision   | Jour            | 1  | 1                   |
|  | Nuit            | 1  | 1                   |
| Résidences   | Jour            | 2 à 4  | 30 à 90             |
|  | Nuit            | 1,4  | 1,4 à 20            |
| Bureaux calmes   | Jour            | 2  | 60 à 128            |
|  | Nuit            | 2  | 60 à 128            |
| Bureaux en général - Ecoles  | Jour            | 4  | 60 à 128            |
|  | Nuit            | 4  | 60 à 128            |
| Ateliers   | Jour            | 8  | 90 à 128            |
|  | Nuit            | 8  | 90 à 128            |
| (1) Vibration continue : dure plus de 30 mn par jour.                |                 |  |                     |
| (2) Vibration intermittente : se reproduit plus de 10 fois par jour. |                 |  |                     |

Tableau 2 : Valeurs limites du coefficient de réponse [4]

### 2.3.2 Méthode VDV

Pour le cas de vibrations intermittentes (se reproduisant plus de 10 fois par jour), des valeurs limites sont également données pour la valeur de dose de vibrations (voir section 2.2.4), dépendant de la durée d'exposition et de la probabilité de déclaration d'inconfort de la part des occupants. En fonction du niveau de déclarations d'inconfort fixé par le maître d'ouvrage, les valeurs limites de  $VDV$  sont fournies dans le Tableau 3.

| Bâtiments d'habitation<br>(durée) | Déclarations d'inconfort |           |           |
|-----------------------------------|--------------------------|-----------|-----------|
|                                   | A faible probabilité     | Possible  | Probable  |
| 16 h le jour                      | 0,2 à 0,4                | 0,4 à 0,8 | 0,8 à 1,6 |
| 8h la nuit                        | 0,13                     | 0,26      | 0,51      |

Tableau 3 : Valeurs limites de  $VDV$  (en  $m \cdot s^{-7/4}$ ) [4]

L'inconvénient majeur de cette méthode réside dans le fait qu'elle n'est utilisée que sur les zones des planchers susceptibles de subir l'action de marche (notamment les couloirs) qui doivent être préalablement connues et bien définies par les parties prenantes.

## 2.4 Norme DIN 4150-2

### 2.4.1 Généralités

La norme allemande DIN 4150-2 propose une méthode visant à évaluer le niveau de confort vibratoire des occupants d'un bâtiment subissant des vibrations continues ou non continues dont la gamme des fréquences d'excitation est comprise entre 1 et 80 Hz. Cette norme n'est généralement pas retenue par les guides d'évaluation du confort ([11], [12]), du fait qu'elle soit basée sur la vitesse qui est plus difficile à mesurer en pratique que l'accélération.

### 2.4.2 Vitesse vibratoire

La vitesse permet de caractériser la réponse vibratoire de la structure et est directement liée à l'énergie vibratoire produite au cours du temps. La mesure doit être effectuée aux endroits où les vibrations sont les plus fortes.

La vitesse vibratoire fréquentielle  $KB(f)$  est déterminée par l'équation (7) :

$$KB(f) = \frac{v(f)}{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{f_0}{f}\right)^2\right)}} \quad (7)$$

où :

$V(f)$  est la transformée de Fourier de la réponse en vitesse ;

$f_0$  est une fréquence de référence égale à 5,6 Hz ;

$f$  est la fréquence du signal d'entrée.

La pondération de la vitesse  $V(f)$  a été effectuée pour tenir compte de la plage de fréquences de vibrations perçue par l'être humain. En effectuant la transformée de Fourier inverse de  $KB(f)$ , on obtient la vitesse vibratoire temporelle  $KB(t)$  qui constituera la base des grandeurs d'évaluation d'acceptabilité décrites ci-après.

### 2.4.3 Méthode de base

Cette méthode vise à déterminer l'amplitude efficace transitoire de vibration  $KB_{\tau}(t_0)$ , obtenue par l'équation suivante :

$$KB_{\tau}(t_0) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{t=0}^{t_0} e^{-\frac{t_0-t}{\tau}} KB^2(t) dt} \quad (8)$$

où :

$\tau$  est la fenêtre temporelle d'intégration, prise égale à 0,125 s ;

$KB(t)$  est la vitesse vibratoire à l'instant  $t$ .

Il en découle la vitesse efficace transitoire maximale :

$$KB_{F_{\max}} = \max_{t_0} KB_{\tau}(t_0)$$

Cette valeur est à comparer aux valeurs limites notées  $A_u$  et  $A_0$  données dans le Tableau 4.

| Classe | Zone                            | Jour  |       | Nuit  |       |
|--------|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|        |                                 | $A_u$ | $A_0$ | $A_u$ | $A_0$ |
| 1      | Zone exclusivement commerciale  | 0,4   | 6     | 0,3   | 0,6   |
| 2      | Zone principalement commerciale | 0,3   | 6     | 0,2   | 0,4   |
| 3      | Zone mixte                      | 0,2   | 5     | 0,15  | 0,3   |
| 4      | Zone résidentielle              | 0,15  | 3     | 0,1   | 0,2   |
| 5      | Zone protégée                   | 0,1   | 3     | 0,1   | 0,15  |

Tableau 4 : Valeurs limites de  $KB_{F_{\max}}$  [5]

Trois cas sont possibles :

- Si  $KB_{F_{\max}} \leq A_u$ , la vibration est acceptable.
- Si  $KB_{F_{\max}} > A_0$ , la vibration n'est pas acceptable.
- Si  $A_u < KB_{F_{\max}} \leq A_0$ , il faut passer à la méthode additionnelle, décrite-ci-après.

### 2.4.4 Méthode additionnelle

Dans le cas où  $A_u < KB_{F_{\max}} \leq A_0$ , une alternative consiste à déterminer une vitesse vibratoire oscillatoire d'évaluation, notée  $KB_{F_{Tr}}$ , qui tient compte de l'accumulation des doses vibratoires tout au long de la période de vibration, dans la mesure où une excitation plus sévère pendant une courte durée puisse être autorisée.

Cette vitesse est déterminée par l'équation suivante :

$$KB_{F_{Tr}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N KB_{F_{Ti}}^2} \cdot \sqrt{\frac{T_e}{T_r}} \quad (9)$$

où :

$N$  est le nombre de cycles de 30 s pendant la durée d'évaluation ;

$KB_{F_{Ti}}$  est la valeur efficace transitoire maximale pendant un cycle de 30 s ;

$T_e$  est la durée totale d'évaluation (de 6 h à 22 h le jour et de 22 h à 6 h la nuit) ;

$T_r$  est la durée totale de vibration.

La vitesse vibratoire oscillatoire d'évaluation  $KB_{F_{Tr}}$  est ensuite comparée à une valeur limite notée  $A_r$ , donnée par le Tableau 5.

| Classe | Zone                            | Jour  | Nuit  |
|--------|---------------------------------|-------|-------|
|        |                                 | $A_r$ | $A_r$ |
| 1      | Zone exclusivement commerciale  | 0,2   | 0,15  |
| 2      | Zone principalement commerciale | 0,15  | 0,1   |
| 3      | Zone mixte                      | 0,1   | 0,07  |
| 4      | Zone résidentielle              | 0,07  | 0,05  |
| 5      | Zone protégée                   | 0,05  | 0,05  |

Tableau 5 : Valeurs limites de  $KB_{F_{Tr}}$  [5]

### 3 Guides d'évaluation du confort des planchers

#### 3.1 Introduction

Afin de répondre à la problématique des vibrations induites par l'homme sur les planchers de bâtiments, des guides et recommandations ont été élaborés ces dernières décennies, visant à présenter des méthodologies d'évaluation des performances vibratoires des planchers. Ces guides ressortent de projets européens ou de centres techniques et scientifiques de la construction métallique existants de par le monde. Ils sont basés sur l'appréciation du confort, donnée par les normes décrites dans la section 2. Les trois guides principaux, à savoir le guide HiVoSS, le guide SCI P354 et le guide AISC/CISC DG 11 sont présentés dans cette section.

**N.B** : une notation uniforme des grandeurs utilisées par les trois guides a été adoptée dans cet article. Par conséquent, de légères différences de notation pourront être rencontrées en consultant les versions officielles de ces guides.

#### 3.2 Guide « HiVoSS »

Ce guide émane du projet de recherche de la CECA « *Vibrations of Floors* » [6] achevé en 2004. Il découle d'une dissémination des résultats de ce dernier, finalisée en 2008, et propose une méthode spectrale, présentée sous forme d'abaques, permettant d'évaluer simplement l'acceptabilité des vibrations induites par l'homme.

##### 3.2.1 Conditions du chargement humain

Le guide vise l'évaluation du confort vibratoire des planchers soumis aux vibrations verticales causées par la marche de courte durée d'une seule personne. Les personnes recevant les vibrations peuvent être debout, assises ou allongées sur le plancher.

### 3.2.2 Calcul de la réponse vibratoire

La réponse adoptée par ce guide est intitulée *OS-RMS<sub>90</sub>* ; c'est la valeur efficace de réponse en vitesse d'un seul pas de la marche d'une personne, couvrant 90 % de personnes marchant normalement.

Cette valeur est obtenue à partir d'abaques établis dans le cadre du projet « VoF » [6], en se basant sur des principes de la norme DIN 4150-2 [5]. Elle dépend à la fois de la fréquence propre, de la masse généralisée (appelée « masse modale » dans le guide, à ne pas confondre avec la « masse modale effective » utilisée dans le calcul parasismique) et de l'amortissement du plancher.

#### 3.2.2.1 Bases d'établissement des graphes d'*OS-RMS<sub>90</sub>*

La méthode HiVoSS est basée sur un modèle de charge normalisé d'un pas qui dépend du poids de la personne  $Q$  ainsi que de sa fréquence de marche  $f_p$ . Ce modèle est reproduit successivement le long de la durée de la marche.

Le rapport de la force excitatrice (par pas de marche) sur le poids s'écrit [6] :

$$\begin{cases} \frac{F(t)}{Q} = \sum_{i=1}^8 k_i t^i & \text{si } t \leq t_s \\ F(t) = 0 & \text{si } t > t_s \end{cases} \quad (10)$$

où :

$(k_i)_{1 \leq i \leq 8}$  sont des coefficients dépendant de la fréquence  $f_p$  [6];

$t_s$  est la durée de contact avec le sol.

Cette méthode a été élaborée en analysant 35 jeux de fréquences de marche et 20 poids de personnes, donnant lieu à 700 modèles de charge différents. Une distribution de probabilité a été considérée pour chacun de ces paramètres.

En faisant varier les caractéristiques dynamiques, un calcul semi-probabiliste basé sur les 700 modèles de charge a permis de déterminer les valeurs d'*OS-RMS<sub>90</sub>* qui sont représentées sous format graphique.

#### 3.2.2.2 Calcul de la valeur *OS-RMS<sub>90</sub>*

La masse généralisée et la fréquence propre sont déterminées à partir d'un modèle du plancher en éléments finis, ou à défaut à l'aide des méthodes analytiques présentées en Annexe (section A.1).

La valeur d'*OS-RMS<sub>90</sub>* dépend également de l'amortissement, exprimé en taux d'amortissement critique du plancher, et déterminé à partir des éléments du Tableau 6.

| Type  | Taux d'amortissement critique |
|---|-------------------------------|
| <b>Amortissement dû à la structure <math>\xi_1</math></b>           |                               |
| Bois  | 6 %                           |
| Béton   | 2 %                           |
| Acier   | 1 %                           |
| Mixte acier-béton   | 1 %                           |
| <b>Amortissement dû au mobilier <math>\xi_2</math></b>              |                               |
| Bureau avec cloisons de 1 à 3 personnes                             | 2 %                           |
| Bureau sans armoires ni étagères                                    | 0 %                           |
| Bureau ouverts « open space »                                       | 1 %                           |
| Librairie   | 1 %                           |
| Résidentiel   | 1 %                           |
| Ecole   | 0 %                           |
| Salle de sport  | 0 %                           |
| <b>Amortissement dû aux finitions <math>\xi_3</math></b>            |                               |
| Faux-plafond  | 1 %                           |
| Faux-plancher   | 0 %                           |
| Chape flottante   | 1 %                           |
| <b>Amortissement total <math>\xi = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3</math></b> |                               |

**Tableau 6 : Taux d'amortissement critique [7]**

Pour la masse généralisée, fréquence propre et taux d'amortissement critique déterminés, la valeur d' $OS-RMS_{90}$  peut être directement obtenue à partir de l'abaque approprié (un abaque par taux d'amortissement critique, masse généralisée en abscisse, fréquence propre en ordonnée).

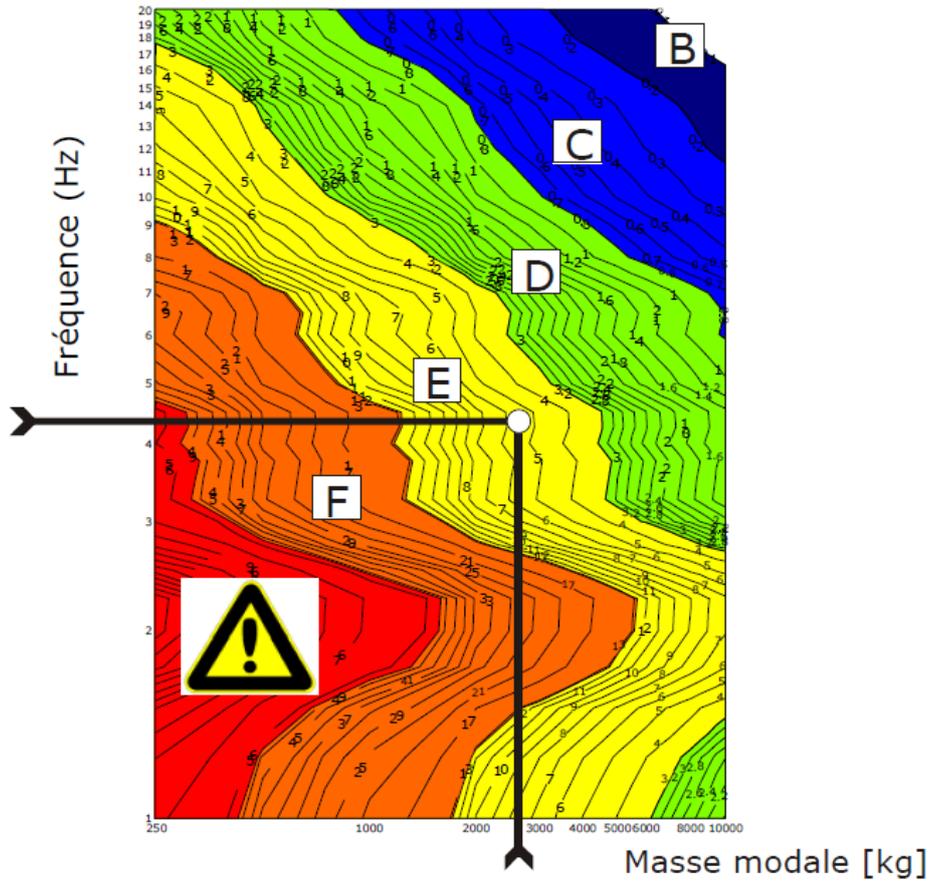


Figure 4 : Exemple d'abaque pour déterminer l' $OS-RMS_{90}$  [7]

Pour le cas de  $N$  modes propres, la valeur d' $OS-RMS_{90}$  pour chaque mode  $i$  doit être déterminée.

La valeur finale d' $OS-RMS_{90}$  est ensuite approximée par l'équation suivante :

$$OS-RMS_{90} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (OS-RMS_{90,i})^2} \quad (11)$$

### 3.2.3 Vérification d'acceptabilité de la réponse

Le guide propose des niveaux d'acceptabilité qui dépendent de la valeur d' $OS-RMS_{90}$  obtenue lors de l'étape précédente et du type d'usage du plancher. Les classes et les niveaux d'acceptabilité sont récapitulés dans le Tableau 7.

| Classe  | OS-RMS <sub>90</sub> |                   | Utilisation du plancher pour le récepteur des vibrations |       |           |             |        |         |          |       |        |            |       |
|---|----------------------|-------------------|--|-------|-----------|-------------|--------|---------|----------|-------|--------|------------|-------|
|   | Limite inférieure    | Limite supérieure | Endroit sensible   | Santé | Education | Résidentiel | Bureau | Réunion | Commerce | Hôtel | Prison | Industriel | Sport |
| A   | 0                    | 0,1               |  |       |           |             |        |         |          |       |        |            |       |
| B   | 0,1                  | 0,2               |  |       |           |             |        |         |          |       |        |            |       |
| C   | 0,2                  | 0,8               |  |       |           |             |        |         |          |       |        |            |       |
| D   | 0,8                  | 3,2               |  |       |           |             |        |         |          |       |        |            |       |
| E   | 3,2                  | 12,8              |  |       |           |             |        |         |          |       |        |            |       |
| F   | 12,8                 | 51,2              |  |       |           |             |        |         |          |       |        |            |       |
| <b>Légende :</b><br>- Vert : Recommandé<br>- Jaune : Critique<br>- Rouge : Non recommandé |                      |                   |  |       |           |             |        |         |          |       |        |            |       |

Tableau 7 : Recommandations d'acceptabilité [7]

**N.B :** Pour les planchers entrant dans l'usage « Sport », l'attention est portée sur le fait que l'excitation étudiée est toujours la marche d'une seule personne, dont le confort est évalué par rapport aux occupants avoisinants (sportifs ou spectateurs).

### 3.2.4 Conclusions sur le guide HiVoSS

Le guide HiVoSS fournit une méthode d'évaluation de confort vibratoire, valable pour une large gamme de bâtiments où la marche des individus représente l'activité vibratoire prépondérante (espaces résidentiels, bureaux, hôtels, centres commerciaux, etc.). Selon cette méthode, l'acceptabilité du confort vibratoire est évaluée sur la base de deux paramètres, à savoir la réponse vibratoire et l'usage du plancher. Cette approche donne une portée assez large à cette méthode, puisqu'elle ne prend en compte ni la position des marcheurs, ni les formes modales, ni certains aspects additionnels, comme la direction d'excitation, le type de vibration (permanente ou temporaire), ou la période du jour, qui peuvent tous avoir de l'influence sur l'évaluation du confort vibratoire des individus, ce qui a été confirmé par Royvaran et al. [8] et Muhammad et al. [9]. Par ailleurs, pour les lieux dominés par les activités rythmiques ou par les vibrations régulières des machines, l'évaluation du confort vibratoire doit être examinée de manière plus approfondie.

### 3.3 Guide SCI P354

Le guide SCI P354 a été élaboré par l'Institut de la construction métallique britannique, « Steel Construction Institute ». En 1989, une méthode simplifiée, basée sur une analyse succincte des propriétés vibratoires de la structure, a été proposée dans le guide SCI P076 par Wyatt [10]. Afin de tenir compte des avancées importantes dans l'analyse de vibration des planchers, un nouveau guide, SCI P354, a été édité en 2007 par Smith et al. [11], puis révisé en 2009. Ce guide comprend une méthode générale et deux méthodes simplifiées

pour l'évaluation du confort vibratoire des planchers, chacune portant sur un domaine d'application spécifique.

### 3.3.1 Méthode générale

Cette méthode est valable pour tous types de planchers soumis à l'action d'une seule personne (marche ou activités rythmiques). Cette méthode doit être privilégiée lorsque l'analyse des propriétés vibratoires du plancher est effectuée à l'aide d'un modèle de calcul par éléments finis. L'étude de réponse est effectuée d'abord selon une méthode de base et, le cas échéant, une méthode additionnelle.

#### 3.3.1.1 Méthode de base

La réponse vibratoire dépend de la fréquence propre fondamentale du plancher étudié :

- Pour les planchers à basse fréquence, la réponse de la structure est stationnaire.
- Pour les planchers à haute fréquence, la réponse de la structure est transitoire.

La fréquence de passage entre ces deux états  $f_l$  est présentée dans le Tableau 8.

| Types d'usage du plancher                        | $f_l$ (Hz) |
|--|------------|
| Planchers généraux, bureaux ouverts              | 10         |
| Espaces fermés (salles d'opération, résidentiel) | 8          |
| Escaliers  | 12         |
| Planchers à activités rythmiques                 | 24         |

Tableau 8 : Fréquences de passage basse/haute fréquence pour l'étude de réponse [11]

Deux cas se présentent alors :

- Si  $f \leq f_l$ , il faut effectuer les deux analyses (stationnaire et transitoire) ;
- Si  $f > f_l$ , l'analyse transitoire est suffisante.

##### 3.3.1.1.1 Analyse stationnaire

La réponse résonante ou stationnaire est due au caractère continu de la charge appliquée. Pour des planchers à faible fréquence, une augmentation graduelle de réponse est perçue jusqu'à une stabilisation (résonance) éventuelle, puis jusqu'à la disparition du chargement, voir Figure 5.

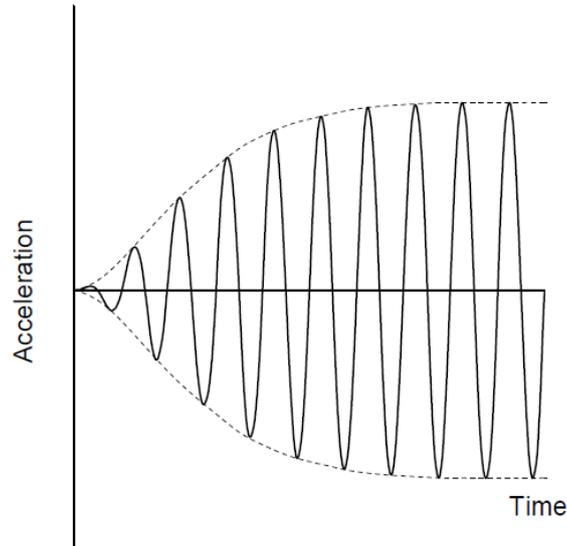


Figure 5 : Réponse stationnaire [11]

### Modèles de charge

La charge équivalente de la marche est décomposée en séries de Fourier [6] à quatre harmoniques  $h$  :

$$F(t) = Q \left[ 1 + \sum_{h=1}^4 \alpha_h \sin(2\pi h f_p t + \phi_h) \right] \quad (12)$$

où :

$Q$  est le poids moyen d'une personne, pris égal à 746 N ;

$\alpha_h$  est le coefficient de Fourier de l'harmonique  $h$  ;

$f_p$  est la fréquence de l'activité humaine ;

$\phi_h$  est le déphasage de l'harmonique  $h$ .

Le Tableau 9 fournit les valeurs des paramètres du chargement pour la marche.

| Harmonique $h$ | Plage de fréquence $h f_p$ (Hz) | $\alpha_h$            | $\phi_h$         |
|----------------|---------------------------------|-----------------------|------------------|
| 1              | 1,8 - 2,2                       | $0,436(h f_p - 0,95)$ | 0                |
| 2              | 3,6 - 4,4                       | $0,006(h f_p + 12,3)$ | $-\frac{\pi}{2}$ |
| 3              | 5,4 - 6,6                       | $0,007(h f_p + 5,2)$  | $\pi$            |
| 4              | 7,2 - 8,8                       | $0,007(h f_p + 2)$    | $\frac{\pi}{2}$  |

Tableau 9 : Paramètres de la charge équivalente de la marche [11]

Quant aux activités rythmiques, la charge équivalente est également décomposable en série de Fourier [6], à trois harmoniques  $h$  :

$$F(t) = Q \left[ 1 + \sum_{h=1}^3 \alpha_h \sin(2\pi h f_p t + \phi_h) \right] \quad (13)$$

Chaque activité rythmique est caractérisée par un ratio de contact  $\alpha_c = \frac{t_s}{T}$ , où  $t_s$  est la durée de contact avec le sol pour une seule excitation et  $T$  est la durée totale correspondante.

Le Tableau 10 fournit les valeurs des paramètres du chargement pour les activités rythmiques dépendant de  $\alpha_c$ .

| $\alpha_c = \frac{t_s}{T}$ | Type d'activité         | Paramètre  | $h=1$            | $h=2$             | $h=3$            |
|----------------------------|-------------------------|------------|------------------|-------------------|------------------|
| $\frac{2}{3}$              | Aérobic (faible impact) | $\alpha_h$ | $\frac{9}{7}$    | $\frac{9}{55}$    | $\frac{2}{15}$   |
|                            |                         | $\phi_h$   | $-\frac{\pi}{6}$ | $-\frac{5\pi}{6}$ | $-\frac{\pi}{2}$ |
| $\frac{1}{2}$              | Aérobic (fort impact)   | $\alpha_h$ | $\frac{\pi}{2}$  | $\frac{2}{3}$     | 0                |
|                            |                         | $\phi_h$   | 0                | $-\frac{\pi}{2}$  | 0                |
| $\frac{1}{3}$              | Sauts usuels            | $\alpha_h$ | $\frac{9}{5}$    | $\frac{9}{7}$     | $\frac{2}{3}$    |
|                            |                         | $\phi_h$   | $\frac{\pi}{6}$  | $-\frac{\pi}{6}$  | $-\frac{\pi}{2}$ |

Tableau 10 : Paramètres des charges des activités rythmiques [11]

### Accélération efficace pondérée

L'accélération efficace pondérée  $a_{w,rms,e,r,h,n}$  pour un mode propre  $n$  dépend du point d'excitation  $e$ , du point d'étude de réponse  $r$  et de l'harmonique d'excitation  $h$ , et a pour expression :

$$a_{w,rms,e,r,h,n} = \mu_{e,n} \mu_{r,n} \frac{F_h}{M_n \sqrt{2}} D_{n,h} W_h \quad (14)$$

où :

$\mu_{e,n}$  est l'amplitude de la forme modale normalisée au point d'excitation  $e$  ;

$\mu_{r,n}$  est l'amplitude de la forme modale normalisée au point d'étude de réponse  $r$  ;

$F_h = \alpha_h Q$  est la force excitatrice du  $h^{\text{ième}}$  harmonique (selon le type d'activité) ;

$M_n$  est la masse généralisée du  $n^{\text{ième}}$  mode ;

$D_{n,h}$  est le coefficient d'amplification dynamique appliqué sur la réponse en accélération (avec  $\beta_n = \frac{f_p}{f_n}$ ) :

$$D_{n,h} = \frac{(h\beta_n)^2}{\sqrt{(1-(h\beta_n)^2)^2 + (2\xi h\beta_n)^2}}$$

$W_h$  est le coefficient de pondération fréquentielle par rapport à  $hf_p$ .

Dans le cas où les amplitudes des formes modales sont inconnues, on prend de manière conservative  $\mu_{e,n} = \mu_{r,n} = 1$ .

Le taux d'amortissement critique  $\xi$  est présenté au Tableau 11.

| Type de plancher   | Taux d'amortissement critique |
|--|-------------------------------|
| Planchers en acier   | 0,5 %                         |
| Planchers vides ou avec une petite quantité de meubles               | 1,1 %                         |
| Planchers cloisonnés avec des meubles en utilisation normale         | 3 %                           |
| Planchers avec cloisons participant à l'amortissement des vibrations | 4,5 %                         |

Tableau 11 : Taux d'amortissement critique [11]

La pondération fréquentielle  $W_h$  est obtenue à partir de l'une des courbes de pondération de la norme BS 6841 selon le Tableau 12.

| Type d'usage   | Axe de vibration | Effet                        | Courbe de pondération |
|--|------------------|------------------------------|-----------------------|
| Espaces de travaux critiques (travaux de précision, hôpitaux)                      | z                | Vision – contrôle de la main | $W_g$                 |
|  | x-y              | Perception                   | $W_d$                 |
| Résidentiel, bureaux, pavillons, laboratoires, chambres de diagnostic des patients | z                | Confort                      | $W_b$                 |
|  | x-y              | Confort                      | $W_d$                 |
| Ateliers et espaces de circulation   | z                | Confort                      | $W_b$                 |
|  | x-y              | Confort                      | $W_d$                 |

Tableau 12 : Choix des courbes de pondération fréquentielle [11]

Les courbes de pondération associées sont présentées à la Figure 6.

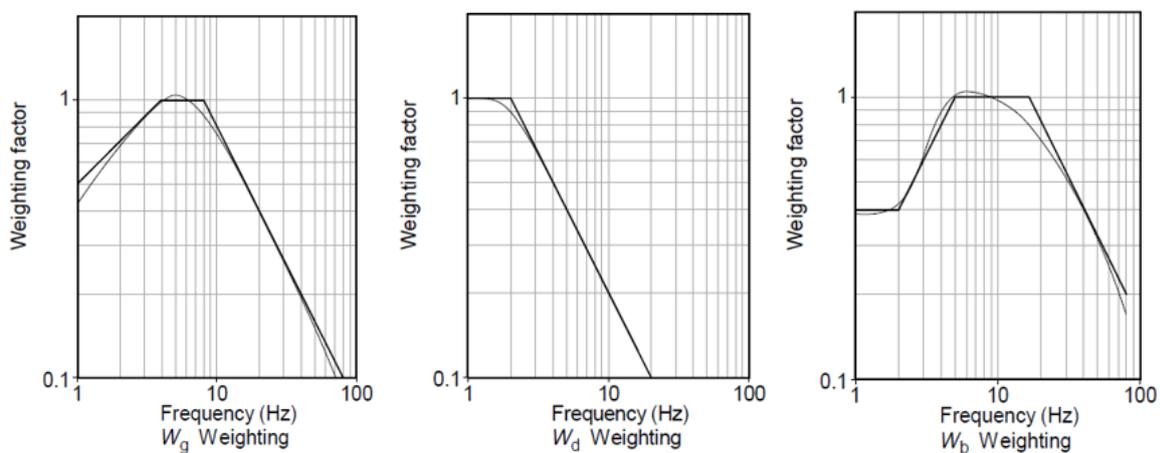


Figure 6 : Courbes de pondération fréquentielle [11]

Pour la marche, la limitation de la longueur du parcours engendre une durée limitée d'excitation. Par conséquent, le plancher n'atteint pas complètement l'état de résonance au cours de la marche, ce qui conduit à une réduction de la réponse stationnaire.

Cette réduction est prise en compte en multipliant l'accélération  $a_{w,rms,e,r,h,n}$  par un coefficient de réduction de résonance  $\rho$ , donné par l'équation (15) :

$$\rho = 1 - e^{\left(\frac{-2\pi\xi L_p f_p}{v}\right)} \quad (15)$$

où :

$L_p$  est la longueur du parcours de marche ;

$f_p$  est la fréquence de marche ;

$v$  est la vitesse de marche, déterminée pour  $1,7 \text{ Hz} \leq f_p \leq 2,4 \text{ Hz}$  par :

$$v = 1,67f_p^2 - 4,83f_p + 4,5 \quad (16)$$

Le calcul précédent doit être effectué par rapport aux modes dominants de vibration, dont la fréquence propre est inférieure à la fréquence de passage (fournie par le Tableau 8) augmentée de 2 Hz.

L'accélération efficace pondérée pour tous les modes propres dominants est ensuite calculée en combinant les réponses des  $H$  harmoniques de marche selon les  $N$  modes dominants de vibration comme suit :

$$a_{w,rms,e,r} = \sqrt{\sum_{h=1}^H \left[ \sum_{n=1}^N (a_{w,rms,e,r,h,n}) \right]^2} \quad (17)$$

### 3.3.1.1.2 Analyse transitoire (uniquement pour la marche)

Cette analyse traduit le caractère intermittent de la charge, dans la mesure où le plancher à haute fréquence se comporte comme si la charge était composée d'une série d'impulsions consécutives, voir Figure 7.

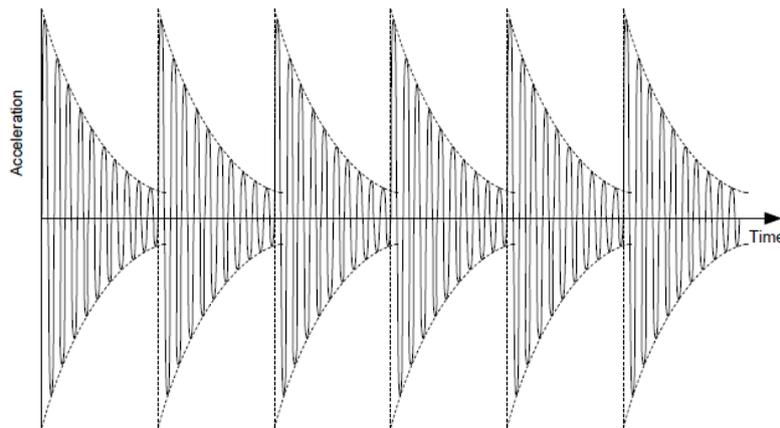


Figure 7 : Réponse transitoire [11]

Dans ce cas, l'impact induit par chaque pas de marche est modélisé par un chargement impulsif s'exprimant comme suit :

$$F_I = 60 \frac{f_p^{1,43}}{f_n^{1,3}} \frac{Q}{700} \quad (18)$$

où :

$f_p$  est la fréquence de marche ;

$f_n$  est la fréquence propre du  $n^{\text{ième}}$  mode ;

$Q$  est le poids moyen d'une personne, pris égal à 746 N.

L'accélération maximale pour le mode propre étudié  $n$  est déterminée par l'équation (19) :

$$a_{w,max,e,r,n} = 2\pi f_n \sqrt{1 - \xi^2} \mu_{e,n} \mu_{r,n} \frac{F_I}{M_n} W_n \quad (19)$$

où :

$F_I$  est la force impulsive excitatrice ;

$W_n$  est le coefficient de pondération approprié par rapport à  $f_n$ .

Les autres termes sont donnés par l'équation (14).

Dans ce cas, les modes propres dominants sont ceux dont la fréquence propre ne dépasse pas le double de la fréquence propre fondamentale.

L'accélération totale de l'ensemble de ces modes sera alors :

$$a_{w,e,r}(t) = \sum_{n=1}^N a_{w,max,e,r,n} e^{-\xi 2\pi f_n t} \sin(2\pi f_n \sqrt{1 - \xi^2} t) \quad (20)$$

L'accélération efficace associée  $a_{w,rms,e,r}$  est déduite par l'équation (21) :

$$a_{w,rms,e,r} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_{w,e,r}^2(t) dt} \quad (21)$$

où  $T = \frac{1}{f_p}$ .

### 3.3.1.1.3 Vérification d'acceptabilité

Conformément à la norme BS 6472, très proche de l'ISO 10137, un coefficient de réponse  $R$  est déterminé par rapport à la courbe de base de perception selon l'axe de vibration en utilisant l'équation (6), rappelée ci-dessous :

$$R = \begin{cases} \frac{a_{w,rms}}{a_z} & \text{pour l'axe } z \\ \frac{a_{w,rms}}{a_{x,y}} & \text{pour les axes } x \text{ et } y \end{cases}$$

$a_{w,rms}$  étant l'accélération efficace pondérée calculée pour la réponse stationnaire ou transitoire, avec  $a_z = 0,005 \text{ m/s}^2$  et  $a_{x,y} = 0,00357 \text{ m/s}^2$ .

Le coefficient  $R$  est à comparer avec les coefficients multiplicateurs par rapport à la limite de perception, donnés ci-après.

La norme BS 6472 définit des coefficients multiplicateurs pour des occupations courantes (hors hôpital) présentés dans le Tableau 13.

| Lieu                          | Période de jour | Coefficient multiplicateur        |                                    |
|-------------------------------|-----------------|-----------------------------------|------------------------------------|
|                               |                 | Vibration continue <sup>(1)</sup> | Vibration impulsive <sup>(2)</sup> |
| Lieux de travail de précision | Jour            | 1                                 | 1                                  |
|                               | Nuit            | 1                                 | 1                                  |
| Résidentiel                   | Jour            | 2 à 4                             | 60 à 90                            |
|                               | Nuit            | 1,4                               | 20                                 |
| Bureaux                       | Jour            | 4                                 | 128                                |
|                               | Nuit            | 4                                 | 128                                |
| Ateliers                      | Jour            | 8                                 | 128                                |
|                               | Nuit            | 8                                 | 128                                |

(1) Temps : 16 h le jour et 8 h la nuit  
(2) Pour plus de 3 occurrences

Tableau 13 : Valeurs admissibles du coefficient  $R$  (lieux généraux) [11]

Pour les bureaux, contrairement à la valeur de 4 donnée dans le Tableau 13, le guide recommande un coefficient multiplicateur égal à 8.

Pour le milieu hospitalier, les coefficients multiplicateurs sont tirés de la norme HTM 08-01 et présentés dans le Tableau 14.

| Type de salle  | Coefficient multiplicateur |
|--|----------------------------|
| Salles d'opération, laboratoires de précision, salles de test d'audition | 1                          |
| Pavillons  | 2                          |
| Laboratoires généraux, espaces de traitement                             | 4                          |
| Bureaux, salles de diagnostic  | 8                          |

Tableau 14 : Valeurs admissibles du coefficient  $R$  (hôpitaux) [11]

Pour les parkings de voiture, un coefficient multiplicateur  $R = 65$  est recommandé (avec un taux d'amortissement critique de 1,1%).

### 3.3.1.2 Méthode additionnelle

Cette méthode est utilisée lorsque les limites de confort sont dépassées selon la méthode de base; elle repose sur les principes de la norme ISO 10137 (voir section 2.3.2), avec une valeur de dose de vibration  $VDV$  (en  $m \cdot s^{-\frac{7}{4}}$ ) donnée par l'équation suivante :

$$VDV = 0,68 a_{w,rms} \sqrt[4]{n_a T_a} \quad (22)$$

où :

$a_{w,rms}$  est l'accélération efficace pondérée dans le cas stationnaire (voir équation (17)) ou transitoire (voir équation (21)) ;

$n_a$  est le nombre d'occurrences de l'activité pour une durée d'exposition (16 h le jour, ou 8 h la nuit) ;

$T_a$  est la durée d'activité humaine ( $T_a = \frac{L_p}{v}$ ).

La valeur obtenue est comparée aux valeurs limites fournies ci-après.

Dans le cas général, la norme BS 6472 définit des valeurs limites de  $VDV$  selon le Tableau 15.

| Bâtiments d'habitation<br>(durée d'exposition) | Déclarations d'inconfort |           |           |
|--|--------------------------|-----------|-----------|
|  | A faible probabilité     | Possible  | Probable  |
| 16 h le jour                                   | 0,2 à 0,4                | 0,4 à 0,8 | 0,8 à 1,6 |
| 8 h la nuit                                    | 0,13                     | 0,26      | 0,51      |

Tableau 15: Valeurs limites de  $VDV$  (bâtiments) [11]

Il est à noter que la méthode additionnelle n'est pas applicable pour le travail de précision (1<sup>ère</sup> ligne du Tableau 14). Pour les autres usages, on utilise les limites d'acceptabilité du Tableau 16, issues de la norme HTM 08-01.

| Type de salle                  | $VDV$ limite ( $m/s^{1,75}$ ) |
|--------------------------------|-------------------------------|
| Pavillons, résidentiel (jour)  | 0,2                           |
| Laboratoires généraux, bureaux | 0,4                           |
| Ateliers                       | 0,8                           |

Tableau 16 : Valeurs limites de  $VDV$  (autres usages) [11]

Dans le cas où le nombre de passages  $n_a$  est inconnu, une autre alternative à cette méthode est d'utiliser l'équation (23) pour déterminer un nombre maximal de passages sur le plancher pendant la durée d'exposition étudiée :

$$n_{a,max} = \frac{1}{T_a} \left[ \frac{VDV_{max}}{0,68 a_{w,rms}} \right]^4 \quad (23)$$

### 3.3.2 1<sup>ère</sup> méthode simplifiée

Cette méthode simplifiée est appliquée pour les planchers ordinaires soumis à une charge de marche normale et couvre les planchers où une estimation forfaitaire de réponse est souhaitée, ou lorsque les propriétés modales du plancher ne sont pas déterminées numériquement. Des formules analytiques sont proposées à cet effet pour la fréquence propre et la masse généralisée du mode fondamental et sont présentées en Annexe (section A.2).

### 3.3.2.1 Méthode de base

La méthode de base n'est valable que pour les planchers ayant une fréquence propre fondamentale supérieure à 3 Hz et est également développée pour les réponses stationnaire ou transitoire (voir section 3.3.1).

#### 3.3.2.1.1 Analyse stationnaire ( $3 \text{ Hz} \leq f_1 \leq 10 \text{ Hz}$ )

L'accélération efficace pour l'analyse stationnaire s'écrit dans ce cas :

$$a_{w,rms} = \mu_e \mu_r \frac{0,1Q}{2\sqrt{2} M_1 \xi} W_1 \rho \quad (24)$$

où :

$\mu_e$  est l'amplitude de la forme modale normalisée du point d'excitation  $e$  ;

$\mu_r$  est l'amplitude de la forme modale normalisée du point d'étude de réponse  $r$  ;

$Q$  est le poids moyen d'une personne, pris égal à 746 N ;

$M_1$  est la masse généralisée du mode fondamental ;

$\xi$  est le taux d'amortissement critique du plancher ;

$W_1$  est le coefficient de pondération approprié par rapport à  $f_1$  ;

$f_1$  est la fréquence propre du mode fondamental ;

$\rho$  est le coefficient d'amplification de résonance, obtenu à l'aide de l'équation (15).

Dans le cas où les amplitudes des formes modales sont inconnues, on prend de manière conservative  $\mu_e = \mu_r = 1$ .

#### 3.3.2.1.2 Analyse transitoire ( $f_1 > 10 \text{ Hz}$ )

Pour une analyse transitoire, l'accélération efficace devient :

$$a_{w,rms} = 2\pi \mu_e \mu_r \frac{185}{M_1 f_1^{0,3}} \frac{Q}{700} \frac{W_1}{\sqrt{2}} \quad (25)$$

Dans le cas d'une direction de vibration inconnue,  $W_1$  peut être déterminé à partir la Figure 8.

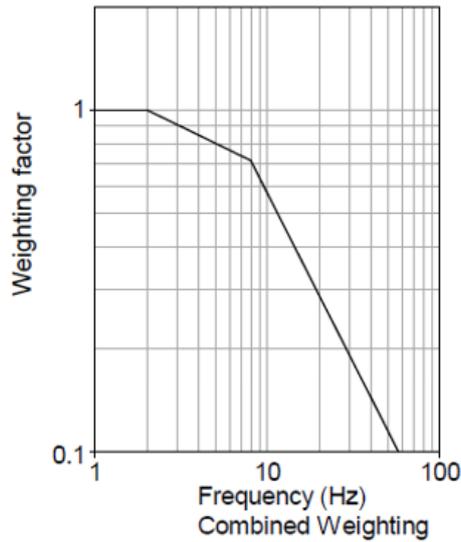


Figure 8 : Courbe de pondération fréquentielle pour une direction inconnue [11]

Pour la vérification d'acceptabilité, on utilise le coefficient de réponse (voir section 3.3.1.1.3) :

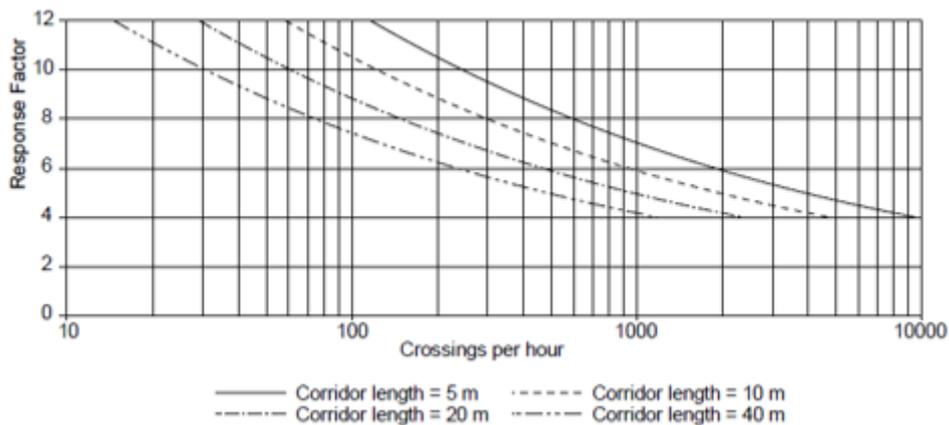
$$R = \frac{a_{w,rms}}{0,005} \quad (26)$$

### 3.3.2.2 Méthode additionnelle

Le nombre de passages de personnes pendant la durée d'exposition (16 h le jour et 8 h la nuit) est comparé avec leur nombre maximal, obtenu par l'équation (23).

Les valeurs de  $VDV_{max}$  sont similaires à celles de la section 3.3.1.2.

Une 2<sup>nd</sup>e alternative consiste à déterminer ce nombre en fonction du coefficient de réponse et de la longueur du couloir à partir de la Figure 9.



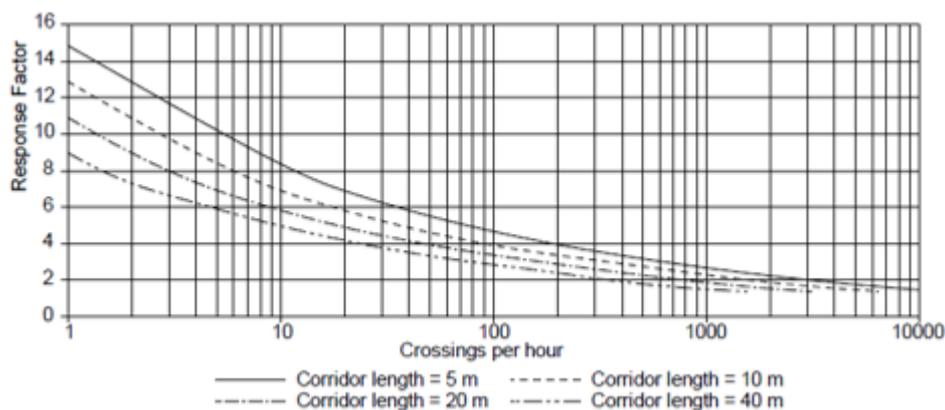


Figure 9 : Nombre maximal de passages pour les vibrations dans la direction de l'axe z pendant 16 h le jour (haut) et dans la direction des axes x et y pendant 8 h la nuit (bas) [11]

### 3.3.3 2<sup>de</sup> méthode simplifiée

Cette méthode concerne les planchers soumis aux mêmes conditions que pour la méthode précédente, en se limitant aux planchers légers. Les planchers légers couverts par cette méthode possèdent des solives composées de profilés formés à froid, en Z ou en C.

#### 3.3.3.1 Vérification de rigidité

Deux conditions doivent être vérifiées pour ces types de planchers, à savoir :

- Une fréquence propre fondamentale dépassant 8 Hz dans le cas général et 10 Hz dans le cas des couloirs de passage, sous charges permanentes additionnée d'une charge égale à  $0,3 \text{ kN/m}^2$ , pour s'éloigner de l'état de résonance ;
- Une flèche statique sous charge ponctuelle de 1 kN limitée pour assurer une raideur suffisante au plancher. Elle doit être inférieure à la flèche limite donnée dans le Tableau 17.

|                    |     |     |     |     |     |     |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| <b>Portée (m)</b>  | 3,5 | 3,8 | 4,2 | 4,6 | 5,3 | 6,2 |
| <b>Flèche (mm)</b> | 1,7 | 1,6 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,2 |

Tableau 17 : Flèches limites selon la portée du plancher [11]

#### 3.3.3.2 Evaluation du confort vibratoire

Cette évaluation est à effectuer dans le cas où la détermination de réponse vibratoire est exigée par les parties prenantes. La section A.2 de l'Annexe présente des expressions analytiques permettant de déterminer la fréquence propre et la masse généralisée du mode fondamental dans ce cas particulier.

##### 3.3.3.2.1 Méthode de base

Puisqu'une fréquence propre élevée est exigée pour ces planchers, on ne tient compte que de la réponse transitoire. L'accélération efficace pondérée s'écrit comme dans le cas de la 1<sup>ère</sup> méthode simplifiée (voir équation (25)).

Le coefficient de réponse  $R$  calculé avec l'équation (6) doit être inférieur à 16 pour tous types d'usage.

### 3.3.3.2.2 Méthode additionnelle

Le nombre de passages de personnes pendant la durée d'exposition (16 h le jour et 8 h la nuit) est comparé avec le nombre limite, obtenu par l'équation (23).

Les valeurs de  $VDV_{max}$  (pour une faible probabilité de déclaration d'inconforts) sont données ci-dessous :

- Bâtiment résidentiel (16 h le jour) : 1,6 ;
- Bâtiment résidentiel (8h la nuit) : 0,51.

### 3.3.4 Conclusions sur le guide SCI P354

Le guide SCI P354, basé sur les principes des normes ISO 2631 et ISO 10137, est le document le plus complet qui traite du confort vibratoire des structures métalliques et mixtes à l'heure actuelle. Une large gamme de structures est ainsi traitée, qui va des bâtiments de bureau, aux hôpitaux et parkings, ainsi que des excitations humaines telles que la marche et les activités rythmiques. La méthode générale qui nécessite l'utilisation d'un modèle de calcul par éléments finis afin d'en extraire les propriétés vibratoires de la structure, est relativement précise mais sera assez longue à mettre en œuvre. La 1<sup>ère</sup> méthode simplifiée ne tient compte que du mode propre fondamental de vibration et utilise un coefficient de Fourier égal à 0,1, d'où une estimation assez sécuritaire des accélérations. Par l'analyse de plus de 50 planchers, il a été démontré par Royvaran et al. [8] que cette méthode simplifiée est assez conservatrice.

## 3.4 Guide AISC/CISC DG 11

Ce guide, à l'instar du guide SCI, est applicable pour des vibrations des planchers sous une action de marche ou d'activités rythmiques appliquées par une seule personne. Il a été initialement établi en collaboration entre l'organisme américain « American Institute of Steel Construction » et l'organisme canadien « Canadian Institute of Steel Construction » en 1997, puis révisé en 2003.

L'analyse modale par éléments finis est également privilégiée dans ce guide, tout en proposant des expressions analytiques pour déterminer les propriétés du mode de vibration fondamental le cas échéant, présentées en Annexe (section A.3).

### 3.4.1 Action de la marche

La méthode décrite ci-après est appliquée pour des planchers ayant une fréquence fondamentale supérieure à 3 Hz, subissant une action de la marche. Comme pour le guide SCI, l'évaluation du confort dépend de la fréquence fondamentale du plancher étudié.

Le chargement associé à la marche est décomposé en séries de Fourier à 4 harmoniques  $h$  comme suit :

$$F(t) = Q \left[ 1 + \sum_{h=1}^4 \alpha_h \cos(2\pi h f_p t) \right] \quad (27)$$

où :

$Q$  est le poids moyen d'une personne, pris égal à 700 N ;

$\alpha_h$  est le coefficient de Fourier de l'harmonique  $h$  ;

$f_p$  est la fréquence de la marche.

Le Tableau 18 fournit les paramètres de cette décomposition.

| Harmonique | Paramètres de marche |            |
|------------|----------------------|------------|
|            | $f_p$ (Hz)           | $\alpha_h$ |
| 1          | 1,6-2,2              | 0,5        |
| 2          | 3,2-4,4              | 0,2        |
| 3          | 4,8-6,6              | 0,1        |
| 4          | 6,4-8,8              | 0,05       |

Tableau 18 : Paramètres du chargement associé à la marche [12]

### 3.4.1.1 Etude de réponse

L'accélération maximale du plancher, comme proportion de l'accélération de la pesanteur  $g$ , est déterminée par l'équation (28) :

$$\frac{a_p}{g} = \frac{P_0 \exp(-0,35f_n)}{\xi W_n} \quad (28)$$

où :

$P_0 = 0,29$  kN pour les bâtiments ;

$f_n$  est la fréquence propre du mode considéré ;

$\xi$  est le taux d'amortissement critique du plancher ;

$W_n$  est le poids généralisé du plancher (lié à la masse généralisée du mode considéré).

Les taux d'amortissement critique  $\xi$  à utiliser sont présentés dans le Tableau 19.

| Usage du plancher  | $\xi$ |
|--|-------|
| Planchers avec peu d'éléments non structurels : centres commerciaux - résidences - espaces de travail - lieux de culte | 0,02  |
| Planchers avec peu de cloisons : bureaux modulaires  | 0,03  |
| Planchers avec cloisonnement massif  | 0,05  |

Tableau 19 : Taux d'amortissement critique [12]

Cette accélération doit être comparée à la valeur limite d'accélération  $\frac{a_0}{g}$ , obtenue sur la base des courbes d'acceptabilité de la norme ISO 2631-2 (version 1989), présentées à la Figure 10.

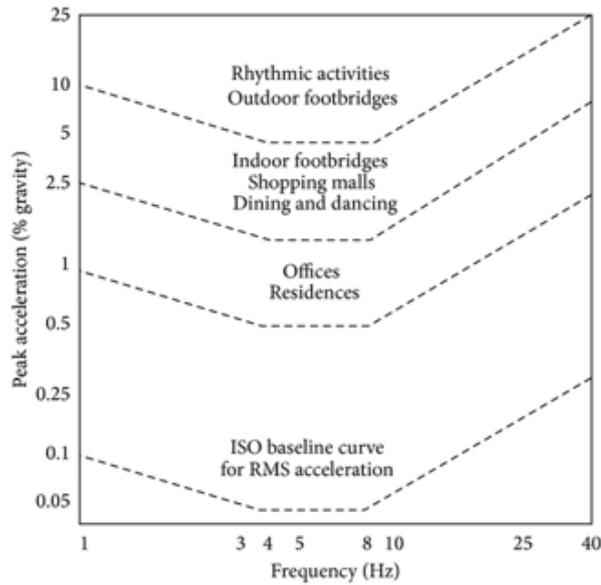


Figure 10 : Courbes d'acceptabilité des vibrations [12]

Les valeurs de  $\frac{a_0}{g}$  sont prises de manière conservatrice en prolongeant le palier de chaque courbe ci-dessus pour toutes les fréquences, donnant lieu aux valeurs suivantes :

- Pour les bureaux, résidences et lieux de culte :  $\frac{a_0}{g} = 0,5 \%$  ;
- Pour les centres commerciaux :  $\frac{a_0}{g} = 1,5 \%$ .

### 3.4.1.2 Cas des planchers à haute fréquence

Pour les planchers de fréquence propre fondamentale supérieure à 9 Hz, il faut, en plus de la vérification précédente, éliminer le risque lié aux effets de la réponse transitoire qui peut être induit par les harmoniques de la marche.

Pour cela, la flèche statique du plancher calculée sous une charge ponctuelle de 1 kN ne doit pas dépasser 1 mm.

### 3.4.2 Activités rythmiques

Pour le cas des activités rythmiques, la charge associée est décomposée en série de Fourier à 3 harmoniques comme suit :

$$F(t) = Q \left[ 1 + \sum_{h=1}^3 \alpha_h \cos(2\pi h f_p t) \right] \quad (29)$$

où :

$Q$  est le poids moyen d'une personne, pris égal à 700 N ;

$\alpha_h$  est le coefficient de Fourier de l'harmonique  $h$  ;

$f_p$  est la fréquence de l'activité rythmique considérée.

Le Tableau 20 fournit les paramètres de ce chargement.

| Harmonique | Sauts (aérobic) |            | Danse      |            | Evènements sportif ou concert |            |
|------------|-----------------|------------|------------|------------|-------------------------------|------------|
|            | $f_p$ (Hz)      | $\alpha_h$ | $f_p$ (Hz) | $\alpha_h$ | $f_p$ (Hz)                    | $\alpha_h$ |
| 1          | 2-2,75          | 1,5        | 1,5-3      | 0,5        | 1,5-3                         | 0,25       |
| 2          | 4-5,5           | 0,6        | -          | -          | 3-5                           | 0,05       |
| 3          | 6-8,25          | 0,1        | -          | -          | -                             | -          |

Tableau 20 : Paramètres des charges d'activités rythmiques [12]

### 3.4.2.1 Limitation de fréquence propre

Pour chaque harmonique d'excitation, il faut vérifier que l'accélération maximale reste inférieure à  $\frac{a_0}{g}$ , ce qui se traduit par une condition sur la fréquence propre  $f_1$  du mode fondamental, présentée dans l'équation (30) :

$$f_1 \geq f_p \sqrt{1 + \frac{k}{\alpha_0} \frac{\alpha_h w_p}{w_t}} \quad (30)$$

où :

$k = 2$  ;  $\frac{\alpha_0}{g} = 5 \%$  pour les sauts et aérobic ;

$k = 1,3$  ;  $\frac{\alpha_0}{g} = 1,5 \%$  pour la danse ;

$k = 1,7$  ;  $\frac{\alpha_0}{g} = 5 \%$  pour le cas d'évènement sportif ou concert ;

$w_p$  est le poids surfacique maximal des personnes (fonction de leur surface d'occupation), selon l'harmonique considéré ;

$w_t$  est le poids surfacique du plancher y compris celui des personnes.

La fréquence d'excitation  $f_p$  et le poids  $w_p$  sont donnés dans le Tableau 21.

| Harmonique | Sauts (aérobic) |             | Danse      |             | Evènement sportif ou concert |             |
|------------|-----------------|-------------|------------|-------------|------------------------------|-------------|
|            | $f_p$ (Hz)      | $w_p$ (kPa) | $f_p$ (Hz) | $w_p$ (kPa) | $f_p$ (Hz)                   | $w_p$ (kPa) |
| 1          | 2,75            | 0,2         | 3          | 0,6         | 3                            | 1,5         |
| 2          | 5,5             | 0,2         | -          | -           | 5                            | 1,5         |
| 3          | 8,25            | 0,2         | -          | -           | -                            | -           |

Tableau 21 : Paramètres caractéristiques d'activités rythmiques [12]

### 3.4.2.2 Méthode d'étude de réponse

La limitation de fréquence donnée en 3.4.2.1 pouvant être assez pénalisante, une étude de réponse peut être envisagée, notamment, lorsque le critère de la précédente méthode n'est pas vérifié pour certains harmoniques. Pour un mode propre  $n$  (souvent le 1<sup>er</sup> mode), trois cas possibles sont à envisager pour chaque harmonique de fréquence  $f_p$  :

- Si  $0,83 f_p \leq f_n \leq 1,2 f_p$ , la réponse est résonante et l'accélération maximale s'écrit :

$$\frac{a_p}{g} = \frac{k}{2\xi} \frac{\alpha_h w_p}{w_t} \quad (31)$$

- Si  $f_n > 1,2 f_p$ , la réponse est transitoire et l'accélération maximale s'écrit :

$$\frac{a_p}{g} = \frac{k}{\left(\frac{f_n}{f_p}\right)^2 - 1} \frac{\alpha_h w_p}{w_t} \quad (32)$$

- Si  $f_n < 0,83 f_p$ , l'équation suivante doit être appliquée :

$$\frac{a_p}{g} = \frac{k \frac{\alpha_h w_p}{w_t}}{\sqrt{\left[\left(\frac{f_n}{f_p}\right)^2 - 1\right]^2 + \left[2\xi \frac{f_n}{f_p}\right]^2}} \quad (33)$$

Le taux d'amortissement critique  $\xi$  est pris égal à 0,06.

L'ensemble des accélérations déterminées pour les  $H$  harmoniques est ensuite combiné pour donner l'accélération totale par l'équation (34) :

$$\frac{a_m}{g} = \left[ \sum_{p=1}^H \left( \frac{a_p}{g} \right)^{1,5} \right]^{\frac{1}{1,5}} \quad (34)$$

Cette accélération doit être inférieure aux limites suivantes :

- Danse : 1,5% ;
- Sauts - évènements sportifs ou concerts : 5%.

### 3.4.3 Conclusions sur le guide AISC/CISC DG 11

La méthode de marche propre au guide AISC néglige les propriétés des harmoniques d'excitation dans la détermination de la réponse maximale, et la méthode des activités rythmiques est limitée au seul mode fondamental de vibration dans la majorité des cas, ce qui pourra résulter en une sous-estimation de la réponse en accélération en général. En revanche, dans certains cas, le calcul de l'accélération maximale pourra résulter en un jugement conservatif du confort vibratoire (cas des *maxima* locaux). L'analyse de Royvaran et al. [8] sur le retour d'expérience de l'usage de bureaux et l'application de cette méthode à plus de 50 planchers aux Etats-Unis montre tout de même qu'elle est assez fidèle au ressenti des usagers. Ceci est également confirmé par les conclusions d'analyse comparative de Muhammad et al. [9].

## 3.5 Limitations communes des guides

Les trois guides d'évaluation de confort présentés dans cet article, quoique largement utilisés et efficaces dans de nombreux cas de vibrations des planchers, présentent des limitations théoriques et d'usage, qu'elles soient spécifiques pour chaque guide (comme décrit précédemment) ou communes entre ceux-ci.

La première limitation commune réside dans le fait que l'ensemble des guides considère le chargement humain comme une action périodique déterministe, avec au plus une caractérisation semi-probabiliste, ce qui est loin d'être le cas dans la réalité. En effet, chaque personne, au cours d'un mouvement donné, produit un chargement différent des autres en termes d'amplitude et de fréquence (intervariabilité) et une même personne ne peut pas reproduire exactement la même excitation durant son mouvement (intravariabilité). Muhammad et al. [9] soulignent ce problème dans les guides étudiés et préconisent la nécessité d'entamer une analyse de vibrations dans un cadre probabiliste pour l'élaboration de modèles plus robustes dans les futures normes.

La seconde limitation est l'hypothèse que le plancher est sollicité par une seule personne en conditions de service, ce qui n'est le cas que pour une catégorie limitée de planchers (certains bureaux et espaces résidentiels). Le cas de la foule n'est pas étudié explicitement par les guides (renvoi à des charges statiques équivalentes dans le guide SCI P354), quoique très fréquent dans les constructions (bâtiments commerciaux et sportifs, gares, etc.). Vijayan et al. [13] confirment l'impact de l'effet de groupe (surtout pour des planchers élancés) et invitent à le prendre en compte dans le cadre de dimensionnement des planchers. En pratique, le guide SCI propose des coefficients de Fourier pour le cas d'un groupe effectuant des « sauts usuels » et l'annexe A de la norme ISO 10137 fournit des coefficients qui prennent en compte l'effet de réduction de la force totale d'une foule par rapport à la somme des forces des individus, aussi bien pour le cas de la marche que pour le cas des activités rythmiques. Ceux-ci peuvent être adoptés dans les modèles de charge des deux guides SCI et AISC pour avoir une première estimation d'accélération du plancher soumis à une action de foule, sans pouvoir les utiliser dans le guide HiVoSS basé sur une approche spectrale avec modèle de charge figé.

Compte tenu de ces insuffisances pouvant donner des résultats non sécuritaires, la prise en compte plus poussée du caractère aléatoire du chargement humain, ainsi que de l'effet d'un groupe de personnes sollicitant les planchers (avec étude de synchronisation), seraient des éléments clés à promouvoir pour le développement de futures méthodes d'évaluation du confort vibratoire des planchers.

## 4 Références

- [1] NF EN 1993-1-1/NA: Eurocode 3 – Calcul des structures en acier – Annexe Nationale à la NF EN 1993-1-1:2005 – Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments, AFNOR, Août 2013.
- [2] ISO 2631-1: Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1: General requirements, ISO, 1997.
- [3] ISO 2631-2: Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1Hz to 80Hz), ISO, 2003.
- [4] ISO 10137: Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations, ISO, 2007.
- [5] Deutsches Institut für Normung e. V. DIN (Norme allemande) 1999 « Vibrations aux bâtiments, Partie 2 : effets sur les personnes dans les bâtiments », DIN 4150-2, juin 1999.
- [6] Sedlacek G. et al., Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public buildings and gymnastic halls, Directorate-General for Research, European Commission, EUR 21972 EN, 2006.
- [7] Feldmann M. et al., Human-Induced Vibrations of Steel Structures (HiVoSS), RFCS, 2008.
- [8] Royvaran M., Avci O, Davis B., Analysis of floor vibration assessment methods using a large database of floors framed with W-shaped members subjected to walking excitation, Journal of Constructional Steel Research 164, 2020.
- [9] Muhammad Z.O., Reynolds P., Vibration Serviceability of Building Floors: Performance Evaluation of Contemporary Design Guidelines, Journal of Performance of Constructed Facilities, 2019.
- [10] Wyatt T.A, Design guide on the vibration of floors, SCI P076, The Steel Construction Institute, 1989.
- [11] Smith A.L., Hicks S.J., Devine P.J., Design of Floors for Vibration: A New Approach (Revised Edition, February 2009), SCI publication P354, The Steel Construction Institute, 2009.
- [12] Murray T.M., Allen D.E., Ungar E.E., Floor Vibrations Due to Human Activity, Steel Design Guide Series N°11, American Institute of Steel Construction and Canadian Institute of Steel Construction, AISC, 2003.
- [13] Vijayan A., Abraham N.M., Kumari S D A., Analysis of structures subjected to crowd loads, Procedia Structural Integrity, 2019.

## Annexe : Calcul simplifié des propriétés modales

Cette annexe présente des méthodes analytiques proposées par les trois guides d'évaluation de confort, permettant de déterminer la fréquence propre et la masse généralisée du mode fondamental de vibration, lorsque l'analyse du plancher par la méthode des éléments finis ne peut pas être effectuée.

Le lecteur est renvoyé aux préconisations de l'Eurocode 4 pour le calcul des paramètres géométriques et inertiels mixtes évoqués au niveau des méthodes analytiques.

### A.1 Guide HiVoSS

#### A.1.1 Généralités

Il convient de tenir compte d'une masse surfacique qui est la masse propre du plancher additionnée des autres charges permanentes (mobilier, finitions). Lorsque le concepteur peut être sûr de l'existence de ces dernières charges, il convient de prendre en compte les charges semi-permanentes dans une limite de 10 % des charges permanentes nominales. Une fraction de 10 à 20 % de la masse due aux charges d'exploitation est ajoutée à ces charges, avec la prise en compte d'une masse minimale représentative d'une personne de 30 kg pour les planchers très légers. De plus, il faut prendre un module élastique du béton augmenté de 10 % par rapport au module sécant statique.

#### A.1.2 Fréquence propre

Pour la fréquence propre, trois méthodes sont présentées pour les planchers mixtes : la méthode directe, la méthode de Dunkerley et la méthode des flèches.

##### A.1.2.1 Méthode directe

Les caractéristiques géométriques du plancher mixte sont illustrées à la Figure 11.

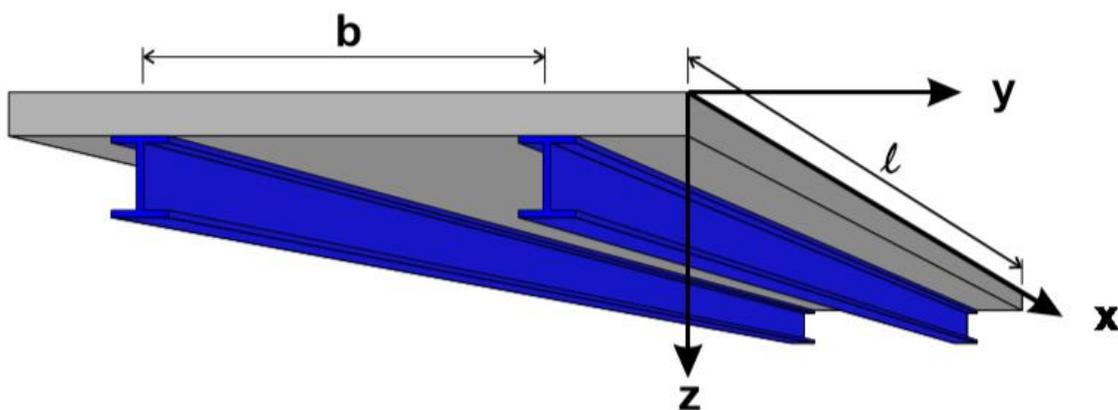


Figure 11 : Géométrie du plancher mixte [7]

La fréquence propre est obtenue par l'équation (35) :

$$f_1 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{E_y I_y}{\mu l^4}} \sqrt{1 + \left[ 2 \left( \frac{b}{l} \right)^2 + \left( \frac{b}{l} \right)^4 \right] \frac{E_x I_x}{E_y I_y}} \quad (35)$$

où :

$E_y I_y$  est la raideur flexionnelle du plancher mixte selon la direction y ;

$E_x I_x$  est la raideur flexionnelle du plancher mixte selon la direction x ;

$\mu_l$  est la masse linéique de la poutre mixte (avec largeur d'entraxe de la dalle).

### A.1.2.2 Méthode de Dunkerley

Cette méthode superpose deux modes propres : celui d'une dalle isotrope (s – slab) et celui d'une poutre mixte (b – beam). La fréquence propre totale s'écrit :

$$\frac{1}{f_1^2} = \frac{1}{f_s^2} + \frac{1}{f_b^2} \quad (36)$$

En gardant les notations de la Figure 11, les fréquences  $f_s$  et  $f_b$  sont obtenues respectivement par les équations (37) et (38) :

$$f_s = \frac{\alpha}{2\pi l^2} \sqrt{\frac{E_c h^3}{12 \mu (1-\nu^2)}} \quad (37)$$

$$f_b = \frac{\beta}{\pi} \sqrt{\frac{3E_a I_b}{\gamma \mu_l l^4}} \quad (38)$$

où :

$h$  est l'épaisseur de la dalle ;

$E_c$  est le module d'élasticité du béton ;

$E_a$  est le module d'élasticité de l'acier ;

$I_b$  est le moment d'inertie de la poutre mixte ;

$\nu$  est le coefficient de Poisson du béton (de l'ordre de 0,2) ;

$\mu$  est la masse surfacique de la dalle (en kg/m<sup>2</sup>) ;

$\mu_l$  est la masse linéique de la poutre (en kg/m, avec largeur d'entraxe de la dalle).

Les valeurs des coefficients  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$  dépendent des conditions d'appui des dalles et des poutres, selon les Tableaux 22 et 23.

| Conditions d'appui                     | $\alpha$ (avec $\lambda = \frac{l}{b}$ )                      |
|--|---|
| Simplement appuyée sur 4 bords         | $\alpha = 1,57 (1 + \lambda^2)$                               |
| Encastrée sur 2 bords opposés          | $\alpha = 1,57 \sqrt{1 + 2,5 \lambda^2 + 5,14 \lambda^4}$     |
| Encastrée sur 3 bords                  | $\alpha = 1,57 \sqrt{5,14 + 2,92 \lambda^2 + 2,44 \lambda^4}$ |
| Encastrée sur 1 bord                   | $\alpha = 1,57 \sqrt{1 + 2,33 \lambda^2 + 2,44 \lambda^4}$    |
| Encastrée sur 2 bords perpendiculaires | $\alpha = 1,57 \sqrt{2,44 + 2,72 \lambda^2 + 2,44 \lambda^4}$ |
| Encastrée sur 4 bords                  | $\alpha = 1,57 \sqrt{5,14 + 3,13 \lambda^2 + 5,14 \lambda^4}$ |

Tableau 22 : Coefficient  $\alpha$  [7]

| Conditions d'appui  | $\beta$ | $\gamma$ |
|---------------------|---------|----------|
| Bi-encastree        | 4       | 0,37     |
| Encastree-articulée | 2       | 0,2      |
| Bi-articulée        | 2       | 0,49     |
| Console             | 0,5     | 0,24     |

Tableau 23 : Coefficients  $\beta$  et  $\gamma$  [7]

### A.1.2.3 Méthode du poids propre

La fréquence propre d'un plancher peut être approximée par l'équation (39) :

$$f_1 = \frac{18}{\sqrt{\delta_{max}}} \quad (39)$$

Où  $\delta_{max}$  (en mm) est égal à la somme de la flèche de la poutre mixte et de celle de la dalle, la dernière est déterminée en supposant une déformation nulle pour les poutres.

### A.1.3 Masse généralisée

La masse généralisée est basée sur la détermination des flèches de la dalle et de la poutre, selon l'équation (40) :

$$M_1 = M_{tot} \left[ \frac{\delta_x^2 + \delta_y^2}{2\delta^2} + \frac{8}{\pi^2} \frac{\delta_x \delta_y}{\delta^2} \right] \quad (40)$$

où :

$M_{tot}$  est la masse totale du plancher ;

$\delta_x$  est la flèche de la poutre ;

$\delta_y$  est la flèche de la dalle considérant la déformée de la poutre comme nulle ;

$\delta$  est la flèche totale :  $\delta = \delta_x + \delta_y$ .

Lorsque la raideur transversale de la dalle est négligeable devant celle de la poutre mixte, le calcul peut se limiter à la masse généralisée de la poutre mixte seule, déterminée par l'une des équations présentées dans le Tableau 24 ( $\mu_l$  étant sa masse linéique).

| Conditions d'appuis | Masse généralisée    |
|---------------------|----------------------|
| Bi-encastree        | $M_1 = 0,41 \mu_l l$ |
| Encastree-articulée | $M_1 = 0,45 \mu_l l$ |
| Bi-articulée        | $M_1 = 0,5 \mu_l l$  |
| Console             | $M_1 = 0,64 \mu_l l$ |

Tableau 24 : Masse généralisée d'une poutre [7]

## A.2 Guide SCI P354

Les équations simplifiées présentées dans cette section ne sont jamais utilisées dans le cadre de la méthode générale présentée dans la section 3.3.1.

### A.2.1 Généralités

Il convient de prendre en compte les charges suivantes dans le calcul de la masse surfacique pour la détermination des caractéristiques dynamiques :

- Poids propre du plancher ;
- Poids des équipements et des finitions ;
- Charges semi-permanentes (en cas de présence du poids précédent, hors planchers d'activités rythmiques) ;
- 10 % des charges d'exploitation.

Le Tableau 25 présente les valeurs préconisées du module dynamique du béton.

| Type du béton   | Poids sec (kN/m <sup>3</sup> ) | Module dynamique (GPa) |
|-----------------|--------------------------------|------------------------|
| Béton ordinaire | 23,5                           | 38                     |
| Béton léger     | 18                             | 22                     |

Tableau 25 : Caractéristiques du béton [11]

### A.2.2 Fréquence propre

Les méthodes présentées dans cette section s'appliquent aux méthodes simplifiées du guide SCI (voir sections 3.3.2 et 3.3.3).

La fréquence propre du mode fondamental dépend de deux modes de déformation :

- Mode des poutres secondaires, entraînant une flèche  $\delta_b$  (en mm) ;
- Mode des poutres principales, entraînant une flèche  $\delta_p$  (en mm).

La fréquence propre a pour expression :

$$f_1 = \text{Min} \left( \frac{18}{\sqrt{\delta_b}}, \frac{18}{\sqrt{\delta_p}} \right) \quad (41)$$

Pour déterminer ces flèches, deux cas se présentent :

- Les travées sont indépendantes et les déplacements dépendent de la configuration du plancher présentée dans le Tableau 26.

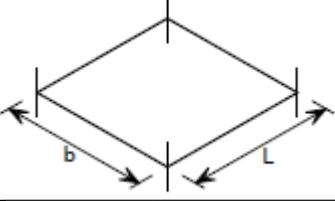
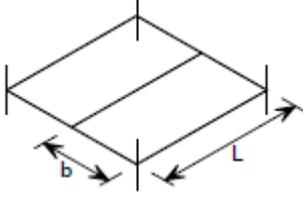
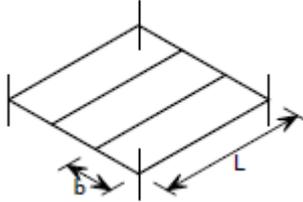
| Configuration   | $\delta_b$  | $\delta_p$   |
|---|---|--|
|  | $\frac{mgb}{384 E} \left( \frac{5L^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$ | -  |
|  | $\frac{mgb}{384 E} \left( \frac{5L^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$ | $\frac{mgb}{384 E} \left( \frac{64 b^3 L}{I_p} + \frac{L^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$  |
|  | $\frac{mgb}{384 E} \left( \frac{5L^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$ | $\frac{mgb}{384 E} \left( \frac{368 b^3 L}{I_p} + \frac{L^4}{I_b} + \frac{b^3}{I_s} \right)$ |

Tableau 26 : Flèche pour poutres principales et secondaires [11]

où :

$m$  est la masse surfacique du plancher ;

$g$  est l'accélération de la pesanteur ;

$E$  est le module d'Young de l'acier ;

$I_b$  est le moment d'inertie de la poutre secondaire mixte ;

$I_p$  est le moment d'inertie de la poutre principale mixte ;

$I_s$  est le moment d'inertie de la dalle (par mètre linéaire).

- Les travées sont continues et un coefficient correcteur, présenté dans le Tableau 27, est appliqué aux déplacements obtenus pour le cas de travées indépendantes.

| Nombre de travées continues | Coefficient correcteur   |
|-----------------------------|--|
| 2                           | $\frac{0,4 + \frac{I_M L_S}{I_S L_M} \left( 1 + 0,6 \frac{L_S^2}{L_M^2} \right)}{1 + \frac{I_M L_S}{I_S L_M}}$     |
| 3                           | $\frac{0,6 + 2 \frac{I_M L_S}{I_S L_M} \left( 1 + 1,2 \frac{L_S^2}{L_M^2} \right)}{3 + 2 \frac{I_M L_S}{I_S L_M}}$ |

Tableau 27 : Coefficient correcteur pour travées continues [11]

Dans le Tableau 27,  $I$  et  $L$  sont respectivement le moment d'inertie et la portée de la travée étudiée.  $M$  est l'indice de la travée la plus longue et  $S$  est celui de la travée la plus courte.

Pour le cas de la 2<sup>nd</sup>e méthode simplifiée, les planchers légers sont généralement beaucoup plus flexibles dans la direction des poutres secondaires. Par conséquent, la fréquence propre est calculée uniquement par rapport à ce mode :

$$f_1 = \frac{18}{\sqrt{\delta_b}} \quad (42)$$

### A.2.3 Masse généralisée

La masse généralisée a pour expression :

$$M_1 = m L_{eff} S \quad (43)$$

où :

$m$  est la masse surfacique totale du plancher ;

$L_{eff}$  est la longueur effective du plancher ;

$S$  est la largeur effective du plancher.

Les longueur et largeur effectives dépendent de la configuration de la dalle et la poutre, ainsi que du type du plancher, qu'il soit ordinaire (usage de la 1<sup>ère</sup> méthode simplifiée) ou léger (usage de la 2<sup>nd</sup>e méthode simplifiée).

#### A.2.3.1 1<sup>ère</sup> méthode simplifiée

Dans cette méthode, deux configurations sont envisagées :

- 1<sup>ère</sup> configuration : la dalle surmonte les poutres (cas des planchers courants) ;
- 2<sup>nd</sup>e configuration : la dalle se trouve entre les semelles des poutres (cas des planchers minces).

Le calcul des dimensions  $L_{eff}$  et  $S$  selon ces deux configurations est détaillé ci-après.

##### A.2.3.1.1 1<sup>ère</sup> configuration : dalle surmontant les poutres

Dans cette configuration, la dalle est coulée sur les semelles supérieures des poutres, donnant lieu aux caractéristiques géométriques présentées dans la Figure 12.

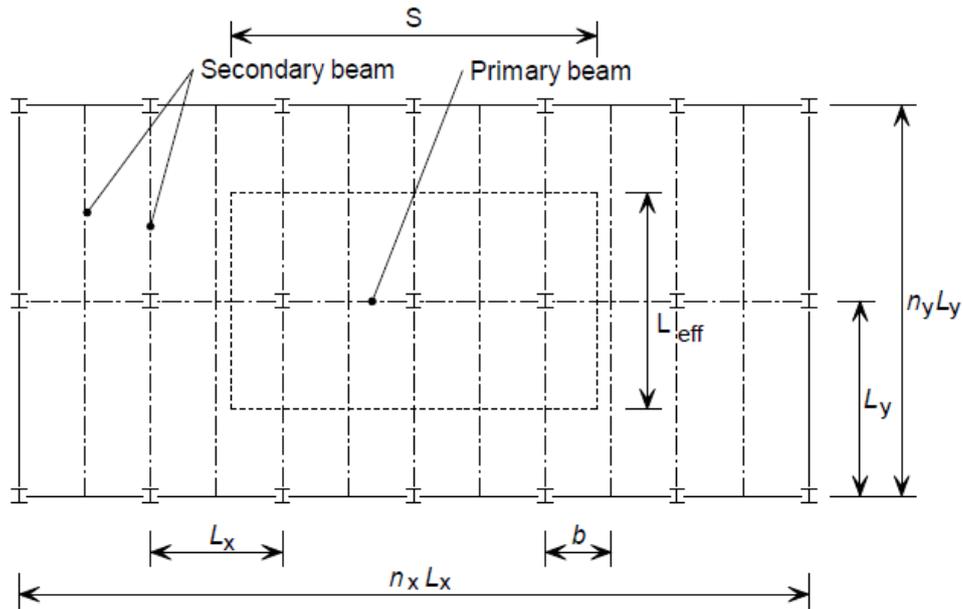


Figure 12 : Géométrie de la 1<sup>ère</sup> configuration [11]

Les longueur et largeur efficaces ont pour expression tant que  $n_x \leq 4$  et  $n_y \leq 4$  :

$$L_{eff} = 1,09 \times (1,1)^{n_y-1} \left[ \frac{(EI)_b}{m b f_1^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (44)$$

$$S = \eta (1,15)^{n_x-1} \left[ \frac{(EI)_s}{m f_1^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (45)$$

où :

$m$  est la masse surfacique totale du plancher ;

$f_1$  est la fréquence propre fondamentale du plancher ;

$(EI)_b$  est la raideur flexionnelle de la poutre secondaire mixte ;

$(EI)_s$  est la raideur flexionnelle de la dalle (selon l'axe fort) ;

$\eta$  est un coefficient prenant en compte l'influence de la fréquence propre sur la réponse de la dalle, obtenu d'après le Tableau 28.

| Fréquence propre                          | $\eta$            |
|---|-------------------|
| $f_1 < 5 \text{ Hz}$                      | 0,5               |
| $5 \text{ Hz} \leq f_1 \leq 6 \text{ Hz}$ | $0,21 f_1 - 0,55$ |
| $f_1 > 6 \text{ Hz}$                      | 0,71              |

Tableau 28 : Coefficient  $\eta$  [11]

### A.2.3.1.2 2<sup>de</sup> configuration : dalle entre les semelles des poutres – planchers minces

Dans cette configuration, la dalle est placée sur les semelles inférieures des poutres, entraînant les caractéristiques géométriques illustrées par la Figure 13.

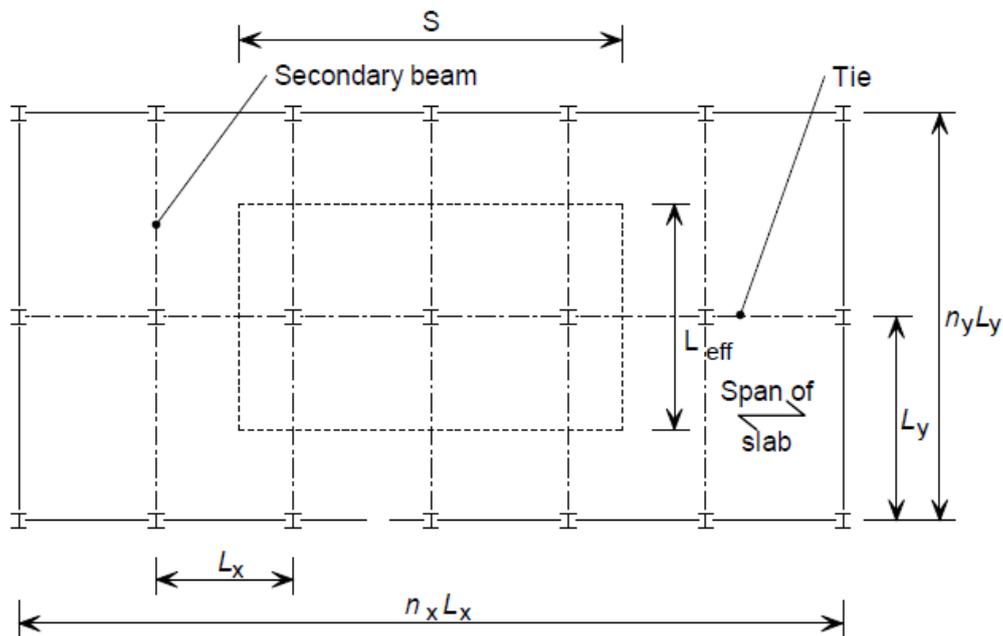


Figure 13 : Géométrie de la 2<sup>de</sup> configuration [11]

Les longueur et largeur efficaces ont pour expression tant que  $n_x \leq 4$  et  $n_y \leq 4$  :

$$L_{eff} = 1,09 \left[ \frac{(EI)_b}{m L_x f_1^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (46)$$

$$S = 2,25 \left[ \frac{(EI)_s}{m f_1^2} \right]^{\frac{1}{4}} \quad (47)$$

### A.2.3.2 2<sup>de</sup> méthode simplifiée

Les caractéristiques géométriques d'un plancher léger sont présentées à la Figure 14.

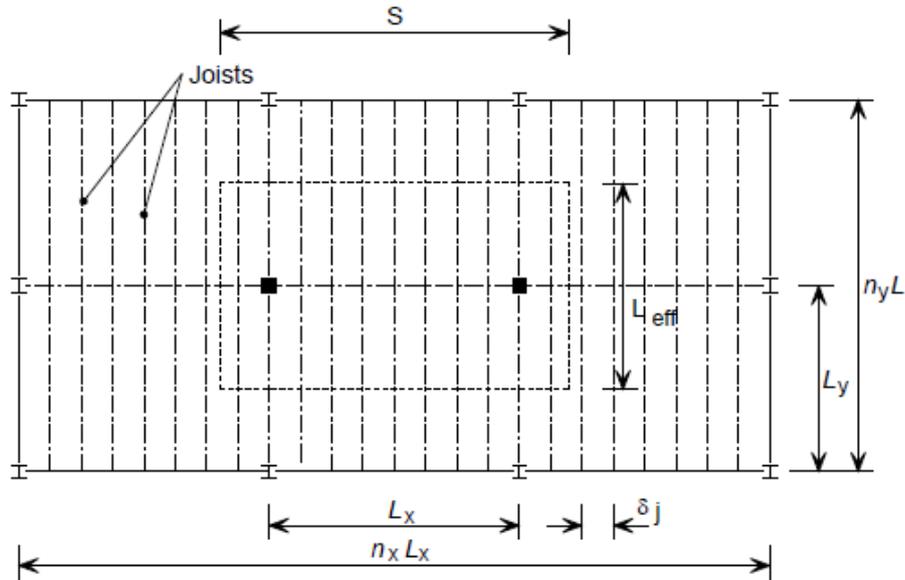


Figure 14 : Géométrie d'un plancher léger [11]

Les longueur et largeur efficaces ont pour expression tant que  $n_x \leq 4$  et  $n_y \leq 4$  :

$$L_{eff} = n_y [0,2 L_y^2 - 2,1 L_y + 7,5] \sqrt{\frac{I_b}{5,3 \times 10^{-6}}} \quad (48)$$

$$S = 0,75 (L_x + 1) \sqrt{\frac{I_b}{5,3 \times 10^{-6}}} + 5,9 (0,6 - \delta_j) \quad (49)$$

$I_b$  étant le moment d'inertie par mètre linéaire de la poutre secondaire mixte.

### A.3 Guide AISC/CISC DG 11

#### A.3.1 Généralités

Les poids surfaciques à prendre en compte dans le calcul sont :

- Poids propre surfacique du plancher ;
- Charges permanentes surfaciques des éléments de second œuvre (finitions et équipements) ;
- Une charge d'exploitation de  $0,25 \text{ kN/m}^2$  pour les planchers résidentiels et de  $0,5 \text{ kN/m}^2$  pour les planchers de bureaux.

De plus, le module dynamique du béton  $E_{c,dyn}$  est obtenu en majorant de 35 % le module statique sécant.

Lors de l'évaluation de l'inertie des poutres mixtes, la largeur efficace de la dalle est obtenue à partir de l'expression suivante :

$$b_{eff} = \text{Min} (e_b, 0,4 L) \quad (50)$$

$L$  étant la longueur du plancher et  $e_b$  l'entraxe entre poutres.

### A.3.2 Fréquence propre

L'équation de Dunkerley est utilisée pour le calcul de la fréquence propre :

$$\frac{1}{f_1^2} = \frac{1}{f_j^2} + \frac{1}{f_g^2} \quad (51)$$

Cette fréquence propre est d'ailleurs communément exprimée en fonction des flèches des solives et traverses :

$$f_1 = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j + \Delta_g}} \quad (52)$$

où :

$g$  est l'accélération de la pesanteur ;

$\Delta_j$  est la flèche statique d'une solive ;

$\Delta_g$  est la flèche statique d'une traverse.

Pour les bâtiments de grande hauteur (ayant plus de 6 étages), il convient d'ajouter le déplacement axial des poteaux  $\Delta_c$  :

$$f_1 = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_c + \Delta_j + \Delta_g}} \quad (53)$$

Pour des travées indépendantes, deux cas se présentent concernant le calcul de la flèche pour la poutre étudiée (solive ou traverse) :

- Poutre simplement appuyée :

$$\Delta_i = \frac{5w_i L_i^4}{384 E_s I_i} \quad (54)$$

- Poutre en console :

$$\Delta_i = \frac{w_i L_i^4}{8 E_s I_i} \quad (55)$$

où :

$\Delta_i$  est la flèche de la poutre étudiée ;

$L_i$  est la portée de la poutre ;

$w_i$  est le poids surfacique supporté par la poutre ;

$E_s I_i$  est la raideur flexionnelle de la poutre.

Pour le cas des travées continues, cette flèche est multipliée par les mêmes coefficients correcteurs du guide SCI, donnés dans le Tableau 26.

### A.3.3 Poids généralisé

Le poids généralisé est utilisé dans la méthode de marche, présentée dans la section 3.4.1. Les poids des deux modes des solives et des traverses sont combinés à partir de l'équation (56) :

$$W_1 = \frac{W_j \Delta_j + W_g \Delta_g}{\Delta_j + \Delta_g} \quad (56)$$

où :

$W_j$  est le poids généralisé supporté par une solive ;

$W_g$  est le poids généralisé supporté par une traverse.

Le poids généralisé de chaque poutre  $i$  (solive ou traverse) est :

$$W_i = w_i L_i B_i \quad (57)$$

où :

$W_i$  est le poids généralisé supporté par la poutre ;

$w_i$  est le poids surfacique supporté par la poutre ;

$L_i$  est la portée de la poutre ;

$B_i$  est la largeur effective de la poutre, dont le calcul sera détaillé ci-après.

#### A.3.3.1 Largeur effective des solives

La largeur effective des solives a pour expression :

$$B_j = \text{Min} \left( C_j \left( \frac{D_s}{D_j} \right)^{\frac{1}{4}} L_j, \frac{2}{3} L_f \right) \quad (58)$$

où :

$L_f$  est la longueur du plancher étudié ;

$L_j$  est la portée d'une solive ;

$C_j$  est un coefficient égal à 2 pour des solives intérieures et 1 pour des solives de rive ;

$D_s$  est le moment d'inertie équivalent de la dalle, obtenu par :  $D_s = \frac{1}{n} \frac{d_e^3}{12}$ , tel que :

- $d_e = h_{dalle} + \frac{h_{revêtement}}{2}$  est l'épaisseur utile du plancher ;
- $n = \frac{E_s}{E_{c,dyn}}$  est le coefficient d'équivalence acier/béton ;

$D_j$  est le moment d'inertie d'une solive divisé par l'entraxe entre solives  $S$ .

### A.3.3.2 Largeur effective des traverses

La largeur effective des traverses a pour expression :

$$B_g = \text{Min} \left( C_g \left( \frac{D_j}{D_g} \right)^{\frac{1}{4}} L_g, \frac{2}{3} l_f \right) \quad (59)$$

où :

$l_f$  est la largeur du plancher étudié ;

$L_g$  est la portée d'une traverse ;

$C_g$  est un coefficient dépendant de l'assemblage entre les solives et les traverses, égal à :

- 1,6 si celui-ci est au niveau des semelles supérieures des traverses ;
- 1,8 si celui-ci est au niveau des âmes des traverses ;

$D_j$  est le moment d'inertie d'une solive divisé par l'entraxe entre solives  $S$  ;

$D_g$  est le moment d'inertie d'une traverse divisé par la portée moyenne des solives  $L_j$ .

Pour une traverse positionnée en rive, la largeur s'écrit :  $B_g = \frac{2}{3} L_j$ .

### A.3.3.3 Cas particuliers

Si le plancher est composé de poutres continues (solives ou traverses), avec un rapport de portées entre travées adjacentes supérieur à 0,7, leur poids généralisé est augmenté de 50 %.

De plus, si  $L_j \leq \frac{L_g}{2}$ , le mode des solives et le mode combiné sont tous deux vérifiés séparément (chacun avec sa fréquence propre et son poids généralisé).

Finalement, si  $0,5 \leq \frac{L_g}{B_j} \leq 1$ , une correction est affectée à  $\Delta_g$ ,  $f_1$  et  $W_1$  comme suit:

$$\Delta'_g = \frac{L_g}{B_j} \Delta_g \quad (60)$$

$$f_1 = 0,18 \sqrt{\frac{g}{\Delta_j + \Delta'_g}} \quad (61)$$

$$W_1 = \frac{W_j \Delta_j + W_g \Delta'_g}{\Delta_j + \Delta'_g} \quad (62)$$