

FRANK KUPFERLE

Mob +33(0) 674 35 35 59

Email frank.kupferle@c4ci.eu

RAPPORT D'ÉTUDE

Analyse comparative de divers Critères Vibratoires pour les Planchers Bois



RESUME / OBJET

Le critère vibratoire de l'Eurocode 5 applicable aux plancher résidentiels est un critère souvent dimensionnant. Ce critère est cependant défini de manière incomplète dans l'Eurocode 5, §7.2, et son Annexe Nationale, laissant une trop large liberté d'interprétation tout en ne traitant que peu de configurations usuelles.

Ce manque de définition claire, combiné à une méconnaissance des paramètres influents et des solutions possibles, entraîne des difficultés en termes de conceptions, des inégalités en termes de saine compétition et au final ne remplit pas son rôle d'amélioration de la qualité.

Divers travaux de recherche ou publications existent sur ce thème, concernant aussi bien les planchers à solivage (avec ou sans chape) que les planchers massifs (CLT,...), et certaines Annexes Nationales de l'Eurocode 5 ou normes étrangères proposent des méthodes, mais leurs avantages/inconvénients ou leur impact technico-économique n'est pas connu.

C'est dans ce contexte, que le CODIFAB a confié à C4Ci la réalisation d'une étude visant à faire un état des lieux des méthodes existantes et des travaux de recherche existants ou en cours, puis à apporter un éclairage qualitatif et technico-économique sur les enjeux de ces diverses méthodes existantes afin de guider les choix et travaux ultérieurs dans ce domaine.

CLIENT	CODIFAB	DATE	17/10/2016
PROJET N°	1811-01	VERSION	REV. 2

SOMMAIRE

1	INTRODUCTION	4
1.1	Contexte	4
1.2	Objectif de l'étude	4
2	RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE.....	5
2.1	Méthodologie	5
2.2	Documents et méthodes retenus	5
2.2.1	DOCUMENTS ET MÉTHODES D'ORIGINE NORMATIVE.....	5
2.2.2	DOCUMENTS ET MÉTHODES ISSUS DE PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES.....	6
2.2.3	DOCUMENTS ET MÉTHODES ISSUS DE GUIDES OU DOCUMENTS COMPLÉMENTAIRES.....	6
2.2.4	EXPLOITATION DANS LE CADRE DE L'ANALYSE COMPARATIVE.....	6
3	CRITÈRE ACTUEL DE L'EUROCODE 5 ET SES ANNEXES NATIONALES	7
3.1	Critère vibratoire actuel et Annexe Nationale française.....	7
3.1.1	CRITÈRE VIBRATOIRE DE L'EUROCODE 5.....	7
3.1.2	ANNEXE NATIONALE FRANÇAISE.....	8
3.2	Revue comparée de 15 Annexes Nationales.....	9
3.2.1	FRÉQUENCE FONDAMENTALE.....	9
3.2.2	VÉRIFICATION STATIQUE : DÉFORMATION DU PLANCHER SOUS CHARGE UNITAIRE.....	9
3.2.3	VÉRIFICATION DYNAMIQUE : VITESSE DE RÉPONSE IMPULSIONNELLE UNITAIRE.....	10
3.3	Mise en perspective et thématiques non résolues	13
3.3.1	THÉMATIQUES LIÉES AUX DONNÉES D'ENTRÉE	13
3.3.2	THÉMATIQUES LIÉES À LA FRÉQUENCE FONDAMENTALE.....	13
3.3.3	THÉMATIQUES LIÉES AU CRITÈRE STATIQUE (DÉFORMATION SOUS CHARGE UNITAIRE)	14
3.3.4	THÉMATIQUES LIÉES AUX DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES	14
3.3.5	AUTRES THÉMATIQUES SOULEVÉES.....	15
3.3.6	CALIBRATION ET INTERACTION DES DIVERS PARAMÈTRES.....	15
4	PRÉSENTATION ET ANALYSE QUALITATIVE DES MÉTHODES EXISTANTES.....	16
4.1	Introduction.....	16
4.2	Annexes Nationales de l'EN 1995-1-1	17
4.2.1	ANNEXE NATIONALE AUTRICHIENNE	17
4.2.2	ANNEXE NATIONALE FINLANDAISE.....	19
4.2.3	ANNEXE NATIONALE SUISSE	20
4.2.4	ANNEXE NATIONALE DU ROYAUME-UNI.....	21
4.3	Critères vibratoires au Canada.....	24
4.3.1	PREMIÈRE PROPOSITION DE FOSCHI ET GUPTA.....	24
4.3.2	CRITÈRE VIBRATOIRE NBCC - PART 9	24
4.3.3	PROPOSITION DE CRITÈRE COMBINÉ FRÉQUENCE ET DÉFORMATION SOUS CHARGE UNITAIRE	25
4.3.4	MÉTHODE DU CCMC UTILISÉE PAR LES FABRICANTS DE POUTRES EN I ET AJOURÉES.....	26
4.4	Autres critères ou méthodes proposés.....	28
4.4.1	APPROCHES DU COMMENTAIRE DE LA DIN 1052 : 2004.....	28
4.4.2	APPROCHE DE J.F. BOQUET DANS LE GUIDE DE JUSTIFICATION DES PLANCHERS RÉSIDENTIELS	30
4.4.3	CRITÈRE DE FRÉQUENCE FONDAMENTALE SEULE DE DOLAN ET MURRAY.....	31
4.4.4	MÉTHODE POUR LES PLANCHERS CLT DU CLT HANDBOOK	32
4.4.5	APPROCHE DE L'INDUSTRIE DE LA CONSTRUCTION MÉTALLIQUE.....	33
5	RECOMMANDATIONS	34
	BIBLIOGRAPHIE.....	35

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

TABLEAUX

Tableau 1 – Synthèse de la revue compare de 14 Annexes Nationales de l'EN 1995-1-1 vis-à-vis du critère vibratoire	11
Tableau 2 – Critères différenciés selon classification des ouvrages – T. Torratsi et A. Talja (2006).....	19
Tableau 3 – UKTFA – EWPC – Facteur modificatif de la fréquence fondamentale kms.....	23

FIGURES

Fig. 1 – EN 1995-1-1, Figure 7.2 – Plage recommandée et relation entre a et b	8
Fig. 2 – SFS EN 1995-1-1 (AN Finlandaise) – Coefficient k de la limite a en fonction de la dimension du plancher	20
Fig. 3 – BS EN 1995-1-1/NA (AN UK) – Evolution de la limite a en fonction de la portée.....	22
Fig. 4 – Critère vibratoire NBCC 2001 – D.M. Onysko et al – Evolution de la limite de déformation sous charge unitaire	24
Fig. 5 – Modélisation de la souplesse du plancher – J.F. Boquet (crédit : CSTB).....	30

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Le critère vibratoire de l'Eurocode 5 applicable aux plancher résidentiels est un critère souvent dimensionnant. Ce critère est cependant défini de manière incomplète dans l'Eurocode 5, §7.2, et son Annexe Nationale, laissant une trop large liberté d'interprétation tout en ne traitant que peu de configurations usuelles.

Ce manque de définition claire, combiné à une méconnaissance des paramètres influents et des solutions possibles, entraîne des difficultés en termes de conceptions, des inégalités en termes de saine compétition et au final ne remplit pas son rôle d'amélioration de la qualité. En outre, de plus en plus de remontées du terrain, matérialisées dans la consultation organisée sur les thèmes à traiter/améliorer dans la prochaine version de l'Eurocode 5 par de très nombreuses demandes à ce sujet, demandent d'améliorer la compréhension des enjeux et de clarifier les conditions pratiques d'application de ce critère.

Divers travaux de recherche ou publications existent sur ce thème, concernant aussi bien les planchers à solivage (avec ou sans chape) que les planchers massifs (CLT,...), et certaines Annexes Nationales de l'Eurocode 5 ou normes étrangères proposent des méthodes, mais leurs avantages/inconvénients ou leur impact technico-économique n'est pas connu.

Le traitement de cette thématique et l'aboutissement vers une méthode complète représente un projet d'envergure, pour lequel la définition des axes de recherche et de proposition de méthodes gagneraient à pouvoir s'appuyer sur des informations qualitatives et technico-économiques sur ces méthodes existantes.

Il a ainsi été proposé de procéder à une première étape préliminaire au lancement d'un projet plus important, visant à fournir une base de réflexion solide et pragmatique pour la mise au point d'un programme plus complet mais aussi mieux ciblé visant à traiter cette thématique plus avant pour déboucher sur un critère vibratoire raisonnablement sûr, mieux défini, plus adapté aux réalités des ouvrages.

1.2 Objectif de l'étude

C'est dans ce contexte, que le CODIFAB a confié à C4Ci la réalisation d'une étude visant à faire un état des lieux des méthodes existantes et des travaux de recherche existants ou en cours, puis à apporter un éclairage qualitatif et technico-économique sur les enjeux de ces diverses méthodes existantes afin de guider les choix et travaux ultérieurs dans ce domaine.

L'étude s'articule autour des éléments suivants :

ETAPE 1 : ETAT DES LIEUX DES PUBLICATIONS ET METHODES ET CRITERES VIBRATOIRES EXISTANTS.

Cette phase initiale consiste en une étude bibliographique visant à rassembler les informations sur les méthodes et travaux existants, afin de mettre en évidence les méthodes possibles, en s'appuyant sur (et en complétant le cas échéant) la recherche bibliographique réalisée par ailleurs dans le cadre d'un projet initié par le SCIBO.

ETAPE 2 : ANALYSE QUALITATIVE DE CES METHODES.

Comparaison des diverses méthodes, enseignements que l'on peut en tirer, points d'intérêt, possible complémentarité ou spécificités, recherche des principes sous-jacents et raisons des choix qui ont été faits, etc....

ETAPE 3 : REDACTION D'UNE SYNTHESE CONCERNANT LES ACTIONS A ENVISAGER DANS LE PROLONGEMENT DE CETTE ETUDE.

Rédaction d'une synthèse présentant des propositions d'axes de recherche et/ou d'orientations des méthodes à développer ou valider,...

2 RECHERCHE BIBLIOGRAPHIQUE

2.1 Méthodologie

Dans le cadre d'un projet de fin d'étude initié par le SCIBO et l'UICB, portant sur le comportement vibratoire des fermettes à entrants porteurs, réalisé en 2014/15 par Benoît Canoine et Arthur Cochin alors élèves-ingénieurs de l'ENSTIB, sous le tutorat de Laurent Bléron, une première recherche bibliographique a été réalisée.

Dans le cadre de la présente mission, la phase de recherche bibliographique s'est appuyée sur les éléments rassemblés au cours de ce projet de fin d'étude (nous remercions ici Laurent Bléron pour sa contribution), tout en élargissant le champ de recherche notamment à un certain nombre de documents normatifs dans lesquels des critères vibratoires sont proposés, mais aussi avec un regard vers la construction métallique.

Les documents retenus contiennent :

- soit des critères à vérifier (cas de documents normatifs), qui ont l'avantage d'avoir été mis en pratique, mais peuvent avoir été simplifiés après calibration (notamment par analogie avec des pratiques existantes reconnues et acceptées), laquelle calibration n'est pas forcément aisément accessible ;
- soit des propositions de critère ou de méthode d'évaluation de certains paramètres influents (cas des travaux de recherche ou autres publications), qui se situent de manière plus proche de la théorie et de la réalité physiques, mais peuvent être complexes à mettre en œuvre ou économiquement trop pénalisantes.

La combinaison de ces deux catégories permet un tour d'horizon intéressant et complémentaire.

En outre, certaines publications contiennent elles-mêmes des synthèses de recherche bibliographique très avancées sur un domaine ou paramètre particulier. Il a été considéré inutile dans le cadre de la présente étude de répéter ce qui a déjà été précisé ailleurs. Le présent rapport se limitera dans ce cas à indiquer de manière claire l'existence de cette information.

2.2 Documents et méthodes retenus

On présente ici la liste des documents et méthodes retenus. Les méthodes sont décrites au §4.

2.2.1 DOCUMENTS ET METHODES D'ORIGINE NORMATIVE

Dans le cadre de la présente analyse, 15 Annexes Nationales (AN) de l'Eurocode 5 issues des pays suivants ont été analysées : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Finlande, France, Irlande, Italie, Pays-Bas, Pologne, Norvège, Espagne, Suède, Suisse et Royaume-Uni.

Seules les AN présentant des particularités et/ou compléments intéressants ont été retenues ci-après. Une revue comparée de ces AN est présentée de manière synthétique au §3.2.

En Europe :

- Eurocode 5 (EN 1995-1-1 : 2004 + A2 : 2014) [1]
- Annexes Nationales de l'EN 1995-1-1 :
 - National Annex to BS EN 1995-1-1 : 2012-11 (Royaume-Uni) [2]
 - ÖNORM B 1995-1-1 : 2013-12 (Autriche) [3]
 - ANNEX 16 - National Annex to SFS EN 1995-1-1 (Finlande) [4]
 - SN EN 1995-1-1/NA : 2014 (Suisse) [5]
- Norme DIN 1052 : 2004 (Allemagne) [6], ancienne norme aux états limites, proche de l'Eurocode 5

Au Canada :

- NBCC 2015, National Building Code of Canada (Canada) [7], norme générale de construction
- CCMC Analytical procedure for calculation of deflection of floors under concentrated load and for meeting Part 9 requirements for vibration controlled spans [8] ; méthode reconnue utilisée systématiquement par les fabricants de poutres en I et de poutres ajourées à âme bois ou métallique.

Les normes de dimensionnement des structures bois en Australie et en Nouvelle-Zélande ont été revues et ne contiennent pas de dispositions particulières vis-à-vis du confort vibratoire.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

2.2.2 DOCUMENTS ET METHODES ISSUS DE PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Certains chercheurs ont travaillé à plusieurs reprises sur la thématique du confort vibratoire des plancher bois, et la proposition de méthodes de vérification. Leurs noms reviennent à plusieurs reprises dans la bibliographie retenue.

Parmi les nombreuses publications, ont été retenues celles qui présentaient des méthodes de vérification ou des approches jugées intéressantes vis-à-vis de certains paramètres entrant dans la vérification du comportement vibratoire des planchers bois.

Le détail des publications est donné dans la section Bibliographie à la fin du présent rapport, qui peut être résumée comme suit :

- Travaux de S. Ohlsson [9], [10] : ils ont servi de base au critère vibratoire de l'Eurocode 5 dans sa forme actuelle [1] ;
- Travaux de D.M. Onykso et al [17], [18] : ils ont formé la base du second critère vibratoire de la norme canadienne (après celui proposé par Foschi et Gupta) ;
- Travaux de Y. H. Chui [11], [12], de L.J. Hu [13] [14], de Y. H. Chui et L.H. Hu [15], [16] et de I. Smith et Y.H. Chui [19] : ils ont servi de base aux évolutions récentes du critère vibratoire de la norme canadienne, et ont proposé des approches complémentaires qui n'ont pas été retenues pour ce critère ;
- Travaux de J. Dolan, T. Murray et al [20] qui ont proposé un critère basé sur la seule fréquence fondamentale ;
- Travaux de T. Toratti et A. Talja [21] qui ont servi de point de départ aux dispositions de l'Annexe Nationale finlandaise de l'Eurocode 5 [4] et proposé une pré-classification en fonction de la fréquence et une classification des ouvrages selon le niveau de sensibilité souhaité ;
- Travaux de J. Weckendorf [22] qui fournissent notamment un bel historique de l'évolution des critères vibratoires et des méthodes proposées par les travaux mentionnés précédemment ;
- Travaux de S. Winter et al [23] qui ont porté plus particulièrement sur les planchers avec chape flottante (sèche ou humide) et planchers massifs (CLT).

2.2.3 DOCUMENTS ET METHODES ISSUS DE GUIDES OU DOCUMENTS COMPLEMENTAIRES

A ces publications s'ajoutent des guides ou documents complémentaires retenus pour leur apport ou leur éclairage :

- le CLT Handbook (US Edition) [24] : version américaine du guide développé par FP Innovations au Canada et qui sert de base au dimensionnement d'immeubles en CLT en Amérique du Nord et à l'évolution des normes de construction pour inclure le CLT ;
- le chapitre 3 du E-book du COST FP0702 [25] qui présente une analyse comparée de 13 Annexes Nationales de l'Eurocode 5, réalisée par B. Zhang, B. Rasmussen, A. Jorissen et A. Harte ;
- le guide de Justification des planchers résidentiels réalisé par J.F. Bocquet dans le cadre du plan Europe [26] et édité par le CSTB, qui présente une méthode avancée de calcul de la souplesse du plancher et prise en compte des diverses rigidités transversales (entretoises, panneaux, etc..)
- un document de travail de l'Engineered Wood Product Committee (EWPC) de la UKTFA [27], présentant les évolutions du critère vibratoire de l'Annexe Nationale anglaise de l'Eurocode 5 validées par les fabricants de poutres en I et poutres ajourées au Royaume-Uni en vue de la révision de ladite AN, mais non implémentée ;
- le rapport technique du Joint Research Center de la Commission Européenne [28] et un guide de contrôle vibratoire des planchers en structure métalliques [29] (co-publié par plusieurs organismes dont le CTICM), qui présente une approche intéressante de classification des ouvrages et de vérification, développée pour possible inclusion dans la révision de l'Eurocode 3.

2.2.4 EXPLOITATION DANS LE CADRE DE L'ANALYSE COMPARATIVE

Toutes les méthodes ou approches présentées dans la bibliographie retenue n'ont pas fait l'objet d'une présentation détaillée ni d'une analyse qualitative. Une sélection a été opérée en privilégiant tout d'abord les méthodes publiées dans les documents normatifs, complétées de quelques approches jugées particulièrement intéressantes.

Notamment, la thèse de J. Weckendorf [22] fournit un bel historique de l'évolution des critères vibratoires et des méthodes proposées par la plupart des travaux de recherche retenus (références bibliographiques [9] à [23]), qui ont pour l'essentiel servi de support au développement de critères normatifs. On se référera à cette thèse puis aux publications correspondantes pour les détails concernant ces travaux.

De même la comparaison de diverses AN de l'EN 1995-1-1 sur deux planchers types réalisées par B. Zhang et al dans le cadre du COST FP0702 [25] est autoportante et n'est pas reprise dans le présent document.

3 CRITERE ACTUEL DE L'EUROCODE 5 ET SES ANNEXES NATIONALES

Dans ce qui suit, on rappelle brièvement le critère vibratoire actuel de l'Eurocode 5, qui est ensuite mis en perspective vis-à-vis de son application au dimensionnement dans la pratique d'ouvrages de planchers résidentiels.

Dans un second temps, une revue comparative de 15 Annexes Nationales est présentée.

Cette partie permet de mettre en lumière les enjeux liés à la configuration actuelle de ce critère vibratoire.

3.1 Critère vibratoire actuel et Annexe Nationale française

3.1.1 CRITERE VIBRATOIRE DE L'EUROCODE 5

Les solives de plancher d'un ouvrage résidentiel doivent faire l'objet d'une vérification du critère vibratoire défini au § 7.3.3 de l'EN 1995-1-1. Ce critère a été proposé par S. Ohlsson à l'issue de ses travaux [9], [10].

Ce critère couplé statique et dynamique, se décompose en une vérification en 3 étapes :

- le calcul de la fréquence fondamentale : f_1 (Hz)
- le calcul de la déformation du plancher sous charge unitaire d'1 kN : w_{1kN} (mm)
- le calcul de la vitesse de réponse impulsionnelle unitaire : v (m/N.s²)

Lorsque $f_1 \leq 8$ Hz, une analyse spécifique est requise et les deux vérifications suivantes ne s'appliquent pas (ceci peut être considéré comme une borne inférieure du cadre de validité de la méthode proposée par S. Ohlsson).

L'EN 1995-1-1 ne donne pas d'indication précise sur la manière de mener cette analyse spécifique.

On considère donc que l'on doit tout d'abord vérifier :

$$f_1 > 8 \text{ Hz}$$

Une fois cette condition vérifiée, on procède aux deux étapes suivantes.

3.1.1.1 Fréquence fondamentale

La fréquence fondamentale f_1 peut être calculée comme suit, pour un plancher de forme rectangulaire simplement appuyé sur ses quatre côtés (que l'on peut assimiler à un plancher de type « plateforme ») :

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}}$$

avec:

$(EI)_L$ rigidité longitudinale du plancher (N.m²/m)

L la portée des solives (m)

m masse du plancher (kg/m²)

3.1.1.2 Vérification statique : déformation du plancher sous charge unitaire

L'EN 1995-1-1 demande que soit vérifié :

$$\frac{w}{F} \leq a \quad mm/kN$$

où w est la déformation instantanée maximale causée par une charge concentrée F appliqué en tout point du plancher, tenant compte de la redistribution de la charge au sein du plancher.

Il s'agit de la rigidité (ou à l'inverse de la souplesse) du plancher.

Cette vérification est communément réécrite en émettant l'hypothèse $F = 1$ kN (charge unitaire) sous la forme :

$$w_{1kN} \leq a \quad mm$$

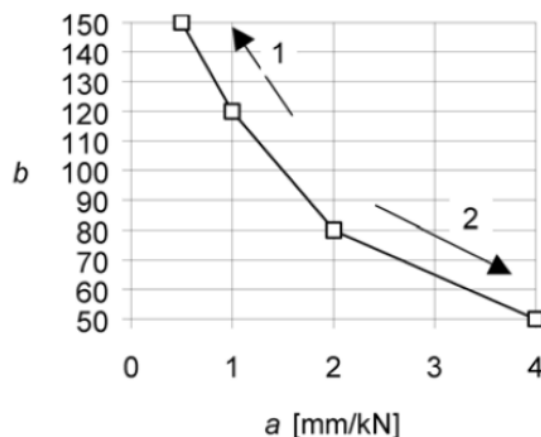
où w_{1kN} est la déformation du plancher sous charge unitaire d'1 kN

La valeur limite a est un choix national (NDP) qui peut donc être indiqué dans l'Annexe Nationale.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

La figure 7.2 de l'EN 1995-1-1 donne le diagramme de relation entre la limite a et la valeur b utilisée pour déterminer la limite de la vérification dynamique (ci-après).



Ici, (1) = Meilleure performance et (2) = Performance plus faible

Fig. 1 – EN 1995-1-1, Figure 7.2 – Plage recommandée et relation entre a et b

Note : S. Ohlsson, sur la base de ses travaux de recherche (limités à des planchers de portée simple inférieure à 4,50m), avait initialement suggéré de positionner une limite unique de $a = 1,5\text{mm}$ (pour laquelle on lit : $b = 100$).

3.1.1.3 Vérification dynamique : vitesse de réponse impulsionnelle unitaire

L'EN 1995-1-1 demande que soit vérifié :

$$v \leq b(f_1 \cdot \zeta^{-1})$$

avec :

v vitesse de réponse impulsionnelle (mm/s)

b est la valeur lue dans la figure 7.2 de l'EN 1995-1-1 en fonction de la limite a

f_1 fréquence fondamentale (Hz)

ζ coefficient d'amortissement modal

On calcule la vitesse de réponse impulsionnelle unitaire v comme suit :

$$v = \frac{4 \cdot (0,4 + 0,6 \cdot n_{40})}{m \cdot L \cdot B + 200}$$

avec :

m masse du plancher (kg/m^2)

L longueur du plancher (m)

B largeur du plancher (m)

n_{40} nombre de modes propres à moins de 40 Hz calculé comme suit :

$$n_{40} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \cdot \left(\frac{L_b}{L_a} \right)^4 \cdot \frac{(EI)_L}{(EI)_B} \right\}^{0,25}$$

où $(EI)_B$ est la rigidité transversale du plancher ($\text{N}\cdot\text{m}^2/\text{m}$) et où l'on prendra le coefficient d'amortissement modal $\zeta = 1\%$ si celui-ci n'est pas connu avec plus de précision.

3.1.2 ANNEXE NATIONALE FRANÇAISE

L'Annexe nationale de la NF EN 1995-1-1 est peu diserte sur l'application du critère vibratoire et n'apporte pas de réponse spécifique aux zones sensibles de l'EN 1995-1-1.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

L'Annexe nationale de la NF EN 1995-1-1 précise qu'un confort normal pour un plancher résidentiel d'usage courant correspond à une valeur de la limite α de la déformation w_{1kN} de $(1,3 \pm 0,3)$ mm/kN. Cette plage ne correspond pas à proprement parler à une limite.

En France, la masse du plancher m est calculée à partir de la charge permanente uniformément répartie du plancher, et en tenant compte de la fraction quasi-permanente des charges d'exploitation.

Ceci est conforme aux prescriptions de l'Annexe Nationale de la NF EN 1990, qui ne sont pas rappelées ou précisées dans l'Annexe Nationale de la NF 1995-1-1.

3.2 Revue comparée de 15 Annexes Nationales

Dans le cadre du présent projet, une revue comparée de 15 Annexes Nationales de l'EN 1995-1-1 a été conduite, portant spécifiquement sur les paramètres déterminés nationalement (NDP) et sur les éventuels compléments nationaux non contradictoires relatifs au §7.3.3 de l'EN 1995-1-1.

Ces 15 Annexes Nationales (AN) sont issues des pays suivants : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Finlande, France, Irlande, Italie, Pays-Bas, Pologne, Norvège, Espagne, Suède, Suisse et Royaume-Uni.

La synthèse de cette analyse comparée est présentée dans le Tableau 1 ci-après.

Seules les AN présentant des particularités et/ou compléments intéressants ont été retenues et seront présentées de manière détaillée au §4.

3.2.1 FREQUENCE FONDAMENTALE

La majorité des AN n'apporte aucun choix national ou complément au texte de l'EN 1995-1-1.

On retiendra :

- l'AN du Royaume-Uni [2] qui introduit une équation de calcul de la fréquence fondamentale pour les éléments porteurs (porteurs de chevêtre ou porteurs principaux) sous chargement uniforme et succession de charges concentrées.
- l'AN Autrichienne [3] qui introduit :
 - des classes de plancher selon leur destination et leur conception,
 - des limites de fréquence fondamentale pour ces classes,
 - une définition quantitative de la distribution transversale,
 - une équation de calcul de la fréquence fondamentale pour les cas de distribution transversale,
 - une vérification complémentaire de l'accélération a_{rms} lorsque la fréquence fondamentale est inférieure à la limite mais reste supérieure à 4,5Hz.
- l'AN Finlandaise [4] qui :
 - fixe une limite à 9 Hz,
 - considère l'équation de l'EN 1995-1-1 dans le cas d'un plancher appuyé sur 2 côtés,
 - introduit une équation de calcul de la fréquence fondamentale pour les cas de planchers appuyés sur les 4 côtés.

3.2.2 VERIFICATION STATIQUE : DEFORMATION DU PLANCHER SOUS CHARGE UNITAIRE

On note une grande disparité de traitement de ce critère.

La plupart des AN fixent des valeurs (Autriche, Belgique, Danemark, Finlande, Irlande, Italie, Pays-bas, Norvège, Suède, Suisse, Royaume-Uni) ou proposent une valeur (Danemark) ou une plage de valeurs (France, Norvège) recommandées pour la limite α , en général entre 0,5 et 2,0 mm/kN.

Quelques AN précisent des équations pour le calcul de la déformation sous charge unitaire : ce sont les mêmes qui introduisent une notion de distribution transversale, de largeur contributive ou nombre de solives contributives (voir ci-dessous).

On note que l'AN Danoise propose une vérification combinée à une limite à la déformation instantanée sous charge d'exploitation (seule) uniformément répartie de $L/600$ (par analogie avec la pratique historique précédant l'Eurocode 5).

On retiendra :

- l'AN Autrichienne [3] qui introduit une largeur contributive (pouvant être élevée) et fixe alors des limites assez strictes pour α , en fonction des classes de planchers déjà mentionnées plus haut ;

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

- l'AN Finlandaise [4] qui :
 - introduit deux équations pour le calcul de la déformation sous charge unitaire prenant en compte de manière différenciée la largeur contributive,
 - définit une valeur stricte de a , qui varie (augmente) pour les planchers de petite dimension.
- l'AN Suisse [5] qui :
 - introduit une différenciation des limites a en fonction de la configuration du plancher (sur 2 ou 3 appuis),
 - introduit également une modulation des limites a en fonction du coefficient d'amortissement modal ζ .
- l'AN du Royaume-Uni [2] qui introduit :
 - une équation pour le calcul de la déformation unitaire qui prend en compte un nombre de solives contributives, la déformation à l'effort tranchant,
 - le principe de portée de calcul équivalente lorsque la solive est sur 2 ou 3 appuis ou plus,
 - une modulation de la limite a en fonction la portée : 1,8 mm/kN en-dessous de 4,0m, puis une limite de plus en plus stricte au fur et à mesure que la portée augmente,
 - la prise en compte par simple superposition de la rigidité du panneau support de plancher, du plafond (s'il est directement fixé) et d'éventuels dispositifs transversaux (fourrures, entretoises).

3.2.3 VERIFICATION DYNAMIQUE : VITESSE DE REPOSE IMPULSIONNELLE UNITAIRE

La quasi-totalité des AN se borne au texte de l'EN 1995-1-1 et, lorsqu'elle a défini une ou plusieurs valeurs précises de la limite a , précise la valeur de b correspondante pour le calcul de la limite de vitesse de réponse impulsionnelle.

On note que certaines AN (Autriche, Suisse) définissent diverses valeurs du coefficient d'amortissement modal ζ .

On remarque également que l'AN Suisse [5] modifie la limite de vitesse de réponse impulsionnelle en divisant celle de l'EN 1995-1-1 par 3.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Tableau 1 – Synthèse de la revue compare de 14 Annexes Nationales de l'EN 1995-1-1 vis-à-vis du critère vibratoire

Pays	Fréquence fondamentale	Déformation sous charge unitaire	Vitesse de réponse impulsionnelle
EC5 ¹⁾	appuyé sur 4 côtés : $f_1 = \frac{\pi}{2.L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}}$ > 8 Hz	aucune $0,5 \leq a \leq 4,0$	$v = \frac{4 \cdot (0,4+0,6 \cdot n_{40})}{m \cdot L \cdot B+200}$ $n_{40} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \cdot \left(\frac{L_b}{L_a} \right)^4 \cdot \frac{(EI)_L}{(EI)_B} \right\}^{0,25}$
Allemagne	indique que l'on peut utiliser l'approche du commentaire de la norme DIN 1052 : 2004 [6] et s'appuyer sur les informations données par S. Winter et al [23]		
Autriche	sans distribution transversale : $f_1 = \frac{\pi}{2.L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}}$ avec distribution transversale : $f_1 = \frac{\pi}{2.L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{L}{B} \right)^4 \cdot \frac{(EI)_B}{(EI)_L}}}$ Distribution transversale si : $\frac{(EI)_B}{(EI)_L} \geq 0,05$ Classe I = 8 Hz Classe II = 6 Hz Classe III = aucune vérifier a_{rms} si : $4.5Hz \leq f_1 \leq f_{I,min}$	$w_{1kN} = \frac{F.L^3}{48 \cdot (EI)_L \cdot b_F}$ avec la largeur contributive : $b_F = \min \left\{ \frac{B}{1,1} ; \sqrt[4]{\frac{(EI)_B}{(EI)_L}} \right\}$	Classe I : $a \leq 0,25$ Classe II : $a \leq 0,5$ Classe III : aucune -/-
Belgique	-/-	-/-	$a = 1,5$ -/-
Danemark	-/-	-/-	recommandation couplée à la vérification $w_{Q,inst} \leq L / 600$ (avec $Q_k = 1.50 \text{ kN/m}^2$) pour $L \leq 5,0\text{m}$ ou $6,0\text{m}$ $a \leq 2,0$ recommande : $a = 1,7$ -/-
Finlande	appuyé sur 2 côtés : $f_1 = \frac{\pi}{2.L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}}$ appuyé sur 4 côtés : $f_1 = \frac{\pi}{2.L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m} \cdot \sqrt{1 + \left[2 \cdot \left(\frac{L}{B} \right)^2 + \left(\frac{L}{B} \right)^4 \right] \cdot \frac{(EI)_B}{(EI)_L}}}$ $\geq 9 \text{ Hz}$	$w_{1kN} = \min \left\{ \frac{F.L^2}{42 \cdot (EI)_L \cdot k_\delta} ; \frac{F.L^3}{48 \cdot (EI)_L \cdot s} \right\}$ avec : $k_\delta = \min \left\{ B/L ; \sqrt[4]{\frac{(EI)_B}{(EI)_L}} \right\}$	$a = k \cdot 0,5$ pour $L \leq 6,0\text{m}$ où $k = f(L)$ $a = 0,5$ pour $L \geq 6,0\text{m}$ -/-
France	-/-	-/-	$a = 1,3 \pm 0,3$ -/-
Irlande	idem Royaume-Uni		
Italie	-/-	-/-	$a = 1,0$ -/-
Pays-Bas	-/-	-/-	$a = 1,0$ -/-
Pologne	-/-	-/-	- -/-
Norvège	-/-	-/-	$a = 0,9$ (« normale ») $a = 0,6$ (« élevée ») -/-
Espagne	-/-	-/-	- -/-
Suède	-/-	-/-	$a = 1,5$ -/-

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Tableau 1 (suite) – Synthèse de la revue compare de 14 Annexes Nationales de l'EN 1995-1-1 vis-à-vis du critère vibratoire

Pays	Fréquence fondamentale	Déformation sous charge unitaire	Vitesse de réponse impulsionnelle
Suisse	-/-	solive sur 2 appuis : $a = r_1 \cdot 1,0$ où : $r_1 = 1,0$ pour $\zeta = 1\%$ (sans chape flottante) $r_1 = 1,15$ pour $\zeta = 2\%$ (planchers massifs avec chape flottante) $r_1 = 1,25$ pour $\zeta = 3\%$ (planchers à solive et chape flottante) solive sur 3 appuis : $a = r_1 \cdot r_2 \cdot 1,4$ où : $r_2 = 1,0$ si pas d'exigence ; sinon : $r_2 = \frac{1}{3 \cdot (\frac{L_2}{L_1})^2 + L_1}$	$v \leq \frac{1}{3} \cdot b \cdot (f_1 \cdot \zeta^{-1})$
Royaume-Uni	solives : $f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}}$ porteuses : $f_1 = \frac{50 \cdot \pi}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_{joist}}{w_t \cdot s_j + \sum (2 \cdot P_i / L) \cdot \sin^2(\pi \cdot a_i / L)}}$ où : P_i est la $i^{\text{ème}}$ charge concentrée à une distance a_i de l'appui le plus proche s_j est la bande de charge répartie et : $w_t = \max\{w ; 0,75\}$ où : w = poids propre du plancher sans cloisons	$w_{1kN} = \frac{1000 \cdot k_{dist} \cdot k_{amp} \cdot L_{eq}^3}{48 \cdot (EI)_{joist}}$ avec le nombre de solives contributives : $k_{dist} =$ $\min \left\{ \begin{array}{l} 0,30 \\ k_{strut} \cdot \left[0,38 - 0,08 \cdot \ln \left(\frac{14 \cdot (EI)_B}{s^4} \right) \right] \end{array} \right.$ $k_{amp} = 1,05$ à $1,30$ (prise en compte de la déformation due à l'effort tranchant et $L_{eq} = 0,8$ à $1,0$ selon le nombre de portées de la solive	$a = 1,8$ pour $L \leq 4,0m$ $a = 16500 / L^{1,1}$ pour $L > 4,0m$

Note :

- 1) On rappelle ici en tant que référence les termes de l'EN 1995-1-1 (Eurocode 5)
- 2) Seuls les paramètres, équations ou compléments nationaux qui diffèrent du texte de référence de l'Eurocode 5 sont précisé. L'absence d'information sous-entend la référence au §7.3 de l'EN 1995-1-1.

3.3 Mise en perspective et thématiques non résolues

La mise en pratique du §7.3 de l'EN 1995-1-1 révèle un certain nombre de thématiques ou questions qui ne trouvent pas leur réponse dans la norme ou ses AN. Le § 7.3.3 de la NF EN 1995-1-1 définit par exemple les principes et équations de base de la vérification du critère vibratoire, mais ne définit pas avec précision certains termes de ces équations.

C'est d'ailleurs pour cette raison que les AN Autrichienne, Finlandaise, Suisse et du Royaume-Uni ont proposé des méthodes plus complètes de mise en œuvre du critère vibratoire.

3.3.1 THEMATIQUES LIEES AUX DONNEES D'ENTREE

3.3.1.1 Détermination de la masse du plancher

La masse du plancher est un paramètre clé du calcul de la fréquence fondamentale, mais également de la vérification dynamique (vitesse de réponse impulsionnelle). Son mode de détermination n'est cependant pas défini avec précision.

Il paraît important de pouvoir clairement **définir si la masse doit prendre en compte** :

- **toutes les actions permanentes**, ou seulement une partie (p.ex. seulement les charges uniformément réparties) ;
- **une partie (p.ex. la partie quasi-permanente) de la charge d'exploitation**, afin p.ex. de tenir compte de l'éventuelle influence du mobilier ;
- **les cloisons légère ou très légères (cloisons de distribution)** et si oui sous quelle forme, puisque l'approche consistant à prendre en compte une charge uniformément répartie (selon EN 1991-1-1) est une hypothèse simplificatrice du calcul qui peut s'avérer fortement erronée dans le cas d'un calcul vibratoire.

3.3.1.2 Détermination des rigidités

La rigidité transversale $(EI)_B$ et la rigidité longitudinale $(EI)_L$ sont des données d'entrée de première importance pour tous les calculs du critère vibratoire de l'EN 1995-1-1. Leur définition reste cependant très générale.

Si dans le cas d'un plancher massif (CLT, ...) la détermination des rigidités semble évidente, dans le cas d'un plancher à solivage les conditions dans lesquelles la déformation sous charge unitaire peut être calculée à partir d'une solive isolée et de la configuration du plancher n'est pas précisée. Dans les deux cas, la question de la contribution de « couches » complémentaires mériterait d'être clarifiée.

Il paraît en conséquence pertinent de **clarifier la prise en compte** (ou non) **et de préciser les modalités de détermination de** :

- **l'effet composite** entre p.ex. la solive et le panneau support de plancher, selon son mode de fixation (cloué/vissé, ou cloué/vissé et collé) ;
- **la rigidité des « couches » de second œuvre complémentaires** telles que chape flottante (sèche ou humide), plancher sur lambourdes, ... ;
- **la largeur contributive du plancher** ou le nombre de solives qui contribuent conjointement à reprendre la charge unitaire, notamment en fonction de la rigidité transversale.

3.3.1.3 Détermination du coefficient d'amortissement modal

Le §7.3.1(3) de l'EN 1995-1-1 stipule qu'en l'absence d'autres valeurs justifiées comme plus appropriées, un coefficient d'amortissement modal $\zeta = 1\%$ doit être pris en compte.

Les modalités de détermination de cet amortissement modal ne sont pas précisées et aucune source « valide » de valeurs « plus appropriées » n'est indiquée. La bibliographie montre que les valeurs d'amortissement modal mesurées dans diverses campagnes d'essais portant sur des planchers bois varient usuellement entre 0.8% et 4% (ou plus). La valeur de $\zeta = 1\%$ est plutôt conservatrice, et influe essentiellement au travers de la vitesse de réponse impulsionnelle sur la rigidité de l'élément formant la rigidité transversale du plancher (p.ex. panneau support de plancher).

Il conviendrait de **clarifier des valeurs pour les configurations de plancher les plus courantes**.

3.3.2 THEMATIQUES LIEES A LA FREQUENCE FONDAMENTALE

Le modèle développé dans l'EN 1995-1-1 ne spécifie pas la méthode applicable aux planchers pour lesquels la fréquence fondamentale f_1 est inférieure ou égale à 8 Hz. Or dans la pratique, et notamment pour des planchers lourds (par ex. avec chape flottante humide ou plancher massif en CLT), il n'est pas inhabituel de rencontrer des cas où la fréquence est inférieure à ce seuil minimal.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

De plus, l'équation présentée dans l'EN 1995-1-1 est valable dans le cas de poutres sur deux appuis, principalement sous chargement uniforme, pour un plancher de forme rectangulaire simplement supporté (appui de type rotule) sur ses 4 côtés. Elle résulte d'une simplification selon une hypothèse d'un rapport de rigidité transversale à la rigidité longitudinale très faible. Par conséquent cette équation :

- ne répond pas au cas de chargement plus complexes, notamment avec des charges concentrées (p.ex. poutrelle porteuse de chevêtre) ;
- ne prend pas en compte le rapport réel entre la rigidité transversale $(EI)_B$ et la rigidité longitudinale $(EI)_L$, ce qui peut poser problème dans le cas de planchers plus rigides comme p.ex. le CLT ou un plancher avec chape humide ;
- ne permet pas un calcul correct dans le cas de plancher sur appuis multiples dès lors que les portées adjacentes ne sont pas de longueur identique ;
- ne prend pas en compte les appuis non infiniment rigides comme par exemple l'appui de la solive sur une poutre porteuse ;
- ne définit pas l'influence d'appuis non totalement libres en rotation (encastremets, porte-à-faux, ...).

Enfin, le concept de plancher « simplement supporté sur ses 4 côtés » n'est pas forcément défini avec précision ou de manière quantifiable. Son cadre d'application est donc quelque peu flou, et on ne sait pas non plus définir un plancher « simplement supporté sur 2 côtés seulement ».

3.3.3 THEMATIQUES LIEES AU CRITERE STATIQUE (DEFORMATION SOUS CHARGE UNITAIRE)

Au-delà des imprécisions liées aux données d'entrée de ce critère (détermination des rigidités, détermination de la largeur contributive ou du nombre de solives contributives), la vérification de déformation sous charge unitaire pose également quelques thématiques non résolues.

Tout d'abord, la question de la pertinence d'une telle vérification dans le cas de planchers massifs (CLT, ...) se pose. En effet, la charge concentrée unitaire (1 kN) sensée représenter le poids d'une personne est en fait de faible intensité au regard des rigidités transversale et longitudinale élevées d'une plaque monolithique, dont la déformation sera habituellement très faible. Sauf à prescrire une limite a plus sévère, ce critère n'est que rarement dimensionnant. En outre, ces planchers « lourds » sont plus rapidement impactés par un critère portant sur la fréquence fondamentale.

A l'inverse, la valeur limite a de la déformation sous charge unitaire du plancher w_{1kN} est le critère limitant principal d'un plancher léger. Se pose alors la question du niveau de déformation acceptable, qui ne peut être dissocié de la détermination des rigidités et de la prise en compte de la largeur contributive : la sensibilité et la difficulté de ce point est illustrée par la variété et/ou l'imprécision des valeurs limites choisies dans les AN vues précédemment.

A titre d'exemple, l'AN Française de l'EN 1995-1-1 précise qu'un confort normal pour un plancher résidentiel d'usage courant correspond à une valeur de la limite a de la déformation w_{1kN} de $(1,3 \pm 0,3)$ mm/kN. Cette plage ne correspond pas à proprement parler à une limite.

Enfin, le critère proposé par S. Ohlsson est issu de travaux expérimentaux sur des planchers de portée de l'ordre de 4,0 à 4,5m, pour lesquels une limite a unique et fixe peut s'avérer satisfaisante. Se pose cependant la question de la validité de cette valeur unique pour des portées plus importantes. L'AN du Royaume-Uni, se basant sur l'expérience et les travaux de recherche Canadiens, propose une valeur de la limite a qui diminue (donc devient plus sévère) au fur et à mesure que la portée augmente au-delà de 4,0 m.

3.3.4 THEMATIQUES LIEES AUX DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES

Dans la mise en pratique du §7.3 de l'EN 1995-1-1, se posent enfin un certain nombre de thématiques liées à des dispositions constructives ou des interfaces du plancher considéré.

S'il apparaît évident que la vérification du critère vibratoire doit être réalisée pour les solives d'un plancher résidentiel, le texte normatif ne fournit pas d'indication sur son application éventuelle aux autres éléments de ce plancher, notamment au sujet des poutres porteuses de chevêtre qui sont habituellement parallèles aux solives et impliquées dans le comportement vibratoire du plancher, ou encore au sujet des porteurs principaux.

Par ailleurs, il n'est pas rare que les solives soient disposées sur appuis multiples voire en porte-à-faux, cas qui ne sont pas décrits avec précision dans la norme.

Le comportement vibratoire des structures de planchers dits légers sont également assez sensibles aux éléments non continus (dans le sens de la portée) apportant une rigidité transversale complémentaire, tels que les entretoises, fourrures, ou autres dispositifs pouvant avoir un effet limitant des vibrations hors plans des solives. Les méthodes de prise en compte de ces éléments de rigidité transversale, mais aussi les conditions pratiques (détails constructifs) permettant d'assurer leur fonction, ne sont aucunement traités dans la norme.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

3.3.5 AUTRES THEMATIQUES SOULEVEES

Enfin, un certain nombre de thématiques connexes sont apparues qui sont regroupées dans cette dernière section :

- **L'influence des cloisons légères** (au-dessus ou en-dessous du plancher) n'est pas précisée ;
- **L'influence des chevêtres de trémies** sur le comportement du plancher n'est pas connue ni précisée, seule une analyse aux éléments finis (peu adaptée au quotidien du dimensionnement des planchers résidentiels) permet à ce jour d'approcher ce comportement ;
- **l'influence de la rigidité des porteurs** formant appui des solives n'est pas traitée.

En outre, se pose la question de la **limitation de la vérification du critère vibratoire aux seuls planchers résidentiels** : en effet les planchers de bureaux, de commerces, d'établissement recevant du public sont également soumis aux problématiques de confort vibratoire.

Par extension, la thématique de la **classification des ouvrages en termes d'exigences** (ou de sensibilité) vis-à-vis du critère vibratoire émerge, avec comme corolaire la **définition de niveaux de confort ou d'exigences** à la fois perceptibles et économiquement raisonnables.

Enfin, la **vérification du critère vibratoire pour des éléments triangulés tels par exemple que les fermettes à entrain porteur n'est absolument pas abordée dans la norme**. Elle n'a pas été traitée non plus dans le cadre des travaux de recherche détectés lors de la recherche bibliographique, à l'exception du projet de fin d'étude initié par le SCIBO et l'UICB, portant sur le comportement vibratoire des fermettes à entrain porteurs, réalisé en 2014/15 par Benoît Canoine et Arthur Cochin alors élèves-ingénieurs de l'ENSTIB, sous le tutorat de Laurent Bléron.

3.3.6 CALIBRATION ET INTERACTION DES DIVERS PARAMETRES

Bien que les divers paramètres, les vérifications, et les thématiques soulevées aient été évoqués précédemment de manière essentiellement individuelle, il est important de préciser que tout critère, méthode ou valeur limite ne peut être analysé correctement de manière individuelle.

En outre, comme souvent dans le cadre d'une méthode de vérification d'une norme de calcul, le critère de l'EN 1995-1-1 a fait l'objet de calibration et de simplification de certaines équations.

Il faut donc attacher une attention particulière aux interactions entre les divers paramètres et méthodes ou équations proposées, ainsi qu'à la calibration de ces valeurs.

REMARQUE FINALE :

Toutes les thématiques mentionnées dans cette section ne trouvent pas une réponse ou un traitement dans les travaux, publications ou documents normatifs retenus dans le cadre de la recherche bibliographique, et n'ont donc pas pu faire l'objet d'une analyse.

Cependant, ces éléments seront repris dans les conclusions et recommandations, afin qu'ils puissent être pris en compte dans les travaux futurs.

4 PRESENTATION ET ANALYSE QUALITATIVE DES METHODES EXISTANTES

Dans cette section, dans la mesure du possible, la présentation des équations a été uniformisée pour permettre une comparaison plus aisée. On ne retrouve donc pas forcément les notations d'origine.

En outre, sauf précision contraire la charge concentrée unitaire $F = 1$ kN.

4.1 Introduction

Les documents et méthodes issus de publications dans le cadre de travaux de recherche et retenus dans le cadre de la recherche bibliographique (cf. §2.2.2) permettent d'extraire des enseignements utiles quant à la compréhension ou la mise en perspective des critères proposés dans les documents normatifs.

Tout d'abord, on note que les critères vibratoires proposés dans le cadre des travaux de recherche ou implémentés dans les documents normatifs se répartissent selon l'une des familles suivantes :

- Critère statique
- Critère dynamique
- Critère couplé statique et dynamique

La plupart des travaux et la totalité des critères implémentés dans les documents normatifs portent sur les paramètres et vérifications suivant :

- Fréquence fondamentale
- Déformation instantanée sous charge unitaire

La vérification dynamique de vitesse de réponse impulsionnelle est apparue dans les travaux de S. Ohlsson [9] et a été implémentée dans l'EN 1995-1-1, formant ainsi un critère couplé statique et dynamique.

Certains travaux de recherche (notamment Y.H. Chui [14], I. Smith & Y.H. Chui [19]), ont abordé l'utilisation d'un critère basé sur l'accélération en racine de la moyenne des carrés a_{rms} , surtout pour les plages basses (4 à 8 Hz) de fréquence fondamentale.

Il est intéressant de noter que cette dernière approche est celle retenue dans les travaux récents de l'industrie de la construction métallique (JRC [28], RFCS [29]), notamment parce qu'elle permet de se référer aux niveaux d'accélération acceptables et aux classifications des normes ISO 2631 et ISO 10137.

Afin de mettre en perspective le critère actuel de l'EN 1995-1-1, il est intéressant de rappeler que l'équation de fréquence fondamentale est le résultat d'une simplification par S. Ohlsson de l'équation « complète » prenant en compte l'ensemble de paramètres de rigidité et les mode de fréquence dans les deux directions :

$$f_{m,n} = \frac{\pi}{2L^2 \sqrt{\rho}} \sqrt{D_x m^4 + 2D_{xy} m^2 n^2 \left(\frac{L}{B}\right)^2 + D_y n^4 \left(\frac{L}{B}\right)^4}$$

sous hypothèse que $D_{xy} \approx D_y$ permettant d'obtenir :

$$f_{1,n} = f_n = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D_x}{\rho L^4}} \sqrt{1 + \left[2n^2 \left(\frac{L}{B}\right)^2 + n^4 \left(\frac{L}{B}\right)^4 \right] \left(\frac{D_y}{D_x}\right)}$$

puis l'hypothèse $D_y/D_x \leq 0,01$ qui permet de négliger le terme sous racine carrée de droite :

$$f_{1,1} = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{D_x}{\rho L^4}}$$

On retrouvera dans certaines méthodes proposées des équations de fréquence fondamentale tenant compte des deux rigidités à l'allure similaire aux deux premières équations ci-dessus.

4.2 Annexes Nationales de l'EN 1995-1-1

Lors de la revue comparative de 15 Annexes Nationales de l'EN 1995-1-1, quatre d'entre elles ont été identifiées car proposant des éléments complémentaires remarquables viv-à-vis du critère vibratoire.

4.2.1 ANNEXE NATIONALE AUTRICHIENNE

L'AN Autrichienne ÖNORM B 1995-1-1 [3] présente un corpus très complet de compléments relatifs au calcul vibratoire, inspiré du commentaire de la norme DIN 1052 : 2004 (Allemagne – cf. §4.4.1.2)

Elle définit tout d'abord le cadre de validité de ses équations qui sont applicables aux planchers des bâtiments de catégorie d'usage A, B, C1, C3.1 et D selon ÖNORM B 1991-1-1 avec une masse surfacique $\geq 50 \text{ kg/m}^2$, et dès lors que l'ouvrage de plancher peut être classé selon la classification décrite au Tableau NA7.2 de l'AN et en respecte les critères constructifs.

Les planchers de masse inférieure et/ou à destination d'usage particulière (salles de sport, de danse, de gymnastique, laboratoires, ...) doivent faire l'objet d'une analyse spécifique non précisée.

Le Tableau NA7.2 définit 3 classes de plancher I, II et III selon la position du plancher (séparatif ou non, etc...) et avec des critères constructifs. Sans reprendre le détail (fastidieux) de cette classification, on en retiendra les éléments principaux suivants :

- Classe I :
 - plancher séparatifs de logements ou de bureaux ou salles de réunion
 - planchers à solives avec chape flottante humide et ajout de masse
 - planchers massifs (CLT, ...) avec chape flottante humide ou chape flottante sèche (et ajout de masse).
- Classe II :
 - plancher au sein du même logement, utilisation usuelle
 - planchers à solives avec chape flottante humide ou chape flottante sèche (et ajout de masse)
 - planchers massifs (CLT, ...) avec chape flottante humide ou chape flottante sèche (et ajout de masse).
- Classe III =
 - plancher sans exigence vis-à-vis de ce critère ou planchers sous locaux non habités

La rigidité de la chape peut être prise en compte par simple superposition sans effet composite avec la structure.

Les critères de vérification sont ensuite définis selon la Classe de l'ouvrage.

Vis-à-vis du calcul de fréquence fondamentale cette AN introduit :

- une limite qui dépend de la classe de l'ouvrage :
 - $f_{1,min} = 8 \text{ Hz}$ en Classe I ; 6 Hz en Classe II ; aucune limite en Classe III (puisque pas d'exigences)

- une définition quantitative de la distribution transversale :

on considère qu'il y a distribution transversale lorsque : $\frac{(EI)_B}{(EI)_L} \geq 0,05$

- une équation de calcul de la fréquence fondamentale pour les cas de distribution transversale :

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{L}{B}\right)^4 \cdot \frac{(EI)_B}{(EI)_L}}$$

Pour les planchers ne satisfaisant pas à la condition de distribution transversale l'équation de l'EN 1995-1-1 s'applique

- un coefficient multiplicateur de la fréquence $k_{e,1}$ prenant en compte le degré de liberté en rotation des appuis :

$k_{e,1} = 1,00$ (rotule – rotule) ; 1.562 (1 encastrement) ; 2.268 (2 encastres) ; $0,356$ (porte-à-faux)

- un coefficient multiplicateur de la fréquence $k_{e,2}$ prenant en compte la dissymétrie de portées adjacentes dans le cas de poutres sur 3 appuis :

$k_{e,2} =$ variant de $1,00$ pour $L_{min}/L_{max} = 1,0$ (symétrie) à $1,474$ pour $L_{min}/L_{max} = 0,1$

- une vérification complémentaire de l'accélération a_{rms} lorsque la fréquence fondamentale f_1 est inférieure à la limite $f_{1,min}$ mais reste supérieure à $4,5\text{Hz}$ (voir plus bas).

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Vis-à-vis du calcul de déformation sous charge unitaire cette AN introduit :

- une largeur contributive b_F (pouvant être élevée) déterminée comme suit :

$$w_{1kN} = \frac{F.L^3}{48.(EI)_L.b_F} \quad \text{où :} \quad b_F = \min \left\{ \frac{L}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_B}{(EI)_L}} \right.$$

- et fixe alors des limites assez strictes pour a , en fonction des classes de planchers déjà mentionnées plus haut ;
 $a = 0,25$ mm en Classe I ; $0,5$ mm en Classe II ; aucune limite en Classe III (puisque pas d'exigences)

Vis-à-vis du calcul de vitesse de réponse impulsionnelle cette AN précise des coefficients d'amortissement modal ζ pour diverses configurations de plancher :

- $\zeta = 1\%$ plancher léger sans chape flottante ou avec chape légère
- $\zeta = 2\%$ plancher avec chape flottante
- $\zeta = 2,5\%$ plancher CLT sans chape flottante ou avec chape légère
- $\zeta = 3\%$ plancher CLT ou massif cloué avec chape flottante
- $\zeta = 4\%$ plancher CLT avec chape flottante et ajout de masse

Enfin, cette AN définit la vérification complémentaire à réaliser lorsque $4,5 \text{ Hz} \leq f_1 < f_{1,min}$ sous la forme d'un critère portant sur l'accélération a_{rms} :

- la valeur limite dépend de la classe de l'ouvrage :

$$a_{rms} \leq 0,05 \text{ m/s}^2 \text{ en Classe I ; } 0,10 \text{ m/s}^2 \text{ en Classe II ; aucune limite en Classe III (puisque pas d'exigences)}$$

- l'accélération a_{rms} se calcule comme suit :

$$a_{rms} = \frac{0,4 \cdot \alpha \cdot F_0}{2 \cdot \zeta \cdot M^*}$$

où : $\alpha = e^{0,47 \cdot f_1}$ est le coefficient de Fournier de la fréquence fondamentale

F_0 est la force correspondant au poids d'une personne (habituellement $F_0 = 700 \text{ N}$)

M^* est la masse modale (kg) calculée comme suit :

$$M^* = \frac{m \cdot L \cdot s}{2} \quad \text{pour les plancher sans distribution transversale (avec } s \text{ l'entraxe des solives)}$$

$$M^* = \frac{m \cdot L \cdot B}{4} \quad \text{pour les plancher avec distribution transversale en vérifiant :}$$

$$B \leq 1,00 \cdot L \quad \text{lorsque } 0,05 \leq \frac{(EI)_B}{(EI)_L} < 0,20$$

$$B \leq 1,25 \cdot L \quad \text{lorsque } 0,20 \leq \frac{(EI)_B}{(EI)_L}$$

POINTS D'INTERET :

- LA DEFINITION DE CLASSES D'OUVRAGES ET D'EXIGENCES DIFFERENCIEES POUR CELLES-CI
- UNE DEFINITION QUANTITATIVE DE LA DISTRIBUTION TRANSVERSALE ET LA PRISE EN COMPTE DE CELLE-CI ET DE LA RIGIDITE TRANSVERSALE DANS LE CALCUL DE LA FREQUENCE FONDAMENTALE
- LA PRISE EN COMPTE DES DEGRES DE LIBERTES EN ROTATION AUX APPUIS ET DE L'ASYMETRIE DE POUTRES SUR 3 APPUIS DANS LE CALCUL DE LA FREQUENCE FONDAMENTALE
- LA PRISE EN COMPTE D'UNE LARGEUR CONTRIBUTIVE DANS LE CALCUL DE LA DEFORMATION SOUS CHARGE UNITAIRE
- LA DEFINITION DE VALEURS D'AMORTISSEMENT MODAL POUR DIFFERENTES TYPOLOGIES DE PLANCHER
- UNE METHODE DE VERIFICATION DE L'ACCELERATION a_{rms} POUR LES PLAGES DE FREQUENCE INFERIEURES A 6 OU 8HZ

LIMITE : LE SYSTEME EST CALIBRE SUR LES HABITUDES CONSTRUCTIVES : PLANCHERS LOURDS AVEC CHAPE FLOTTANTE

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

4.2.2 ANNEXE NATIONALE FINLANDAISE

4.2.2.1 Travaux de T. Toratti et A. Talja

Les travaux de T. Toratti et A. Talja [21] ont servi de point de départ aux dispositions de l'Annexe Nationale finlandaise de l'Eurocode 5 [4] et proposé une pré-classification en fonction de la fréquence et une classification des ouvrages selon le niveau de sensibilité souhaité.

Tout d'abord il est proposé de séparer les planchers selon que leur fréquence fondamentale est inférieure ou supérieure ou égale à 10 Hz. A cet effet une équation de fréquence fondamentale tenant compte de la rigidité transversale est proposée en complément de l'équation de l'EN 1995-1-1.

Ensuite une classification des ouvrages est proposée qui permettra de décliner les critères limites :

- Classe A : exigence très élevée au sein du même logement ; exigence normale entre logements contigus
- Classe B : exigence élevée au sein du même logement ; exigence basse entre logements contigus
- Classe C : exigence normale au sein du même logement – classe de référence
- Classe D : exigence basse au sein du même logement
- Classe E : aucune exigence

Enfin des critères limites sont proposés sur la base de cette classification pour différentes vérifications :

	Dynamic vibration values				Static deflection values	
	$f_{1,1} < 10$ Hz	$f_{1,1} > 10$ Hz			Floor plate or super-structure	
	$a_{w,rms}$ [m/s ²]	v_{max} [mm/s]	v_{rms} [mm/s]	u_{max} [mm]	δ [mm/kN]	δ_1 [mm/kN]
A	≤ 0.03	≤ 4	≤ 0.3	≤ 0.05	≤ 0.12	≤ 0.12
B	≤ 0.05	≤ 6	≤ 0.6	≤ 0.1	≤ 0.25	≤ 0.25
C	≤ 0.075	≤ 8	≤ 1.0	≤ 0.2	≤ 0.5	≤ 0.5
D	≤ 0.12	≤ 10	≤ 1.5	≤ 0.4	≤ 1.0	≤ 1.0
E	> 0.12	> 10	> 1.5	> 0.4	> 1.0	> 1.0

Note: $a_{w,rms}$ is the weighted r.m.s. acceleration, v_{max} is the peak velocity, v_{rms} is the r.m.s. velocity, u_{max} is the peak vertical displacement, δ is the global deflection, and δ_1 is the local deflection.

Tableau 2 – Critères différenciés selon classification des ouvrages – T. Toratti et A. Talja (2006)

Les limites a sont en outre modulées favorablement pour les planchers de petite dimension (dont la dimension la plus grande n'excède pas 6,00 m).

Cette classification n'a pas été reprise dans l'AN, et certains critères proposés ont été amendés.

4.2.2.2 Annexe Nationale

L'AN Finlandaise ANNEX 16 - SFS EN 1995-1-1 [4] précise que le critère vibratoire doit s'appliquer également aux bureaux, commerces, ou locaux de rassemblement du public (catégories d'usage A, B, C, D).

Vis-à-vis du calcul de fréquence fondamentale cette AN:

- fixe une limite plus sévère que celle de l'EN 1995-1-1 :
 $f_1 \geq 9$ Hz ; les planchers n'y satisfaisant pas devant faire l'objet d'une analyse spécifique
- considère que l'équation de l'EN 1995-1-1 s'applique au cas d'un plancher appuyé sur 2 côtés
- introduit une équation de calcul de la fréquence fondamentale pour d'un plancher appuyé sur 4 côtés qui tient compte de la rigidité transversale (on notera les similarités avec celle de l'AN Autrichienne) :

$$f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \cdot \sqrt{1 + \left[2 \cdot \left(\frac{L}{B}\right)^2 + \left(\frac{L}{B}\right)^4 \right] \cdot \frac{(EI)_B}{(EI)_L}}$$

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Vis-à-vis du calcul de déformation sous charge unitaire cette AN :

- introduit deux équations pour le calcul de la déformation sous charge unitaire prenant en compte de manière différenciée la largeur contributive :

$$w_{1kN} = \min \left\{ \frac{F.L^2}{42.(EI)_L.k_\delta} ; \frac{F.L^3}{48.(EI)_L.s} \right\} \quad \text{avec : } k_\delta = \min \left\{ B/L ; \sqrt[4]{\frac{(EI)_B}{(EI)_L}} \right\} \quad \text{et : } s \text{ l'entraxe des solives (m)}$$

on remarque que prend w_{1kN} en compte le rapport de rigidité dans les deux directions et la capacité de distribution transversale, sans cependant dépasser l'équivalent d'une solive par mètre.

note : la restriction $k_\delta \leq B/L$ ne s'applique pas aux plancher appuyés sur 2 côtés seulement.

- définit une valeur stricte de a , qui varie (augmente) pour les planchers de petite dimension (dont la dimension la plus grande n'excède pas 6,00 m) :

$$a = 0,5 \text{ mm/kN pour } L \geq 6,0\text{m} \quad \text{et : } a = k \cdot 0,5 \text{ mm/kN pour } L \leq 6,0\text{m}$$

où k se lit de la ci-dessous en fonction de la plus grande dimension du plancher

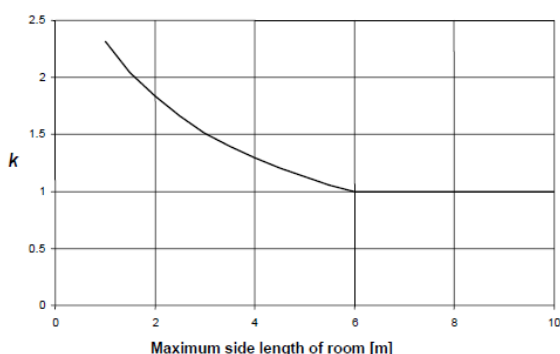


Fig. 2 – SFS EN 1995-1-1 (AN Finlandaise) – Coefficient k de la limite a en fonction de la dimension du plancher

Cette AN n'apporte aucun complément vis-à-vis du calcul de vitesse de réponse impulsionnelle.

POINTS D'INTERET :

- LA PRISE EN COMPTE DE LA RIGIDITE TRANSVERSALE DANS LE CALCUL DE LA FREQUENCE FONDAMENTALE ET LA DIFFERENTIATION DES PLANCHERS APPUYES SUR 2 OU 4 COTES
- LA PRISE EN COMPTE D'UNE LARGEUR CONTRIBUTIVE DANS LE CALCUL DE LA DEFORMATION SOUS CHARGE UNITAIRE

LIMITE : LES CRITERES LIMITES, PRINCIPALEMENT POUR LA DEFORMATION, SONT TRES SEVERES

4.2.3 ANNEXE NATIONALE SUISSE

L'AN Suisse SN EN 1995-1-1 [5] apporte quelques compléments au critère vibratoire, notamment une interaction entre l'amortissement modal et le critère statique.

Cette AN n'apporte aucun complément vis-à-vis du calcul de la fréquence fondamentale.

Vis-à-vis du calcul de déformation sous charge unitaire cette AN introduit:

- une différenciation des limites a en fonction de la configuration du plancher (sur 2 ou 3 appuis)

$$\text{pour une solive/un plancher sur 2 appuis : } a = r_1 \cdot 1,0 \quad \text{mm/kN}$$

$$\text{pour une solive/un plancher sur 3 appuis : } a = r_1 \cdot r_2 \cdot 1,4 \quad \text{mm/kN}$$

- une modulation des limites a en fonction du coefficient d'amortissement modal ζ .

$$r_1 = 1,0 \text{ pour } \zeta = 1\% ; r_1 = 1,15 \text{ pour } \zeta = 2\% ; r_1 = 1,25 \text{ pour } \zeta = 3\%$$

$$r_2 = \frac{1}{3 \cdot \left(\frac{L_2}{L_1}\right)^2 + \frac{L_2}{L_1}} \quad (\text{où : } L_1 \geq L_2) \quad ; r_2 = 1,0 \text{ si pas d'exigence}$$

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Vis-à-vis du calcul de la vitesse de réponse impulsionnelle cette AN :

- précise des coefficients d'amortissement modal ζ pour diverses configurations de plancher :
 - $\zeta = 1\%$ plancher léger sans chape flottante
 - $\zeta = 2\%$ plancher massif avec chape flottante
 - $\zeta = 3\%$ plancher à solives avec chape flottante
- modifie la limite de vitesse de réponse impulsionnelle en divisant celle de l'EN 1995-1-1 par 3 :

$$v \leq \frac{1}{3} \cdot b(f_1 \cdot \zeta^{-1})$$

POINTS D'INTERET :

- L'INTERACTION ENTRE LE CRITERE STATIQUE ET L'AMORTISSEMENT MODAL DES DIFFERENTES CONFIGURATIONS DE PLANCHER, TENANT EGALEMENT COMPTE DU NOMBRE DE PORTEES
- LA DEFINITION DE VALEURS D'AMORTISSEMENT MODAL POUR DIFFERENTES TYPOLOGIES DE PLANCHER

LIMITE : LA MODIFICATION DE LA VITESSE DE REPOSE IMPULSIONNELLE N'EST PAS EXPLIICITEE

4.2.4 ANNEXE NATIONALE DU ROYAUME-UNI

On présente dans un premier temps le contenu de l'Annexe Nationale du Royaume-Uni dans son état de publication actuel, avant d'indiquer les éléments d'évolution du critère vibratoire de l'Annexe Nationale anglaise de l'Eurocode 5 validées par les fabricants de poutres en I et poutres ajourées au Royaume-Uni en vue de la révision de ladite AN, mais non implémentée.

4.2.4.1 Annexe Nationale

L'Annexe Nationale BS EN 1995-1-1/NA du Royaume-Uni [2] apporte une réponse assez complète à l'application du critère vibratoire pour ses planchers résidentiels, réalisés majoritairement en EWP (poutres en I ou ajourées).

Vis-à-vis du calcul de la fréquence fondamentale cette AN introduit :

- une équation de calcul de la fréquence fondamentale pour les éléments porteurs (porteurs de chevêtre ou porteurs principaux) sous chargement uniforme et succession de charges concentrées :

$$f_1 = \frac{50 \cdot \pi}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_{joist}}{w_t \cdot s_j + \sum (2 \cdot P_i / L) \cdot \sin^2(\pi \cdot a_i / L)}}$$

où : P_i est la $i^{\text{ème}}$ charge concentrée à une distance a_i de l'appui le plus proche

s_j est la bande de charge uniformément répartie

et : $w_t = \max\{w; 0,75\}$ avec : w = poids propre du plancher sans cloisons

Vis-à-vis du calcul de déformation sous charge unitaire cette AN introduit :

- une équation pour le calcul de la déformation unitaire qui prend en compte un nombre de solives contributives, la déformation à l'effort tranchant (qui est non négligeable pour les poutres en I et ajourées) et une portée de calcul équivalente lorsque la solive est sur 2 ou 3 appuis ou plus:

$$w_{1kN} = \frac{1000 \cdot k_{dist} \cdot k_{amp} \cdot L_{eq}^3}{48 \cdot (EI)_{joist}}$$

avec :

$k_{dist} = \min \left\{ \begin{array}{l} 0,30 \\ k_{strut} \cdot \left[0,38 - 0,08 \cdot \ln \left(\frac{14 \cdot (EI)_B}{s^4} \right) \right] \end{array} \right.$ où : $k_{strut} = 0,97$ pour des solives rectangulaires entretoisées

$k_{amp} = 1,05$ (section rectangulaire) ; 1,20 (poutres en I) ; 1,30 (poutres ajourées)
prend en compte de la déformation due à l'effort tranchant

$L_{eq} = 1,0 \cdot L$ (portée simple) ; $0,875 \cdot L$ (portée d'extrémité de solive continue) ; $0,8 \cdot L$ (portée centrale de solive continue)

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

- une modulation de la limite a en fonction la portée avec une limite de plus en plus stricte au fur et à mesure que la portée augmente :

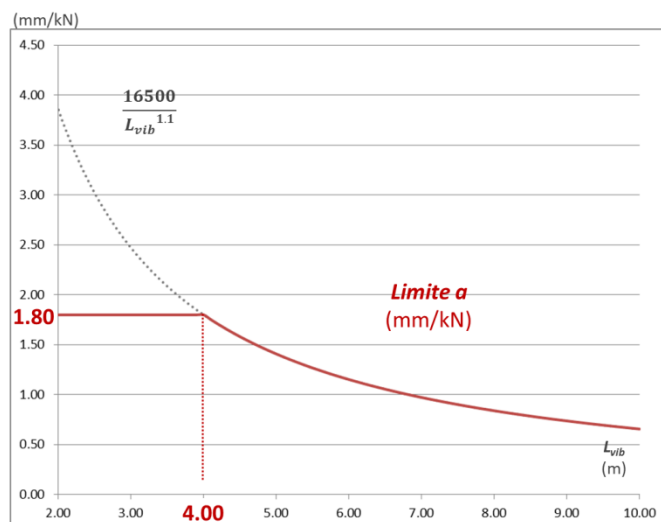


Fig. 3 – BS EN 1995-1-1/NA (AN UK) – Evolution de la limite a en fonction de la portée

- la prise en compte par simple superposition de la rigidité du panneau support de plancher, du plafond (s'il est directement fixé) et d'éventuels dispositifs transversaux par le coefficient (fourrures, entretoises).

Vis-à-vis du calcul de la vitesse de réponse impulsionnelle cette AN :

- fixe le coefficient d'amortissement modal $\zeta = 2\%$

On note en outre que cette AN permet la prise en compte de l'effet composite uniquement pour les cas de panneaux supports de plancher collés sous condition de dimensionnement selon le §9.1.2 de l'EN 1995-1-1 et du respect des dispositions vis-à-vis des adhésifs au §3.6 et de l'exécution au §10.3 de l'EN 1995-1-1.

POINTS D'INTERET :

- UNE EQUATION DE FREQUENCE FONDAMENTALE ADAPTEE A UN CHARGEMENT COMBINE (CHARGE UNIFORME ET CHARGES CONCENTREES) PARTICULIEREMENT ADAPTE P.EX. AUX PORTEURS DE CHEVETRES ET AUTRES PORTEURS PRINCIPAUX
- UN CRITERE STATIQUE PRENANT EN COMPTE LE NOMBRE DE SOLIVES CONTRIBUTIVES ET LA DEFORMATION A L'EFFORT TRANCHANT
- UNE LIMITE DE DEFORMATION SOUS CHARGE UNITAIRE QUI DEVIENT PLUS STRICTE LORSQUE LA PORTEE AUGMENTE

LIMITE : LA CALIBRATION A ETE FAITE SUR DES PLANCHERS SIMPLEMENT APPUYES SUR 2 COTES (TYPQUES DU MODE CONSTRUCTIF LOCAL)

4.2.4.2 Evolution proposées

Le document de travail de l'Engineered Wood Product Committee (EWPC) de la UKTFA [27] présente les évolutions et améliorations que les fabricants d'EWP, poutres en I et ajourées envisagent de proposer pour une mise à jour de l'AN :

- Il est proposé soit de calculer la déformation réelle par application de la résistance des matériaux en tenant compte de la déformation due à la flexion et à l'effort tranchant, soit de remplacer les valeurs de k_{amp} ci-dessus par :

$$k_{amp} = 1 + \left(\frac{12}{L^2}\right) \cdot \frac{EI_{joist}}{GA_{joist}}$$

- Les équations de fréquence fondamentale sont revues et proposées comme suit :

solives sur 2 appuis ou plus :

$$f_1 = \frac{50 \cdot \pi \cdot k_{ms}}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_{joist}}{(0,2+0,8 \cdot k_{amp}) \cdot (w_t \cdot s_j)}}$$

porteurs sur 2 appuis :

$$f_1 = \frac{50 \cdot \pi \cdot k_{ms}}{L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_{joist}}{(0,2+0,8 \cdot k_{amp}) \cdot (w_t \cdot s_j + \sum(2 \cdot P_i/L) \cdot \sin^2(\pi \cdot a_i/L))}}$$

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

porteurs sur 3 appuis ou plus : la fréquence est calculée avec l'expression ci-dessus (pour 2 appuis) pour chaque portée séparément, et la valeur la plus faible est retenue

avec k_{ms} un facteur de modification tenant compte du nombre de portées et de leurs rapports de longueur :

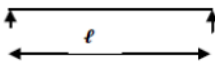


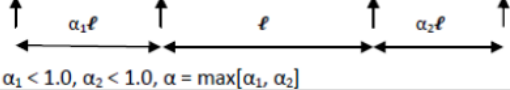
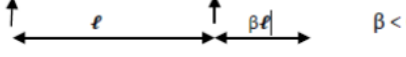
Joist type	Span arrangement	k_{ms}
Single span		1.0
Double span		$1.25 - 0.25\alpha$
Triple span whose largest span is an end span		$1.25 - 0.25\alpha$
Triple span whose largest span is a central span		$1.25 - 0.25\alpha$
Single span + Cantilever		1.0

Tableau 3 – UKTFA – EWPC – Facteur modificatif de la fréquence fondamentale k_{ms}

Note : l'introduction de k_{amp} dans les équations de fréquence fondamentale correspond à la prise en compte d'une rigidité de flexion apparente et non du module d'élasticité local seul.

POINTS D'INTERET :

- UNE PRISE EN COMPTE PLUS FINE DES CONFIGURATIONS DE PORTEES DES SOLIVES ET PORTEURS POUR LE CALCUL DE LA FREQUENCE FONDAMENTALE, TENANT COMPTE DE LA DEFORMATION A L'EFFORT TRANCHANT

LIMITE : CES MODIFICATIONS N'ONT PAS ETE SOUMISES AU VOTE POUR PUBLICATION

4.3 Critères vibratoires au Canada

Historiquement, le premier critère vibratoire effectivement implémenté dans une norme de calcul en construction bois l'a été au Canada. De nombreux travaux ont été réalisés pour faire évoluer ce critère dans le temps.

4.3.1 PREMIERE PROPOSITION DE FOSCHI ET GUPTA

Foschi et Gupta (1987) ont proposé le premier critère vibratoire pour une norme de calcul en construction bois au Canada, sous une forme assez sommaire :

$$\Delta L = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot EI} \leq 1 \text{ mm}$$

avec : $F = 1 \text{ kN}$ et : EI la rigidité de flexion de la poutre bois seule.

4.3.2 CRITERE VIBRATOIRE NBCC - PART 9

Le premier critère vibratoire a été effectivement implémenté dans le National Building Code of Canada 1990, sur la base des travaux de D.M. Onysko [11]. Il s'agissait d'un critère statique qui considérait déjà une évolution de la limite de déformation sous charge unitaire en fonction de la portée et était combiné à une vérification complémentaire de déformation instantanée sous charge d'exploitation uniformément répartie de 1.9 kN/m^2 :

$$w_{1kN} \leq \min \left\{ 2,0 \text{ mm} ; \frac{8}{L^{1.3}} \right\} \quad \text{et} \quad w_{Q,inst} \leq L/360$$

(on note que pour $L = 3,0 \text{ m}$, $\frac{8}{L^{1.3}} = 2,0 \text{ mm}$)

Ce critère ayant été considéré comme insuffisamment précis pour des portées longues, il a été amélioré en 2000 sur la base des propositions de D.M. Onysko et al [12] :

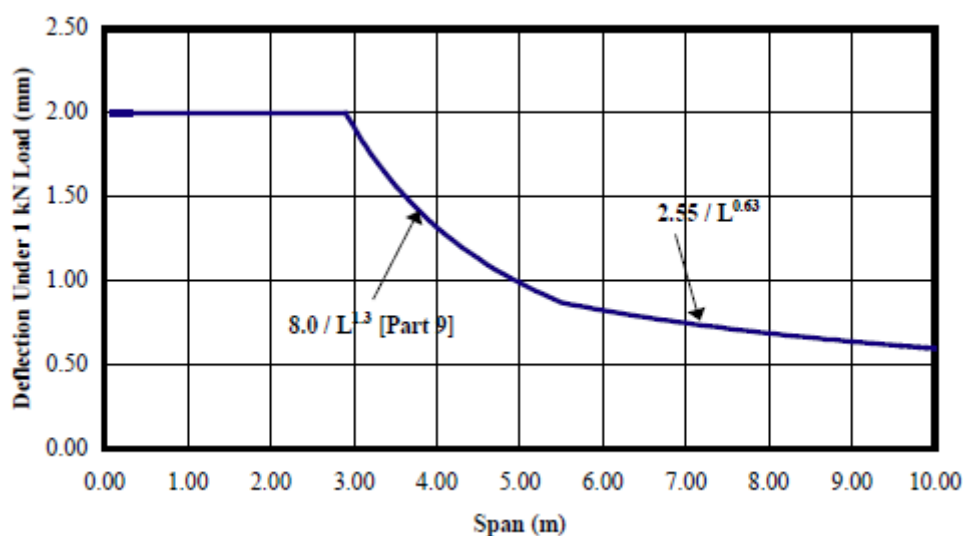


Fig. 4 – Critère vibratoire NBCC 2001 – D.M. Onysko et al – Evolution de la limite de déformation sous charge unitaire

La vérification reste couplée à une vérification complémentaire de déformation instantanée sous charge d'exploitation uniformément répartie de 1.9 kN/m^2 .

Ce critère est toujours encore en vigueur dans le NBCC 2015.

POINTS D'INTERET :

- UN CRITERE STATIQUE COMBINANT LA DEFORMATION SOUS CHARGE UNITAIRE ET LA DEFORMATION INSTANTANEE SOUS CHARGE UNIFORME D'EXPLOITATION
- UNE LIMITE DE DEFORMATION SOUS CHARGE UNITAIRE QUI DEVIENT PLUS STRICTE LORSQUE LA PORTEE AUGMENTE

LIMITE : PAS D'INTERACTION OU DE PRISE EN COMPTE DES ASPECTS DYNAMIQUES (P.EX. FREQUENCE)

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

4.3.3 PROPOSITION DE CRITERE COMBINE FREQUENCE ET DEFORMATION SOUS CHARGE UNITAIRE

Dans un souci d'augmenter la précision du critère vibratoire et de mieux couvrir un panel de configurations plus large, une série de travaux a été réalisée par Y. H. Chui [11], [12], L.J. Hu [13] [14], Y. H. Chui et L.H. Hu [15], [16] et I. Smith et Y.H. Chui [19].

Plusieurs critères ont été formés par combinaison de 2 à 3 paramètres choisis parmi : la fréquence fondamentale, la déformation sous charge unitaire, la masse, la portée, la vitesse de réponse impulsionnelle :

- (1a) Frequency [Hz] / (1 kN deflection [mm])^{0.39} ≥ 15.3;
- (1b) Frequency [Hz] / (1 kN deflection [mm])^{0.39} ≥ 16.2
- (2a) Frequency [Hz] × (mass/area [kg/m²])^{0.265} / (1 kN deflection [mm])^{0.219} ≥ 37.1;
- (2b) Frequency [Hz] × (mass/area [kg/m²])^{0.265} / (1 kN deflection [mm])^{0.219} ≥ 41.5;
- (3) Frequency [Hz] × (span [m])^{0.35} / (1 Ns impulse initial velocity [mm/s])^{0.21} ≥ 17.5;
- (4) Frequency [Hz] × (span [m])^{0.38} / (1 Ns impulse r.m.s. acc. [mm/s²])^{0.21} ≥ 10.3;
- (5) Frequency [Hz] × (span [m])^{0.49} / (1 Ns impulse peak-acc. [mm/s²])^{0.143} ≥ 10.7.

Ces critères ont été analysés et comparés (par régression) à une population importante d'essais sur planchers et d'évaluation de satisfaction.

Une équation adaptée de la fréquence fondamentale a été proposée à cet effet :

$$f_{1,1} = \frac{\pi}{2\sqrt{\rho}} \sqrt{D_x \left(\frac{1}{L}\right)^4 + 2D_{xy} \left(\frac{1}{LB}\right)^2 + D_y \left(\frac{1}{B}\right)^4}$$

La corrélation entre les divers critères et les résultats expérimentaux et de satisfaction était très bonne (entre 86% et 91%).

Pour des raisons de facilité de mise en application le choix de Y.H. Chui et J.L. Hu s'est porté sur le critère :

$$\frac{f_1}{(w_{1kN})^{0.44}} \geq 18.7$$

Le critère n'a pas été adopté à ce jour.

En outre, il est important de préciser que la régression a été calibrée avec un focus particulier sur les matériaux disponibles sur le marché Canadien, subordonnant son extension à d'autres pays à une calibration complémentaire éventuellement associée à une phase expérimentale.

L'intérêt de la méthode proposée réside d'une part dans la prise en compte des rigidités dans les diverses direction pour le calcul de la fréquence fondamentale, et l'interaction entre la fréquence fondamentale et la déformation sous charge unitaire, permettant de traiter les aspects dynamiques et statiques de manière combinée dans un critère unique.

POINTS D'INTERET :

- LA PRISE EN COMPTE DES RIGIDITES DANS LES DIVERSES DIRECTIONS POUR LE CALCUL DE LA FREQUENCE FONDAMENTALE
- L'INTERACTION ENTRE LA FREQUENCE FONDAMENTALE ET LA DEFORMATION SOUS CHARGE UNITAIRE, PERMETTANT DE TRAITER LES ASPECTS DYNAMIQUES ET STATIQUES DE MANIERE COMBINEE DANS UN CRITERE UNIQUE

LIMITE : UNE EQUATION CALIBREE SUR LES PLANCHERS ET MATERIAUX CANADIENS

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

4.3.4 METHODE DU CCMC UTILISEE PAR LES FABRICANTS DE POUTRES EN I ET AJOUREES

En partant du critère du NBCC – Part 9, le CCMC, avec l'appui des fabricants d'EWP, de poutres en I et ajourées nord-américains (dont plusieurs avaient réalisés des travaux propriétaires sur ce sujet), a développé et calibré une méthode plus complète pour calculer la portée limitée par le critère vibratoire (« vibration controlled span »).

On se reportera au document correspondant [8] pour les détails de la méthode. On présente ici les éléments particulièrement intéressants.

Le critère est basé sur la déformation instantanée sous charge unitaire. La méthode proposée est un processus itératif :

- on choisit une portée L_v pour l'itération
- on détermine le maximum entre 3 valeurs différentes de la portée limite (les constantes sont en N pour un calcul en système métrique) :

$$L_{v,i} = \max \begin{cases} 6,46 \cdot \left(\frac{EI_{eff}}{DF}\right)^{1/4.3} \\ 0,307 \cdot \left(\frac{EI_{eff}}{DF}\right)^{1/3} \\ 1,86 \cdot \left(\frac{EI_{eff}}{DF}\right)^{1/3.63} \end{cases}$$

- tant que la portée choisie initialement L_v et le maximum de ces trois valeurs limites $L_{v,i}$ ne sont pas suffisamment proche (dans un intervalle de ± 25 mm), on poursuit l'itération
- au final on compare la portée limite (« vibration controlled span ») ainsi déterminée avec la portée réelle de la solive considérée.

On comprend d'emblée que ces équations ont été calibrées, posant par là même le même type de problématique pour leur extension à d'autres pays que celle rencontrée dans la méthode proposée au §0.

Cette procédure peut être inversée pour permettre un calcul à partir de la portée réelle de la solive, comme cela est fait p.ex. dans l'EN 1995-1-1, sous la forme :

$$w_{1kN} = \frac{DF \cdot F \cdot L^3}{48 \cdot EI_{eff}}$$

avec :

EI_{eff} la rigidité de flexion efficace (voir plus bas) de la solive de plancher

DF un facteur de distribution (voir plus bas) selon le principe de nombre de solives contributives

La rigidité de flexion efficace EI_{eff} est déterminée en tenant compte de :

- l'effet composite entre la solive et les autres composants du plancher : panneau support de plancher, chape (si elle est présente), plafond en plaque de plâtre (si fixé directement aux solives = rails mais pas de suspentes) ;
- la déformation à l'effort tranchant (EI_{eff} est la rigidité de flexion apparente ou globale) qui est non négligeable dans le cas des poutres en I et ajourées ;
- l'éventuelle continuité de la solive sur 3 appuis (coefficient multiplicateur $K_{span} = 1,4$)

La prise en compte de l'effet composite utilise une approche similaire à la méthode dite « des gammas » (cf. Annexe B de l'EN 1995-1-1) en ce qu'elle considère une connexion imparfaite entre les éléments (coefficient de glissement S_1 et S_2), même lorsque le panneau support de plancher est collé. Elle prend également en compte le caractère disjoint de ces éléments sous la forme d'un entraxe entre joints de panneau (de plaque de plâtre) perpendiculaire aux solives (longueurs L_1 et L_2).

Les propriétés des panneaux de plancher, des plaques de plâtre, de la chape ciment ainsi que les coefficients de glissement S_1 et S_2 et les longueurs L_1 et L_2 ont là aussi été calibrées spécifiquement pour cette méthode.

Le facteur de distribution DF prend en compte l'ensemble des paramètres influençant la rigidité transversale et donc la capacité de redistribution de la charge concentrée (ou de contribution des solives voisines à celle dimensionnée).

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Il est déterminé comme suit :

$$DF = DF_b - DF_v$$

où : DF_b est le facteur de distribution des éléments transversaux en flexion :
panneau, chape, fourrures continues (traversantes ou sous la solive), plaques de plâtre

DF_v est le facteur de distribution des éléments transversaux en cisaillement :
entretoises pleines (hauteur égale à celle de la solive), croisillons

DF_b est déterminé comme suit :

$$DF_b = 0,0294 + 0,536 \cdot K_1^{1/4} + 0,516 \cdot K_1^{1/2} - 0,31 \cdot K_1^{3/4}$$

avec : $K_1 = \frac{K_j}{K_j + \sum K_{bi}}$

où : $K_j = \frac{EI_{eff}}{L^3}$ est la constante de rigidité de la solive

et : K_b est la constante de rigidité des autres éléments en flexion

$$K_b = \frac{0,585 \cdot EI_b \cdot L}{s^3} \quad \text{pour les éléments surfaciques (panneau, plaque de plâtre, chape)}$$

$$K_b = \frac{E_{0,05} \cdot I_x}{s^3} \cdot \left(\frac{2 \cdot a}{L}\right)^{1,71} \quad \text{pour les éléments disjoints (fourrures), avec a = distance à l'appui le plus proche}$$

DF_v est déterminé comme suit :

$$DF_v = -0,00253 - 0,0854 \cdot K_1^{1/4} + 0,0797 \cdot K_2^{1/2} - 0,0327 \cdot K_2^{3/4}$$

avec : $K_2 = \frac{\sum K_{vi}}{\sum K_{bi}}$

et : K_v est la constante de rigidité des éléments en cisaillement

$$K_b = \frac{G \cdot A}{s} \cdot \left(\frac{2 \cdot a}{L}\right)^{1,71} \quad \text{pour les entretoises ou croisillons, avec a = distance à l'appui le plus proche}$$

En l'absence d'entretoises ou croisillons $DF_v = 0$.

Là encore, il apparaît que ces équations ainsi que certains paramètres de calcul ont été calibrés spécifiquement.

Cette méthode avait la particularité de prendre en compte l'apport positif en termes de rigidité de la chape ciment. Il est important de noter que, suite à des réclamations sérielles de clients finaux, il a été décidé d'un commun accord par le CCMC et les fabricants d'EWP, de poutres en I et ajourées nord-américains de ne plus prendre en compte l'apport en rigidité de la chape ciment.

Enfin, il est intéressant de noter que le document du CCMC comporte des recommandations de mise en œuvre des panneaux (collage et clouage) et des fourrures transversales, permettant de cadrer les conditions à respecter pour que ces éléments puissent réellement être pris en compte dans le calcul vibratoire.

POINTS D'INTERET :

- LA PRISE EN COMPTE D'UNE RIGIDITE DE FLEXION EFFICACE APPARENTE QUI COUVRE L'EFFET COMPOSITE AVEC TOUS LES COMPOSANTS DU PLANCHER (PANNEAU, PLAFOND)
- LA PRISE EN COMPTE DE LA CAPACITE DE REDISTRIBUTION (CONTRIBUTION) TRANSVERSALE AUSSI BIEN PAR LE BIAS DES ELEMENTS SURFACIQUES (PANNEAU, PLAFOND) QUE DES ELEMENTS DISJOINTS (FOURRURES, ENTRETOISES)
- UNE METHODE COMPLETE QUI PREND EN COMPTE L'ENSEMBLES DES ELEMENTS CONSTRUCTIFS

LIMITE : DES EQUATIONS, PARAMETRES ET PROPRIETES DES MATERIAUX CALIBRES SUR LES PLANCHERS ET MATERIAUX CANADIENS

4.4 Autres critères ou méthodes proposés

4.4.1 APPROCHES DU COMMENTAIRE DE LA DIN 1052 : 2004

4.4.1.1 Critère de la DIN 1052 : 2004

La norme DIN 1052 : 2004 (Allemagne) [6], ancienne norme aux états limites, proche de l'Eurocode 5, proposait pour les planchers résidentiels un critère statique simple adapté de la méthode de l'EN 1995-1-1 sous forme de limite de la déformation instantanée sous charge uniformément répartie tenant compte du poids propre et de la fraction quasi-permanente de la charge d'exploitation :

$$w_{perm} = w_{G,inst} + \psi_2 \cdot w_{Q,inst} \leq 6 \text{ mm}$$

L'origine de ce critère est précisée dans le commentaire de cette norme, où il est démontré que dans le cas général d'un plancher bois résidentiel (avec charges conformes à la norme DIN 1055) en portée simple, $w_{perm} = 6 \text{ mm}$ correspond à une fréquence fondamentale de 7,2 Hz, suffisamment proche de la limite de 8 Hz de l'EN 1995-1-1 pour justifier d'utiliser ce critère jugé plus aisé à mettre en œuvre.

Il est important de noter que ce critère a dans cette norme un caractère incitatif, mais non obligatoire.

C'est dans le commentaire de la norme que se retrouvent les détails de l'approche envisagée par les rédacteurs de celle-ci.

4.4.1.2 Approches complémentaires du Commentaire de la DIN 1052 : 2004

Le commentaire introduit un coefficient de largeur contributive :

$$\alpha = \frac{B}{L} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_L}{(EI)_B}}$$

dont on note la similarité avec le coefficient b_F de l'AN Autrichienne.

Le commentaire apporte des précisions sur le calcul de w_{perm} :

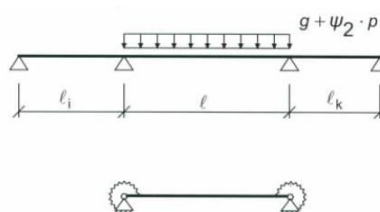
- d'une part dans le cas de poutres sur appuis multiples où il est proposé de calculer la déformation sur la portée fictive la plus longue en tenant compte de la rigidité rotationnelle aux appuis ;
- d'autre part pour tenir compte de la largeur contributive lorsque le calcul est réalisé à partir de la solive seule.

En combinant les deux principes, dans le cas d'une poutre sur 3 travées L_i , L et L_k , dont la portée centrale L est la plus longue on écrit :

$$w_{perm} = \beta \cdot \frac{5 \cdot q \cdot L^4}{384 \cdot EI_{joist}} \cdot \frac{1}{1 + 1/\alpha^4} \quad \text{avec : } q = g_k + \psi_2 \cdot q_k$$

et où le coefficient β est égal à 1 pour une portée simple et se lit dans le tableau suivant :

$\frac{k_k}{k_i}$	0	0,25	0,5	1,0	2,0	4,0	8,0	∞
0	1,000							
0,25	0,880	0,782						
0,5	0,800	0,715	0,657					
1,0	0,700	0,631	0,583	0,520				
2,0	0,600	0,544	0,506	0,455	0,400			
4,0	0,522	0,475	0,443	0,400	0,354	0,314		
8,0	0,474	0,431	0,400	0,363	0,322	0,286	0,262	
∞	0,415	0,399	0,352	0,316	0,280	0,250	0,229	0,200



en fonction des facteurs k_i et k_k : $k_i = \frac{K_i \cdot L}{3 \cdot (EI)_L}$ et : $k_k = \frac{K_k \cdot L}{3 \cdot (EI)_L}$

eux-mêmes déterminés en fonction des rigidités rotationnelles K_i et K_k :

$$K_i = \frac{3 \cdot EI_i}{L_i} \quad \text{et :} \quad K_k = \frac{3 \cdot EI_k}{L_k}$$

Dans l'esprit des rédacteurs de la norme DIN 1052 : 2004, une vérification spécifique peut être réalisée dans les cas où le critère $w_{perm} \leq 6 \text{ mm}$ n'est pas vérifié.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Il est alors tout d'abord proposé de vérifier le critère de l'EN 1995-1-1, avec une fréquence fondamentale calculée en tenant compte de la largeur contributive et, le cas échéant, de la dissymétrie des portées adjacentes (pour des travées multiples) :

$$f_1 = k_f \cdot \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \cdot \sqrt{1 + 1/\alpha^4}$$

où : k_f varie de 1,0 pour $L_{min}/L_{max} = 1,0$ (symétrie) à 1,42 pour $L_{min}/L_{max} = 0,1$

Cette équation est identique à celle de l'AN Autrichienne, ne différant que par les valeurs de k_f et $k_{e,2}$.

La vérification sous charge unitaire est également identique à celle de l'AN Autrichienne :

$$w_{1kN} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot (EI)_L \cdot b_F} \quad \text{où :} \quad b_F = \min \left\{ \frac{L}{1,1} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_B}{(EI)_L}} \right.$$

On note que le commentaire de la DIN 1052 : 2004 ne propose pas de valeur limite a .

La vitesse de réponse impulsionnelle est quant à elle proposée sous une forme adaptée, qui là encore tient compte d'éventuelles travées multiples asymétriques, avec un coefficient d'amortissement modal $\zeta = 1\%$:

$$v = \sqrt{\frac{40}{f_0}} \cdot \frac{2,4 \cdot \alpha}{m \cdot L \cdot B \cdot \gamma}$$

où : $f_0 = k_f \cdot \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} = f_1 / \sqrt{1 + 1/\alpha^4}$ et : le coefficient γ est lu dans le tableau ci-dessous :

l_1/l	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2	0,1	0
γ	2,00	1,40	1,15	1,05	1,00	0,969	0,951	0,934	0,927	0,918	0,912

Lorsque le rapport $\frac{(EI)_B}{(EI)_L}$ devient très petit (plancher à solive avec faible rigidité transversale), les termes en $1 + 1/\alpha^4$ tendent vers 1,0, et le commentaire présente des équations épurées de ces termes pour ces configurations. Dans ce cas, la formule approchée de vitesse de réponse impulsionnelle est adaptée et devient : $v = \frac{1}{m \cdot e \cdot \frac{L}{2} \cdot \gamma + 50}$ avec e l'entraxe des solives.

Dès lors qu'en portée simple, $w_{perm} = 6 \text{ mm}$ correspond à une fréquence fondamentale de 7,2 Hz, inférieure à la limite de 8 Hz de l'EN 1995-1-1, si $w_{perm} > 6 \text{ mm}$ alors $f_1 < 8 \text{ Hz}$. Ceci ne sera pas forcément le cas pour une poutre sur travées multiples.

Si l'ensemble du critère adapté de l'EN 1995-1-1 n'est pas vérifié, il est alors proposé de procéder à une étude spécifique s'articulant autour des deux vérifications suivantes :

- la vitesse de réponse à la sollicitation à la marche (impulsion de 55 Ns, $t = 0,05 \text{ s}$) :

on vérifie : $v \leq 6 \cdot b \cdot (f_1 \cdot \zeta^{-1})$

avec : $v = \frac{950 \cdot \alpha}{f_0 \cdot m \cdot L \cdot B \cdot \gamma}$ ou pour $\frac{(EI)_B}{(EI)_L}$ très petit : $v = \frac{55}{m \cdot e \cdot \frac{L}{2} \cdot \gamma + 50}$

l'accélération vis-à-vis de la résonance où on vérifie :

$$a = \frac{56}{m \cdot L \cdot B \cdot \gamma} \cdot \frac{1}{\zeta} < 0,1 \text{ m/s}^2$$

On note là aussi une similarité avec l'équation d'accélération de l'AN Autrichienne, qui semble cependant moins simplifiée et calibrée que les équations ci-dessus.

POINTS D'INTERET :

- UNE VERIFICATION DE VITESSE IMPULSIONNELLE ADAPTEE ET D'ACCELERATION (RESONANCE) POUR LES CAS OU LA FREQUENCE FONDAMENTALE EST INFERIEURE A 8 HZ.
- LA PRISE EN COMPTE DES RIGIDITES TRANSVERSALES ET DES CONFIGURATIONS DE TRAVEES MULTIPLES POUR TOUS LES CRITERES

LIMITE : DES EQUATIONS CALIBREES POUR ETRE SIMPLIFIEES

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

4.4.2 APPROCHE DE J.F. BOQUET DANS LE GUIDE DE JUSTIFICATION DES PLANCHERS RESIDENTIELS

Dans le guide de « Justification des planchers résidentiels » réalisé édité par le CSTB dans le cadre du plan Europe [26], J.F. Bocquet propose une méthode avancée de calcul de la souplesse du plancher et prise en compte des diverses rigidités transversales (entretoises, panneaux, etc.).

Le modèle proposé prend en compte les différentes couches formant le plancher telles que le panneau support de plancher, le revêtement de sol, mais aussi la chape ou encore le plancher sur lambourdes.

Indépendamment du calepinage des panneaux, le modèle s'appuie sur l'hypothèse d'un panneau multicouche isolé reposant sur 5 appuis (solives) au milieu du plancher.

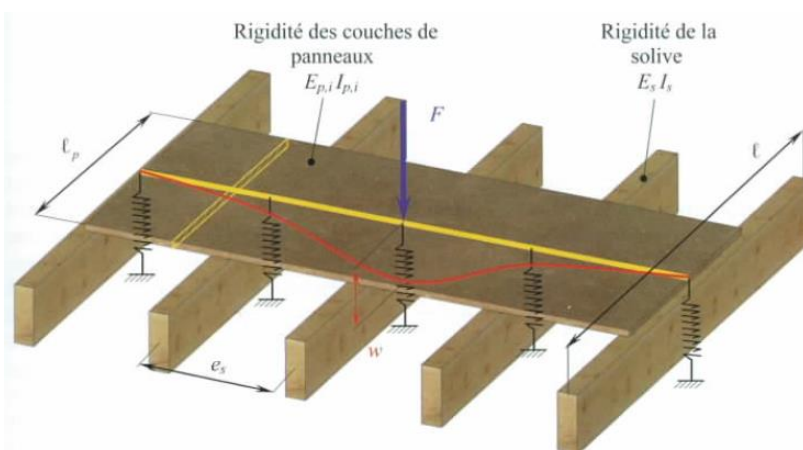


Fig. 5 – Modélisation de la souplesse du plancher – J.F. Boquet (crédit : CSTB)

Ce panneau s'apparente alors à une poutre sur des appuis discrets élastiques.

La souplesse du plancher (déformation sous charge unitaire) peut être approchée comme suit :

$$w_{1kN} = 10^3 \cdot k_s \cdot \frac{(36 \cdot k_s^2 + 108 \cdot k_s \cdot k_p + 7 \cdot k_p^2)}{(180 \cdot k_s^2 + 204 \cdot k_s \cdot k_p + 7 \cdot k_p^2)}$$

où : $k_s = \frac{L^3}{48 \cdot EI_{joist}}$ et $k_p = \frac{e_s^3}{\sum EI_{p,i}}$

où : $EI_{p,i}$ est la rigidité de la couche i , calculée avec la largeur de la couche l_i ; e_s est l'entraxe des solives

En considérant que $10^3 \cdot k_s = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot EI_{joist}}$, on note que cette équation peut être rapprochée (par exemple) de la forme de l'équation de l'AN du Royaume-Uni :

$$w_{1kN} = \frac{1000 \cdot k_{dist} \cdot L^3}{48 \cdot (EI)_{joist}}$$

avec :

$$k_{dist} = \frac{(36 \cdot k_s^2 + 108 \cdot k_s \cdot k_p + 7 \cdot k_p^2)}{(180 \cdot k_s^2 + 204 \cdot k_s \cdot k_p + 7 \cdot k_p^2)}$$

On reprendra dans ce qui suit cette notation, puisque le terme $10^3 \cdot k_s$ reste applicable dans toutes les configurations.

Le modèle est ensuite développé pour permettre la prise en compte de renfort de rigidité transversale tels que des entretoises, étrésoillons ou feuillard tendu :

$$k_{dist} = \frac{(36 \cdot k_s^2 + 108 \cdot k_s \cdot k_p + 7 \cdot k_p^2 + 7 \cdot k_s \cdot k_p^2 \cdot K_{ent} + 12 \cdot k_s^2 \cdot k_p \cdot K_{ent})}{(180 \cdot k_s^2 + 204 \cdot k_s \cdot k_p + 7 \cdot k_p^2 + 21 \cdot k_s \cdot k_p^2 \cdot K_{ent} + 60 \cdot k_s^2 \cdot k_p \cdot K_{ent})}$$

avec :

$$K_{ent} = 3,64 \cdot e^{(8,35 \cdot \beta_s)} \text{ pour les étrésoillons ou entretoises pleines ; } K_{ent} = 1,21 \cdot e^{(8,35 \cdot \beta_s)} \text{ pour les feuillards}$$

où : $\beta_s = h_s/e_s$ est l'élançement de l'entretoisement (h_s est la hauteur de la solive)

On note que cette équation devient identique à la précédente si en l'absence d'entretoisement on prend $K_{ent} = 0$.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

Lorsqu'un entretoisement (ou autre renfort de rigidité transversale) est prévu à mi-portée, le modèle propose également de vérifier la nécessité éventuelle de mettre en place des renforts transversaux additionnels, partant de l'observation qu'une position défavorable située autour des 2/3 de la mi-portée subsiste, et qu'il convient donc de limiter la souplesse w'_{1kN} en ce point également :

$$w'_{1kN} = \frac{10^3 \cdot L^3}{34992 \cdot EI_{joist}} \cdot \frac{(47 \cdot L^3 \cdot K_{ent_pl} + 27648 \cdot EI_{joist})}{(L^3 \cdot K_{ent_pl} + 48 \cdot EI_{joist})}$$

avec :

$$K_{ent_pl} = \frac{10^3}{w'_{1kN}} - \frac{48 \cdot EI_{joist}}{L^3}$$

Enfin, le modèle est complété par une proposition de calcul de la souplesse dans le cas d'un plancher avec chape flottante ou avec une rigidité transversale non négligeable. La résolution est celle proposée par L.J. Hu et Y.H. Chui [18] :

$$w_{1kN} = \frac{4 \cdot 10^3}{L \cdot B \cdot \pi^4} \cdot \sum_{m=1,3,5,\dots}^{17} \sum_{n=1,3,5,\dots}^{35} \frac{1}{\left(\frac{m}{L}\right)^4 \cdot D_x + 4 \cdot \left(\frac{m \cdot n}{L \cdot B}\right)^2 \cdot D_{xy} + 4 \cdot \left(\frac{n}{B}\right)^4 \cdot D_y}$$

On se référera au guide concerné [26] pour les détails de calcul des différents termes, dont la reprise ici est inutilement fastidieuse.

Les équations ci-dessus sont toutes définies sur la base d'une solive sur portée simple. Si les principes restent applicables à des configurations de travées multiples et certaines équations sont aisément transposables, d'autres sont moins triviales ou on été simplifiées de manière approchée, rendant leur exploitation directe plus compliquée.

POINTS D'INTERET :

- UNE METHODE DE DETERMINATION DE LA SOUPLESSE (DEFORMATION SOUS CHARGE CONCENTREE) QUI PREND EN COMPTE DE MANIERE FINE LA RIGIDITE DU PLANCHER DANS LES DEUX DIRECTIONS
- UNE PRISE EN COMPTE FINE DES DISPOSITIFS DE RENFORT DE RIGIDITE TRANSVERSALE
- UNE METHODE D'ESTIMATION DU BESOIN COMPLEMENTAIRE DE RENFORTS DE RIGIDITE TRANSVERSALE LORSQU'UN RENFORT EST DEJA PRESENT A MI-PORTEE

LIMITE : LA METHODE NE DETAILLE PAS LES CAS DE SOLIVES SUR APPUIS MULTIPLES

4.4.3 CRITERE DE FREQUENCE FONDAMENTALE SEULE DE DOLAN ET MURRAY

J.D. Dolan, T.M. Murray et al ont proposé un critère vibratoire basé uniquement sur la fréquence fondamentale [20] :

- $f_1 \geq 15 \text{ Hz}$ pour les planchers dits « non occupés » ;
- $f_1 \geq 14 \text{ Hz}$ pour les planchers dits « occupés » ;

la fréquence fondamentale étant calculée selon la formule de base de l'EN 1995-1-1.

Ce critère a été proposé suite à des essais en laboratoire et l'analyse de nombreux planchers in situ jugés acceptable, moyennement acceptable ou inacceptable. Le positionnement de ces limites assurait qu'aucun des planchers jugés inacceptables ne satisfasse à ce critère, mais excluait également 10 à 12 % de planchers jugés acceptables. Ce critère a ainsi été rejeté par l'industrie car jugé trop restrictif.

J.D. Dolan, T.M. Murray et al ont confirmé que la fréquence équivalente d'un système composé de poutres porteuses et de solivage perpendiculaires à ces poutres pouvait être estimée de manière satisfaisante au moyen de l'équation de Dunkerly :

$$\frac{1}{f_{1,fl oor}^2} = \frac{1}{f_{1,joist}^2} + \frac{1}{f_{1,beam}^2} \quad \text{qui peut s'écrire :} \quad f_{1,fl oor} = \sqrt{\frac{f_{1,joist}^2 \cdot f_{1,beam}^2}{f_{1,joist}^2 + f_{1,beam}^2}}$$

tout en plaçant la même exigence $f_{1,beam} \geq 15 \text{ Hz}$ sur les poutres porteuses, afin d'en garantir une rigidité minimale.

POINTS D'INTERET :

- UNE METHODE DE PRISE EN COMPTE DE LA RIGIDITE DES PORTEURS POUR LA VERIFICATION DES SOLIVES / DU PLANCHER

LIMITE : LE CRITERE UNIQUE DE FREQUENCE FONDAMENTALE EST TROP ABRUPT D'UN POINT DE VUE ECONOMIQUE

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

4.4.4 METHODE POUR LES PLANCHERS CLT DU CLT HANDBOOK

Dans le cadre des travaux réalisés par FP Innovations pour rédiger le CLT Handbook (guide complet de conception d'ouvrages en CLT), un critère vibratoire a été proposé.

Important : On présente ici sa version américaine (donc en unités impériales). Le principe utilisé au Canada est le même, moyennant un passage aux unités métriques et l'ajustement de certaines variables calibrées.

Le critère à vérifier est un critère combiné de déformation sous charge unitaire et de fréquence fondamentale :

$$\frac{f}{d^{0.7}} \geq 125.1 \quad \text{or} \quad d \leq \frac{f^{1.43}}{993.3}$$

où : $d = w_{1kN}$ et : $f = f_1$ sont calculés comme suit :

$$f = \frac{2.188}{2l^2} \sqrt{\frac{EI_{app}}{\rho A}}$$

et :

$$d = \frac{1728Pl^3}{48EI_{app}}$$

Ces équations utilisent la rigidité de flexion apparente du panneau CLT par unité de largeur de panneau (ici en pied « ft ») et la densité ρ du panneau.

Ces équations sont des versions simplifiées et calibrées d'équations plus complexes proposées notamment par Y.H. Chui [13] :

$$d = \frac{4000P}{ab\pi^4} \sum_{m=1,3,5..} \sum_{n=1,3,5..} \frac{1}{\left(\frac{m}{a}\right)^4 D_x + 4\left(\frac{mn}{ab}\right)^2 D_{xy} + \left(\frac{n}{b}\right)^4 D_y} \text{ in mm}$$

$$f = \frac{\pi}{2\sqrt{\rho}} \sqrt{D_x \left(\frac{1}{a}\right)^4 + 4D_{xy} \left(\frac{1}{ab}\right)^2 + D_y \left(\frac{1}{b}\right)^4} \text{ in Hz}$$

En substituant les équations de fréquence fondamentale et de déformation sous charge unitaire dans le critère initial, on obtient en lecture directe un critère permettant de déterminer la portée maximale satisfaisant au critère vibratoire (« vibration controlled span »), dans l'esprit des critères vibratoires Canadiens présentés au §4.3 :

$$l \leq \frac{1}{12.05} \frac{(EI_{app})^{0.293}}{(\rho A)^{0.122}}$$

POINTS D'INTERET :

- UNE METHODE COMBINANT FREQUENCE FONDAMENTALE ET DEFORMATION SOUS CHARGE UNITAIRE
- UNE EQUATION SIMPLIFIEE PERMETTANT DE DETERMINER DIRECTEMENT LA PORTEE LIMITE SATISFAISANT AU CRITERE VIBRATOIRE, SANS NECESSITER LE CALCUL PLUS COMPLEXE DES PARAMETRES INTERMEDIAIRES

LIMITE : DES EQUATIONS ET PARAMETRES CALIBRES, LE CAS ECHEANT SELON LE SYSTEME DE MESURE IMPERIAL

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

4.4.5 APPROCHE DE L'INDUSTRIE DE LA CONSTRUCTION METALLIQUE

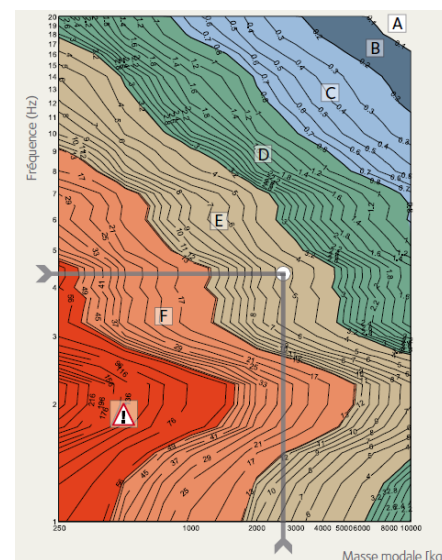
Le rapport technique du Joint Research Center de la Commission Européenne [28] et un guide de contrôle vibratoire des planchers en structure métalliques [29] (co-publié par plusieurs organismes dont le CTICM), présente une approche intéressante de classification des ouvrages et de vérification, développée pour possible inclusion dans la révision de l'Eurocode 3.

On présente ici les éléments clés de la méthode, et on se référera au guide [29] (ou sa version mise en forme par Arcelor Mittal) pour les (nombreux) détails, tableaux et abaques utilisés.

Cette méthode utilise comme paramètre d'évaluation final l'OS-RMS₉₀ : l'accélération « one step – root mean square », ou valeur efficace de la vitesse (verticale) sous l'effet de la marche d'une personne couvrant 90% des personnes marchant normalement (on peut parler de fractile à 90%) sous pas unique (one step).

La méthode se déroule selon les étapes suivantes :

- détermination des caractéristiques du plancher :
 - fréquence propre : le guide donne plusieurs équations et abaques couvrant les cas usuels
 - masse modale : le guide donne plusieurs équations et abaques couvrant les cas usuels
 - amortissement : obtenu par addition de l'amortissement (modal, en % de l'amortissement critique) de la structure, du mobilier et des finitions spécifiées dans un tableau issu des travaux support du rapport du JRC
- lecture de la valeur d'OS-RMS₉₀ : le guide fournit des abaques de lecture pour chaque amortissement de 1% à 9% en fonction de la masse modale et de la fréquence propre au format ci-contre.
- détermination de la classe d'acceptabilité A, B, C, D, E ou F par lecture des abaques précédents et comparaison à la classification des planchers et recommandations en fonction de leur utilisation suivante :



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										
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										

Legend:
■ Recommandé (vert)
■ Critique (orange)
■ Non recommandé (rouge)

POINTS D'INTERET :

- [UNE METHODE BASEE SUR L'ACCELERATION OS-RMS, POUR LAQUELLE LES NORMES ISO DONNENT DES NIVEAUX D'ACCEPTABILITE](#)
- [UNE CLASSIFICATION DES PLANCHER EN FONCTION DE LEUR UTILISATION ET DE LEUR CARACTERISTIQUES](#)
- [UN GUIDE COMPLET PERMETTANT UNE APPROCHE PAS A PAS](#)

LIMITE : LA RESOLUTION PAR LECTURE GRAPHIQUE D'ABAQUES

5 RECOMMANDATIONS

Suite aux travaux de recherche bibliographique, d'analyse qualitative et de comparaison « quantitative » (technico-économique), nous recommandons que les paramètres et/ou configurations suivants soient pris en compte dans la réalisation de travaux futurs dans le domaine du comportement vibratoire des planchers ayant pour objectif d'aider à définir un critère normatif.

- **Evaluation/quantification de l'accélération du plancher** et mise en relation (si possible) avec les autres paramètres statico-dynamiques (déformation/rigidité, fréquence,...). L'accélération et sa perception par l'homme est le paramètre qui ressort progressivement comme étant celui pris comme référence dans le cadre des premiers litiges en Europe sur les planchers insatisfaisant, par référence à l'ISO 10137 (et éventuellement ISO 2631-2).
- **Efficacité réelle des organes de rigidité transversale tels que les entretoises** (inconnue la plus élevée), les **fouitures**,... et comparaison à sa prise en compte théorique. Evaluation de leur influence sur la fréquence (non attendue) et sur la rigidité globale du plancher (élément clé).

La tentation est grande de prendre en compte un entretoisement pour son apport mécanique « pur », alors que sa contribution réelle dépend grandement de la qualité de sa connexion aux solives et au panneau de plancher.

- **Influence réelle des conditions d'appuis** : solive pseudo-encastree dans le cas d'un plancher plateforme, appuis sur connecteur, appui sur poutre intermédiaire (support non rigide). Dans le cas (fréquent) de l'appui sur poutre intermédiaire, *a minima* une approche par la fréquence combinée solive + poutre est à prendre en compte.
- **Intégration dans le modèle d'analyse de l'effet composite du panneau de plancher avec la solive sur la rigidité du système** : fixation clouée/vissée (applicabilité/calibration de la méthode des gammas à ce type de vérification) ; éventuellement collée/clouée.
- **Influence réelle de la chape (sèche ou humide)** formant a priori une plaque de redistribution et apportant une masse (aisée à prendre en compte dans un modèle de type fréquence), mais non liaisonnée mécaniquement à la structure porteuse du plancher (la prise en compte trop « optimiste » de chapes humides dans le critère canadien, évaluée à son pur apport mécanique et de masse a conduit à des plancher notoirement insatisfaisant bien que conformes au critère)
- **Influence et qualification des conditions de rives** : plancher appuyé sur deux ou quatre côtés ; comment définir des critères objectifs de comportement d'un appui de rive (parallèle aux solivage) qui permettent de classer un plancher dans l'une des deux catégories
- **Influence des éléments de second œuvre et du mobilier** : si l'apport de masse peut être pris en compte de manière satisfaisante dans les calculs (fréquence, déformation), la question de l'évaluation de son intensité (proportion de charge d'exploitation p.ex.) et de son apport réel en termes de perception ou de validité du modèle mérite d'être approfondie.
- **Comportement d'une structure triangulée en 3 dimensions (charpente industrielle)** et mise en relation avec les modèles « classiques » (fréquence, déformation) de critère vibratoire. L'information disponible est faible, et les travaux réalisés n'ont pas permis de développer un modèle suffisamment permettant une analyse statico-dynamique.

Il nous paraît pertinent de prévoir une approche combinée analyse éléments finis et mesure in situ sur un cas standard de charpente à comble habitable (entrait porteur) pour tenter de calibrer la prise en compte dans les modèle théoriques (de type fréquence et déformation) de l'apport des éléments d'anti-dévers et de contreventement, en plus du panneau de plancher et du comportement de la structure triangulée.

- **Influence des cloisons « légères »** : ce point n'est pas traité, et est complexe tout en étant à ce stade secondaire vis-à-vis de la nécessité de mieux évaluer les paramètres cités précédemment. Néanmoins, dans le cadre d'éventuels essais in situ, si la situation se présente, il apparaît pertinent de procéder à des mesures, tant sur des cloisons au-dessus du plancher (apport faible) que sous le plancher (apport pouvant être élevé selon leur fixation en sous face de la structure).
- **Influence d'un chevêtre de trémie** : ce point n'est pas traité/abordé, et est complexe tout en étant à ce stade secondaire vis-à-vis de la nécessité de mieux évaluer les paramètres cités précédemment. Néanmoins, dans le cadre d'éventuels essais in situ, si la situation se présente, il apparaît pertinent de procéder à des mesures en partie pleine et à proximité de la trémie.

NOTE DE CONFIDENTIALITE

Cette page contient des informations confidentielles couverte par le secret professionnel et que la Société C4Ci Sarl (immatriculée en France sous le No 507 494 607) considère sa propriété intellectuelle et industrielle. Ces informations sont la propriété seule et unique de la Société et aucune utilisation, reproduction ou distribution même partielle n'est autorisée ou permise sans l'accord exprès préalable par écrit d'un représentant dûment autorisé de C4Ci.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Norme EN 1995-1-1 : 2004 + A2 : 2014, «Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings,» CEN, Europe.
- [2] Annexe Nationale BS EN 1995-1-1 : 2012-11, «National Annex to BS EN 1995-1-1,» BSI, UK.
- [3] Annexe Nationale ÖNORM B 1995-1-1 : 2013-12, «Nationale Festlegungen, nationale Erläuterungen und nationale Ergänzungen zur ÖNORM EN 1995-1-1,» Austrian Standard Institute, Autriche.
- [4] Annexe Nationale SFS EN 1995-1-1, «ANNEX 16 - National Annex to standard SFS EN 1995-1-1,» SFS, Finlande.
- [5] Annexe Nationale SN EN 1995-1-1 : 2014, «Nationaler Anhang NA zu SN EN 1995-1-1:2004,» SIA, Suisse.
- [6] Norme DIN 1052 : 2004-08, «Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken - Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau,» DIN, Allemagne.
- [7] Norme NBCC 2015, «National Building Code of Canada 2015,» National Research Council, Canada.
- [8] CCMC, «CCMC Analytical procedure for calculation of deflection of floors under concentrated load and for meeting Part 9 requirements for vibration controlled spans,» Canadian Construction and Material Center, Canada.
- [9] S. Ohlsson, Floor vibration and human discomfort, Doctoral Thesis, UK: Chalmers University of Technology, Division of steel and timber Structure, 1982.
- [10] S. Ohlsson, Springiness and Human Induced Floor Vibrations: A Design Guide, Stockholm, Sweden: Spangbergs Tryckeri AB, 1988.
- [11] D. M. Onysko, «Performance criteria for residential floors based on consumer responses,» chez *Proceedings of the International Conference on Timber Engineering*, Seattle, WA, USA, 1988.
- [12] D. Onysko, L. Hu, E. Jones et B. Di Leonardo, «Serviceability design of residential wood framed floors in Canada,» chez *Proceedings of the 6th World Conference on Timber Engineering*, Whistler, BC, Canada, 2000.
- [13] Y. H. Chui, «Application of ribbed-plate theory of predict vibrational serviceability of timber floor systems,» chez *Proceedings of the 7th World Conference on Timber Engineering*, Shah Alam, Malaysia, 2002.
- [14] Y. H. Chui, Vibrational Performance of Wooden Floors in Domestic Dwellings [PhD Thesis], Brighton, UK: Brighton Polytechnic, 1987.
- [15] L. J. Hu, «Development of a performance criterion for controlling vibrations in wood-based floors,» chez *Proceedings of the 7th World Conference on Timber Engineering*, Shah Alam, Malaysia, 2002.
- [16] L. Hu, «Serviceability Design Criteria for Commercial and Multi-Family Floors,» Forintek Canada Corp., Canada, 2000.
- [17] Y. Chui et L. Hu, «A new design method to control vibrations induced by foot steps in timber floors,» chez *Proceedings of CIB-W18.*, Edinburgh, UK, 2004.
- [18] Y. Chui et L. Hu, «Development of a design method to control vibrations induced by normal walking action in wood-based floors,» chez *Proceedings of the 8th World Conference on Timber Engineering*, Lahti, Finland, 2004.
- [19] I. Smith et Y. Chui, «Design of lightweight floors to avoid human discomfort,» *Canadian Journal of Civil Engineering*, pp. 15, 254–262, 1988.
- [20] J. Dolan, T. Murray, J. Johnson, D. Runte et B. Shue, «Preventing annoying wood floor vibrations,» *ASCE Journal of Structural Engineering*, pp. 125(1), 19–24, 1999.
- [21] T. Toratti et A. Talja, «Classification of human induced floor vibrations,» *Journal of Building Acoustics*, pp. 13(3), 211–221, 2006.
- [22] J. Weckendorf, Dynamic response of structural timber flooring systems, Doctoral Thesis, Edimburgh, UK: Napier University, 2009.
- [23] S. Winter, P. Hamm et A. Richter, Schwingungsoptimierung von Holz- und Holz-Beton-Verbunddecken, Munich, Germany: TU Munich, 2009.
- [24] CLT Handbook, US Edition, USA: FP Innovations and Binational Softwoof Lumber Council, 2013.
- [25] B. Zhang, B. Rasmussen, A. Jorissen et A. Harte, Comfort assessment for sound and vibration, COST FP 0702, 2012.
- [26] J. Bocquet, Justification des planchers bois résidentiels - Etats limites de service vis-à-vis des critères de vibration de l'Eurocode, CSTB, 2009.
- [27] EWPC, UKTFA, I-joist manufacturers agreed approach to floor design, UK, 2015.
- [28] JRC, Design of floor structures for human induced vibrations (prepared under JRC-ECCS cooperation agreement to the evolution of Eurocode 3), European Commission – Joint Research Center, 2009.
- [29] Research Fund for Coal and Steel, Contrôle vibratoire des planchers (guide), HiVoSS (human induced vibration of steel structures, Aachen Universität RWTH, Arcelor Mittal, TNO, SCI, CTICM, Universidad de Porto, Schlaich Bergermann und Partner, 2007.