



Guide pour le contrôle vibratoire des planchers





Ce guide présente une méthode d'évaluation du comportement vibratoire des planchers afin de garantir le confort des occupants. Cette méthode se base sur les résultats d'une récente recherche européenne (RFCS Project "Vibration of floors" [1]).

Le comportement de la structure est déterminé suivant des théories usuelles bien connues.

Table des matières:

1.	Introduction	3
2.	Définitions	7
3.	Détermination des caractéristiques des planchers	11
4.	Classification des vibrations	15
5.	Procédure d'évaluation et diagrammes	19
Annex A	Formules pour calculs manuels	31
Annex B	Exemples	43
Support technique & parachèvement		52
Références		52
Vos partenaires		53



1. INTRODUCTION

1. Introduction

Les structures de planchers sont généralement dimensionnées aux Etats Limites Ultimes (ELU) ainsi qu'aux Etats Limites de Service (ELS) :

- Les Etats Limites Ultimes traitent de la stabilité et de la résistance,
- Les Etats Limites de Service font essentiellement référence aux vibrations et par conséquent dépendent des raideurs, des masses, de l'amortissement et des mécanismes d'excitation.

Pour les structures de planchers minces, comme celles en acier ou mixtes acier-béton, les critères de service sont souvent prépondérants dans le dimensionnement.

Ce guide aborde les points suivants :

- Définition des vibrations acceptables par le biais d'une classification (chapitre 4) et,
- Evaluation de la réponse vibratoire du plancher aux actions d'origine humaine en fonction de l'utilisation prévue du bâtiment (chapitre 5).

La figure 1 montre une vue générale de la procédure d'évaluation présentée au chapitre 5.

Plusieurs caractéristiques dynamiques du plancher sont nécessaires pour l'évaluation du comportement vibratoire. Ces caractéristiques et les méthodes simplifiées pour leur détermination, sont brièvement abordées dans l'annexe A. L'annexe B reprend des exemples de calcul.

Le guide se repose sur des méthodes et des recommandations simples pour juger de l'acceptabilité des vibrations provoquées par des personnes lors d'une utilisation normale. Les mesures réelles effectuées sur site après construction pourraient différer des valeurs évaluées, sans pour autant que ces dernières puissent être remises en cause.

Les méthodes de calcul des vibrations de plancher font référence aux vibrations de résonance d'origine humaine, provoquées par la marche de personnes lors d'une utilisation normale du plancher du bâtiment. Les vibrations provoquées par des machines ou celles provenant d'un trafic de véhicule, ou autre ne seront pas traitées dans ce guide.

De même, ce guide ne peut pas être utilisé dans le cas de passerelles pour piétons ou toute autre structure n'ayant pas de caractéristiques structurelles ou d'utilisation similaires aux planchers de bâtiment.

Figure 1: procédure d'évaluation
(voir Chapitre 5)

**Détermination des caractéristiques
dynamiques du plancher:**

- Fréquence propre
- Masse modale
- Amortissement

(Chapitre 3 ; Annexe A)



Lecture de la valeur d' OS-RMS₉₀

(Chapitre 5)



Détermination de la classe d'acceptabilité

(Chapitre 4)



2. DÉFINITIONS

2. Définitions

Les définitions ici présentes sont applicables uniquement dans le contexte de ce guide.

Amortissement D

L'amortissement est la dissipation d'énergie d'un système vibrant. L'amortissement total consiste en

- L'amortissement dû aux matériaux et à la structure,
- L'amortissement dû au mobilier et aux finitions (ex. faux-plafond),
- La redistribution de l'énergie dans l'ensemble du bâtiment

Masse modale M_{mod}

Dans de nombreux cas chaque mode d'un système comportant plusieurs degrés de liberté peut être assimilé à un système à un seul degré de liberté

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K_{mod}}{M_{mod}}}$$

avec f est la fréquence propre du mode considéré,
 K_{mod} est la raideur modale,
 M_{mod} est la masse modale.

La masse modale peut donc être interprétée comme la masse activée dans un mode vibratoire spécifique.

La détermination de la masse modale est décrite au chapitre 3.

Fréquence propre f

Chaque structure a son propre comportement dynamique face à la forme et la durée $T[s]$ d'une seule oscillation. La fréquence f est l'inverse du temps d'oscillation ou période $T(f = 1/T)$.

La fréquence propre est la fréquence d'un système libre pouvant osciller sans excitation extérieure continue.

Chaque structure a autant de fréquences propres et de modes vibratoires (formes d'oscillation) associés que de degrés de liberté. Elles se distinguent généralement par les différents niveaux d'énergie créés par l'oscillation. La fréquence propre (fondamentale) est celle qui correspond au niveau d'énergie le plus bas. C'est donc celle qui sera activée de préférence en premier.

L'équation de la fréquence propre d'un système libre à un degré de liberté est

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

où : K est la raideur,
 M est la masse.

La détermination des fréquences est décrite dans le chapitre 3.

OS-RMS₉₀

RMS- Valeur efficace de la vitesse (verticale) sous l'effet de la marche d'une personne couvrant 90% de personnes marchant normalement.

OS: "One step" pas unique

RMS: Root Mean Square = valeur efficace de la vitesse v

$$v_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)^2 dt} = \frac{v_{pointe}}{\sqrt{2}}$$

où : T est la période étudiée.



3. DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES DES PLANCHERS

3. Détermination des caractéristiques des planchers

Les caractéristiques des planchers peuvent être déterminées soit par calcul simplifié soit par analyse aux éléments finis ou encore par essai.

Puisque ce guide est une aide à la vérification essentiellement pour les nouvelles constructions, les procédures de test ne sont pas abordées mais seulement référencées en [1].

Les différents programmes de calcul par éléments finis permettent des calculs dynamiques et offrent la possibilité d'obtenir les fréquences propres. La masse modale est aussi donnée par la plupart des programmes par une analyse de la fréquence.

Dans la pratique, il existe des différences d'un programme à l'autre au niveau des résultats d'analyses par éléments finis, en fonction de la définition des éléments, de la considération de l'amortissement, et enfin du type de résultat donné par le calcul. De ce fait, seulement quelques informations générales seront données dans ce guide à ce sujet.

Si les analyses par éléments finis sont utilisées pour le dimensionnement des planchers par rapport aux vibrations, il est à noter que les calculs dynamiques (ELS) pourront être très différents des calculs aux ELU car ils se limitent aux petites déformations engendrées par les vibrations. Un exemple typique est la différence des conditions limites en analyse vibratoire: Un appui peut être considéré comme simple aux ELU mais comme encastré lors d'un calcul de vibration.

Le module d'élasticité dynamique du béton devrait être admis égal au module sécant statique E_{cm} augmenté de 10%.

Les fréquences et les masses modales des plaques isotropes et orthotropes ainsi que celles des poutres peuvent être calculées manuellement par les formules contenues dans l'annexe A.

L'amortissement a une influence importante sur le comportement vibratoire d'un plancher. La valeur de l'amortissement d'un système en vibration peut être calculée indépendamment des fréquences et des masses modales en considérant les valeurs données dans la Table 1. Ces valeurs prennent en compte l'influence de l'amortissement de la structure en fonction des différents matériaux, de l'amortissement dû au mobilier et de celui dû aux finitions. L'amortissement D est obtenu par l'addition des valeurs appropriées de D_1 à D_3 .

Pour le calcul des caractéristiques dynamiques du plancher, il est fortement conseillé d'ajouter une fraction réaliste des charges d'exploitation (variables) à la masse même du plancher (m , M). Suivant l'expérience dans les bâtiments résidentiels et les bureaux, les valeurs vont de 10 % à 20 % des charges d'exploitation (variables).

Table 1: Calcul de l'amortissement

Type	Amortissement (% de l'amortissement critique)
Amortissement de la structure D_1	
Bois	6%
Béton	2%
Acier	1%
Mixte acier-béton	1%
Amortissement du mobilier D_2	
Bureau de 1 à 3 personnes avec cloisons	2%
Bureau sans armoires ni étagères	0%
Bureau ouvert "open space"	1%
Librairie	1%
Résidentiel	1%
Ecoles	0%
Hall de sport	0%
Amortissement des finitions D_3	
Faux-plafond	1%
Faux-plancher	0%
Chape flottante	1%
Amortissement total $D = D_1 + D_2 + D_3$	



4. CLASSIFICATION DES VIBRATIONS

4. Classification des vibrations

La perception des vibrations par les personnes et le sentiment individuel de gêne dépendent de plusieurs aspects. Les plus importants sont :

- La direction de la vibration, même si dans ce guide uniquement la vibration verticale est considérée,
- La posture des personnes comme être debout, allongée ou assise ;
- L'activité dans laquelle la personne se trouve est importante pour sa perception des vibrations; Une personne travaillant dans une usine de production perçoit différemment les vibrations que celle qui est assise, concentrée, dans un bureau ou bien effectuant une opération chirurgicale,
- L'âge et l'état de santé des personnes rencontrées sont aussi des facteurs importants conditionnant le sentiment de gêne causé par les vibrations.

La perception des vibrations est donc un problème individuel qui ne peut être décrit que d'une façon qui réponde aux attentes de confort de la majorité.

Il est à noter que ce guide se penche uniquement sur les vibrations qui touchent au confort des occupants et non à l'intégrité de la structure.

Afin d'obtenir une procédure de vérification universelle pour les vibrations d'origine humaine, il est recommandé d'adopter comme mesure la valeur OS-RMS. Cette valeur correspond à l'oscillation harmonique causée par un pas de référence sur le plancher.

Comme l'effet dynamique de la marche sur un plancher dépend de certaines conditions comme, par exemple, le poids de la personne, la vitesse de la marche, le type de chaussure ou du revêtement, etc, il est recommandé de prendre comme valeur de référence 90 % de OS-RMS ($OS\ RMS_{90}$). L'indice « 90 » indique que 90 pourcent de toutes les valeurs OS-RMS sont couvertes par cette valeur.

La Table 2 donne des recommandations en fonction des différentes classes et de l'utilisation du plancher.

Table 2: Classification des planchers et recommandations en fonction de l'utilisation

Classe	OS-RMS ₉₀		utilisation du plancher									
	Limite inférieure	Limite supérieure	Endroit sensible	Santé	Education	Résidentiel	Bureau	Réunion	Commerce	Hôtel	Industriel	Sport
A	0.0	0.1	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé
B	0.1	0.2	Critique	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé
C	0.2	0.8	Non recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé
D	0.8	3.2	Non recommandé	Critique	Critique	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé	Recommandé
E	3.2	12.8	Non recommandé	Non recommandé	Non recommandé	Critique	Critique	Critique	Critique	Critique	Recommandé	Recommandé
F	12.8	51.2	Non recommandé	Non recommandé	Non recommandé	Non recommandé	Non recommandé	Non recommandé	Non recommandé	Non recommandé	Critique	Critique

- Recommandé
- Critique
- Non recommandé



5. PROCÉDURE D'ÉVALUATION ET DIAGRAMMES

5. Procédure d'évaluation et diagrammes

Une vue générale de la procédure d'évaluation est montrée à la Figure 2. La méthode présente 3 étapes dans lesquelles la détermination des caractéristiques dynamiques du plancher est la plus complexe. C'est pourquoi des explications générales sont données dans le chapitre 3 ainsi que des méthodes simplifiées dans l'Annexe A.

Lorsque la masse modale et la fréquence ont été obtenues, la valeur de l'OS-RMS₉₀ et la classe d'acceptabilité du plancher peuvent être déterminées grâce aux diagrammes suivants (figures 4 à 12). Le choix du diagramme dépend de la valeur de l'amortissement du plancher en condition réelle d'utilisation (finitions et mobilier compris), voir chapitre 3.

Les diagrammes ont été élaborés par l'institut TNO Bouw, aux Pays-Bas dans le cadre de [1].

Figure 2: Procédure d'évaluation

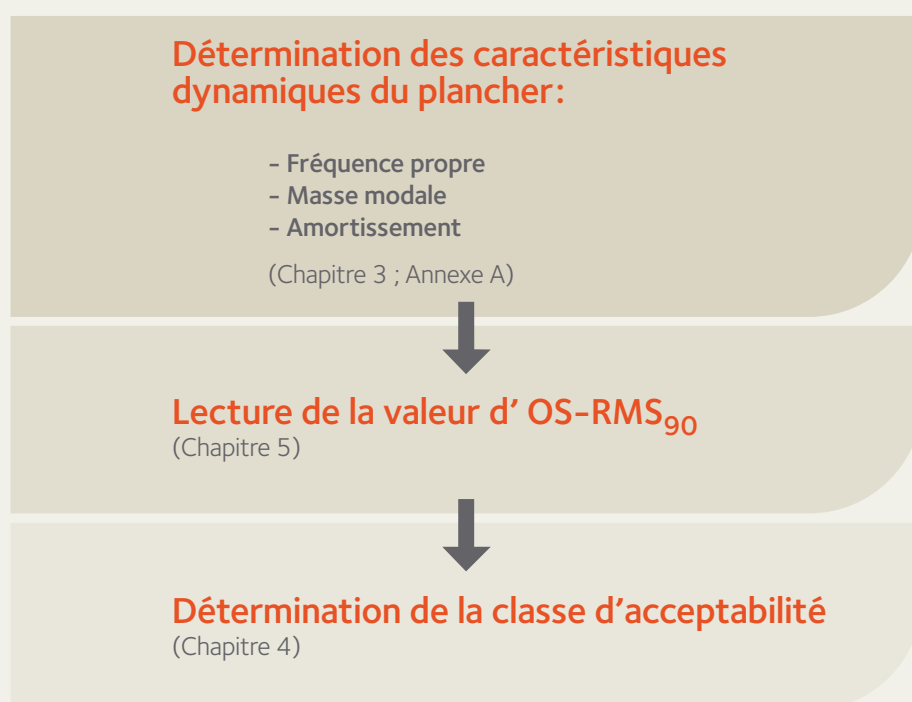
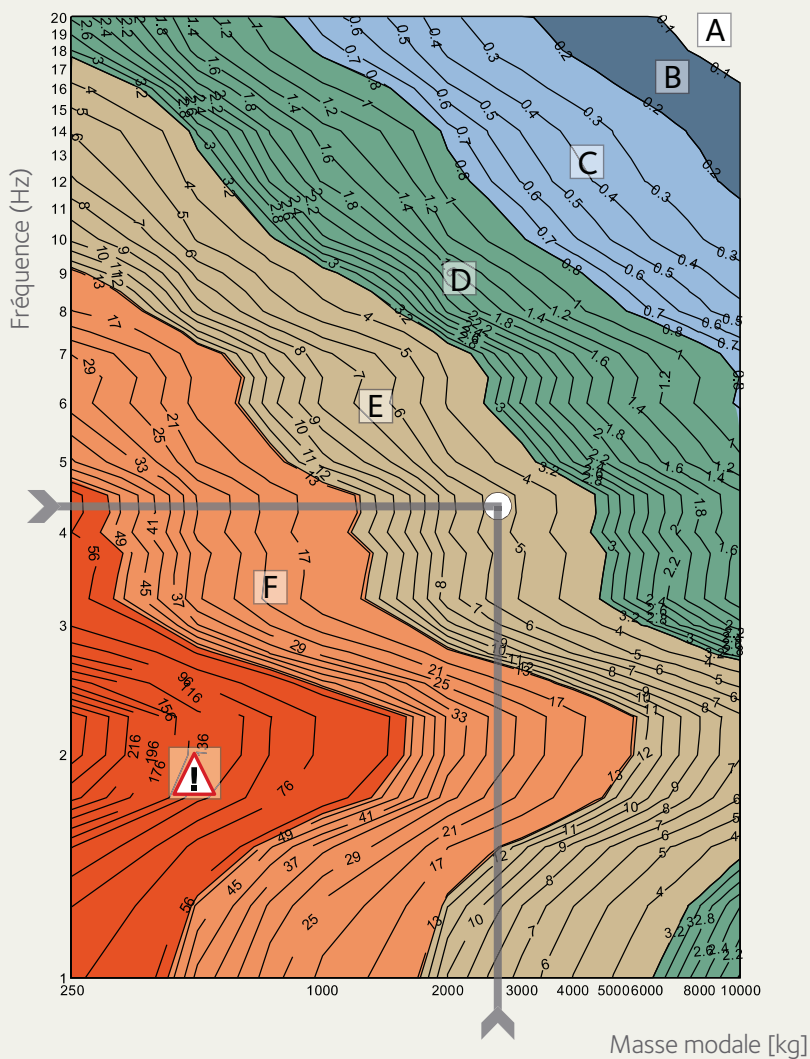


Figure 3: Principe d'application des diagrammes



Le diagramme s'utilise en repérant la masse modale sur l'axe des abscisses et la fréquence correspondante sur l'axe des ordonnées. La valeur OS-RMS et la classe d'acceptabilité sont directement lues au point de coordonnées correspondantes.



: signifie une zone en dehors du domaine tolérable

Figure 4: OS-RMS₉₀ pour un amortissement de 1 %

Classification pour un amortissement de 1 %

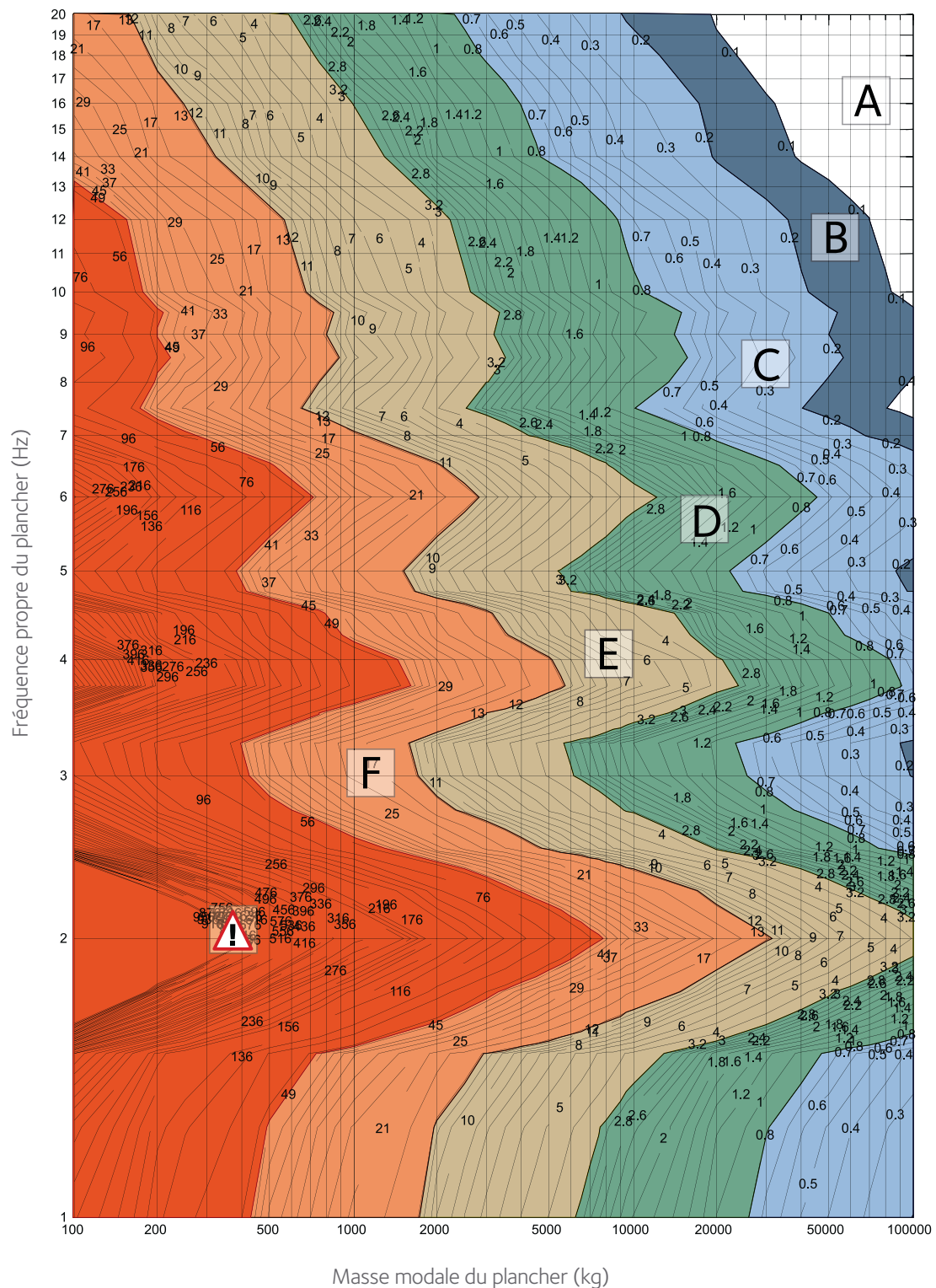


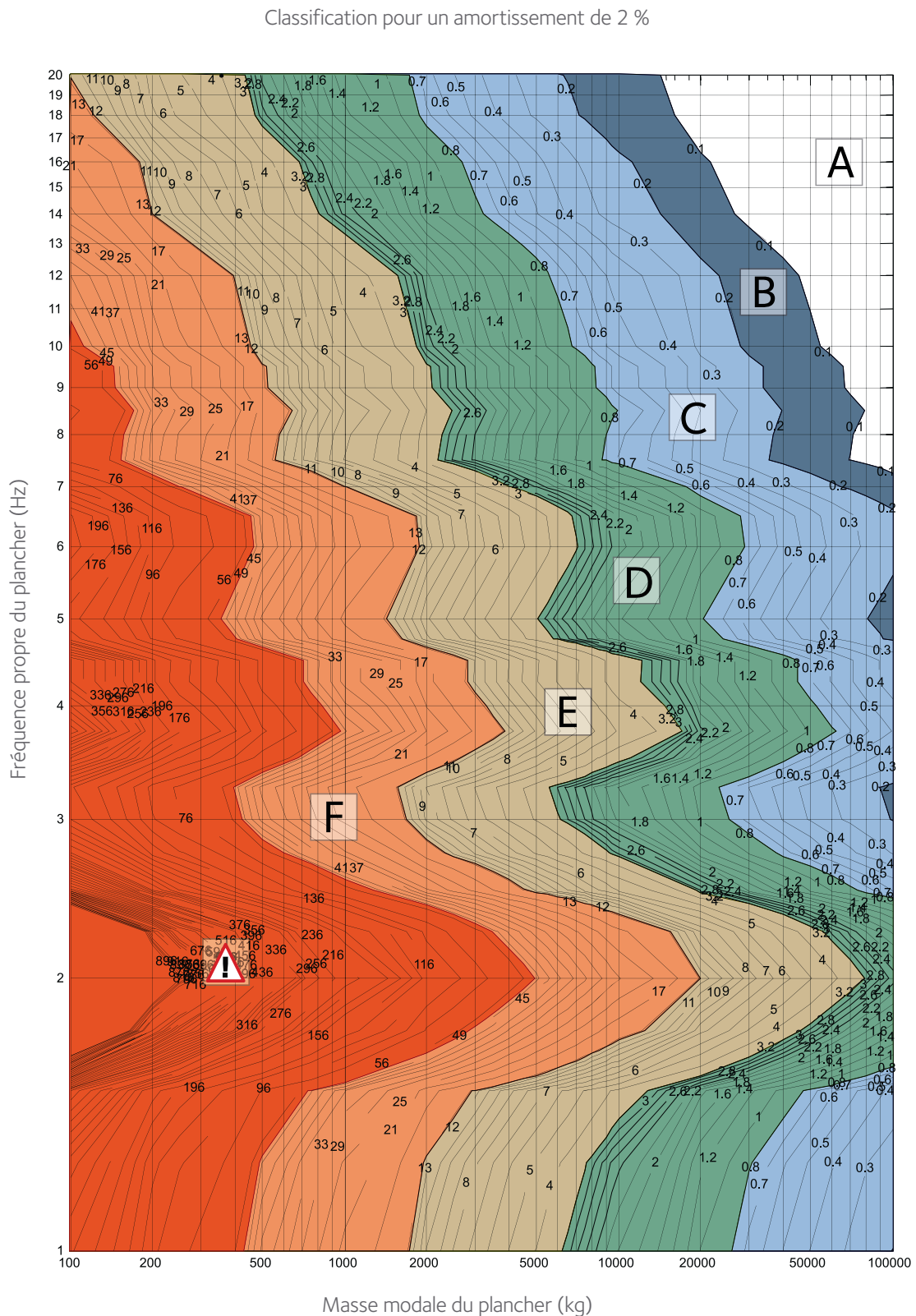
Figure 5: OS-RMS₉₀ pour un amortissement de 2 %

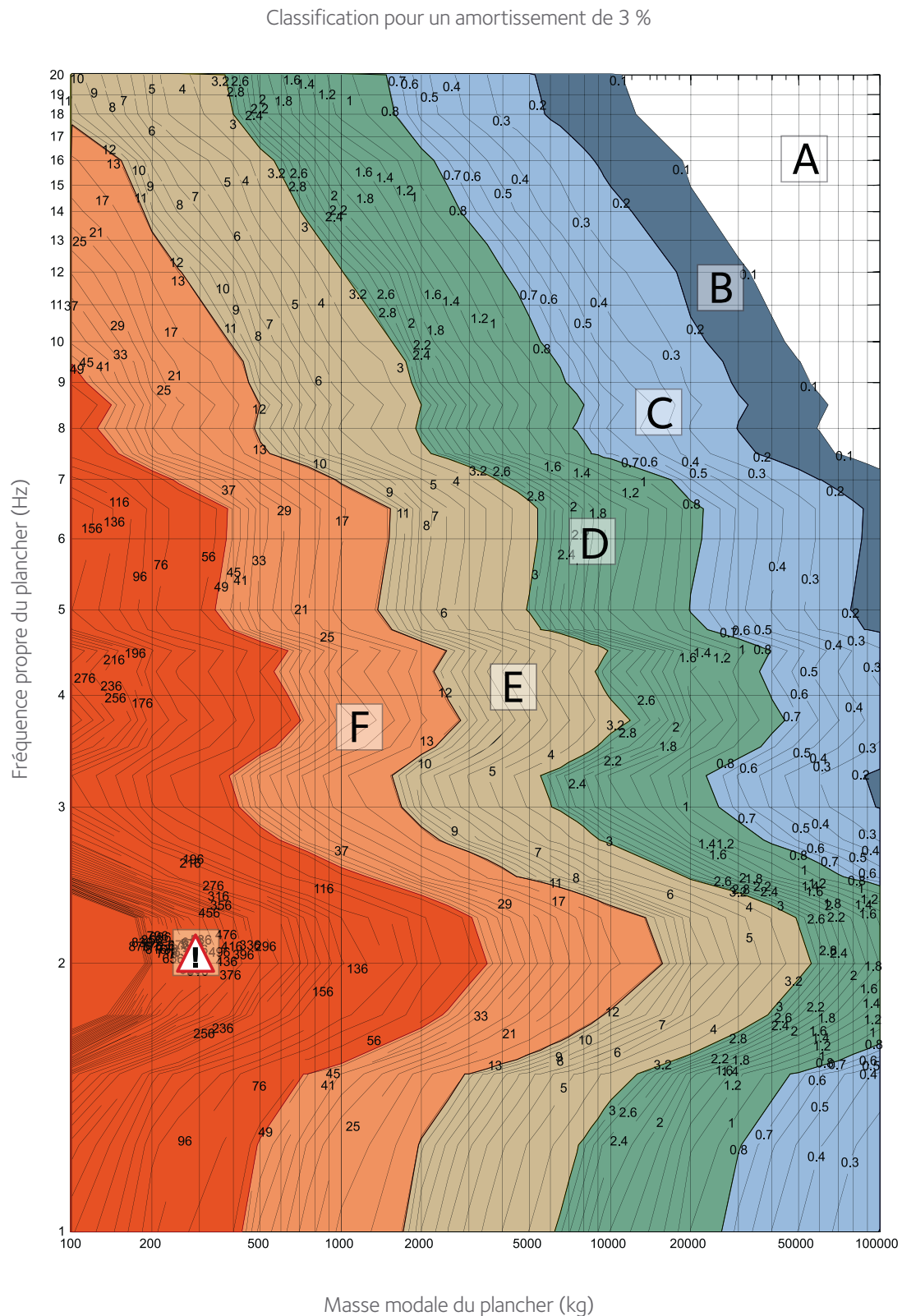
Figure 6: OS-RMS₉₀ pour un amortissement de 3 %

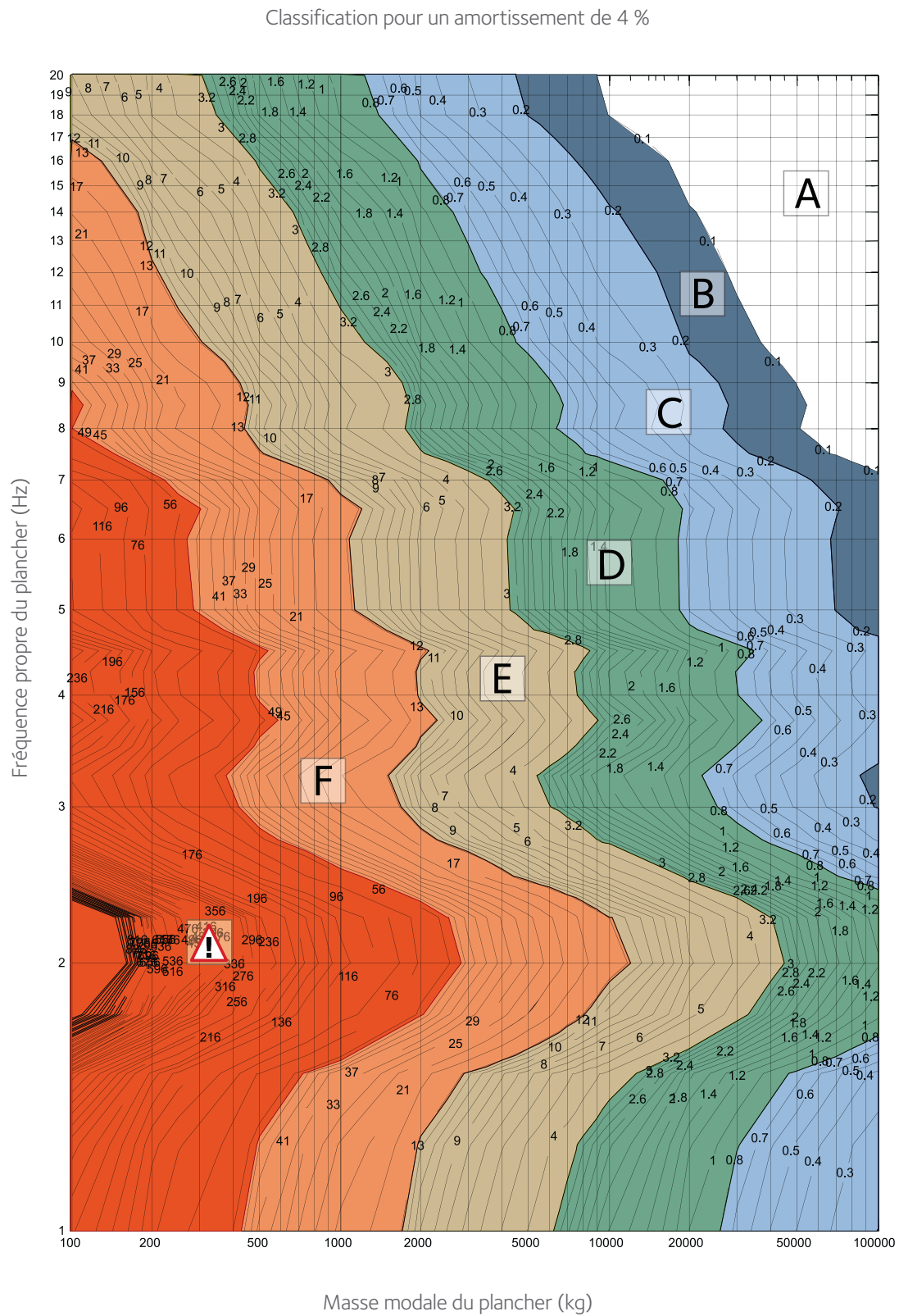
Figure 7: OS-RMS₉₀ pour un amortissement de 4 %

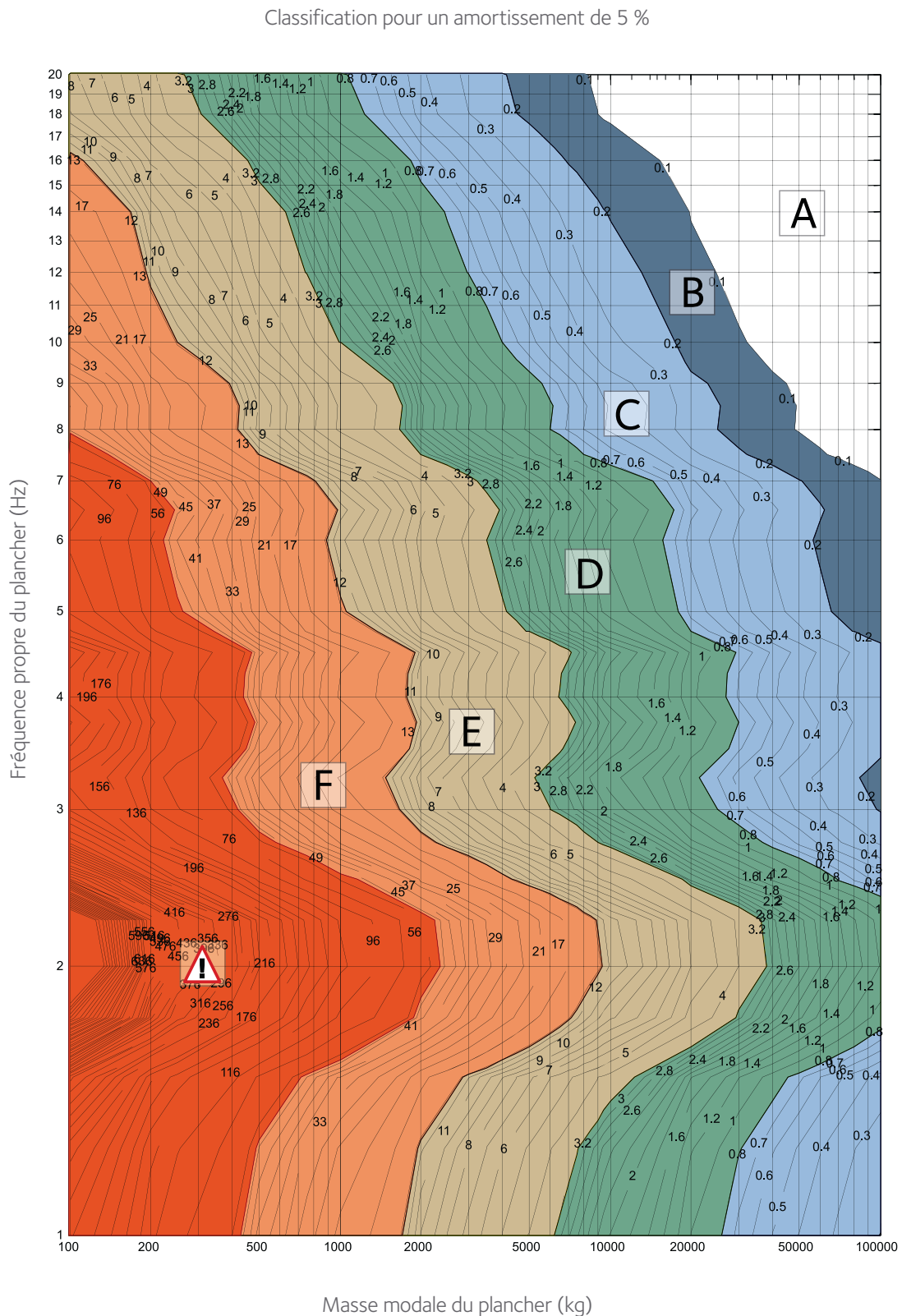
Figure 8: OS-RMS₉₀ pour un amortissement de 5 %

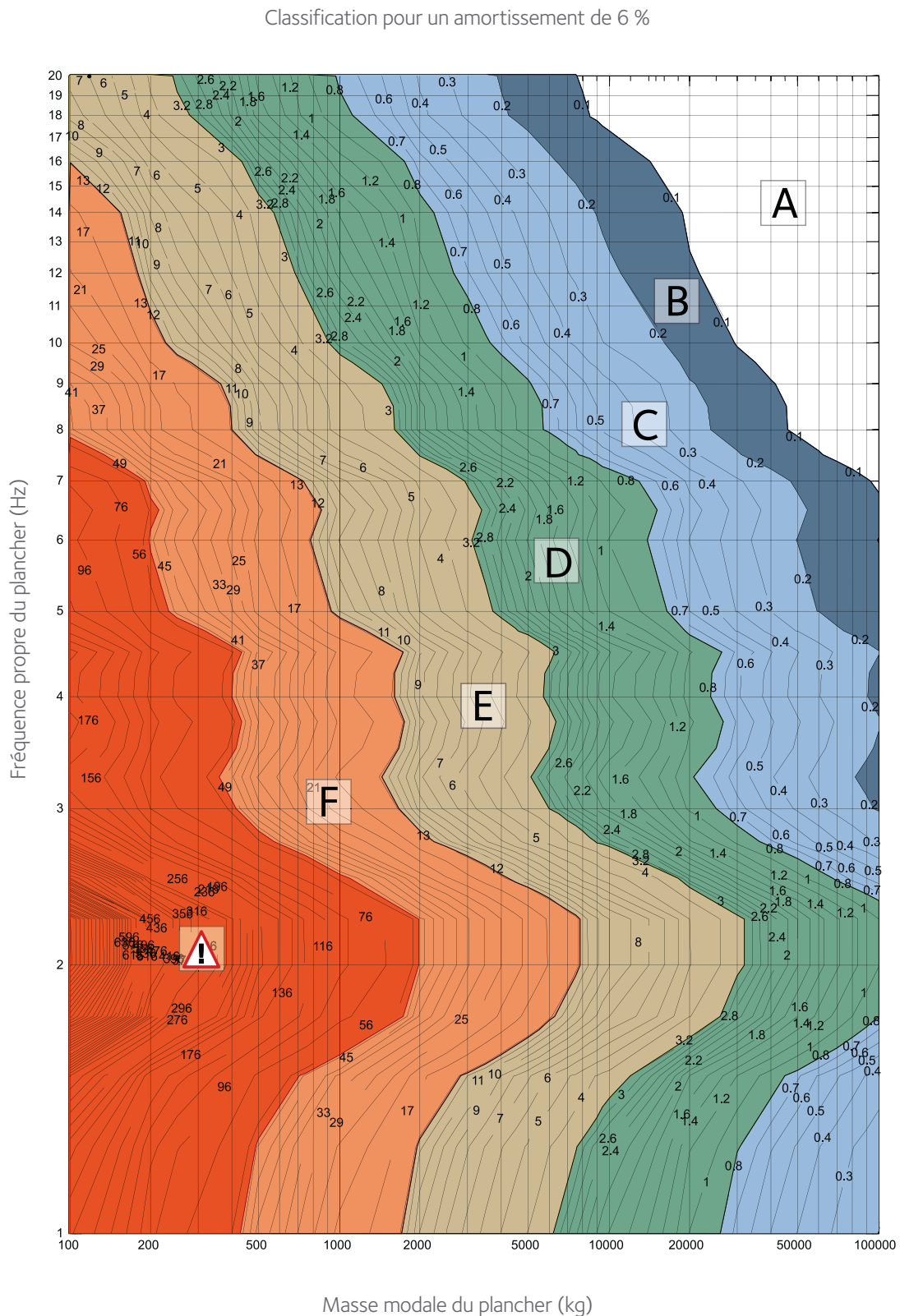
Figure 9: OS-RMS₉₀ pour un amortissement de 6 %

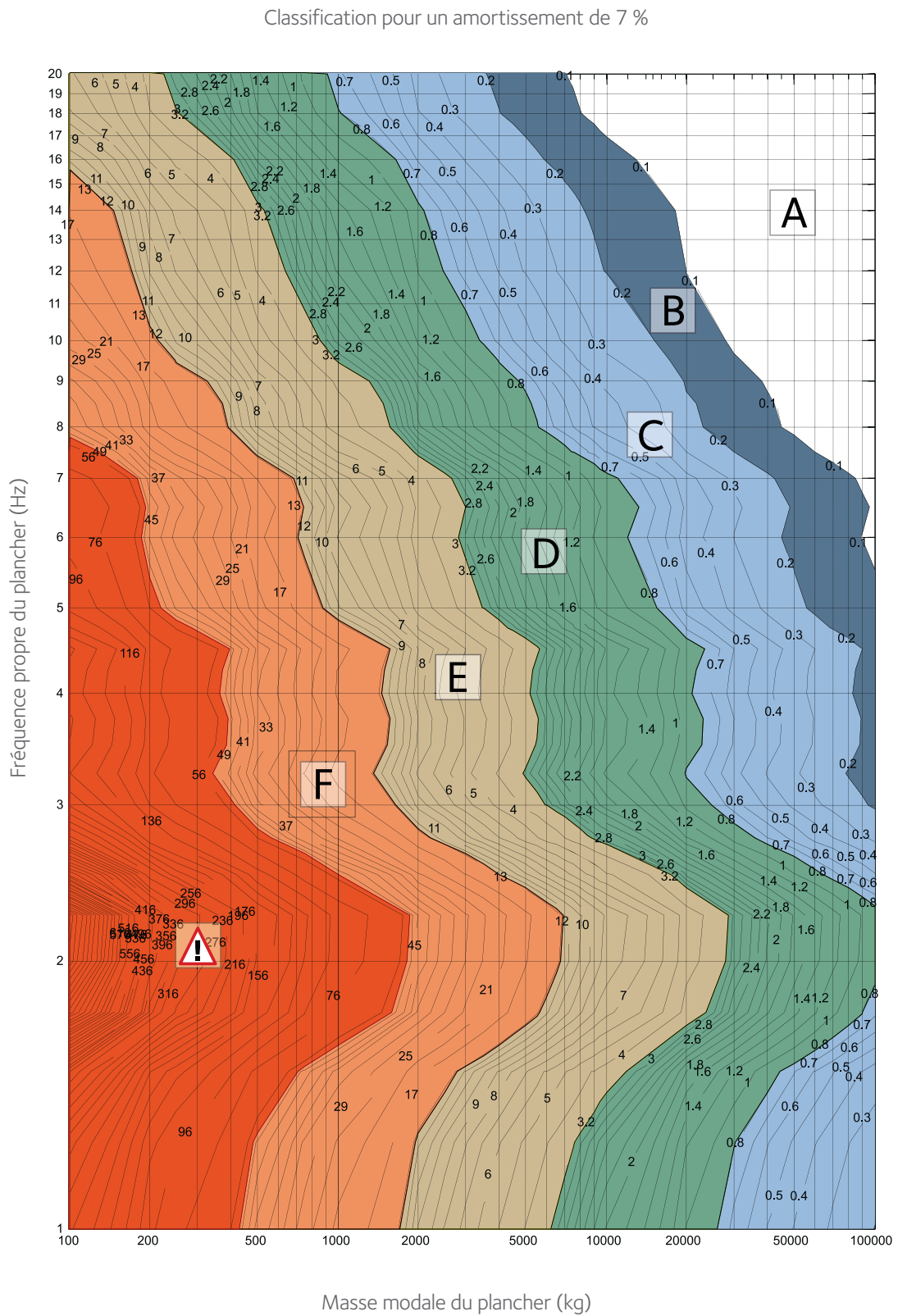
Figure 10: OS-RMS₉₀ pour un amortissement de 7 %

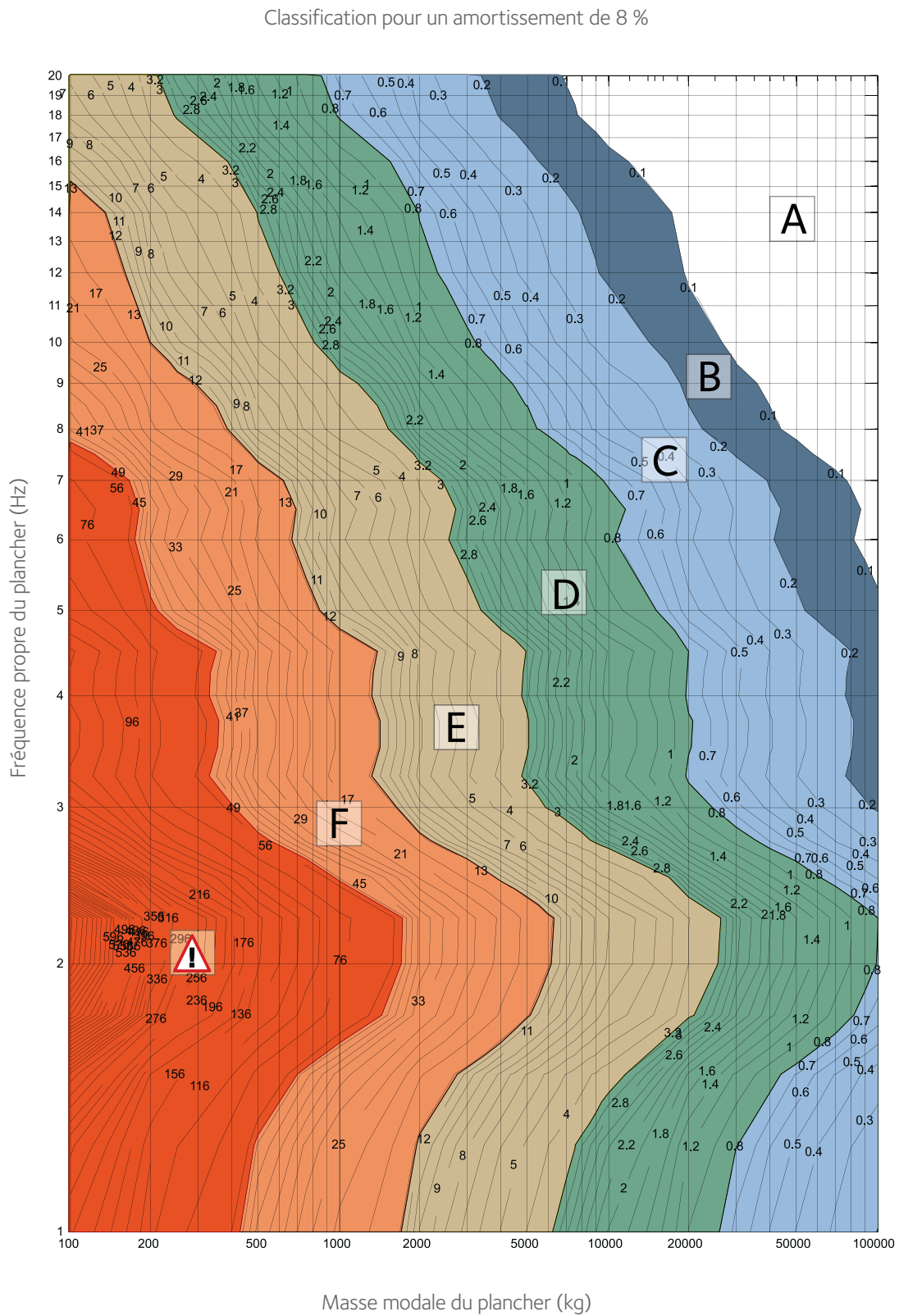
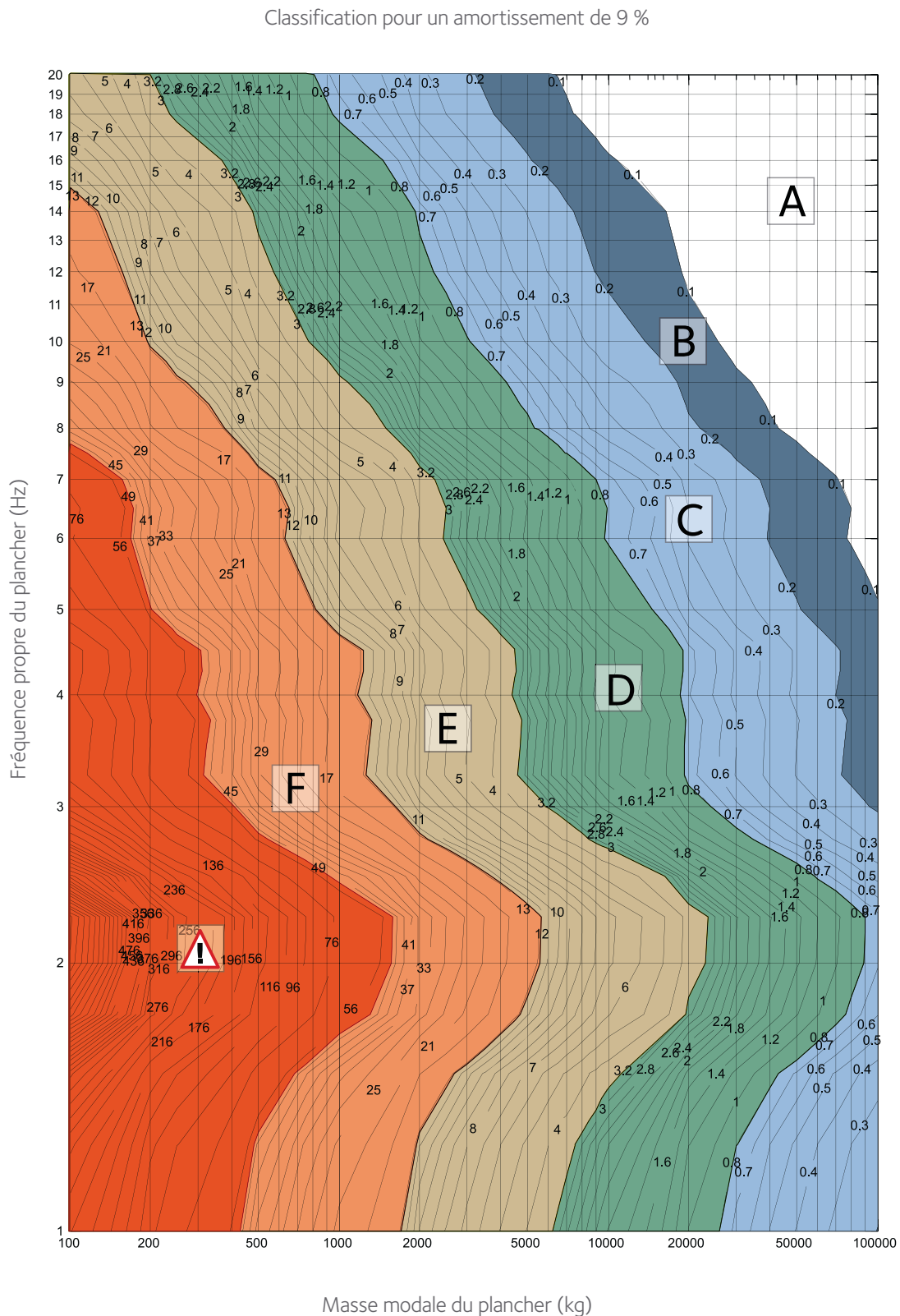
Figure 11: OS-RMS₉₀ pour un amortissement de 8 %

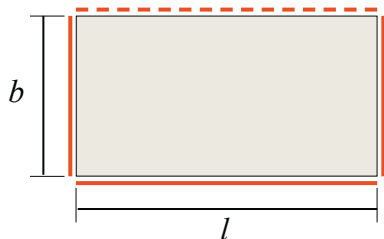
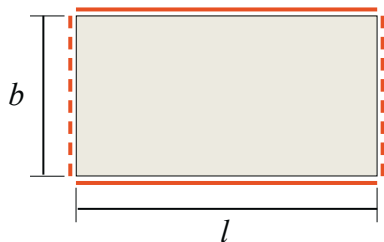
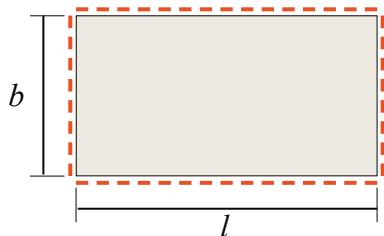
Figure 12: OS-RMS₉₀ pour un amortissement de 9 %

ANNEXE A FORMULES POUR UN CALCUL MANUEL

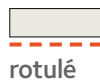
A.1	Fréquence propre et masse modale des dalles isotropes	32
A.2	Fréquence propre et masse modale des poutres	34
A.3	Fréquence propre et masse modale des dalles orthotropes	35
A.4	Approche par le poids propre pour la fréquence propre	36
A.5	Approche Dunkerley pour la fréquence propre	37
A.6	Approximation de la masse modale	38

A.1 Fréquence propre et masse modale des dalles isotropes

Les tableaux suivants permettent le calcul de la fréquence propre (selon [2]) et de la masse modale de dalles pour différentes conditions d'appuis. Les équations prennent pour hypothèses qu'il n'y a pas de glissement latéral possible sur le pourtour des dalles.

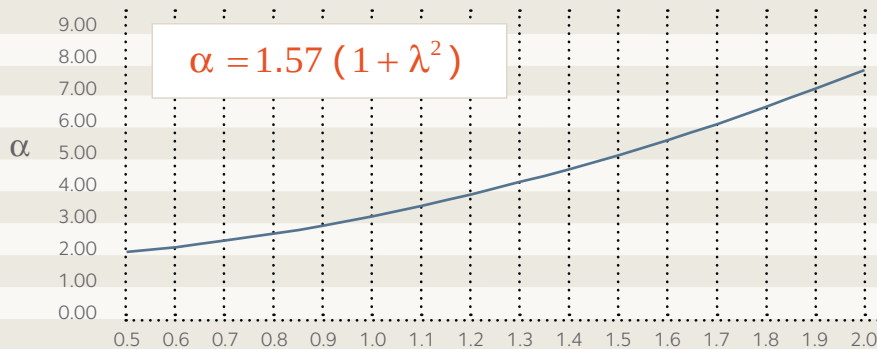


Conditions d'appui :



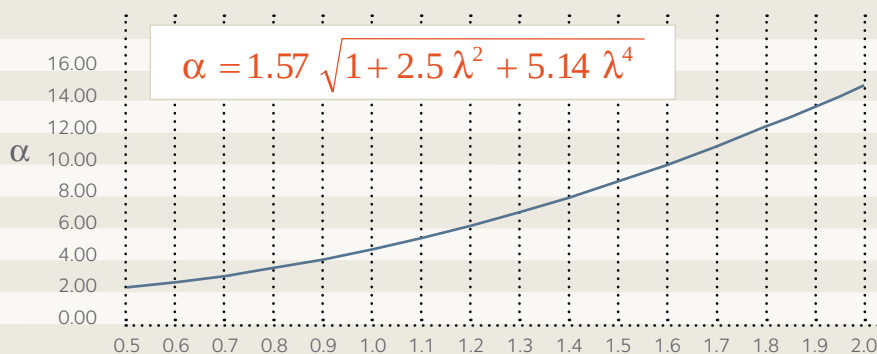
Fréquence ; Masse modale

$$f = \frac{\alpha}{l^2} \sqrt{\frac{E t^3}{12m (1-\nu^2)}} ; M_{\text{mod}} = \beta M$$



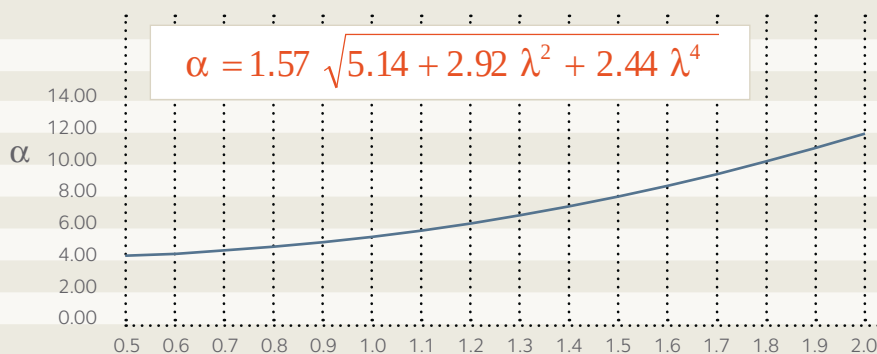
$\beta \approx 0.25$ pour tout λ

rapport $\lambda = l/b$



$\beta \approx 0.20$ pour tout λ

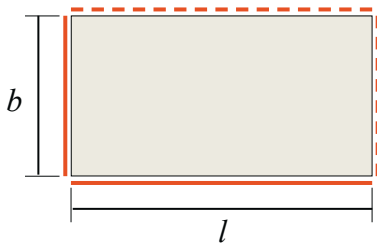
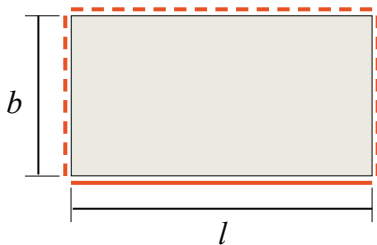
rapport $\lambda = l/b$



$\beta \approx 0.18$ pour tout λ

rapport $\lambda = l/b$

- E** Module d'élasticité en N/m²
 t Epaisseur de la dalle en m
 m Masse surfacique du plancher incluant les finitions et une partie représentative des charges variables (voir Chapitre 3) en kg/m²
 ν Coefficient de Poisson
 M_{tot} Masse totale du plancher incluant les finitions et une partie représentative des charges variables en kg

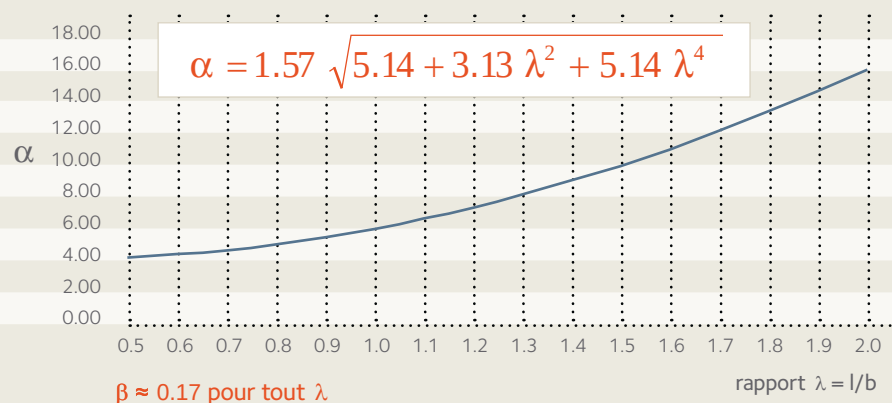
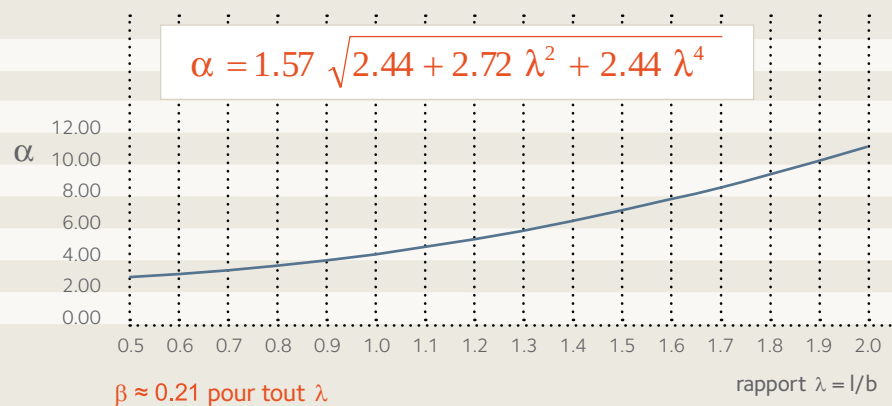
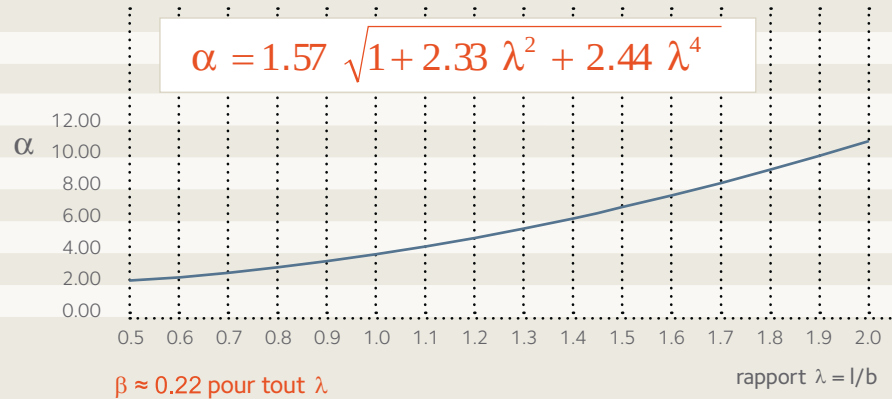


Conditions d'appui :



Fréquence ; Masse modale

$$f = \frac{\alpha}{l^2} \sqrt{\frac{E t^3}{12 m (1 - \nu^2)}} ; M_{mod} = \beta M$$

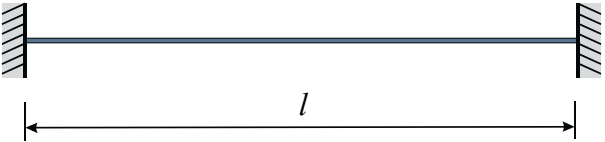
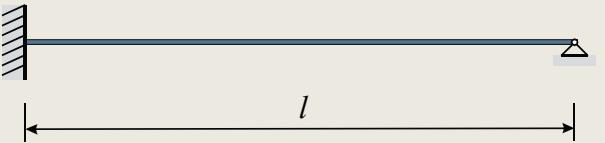
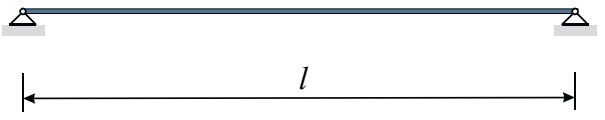
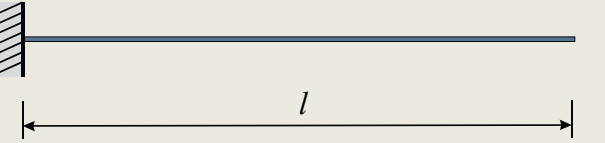


A.2 Fréquence propre et masse modale des poutres

La fréquence propre d'une poutre peut être calculée à l'aide des formules de la Table 3 pour différentes conditions d'appuis:

- E Module d'élasticité [N/m²]
- I Moment d'inertie [m⁴]
- μ Masse surfacique m du plancher (voir p. 33) multipliée par la largeur d'influence [kg/m]
- l Longueur de la poutre

Table 3: Calcul de la fréquence propre des poutres

Conditions aux appuis	Fréquence propre	Masse modale
	$f = \frac{4}{\pi} \sqrt{\frac{3 EI}{0.37 \mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0.41 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3 EI}{0.2 \mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0.45 \mu l$
	$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3 EI}{0.49 \mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0.5 \mu l$
	$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{3 EI}{0.24 \mu l^4}}$	$M_{\text{mod}} = 0.64 \mu l$

A.3 Fréquence propre et masse modale des dalles orthotropes

Les planchers orthotropes, comme par exemple les planchers mixtes avec des poutres dans la direction longitudinale et la dalle portant transversalement, ont des raideurs différentes suivant la longueur ou suivant la largeur ($EI_x > EI_y$). Voir Figure 13 ci-dessous.

La fréquence propre d'une dalle orthotrope simplement supportée sur les quatre cotés est :

$$f_1 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI_y}{m l^4}} \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{b}{l} \right)^2 + \left(\frac{b}{l} \right)^4 \right] \frac{EI_x}{EI_y}}$$

Avec :

m est la masse surfacique du plancher incluant les finitions et une partie représentative des charges variables (voir Chapitre 3) en kg/m^2 ,

l est la longueur du plancher en m (dans la direction X),

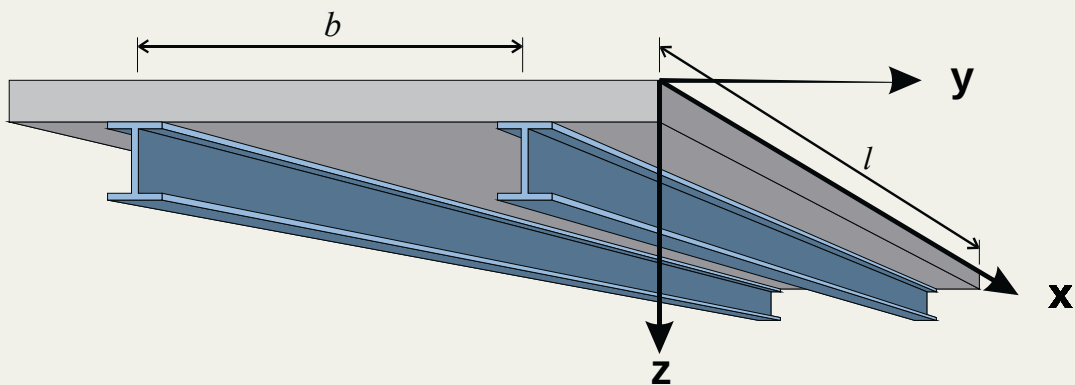
b est la largeur du plancher en m (dans la direction Y),

E est le module d'élasticité en N/m^2 ,

I_x est le moment d'inertie pour la flexion autour de l'axe Y en m^4 ,

I_y est le moment d'inertie pour la flexion autour de l'axe X en m^4 .

Figure 13: Dimensions et axes de référence d'une dalle orthotrope



A.4 Approche par le poids propre pour évaluer la fréquence propre

L'approche par le poids propre est une approximation très pratique dans les cas où la déformée maximale $\delta_{\max}$ due à la masse m est déjà connue comme par exemple suite à des calculs par éléments finis.

Cette méthode a pour origine l'équation générale de la fréquence :

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}}$$

La raideur K peut être déduite par l'hypothèse :

$$K = \frac{M g}{\frac{3}{4} \delta}$$

Avec

M est la masse totale du système en vibration,

$g = 9.81$ m/s² l'accélération de la pesanteur et

$\frac{3}{4} \delta$ est la déformation moyenne [mm].

La valeur approximative de la fréquence propre est

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{4g}{3\delta_{\max}}} = \frac{18}{\sqrt{\delta_{\max} [mm]}}$$

Où $\delta_{\max}$ est la déformée maximale sous charges relatives à la masse m .

A.5 Approche Dunkerley pour évaluer la fréquence propre

L'approche Dunkerley est une approximation pour calculs manuels. Elle est applicable lorsque la nature des vibrations semble très complexe mais elle permet de diviser le problème en plusieurs modes simples. La fréquence propre pourra alors être déterminée en utilisant les formules décrites aux paragraphes A.1 à A.3.

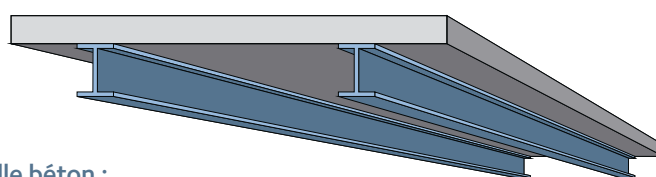
La Figure 14 montre un exemple d'un plancher mixte avec deux poutres simplement appuyées et une dalle béton libre aux extrémités. Le mode vibratoire escompté est divisé en deux modes simples indépendants ; un pour la dalle en béton, l'autre pour la poutre mixte. Les deux formes ont leur propre fréquence propre (f_1 pour la vibration de la dalle en béton et f_2 pour la poutre mixte).

Selon l'approche Dunkerley, la fréquence propre résultante f du système totale est:

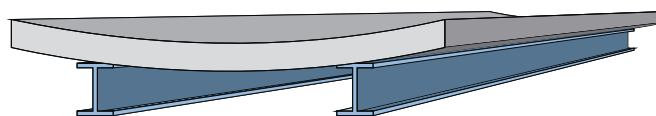
$$\frac{1}{f^2} = \frac{1}{f_1^2} + \frac{1}{f_2^2} + \frac{1}{f_3^2} + \dots$$

Figure 14: Exemple de la décomposition des modes

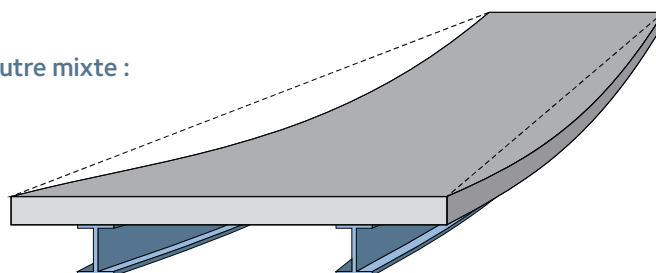
Système initial :



Mode de la dalle béton :



Mode de la poutre mixte :



A.6 Approximation de la masse modale

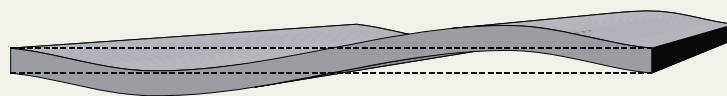
La masse modale peut être interprétée comme la fraction de la masse totale d'un plancher qui est activée lorsque ce dernier oscille dans un mode spécifique. Chaque mode de vibration a sa fréquence propre et sa masse modale spécifique.

Pour le calcul de la masse modale, le mode doit être connu et être décrit en fonction relative à la déformation maximale. Puisque le mode ne peut être déterminé par un calcul manuel, des approximations du premier mode seront généralement utilisées.

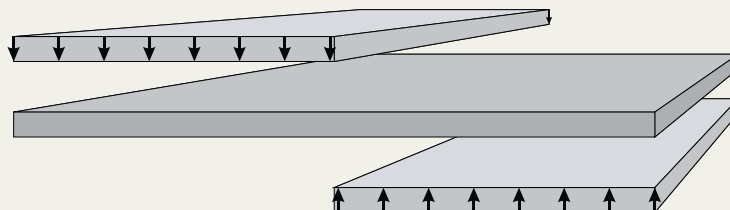
De même, les analyses par éléments finis (AEF) sont souvent utilisées en alternative au calcul manuel. Si les programmes ne fournissent pas la masse modale comme résultat de l'analyse modale, le mode de vibration peut être obtenu par l'application de charges poussant la dalle vers la déformation du mode escompté, voir Figure 15.

Figure 15: Application de charges pour l'obtention du mode escompté (exemple)

mode escompté:



Application des charges:



Si le mode vibratoire du plancher peut être approché par une fonction normalisée $\delta(x,y)$ (c.a.d. $|\delta(x,y)|_{max}=1,0$) la masse modale correspondante se traduit dans l'équation suivante par:

$$M_{mod} = \mu \int_F \delta^2(x,y) dF$$

Avec

μ est la distribution des masses
 $\delta(x,y)$ est la déformée verticale au point x,y

Cette équation devient lorsque le mode est calculé par AEF:

$$M_{mod} = \sum_{nœud\ i} \delta_i^2 dM_i$$

Avec

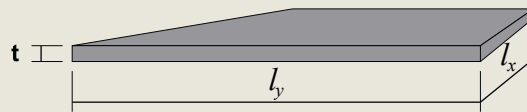
δ_i est la déformée verticale au nœud i (relative à la déformée maximale)
 dM_i est la fraction de masse représentée au nœud i

Si la fonction $\delta(x,y)$ représente la solution exacte pour le mode vibratoire, l'équation décrite ci-dessus conduit alors à la masse modale.

Les exemples suivants illustrent des calculs manuels de la masse modale

Exemple 1:

Dalle simplement appuyée sur quatre cotés, $l_y \sim l_x$



- approximation du premier mode de vibration:

$$\delta(x, y) = \sin\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{l_y}\right)$$

$$|\delta(x, y)|_{\max} = 1.0$$

- distribution de la masse

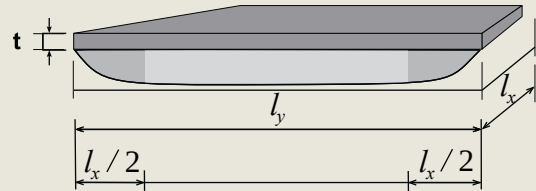
$$\mu = \frac{M}{l_x l_y}$$

- masse modale

$$\begin{aligned} M_{\text{mod}} &= \mu \int_F \delta^2(x, y) dF = \frac{M}{l_x l_y} \int_0^{l_y} \int_0^{l_x} \sin^2\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) \sin^2\left(\frac{\pi y}{l_y}\right) dx dy \\ &= \frac{M}{4} \end{aligned}$$

Exemple 2:

Dalle simplement appuyée aux quatre cotés, $l_x < l_y$



- approximation du mode fondamental de vibration:

$$1. \quad 0 \leq y \leq \frac{l_y}{2} \quad \text{et} \quad l_y - \frac{l_y}{2} \leq y \leq l_y : \quad \delta(x, y) = \sin\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{l_y}\right)$$

$$|\delta(x, y)|_{\max} = 1.0$$

$$2. \quad \frac{l_x}{2} \leq x \leq l_x - \frac{l_x}{2} : \quad \delta(x, y) = \sin\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) 1.0$$

$$|\delta(x, y)|_{\max} = 1.0$$

- distribution de la masse

$$\mu = \frac{M}{l_x l_y}$$

- masse modale

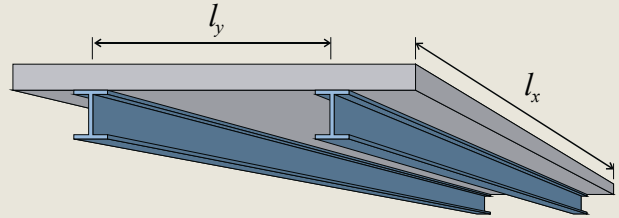
$$M_{\text{mod}} = \mu \int_F \delta^2(x, y) dF$$

$$= \frac{M}{l_x l_y} \left[2 \int_0^{l_x} \int_0^{\frac{l_y}{2}} \sin^2\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) \sin^2\left(\frac{\pi y}{l_y}\right) dx dy + \int_0^{l_x} \int_{\frac{l_y}{2}}^{l_y} \sin^2\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) dx dy \right]$$

$$= \frac{M}{4} \left(2 - \frac{l_x}{l_y} \right)$$

Exemple 3:

Dalle portant dans une seule direction
entre poutres, dalle et poutres
simplement appuyées



- approximation du mode fondamental de vibration:

$$\delta(x, y) = \frac{\delta_x}{\delta} \sin\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) + \frac{\delta_y}{\delta} \sin\left(\frac{\pi y}{l_y}\right)$$

$$|\delta(x, y)|_{\max} = 1.0$$

avec

δ_x = déformée de la poutre

δ_y = déformée de la dalle considérant la
déformée des appuis (c.à.d. la
déformée de la poutre) comme nulle

δ = $\delta_x + \delta_y$

- distribution de la masse

$$\mu = \frac{M}{l_x l_y}$$

- masse modale

$$\begin{aligned} M_{\text{mod}} &= \mu \int_F \delta^2(x, y) dF = \frac{M}{l_x l_y} \int_0^{l_x} \int_0^{l_y} \left[\frac{\delta_x}{\delta} \sin\left(\frac{\pi x}{l_x}\right) + \frac{\delta_y}{\delta} \sin\left(\frac{\pi y}{l_y}\right) \right]^2 dx dy \\ &= M \left[\frac{\delta_x^2 + \delta_y^2}{2\delta^2} + \frac{8}{\pi^2} \frac{\delta_x \delta_y}{\delta^2} \right] \end{aligned}$$



ANNEXE B EXEMPLES

B.1	Dalle filigrane (pré-dalle) avec poutre cellulaire ACB mixte (bâtiment de bureau)	44
B.1.1	Description du plancher	44
B.1.2	Détermination des caractéristiques dynamiques du plancher	47
B.1.3	Evaluation	47
B.2	Bâtiment de bureaux à 3 niveaux	48
B.2.1	Introduction	48
B.2.2	Description du plancher	48
B.2.3	Détermination des caractéristiques dynamiques du plancher	50
B.2.4	Evaluation	51

B.1 Dalle filigrane (pré-dalle) avec poutre cellulaire ACB mixte (bâtiment de bureau)

B.1.1 Description du plancher

Dans ce premier exemple de bureaux ouverts dits « open space », le comportement d'un plancher coulé sur pré-dalles avec faux-plancher est contrôlé par rapport à la marche.

La dalle porte sur 4,2 m entre poutres. L'épaisseur totale est de 160 mm. Les poutres principales sont des poutres cellulaires ArcelorMittal (ACB) agissant comme poutres mixtes. Elles sont connectées aux poteaux verticaux avec un assemblage d'encastrement. La vue en plan est donnée à la Figure 18. Pour une analyse vibratoire, il est suffisant d'étudier seulement une partie du plancher (travée représentative du plancher). La partie représentative du plancher à considérer dans cet exemple est indiquée en hachuré à la Figure 18.



Figure 16: Structure du bâtiment



Figure 17: Assemblage poutre-poteau

Figure 18: vue en plan

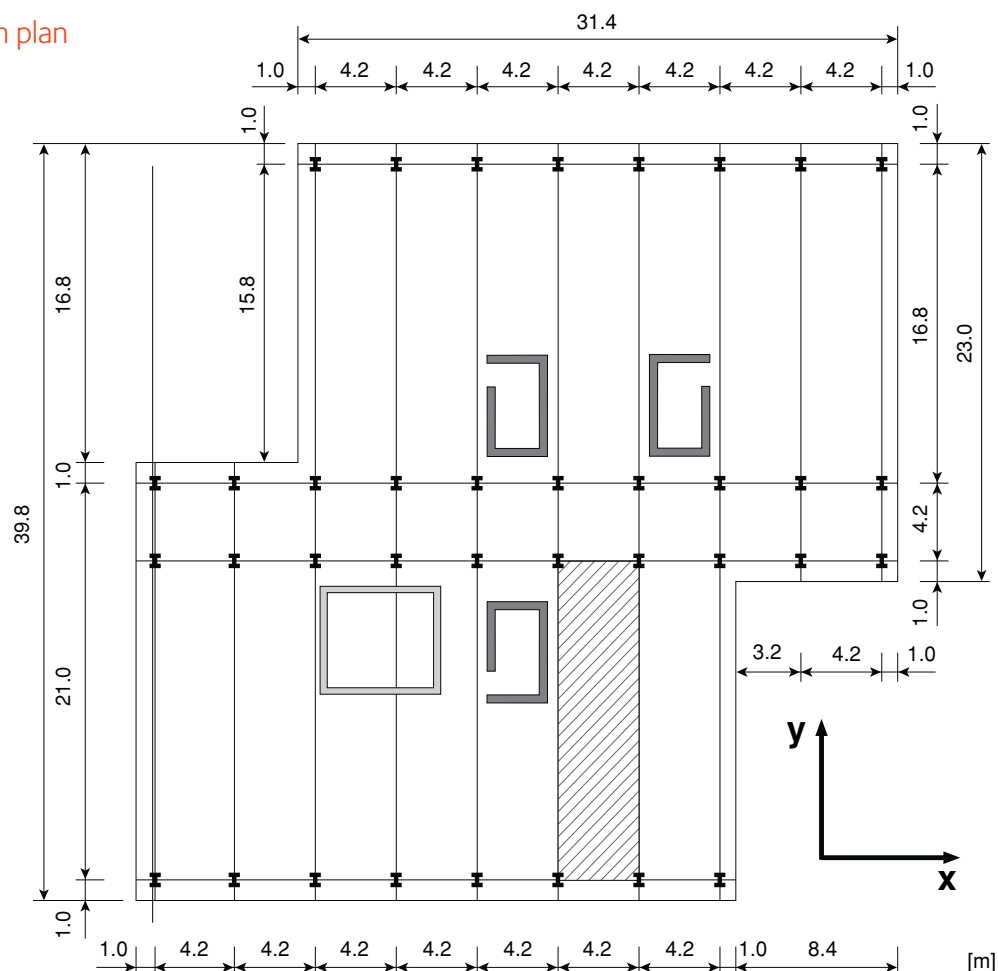
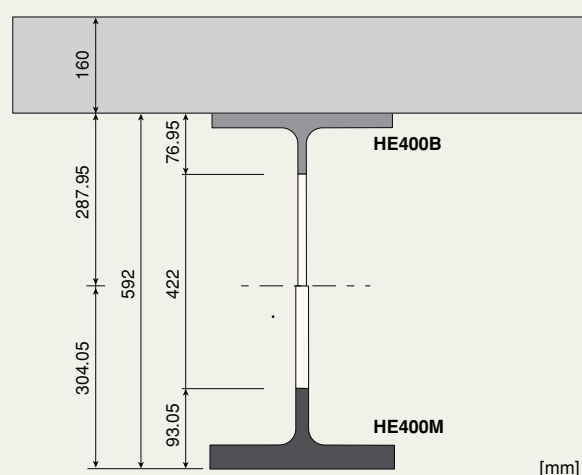


Figure 19: Section transversale



Pour les poutres de 16,8 m de portée, les profilés ACB/HEB/HEM400 de qualité S460 ont été choisis, celles plus petites de 4,2 m sont des ACB/HEM360, aussi en S460.

Les poutres transversales qui portent dans la direction globale X sont négligées pour les calculs, puisqu'elles ne contribuent pas au transfert des charges de la structure.

Les propriétés nominales des matériaux sont

- Acier S460: $E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$, $f_y = 460 \text{ N/mm}^2$
- Béton C25/30: $E_{cm} = 31000 \text{ N/mm}^2$, $f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$

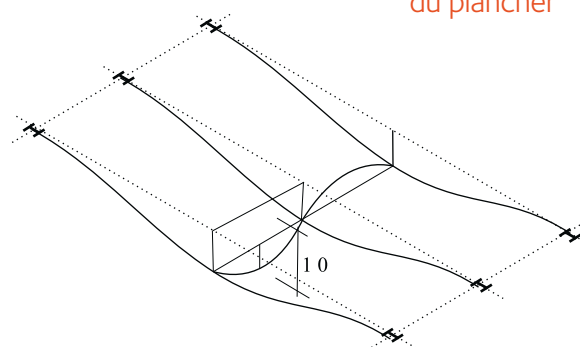
Comme annoncé dans le chapitre 3, le module élastique nominal du béton sera augmenté pour les calculs dynamiques par :

$$E_{c,dyn} = 1.1 E_{cm} = 34100 \text{ N/mm}^2$$

Le mode de vibration escompté qui correspond à la fréquence propre de la partie du plancher est dessiné à la Figure 20. De par le mode représenté ici, on peut conclure, pour les calculs dynamiques suivants, que chacun des champs de la dalle se comporte comme simplement appuyé.

De même pour les conditions aux appuis de la poutre principale, suivant le type d'assemblage poutre-poteau montré à la Figure 17, il semble évident que pour des faibles amplitudes comme celles rencontrées dans l'analyse des vibrations, la rigidité rotationnelle de l'assemblage est suffisante pour permettre de considérer la poutre comme encastree.

Figure 20: Mode escompté correspondant à la première fréquence propre de la partie du plancher



Propriétés de la section

Dalle:

Les propriétés de la dalle suivant:
la direction globale X sont :

$$A_{c,x} = 160 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

$$I_{c,x} = 3.41 \times 10^5 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

Poutre principale:

La largeur participante de la poutre mixte
est obtenue par l'équation suivante
en considérant le mode fondamental
de vibration décrit auparavant :

$$\begin{aligned} b_{eff} &= b_{eff,1} + b_{eff,2} = \frac{l_0}{8} + \frac{l_0}{8} \\ &= 2 \times \frac{0.7 \times 16.8}{8} = 2.94 \text{ m} \end{aligned}$$

Les propriétés de la section nécessaires pour les
états limites de service (sans fissuration) sont :

$$\begin{aligned} A_{a,net} &= 21936 \text{ mm}^2 \\ A_{a,total} &= 29214 \text{ mm}^2 \\ A_i &= 98320 \text{ mm}^2 \\ I_i &= 5.149 \times 10^9 \text{ mm}^4 \end{aligned}$$

Charges

Dalle:

- Poids propre (avec 1.0 kN/m² pour le faux-plancher):

$$g_{dalle} = 160 \times 10^{-3} \times 25 + 1.0 = 5 \text{ kN/m}^2$$

- Charge variable: généralement une charge variable de 3 kN/m² est recommandée pour les bâtiments de bureaux. La fraction de charge variable considérée pour le calcul dynamique est d'environ 10 % de la charge variable totale, d'où

$$q_{dalle} = 0.1 \times 3.0 = 0.3 \text{ kN/m}^2$$

Poutre principale:

- Poids propre (avec 2,00 kN/m pour l'ACB) :

$$g_{poutre} = 5.0 \times \frac{4.2}{2} \times 2 + 2.0 = 23.00 \text{ kN/m}$$

- Charge variable:

$$q_{dalle} = 0.3 \times \frac{4.2}{2} \times 2 = 1.26 \text{ kN/m}$$

B.1.2 Détermination des caractéristiques dynamiques du plancher

Fréquence propre

La fréquence propre est calculée selon l'approche du poids propre. La déformée maximale totale sera obtenue par superposition de la déformée de la dalle et de celle de la poutre principale :

$$\delta_{\max} = \delta_{\text{dalle}} + \delta_{\text{poutre}}$$

Avec

$$\delta_{\text{dalle}} = \frac{5 \times (5.0 + 0.3) \times 10^{-3} \times 4200^4}{384 \times 34100 \times 3.41 \times 10^5} = 1.9 \text{ mm}$$

$$\delta_{\text{poutre}} = \frac{1 \times (23.0 + 1.26) \times 16800^4}{384 \times 210000 \times 5.149 \times 10^9} = 4.7 \text{ mm}$$

La déformée maximale est

$$\delta_{\max} = 1.9 + 4.7 = 6.6 \text{ mm}$$

La première fréquence propre sera alors obtenue (suivant l'Annexe A.4) par

$$f_1 = \frac{18}{\sqrt{6.6}} = 7.0 \text{ Hz}$$

Masse modale

La masse totale de la dalle est

$$M = (5 + 0.3) \times 10^2 \times 16.8 \times 4.2 = 37397 \text{ kg}$$

Suivant l'exemple 3 du chapitre A.6, la masse modale de la dalle se calcule par

$$M_{\text{mod}} = 37397 \times \left[\frac{1.9^2 + 4.7^2}{2 \times 6.6^2} + \frac{8}{\pi^2} \times \frac{1.9 \times 4.7}{6.6^2} \right] = 17246 \text{ kg}$$

Amortissement

Le rapport d'amortissement de la dalle acier-béton avec faux-plancher se déduit de la Table 1 :

$$D = D_1 + D_2 + D_3 = 1 + 1 + 1 = 3\%$$

Avec

$$D_1 = 1,0 \text{ (dalle acier-béton)}$$

$$D_2 = 1,0 \text{ (bureau ouvert)}$$

$$D_3 = 1,0 \text{ (faux-plancher)}$$

B.1.3 Evaluation

Selon les caractéristiques modales calculées ci-dessus, le plancher est de classe C (Figure 6). La valeur OS-RMS90 espérée est d'environ 0,5 mm/s.

Suivant la Table 2, la classe C fait partie du domaine recommandé pour les bâtiments de bureaux, l'exigence est donc remplie.

B.2 Bâtiment de bureaux à 3 niveaux

B.2.1 Introduction

La méthode procure, en général, des résultats sécuritaires lorsqu'elle est appliquée à travées simples utilisant le mode issu de la fréquence propre.

Cependant, dans les cas spéciaux où la masse modale provenant d'un mode plus élevé a une valeur suffisamment basse, signifiant ainsi que les modes plus élevés doivent être considérés, l'exemple suivant s'applique.

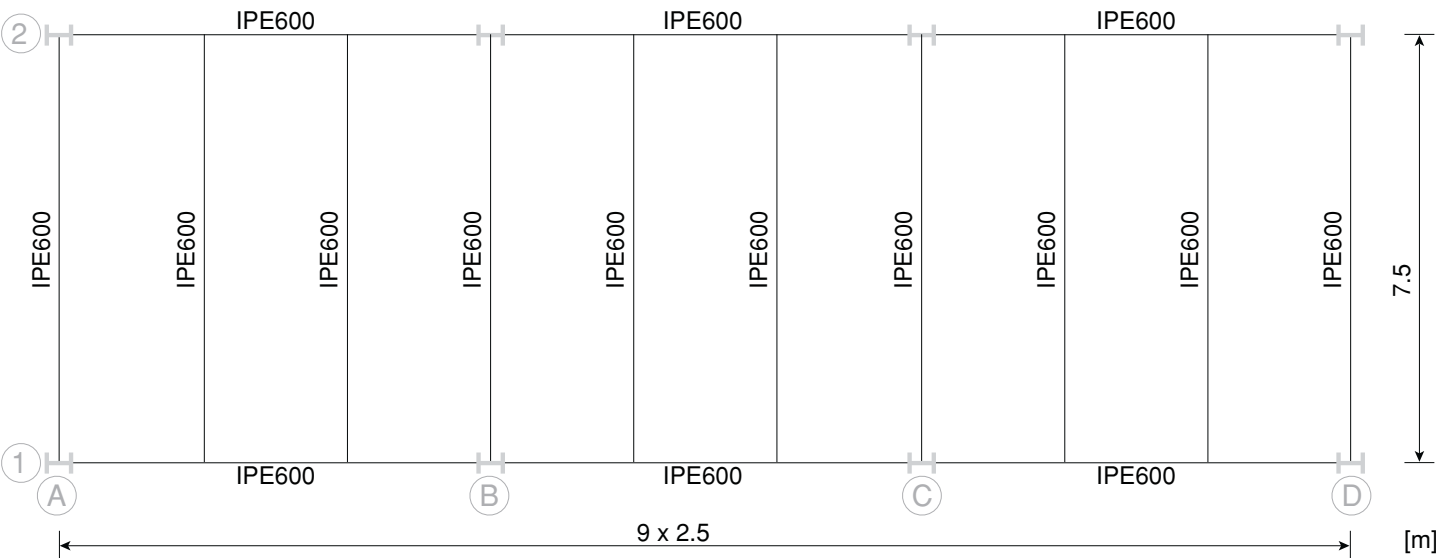
B.2.2 Description du plancher

La portée du plancher de ce bâtiment, voir Figure 21, est de 15 m de bord à bord. Les poutres secondaires sont des IPE600 et ont un entre-axe de 2,5 m. Les poutres primaires de rives, de portée 7,5 m de poteau à poteau, sont aussi des IPE600, voir Figure 22.

Figure 21: vue d'ensemble de la structure



Figure 22: Vue en plan du plancher avec désignation des sections en acier.



La dalle est une dalle mixte d'épaisseur totale de 15 cm avec un bac acier COFRASTRA 70, Figure 23. Pour plus d'informations concernant COFRASTRA 70, voir www.arval-construction.fr.

Les propriétés nominales des matériaux sont

- Acier S235: $E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$, $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$
- Béton C25/30: $E_{cm} = 31000 \text{ N/mm}^2$, $f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$

Pour les calculs dynamiques (analyse vibratoire) le module sécant élastique sera augmenté selon le Chapitre 3

$$E_{c, dyn} = 1.1 E_{cm} = 34100 \text{ N/mm}^2$$

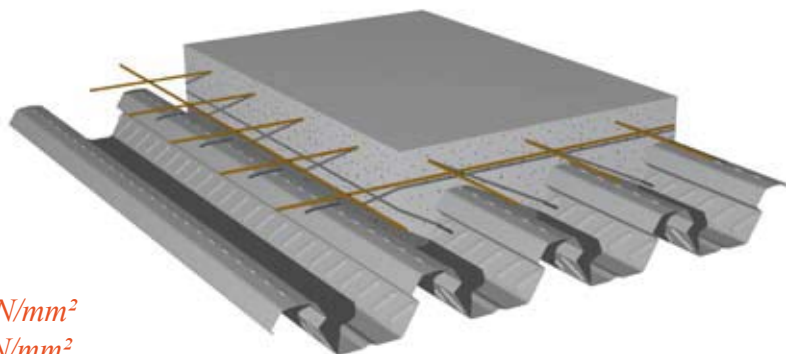


Figure 23: Composition du plancher avec Cofradal 70

Propriétés des sections

Dalle (transversale aux poutres; $E=210000 \text{ N/mm}^2$):

$$\begin{aligned} A &= 1170 \text{ cm}^2/\text{m} \\ I &= 20355 \text{ cm}^4/\text{m} \end{aligned}$$

Poutre mixte

($b_{\text{eff}} = 2,5\text{m}$; $E=210000 \text{ N/mm}^2$):

$$\begin{aligned} A &= 468 \text{ cm}^2 \\ I &= 270089 \text{ cm}^4 \end{aligned}$$

Charges

Dalle (transversale aux poutres ; $E=210000 \text{ N/mm}^2$):

Charge permanente

$$g = 3.5 \text{ kN/m}^2 \text{ (poids propre)}$$

$$\Delta g = 0.5 \text{ kN/m}^2 \text{ (poids propre)}$$

$$g + \Delta g = 4.0 \text{ kN/m}^2 \text{ (charge permanente)}$$

Charge variable

$$\begin{aligned} q &= 3.0 \times 0.1 = 0.3 \text{ kN/m}^2 \\ &\text{(10\% des charges variables totales)} \end{aligned}$$

Poutre mixte

($b_{\text{eff}} = 2,5\text{m}$; $E=210000 \text{ N/mm}^2$):

Charge permanente

$$g = (3.5+0.5) \times 2.5 + 1.22 = 11.22 \text{ kN/m}$$

Charge variable

$$q = 0.3 \times 2.5 = 0.75 \text{ kN/m}$$

B.2.3 Détermination des caractéristiques dynamiques du plancher

Conditions d'appuis

Les poutres secondaires aboutissent sur des poutres primaires qui sont des sections ouvertes à faible raideur de torsion. Ces poutres seront donc considérées comme simplement appuyées.

Fréquence propre

Pour cet exemple, la fréquence propre est calculée suivant trois méthodes: la formule de la poutre négligeant la raideur transversale du plancher, la formule des dalles orthotropes et la méthode du poids propre en prenant en compte la raideur transversale.

- Application de l'équation de la poutre (Chapitre A.2):

$$p = 11.97 \text{ kN/m} \Rightarrow \mu = 11.97 \times 1000 / 9.81 = 1220 \text{ kg/m}$$

$$f = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3 EI}{0.49 \mu l^4}} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\frac{3 \times 210000 \times 10^6 \times 270089 \times 10^{-8}}{0.49 \times 1220 \times 15^4}} = 4.8 \text{ Hz}$$

- Application de l'équation des dalles orthotropes (Chapitre A.3):

$$\begin{aligned} f_1 &= \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{EI_y}{m l^4}} \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{b}{l} \right)^2 + \left(\frac{b}{l} \right)^4 \right] \frac{EI_x}{EI_y}} \\ &= \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{210000 \times 10^6 \times 270089 \times 10^{-8}}{1220 \times 15^4}} \times \sqrt{1 + \left[2 \left(\frac{2.5}{15} \right)^2 + \left(\frac{2.5}{15} \right)^4 \right] \frac{3410 \times 20355}{21000 \times 270089}} \\ &= 4.8 \times 1.00 = 4.8 \text{ Hz} \end{aligned}$$

- Application de la méthode du poids propre (Chapitre A.4):

$$\delta_{\max} = \delta_{\text{dalle}} + \delta_{\text{poutre}}$$

$$\delta_{\text{dalle}} = \frac{5 \times 4.3 \times 10^{-3} \times 2500^4}{384 \times 34100 \times 2.0355 \times 10^5} = 0.3 \text{ mm}$$

$$\delta_{\text{poutre}} = \frac{5 \times 11.97 \times 15000^4}{384 \times 210000 \times 270089 \times 10^4} = 13.9 \text{ mm}$$

$$\delta_{\max} = 0.3 + 13.9 = 14.2 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow f_1 = \frac{18}{\sqrt{14.2}} = 4.8 \text{ Hz}$$

Masse modale

La détermination de la fréquence propre a montré ci-dessus que le comportement dynamique du plancher peut être assimilé au modèle d'une poutre simple. Ce même modèle sera aussi utilisé pour la masse modale.

$$M_{\text{mod}} = 0.5 \mu l = 0.5 \times 1220 \times 15 = 9150 \text{ kg}$$

Amortissement

Le rapport d'amortissement de la dalle acier-béton avec faux-plancher se déduit de la Table 1:

$$D = D_1 + D_2 + D_3 = 1 + 1 + 1 = 3\%$$

Avec

$$D_1 = 1,0 \text{ (dalle acier-béton)}$$

$$D_2 = 1,0 \text{ (bureau ouvert)}$$

$$D_3 = 1,0 \text{ (faux-plafond)}$$

B.2.4 Evaluation

Selon les caractéristiques modales calculées ci-dessus, le plancher est de classe D (Figure 6). La valeur OS-RMS₉₀ espérée est d'environ 3,2 mm/s.

Suivant la Table 2, la classe C fait partie du domaine recommandé pour les bâtiments de bureaux, l'exigence est donc remplie.

Support technique & parachèvement

Support technique

Commercial Sections vous propose des conseils techniques gratuits pour optimiser l'emploi de ses produits et solutions dans vos projets et pour répondre à vos questions relatives à l'utilisation des profilés et aciers marchands.

Ces conseils techniques couvrent la conception d'éléments de structures, les détails constructifs, la protection des surfaces, la protection incendie, la métallurgie et le soudage.

Nos spécialistes sont à votre disposition pour accompagner vos initiatives à travers le monde.

Pour faciliter le dimensionnement de vos projets, nous proposons également un ensemble de logiciels et documentations techniques que vous pouvez consulter ou télécharger sur le site

sections.arcelormittal.com

Parachèvement

Pour compléter les possibilités techniques de ses partenaires, la division Commercial Sections s'est dotée d'outils de parachèvement performants et offre un large éventail de services, tels que :

- forage
- oxycoupage
- découpes en Tés
- crantage
- contrefléchage
- cintrage
- dressage
- mise à longueur exacte par sciage à froid
- soudage de connecteurs
- grenaillage
- traitements de surface

Construction

ArcelorMittal dispose d'une équipe de professionnels multi-produits dédiée au marché de la construction.

Via son site internet Constructalia, BCS offre une palette complète de produits et solutions dédiés à la construction sous toutes ses formes: structures, façades, couvertures, etc.

www.constructalia.com

Références :

- [1] European Commission – Technical Steel Research: "Generalisation of criteria for floor vibrations for industrial, office, residential and public building and gymnastic halls", RFCS Report EUR 21972 EN, ISBN 92-79-01705-5, 2006, <http://europa.eu.int>
- [2] Hugo Bachmann, Walter Ammann: "Vibration of Structures induced by Man and Machines" IABSE-AIPC-IVBH, Zürich 1987, ISBN 3-85748-052-X

Vos partenaires

FRANCE

ArcelorMittal
Commercial Sections
6, rue André Campra
F-93212 La Plaine Saint Denis Cedex
Tél. : +33 (0) 1 71 92 00 00
Fax : +33 (0) 1 71 92 17 97
sections.arcelormittal.com

ConstruirAcier
20, rue Jean Jaures
F-92800 Puteaux
Tél. : +33 (0) 1 55 23 02 30
Fax : +33 (0) 1 55 23 02 49
www.construiracier.fr

CTICM
Espace technologique
L'Orme des Merisiers
Bâtiment Apollo
F-91193 Saint-Aubin
Tél. : +33 (0) 1 60 13 83 00
Fax : +33 (0) 1 60 13 13 03
www.cticm.com

BENELUX

ArcelorMittal
Commercial Sections
Benelux B.V.
Boompjes 40
NL-3011 XB Rotterdam (Pays-Bas)
Tél. : +31 1 020 60 555
Fax. : +31 1 020 60 559
sections.arcelormittal.com

Centre Information Acier
Chaussée de Zellik 12
B-1082 Bruxelles (Berchem-Sainte-Agathe)
Tél. : +32 2 509 15 01
Fax : +33 2 511 12 81
www.infosteel.be

SUISSE

ArcelorMittal
Commercial Sections
Innere Margarethenstrasse 7
CH-4051 Basel
Tél. : +41 61 227 77 77
Fax : +41 61 227 77 66
sections.arcelormittal.com

SZS
Centre Suisse de la Construction Métallique
Seefeldstrasse 25
CH-8034 Zürich
Tél. : +41 44 261 89 80
Fax : +41 44 262 09 62
www.szs.ch

Auteurs :

Prof. Dr.-Ing. Markus Feldmann
Dr.-Ing. Ch. Heinemeyer
Dr.-Ing. B. Völling
Université d'Aix-la-Chapelle
RWTH
Institut und Lehrstuhl für Stahlbau
und Leichtmetallbau

ArcelorMittal
Commercial Sections
Département Assistance Technique
66, rue de Luxembourg
L-4221 Esch-sur-Alzette
LUXEMBOURG
Tel. + 352 5313 3010
Fax + 352 5313 2799
sections.arcelormittal.com

ArcelorMittal
Commercial Sections

66, rue de Luxembourg
L-4221 Esch-sur-Alzette
LUXEMBOURG
Tel. + 352 5313 3010
Fax + 352 5313 2799

sections.arcelormittal.com



Sources Mixtes

Groupe de produits issu de forêts bien
gérées et d'autres sources contrôlées.
www.fsc.org Cert no. IMO-COC-027742
© 1996 Forest Stewardship Council