

FRANK KUPFERLE

Mob +33(0) 674 35 35 59

Email [frank.kupferle@c4ci.eu](mailto:frank.kupferle@c4ci.eu)

## ÉTUDE CRITERE DE SERVICE EC5

*Rapport final*

A l'initiative de :



Financé par :



CLIENT CODIFAB

DATE 10/03/2022

PROJET N° 1951

VERSION REV4

## 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.

### TABLE DES MATIERES

<b>1</b>	<b>CONTEXTE .....</b>	<b>6</b>
1.1	Contexte général .....	6
1.2	Contexte particulier aux critères de flèche.....	6
1.3	Contexte particulier au critère vibratoire.....	7
<b>2</b>	<b>CRITERE DE FLECHE – APPROPRIATION ET APPROCHE COMPAREE.....</b>	<b>8</b>
2.1	NF EN 1990 : 2003 (Eurocode 0) et son AN – Principes, combinaisons d’actions, définitions.....	8
2.1.1	PRINCIPES.....	8
2.1.2	COMBINAISONS D’ACTION A L’ELS .....	9
2.1.3	FLECHES VERTICALES.....	9
2.1.4	FLECHES HORIZONTALES.....	10
2.2	prEN 1990 : 2020 (Projet final de révision de l’Eurocode 0) .....	10
2.2.1	PRINCIPES ET COMBINAISONS D’ACTION A L’ELS.....	10
2.2.2	FLECHES VERTICALES.....	10
2.2.3	FLECHES HORIZONTALES.....	11
2.3	NF EN 1995-1-1 : 2005 + A1 : 2008 + A2 : 2014 (Eurocode 5) et son AN .....	11
2.3.1	PRINCIPES ET COMBINAISON D’ACTION A L’ELS.....	11
2.3.2	FLECHES VERTICALES.....	12
2.3.3	FLECHES HORIZONTALES.....	14
2.4	prEN1995-1-1 : 2021 (Projet de révision de l’Eurocode 5).....	14
2.4.1	PRINCIPES.....	14
2.4.2	FLECHES VERTICALES.....	14
2.5	NF EN 1992-1-1 (Eurocode 2) et FD P18-717 (Guide d’application national) .....	15
2.5.1	PRINCIPES.....	15
2.5.2	FLECHE TOTALE.....	15
2.5.3	FLECHE NUISIBLE – FD P 18-717 (AOUT 2021).....	15
2.5.4	FLECHES HORIZONTALES.....	17
2.6	NF P19-205 : 2019 et CPT 3718_V2 : 2018 (Planchers à poutrelles préfabriquées) .....	17
2.6.1	CONTEXTE.....	17
2.6.2	PRINCIPES.....	17
2.6.3	FLECHE TOTALE.....	18
2.6.4	FLECHE ACTIVE (NF P19-205 : 2019 ET CPT 3718_V2 : 2018).....	18
2.7	NF EN 1993-1-1 (Eurocode 3) et son AN.....	20
2.7.1	PRINCIPES.....	20
2.7.2	FLECHES VERTICALES.....	20
2.7.3	FLECHES HORIZONTALES.....	20
<b>3</b>	<b>CRITERE DE FLECHE – ELEMENTS POUR LA COMPARAISON DES FLECHES ET DE LEUR LIMITE .....</b>	<b>21</b>
3.1	Principe et cadre de la comparaison .....	21
3.2	Flèches Eurocode comparées selon leur combinaison d’actions et limites équivalentes .....	21
3.3	Coefficient de fluage moyen .....	23
3.4	Flèches des Règles CB71 et Eurocode 5.....	23
3.5	Flèche nuisible .....	26
3.6	Flèche active.....	28
<b>4</b>	<b>CRITERE DE FLECHE – REVUE ETENDUE DES REFERENTIELS ET SYNTHESE .....</b>	<b>30</b>
4.1	Revue des Annexes Nationales de l’Eurocode 5 .....	30
4.1.1	PREAMBULE .....	30
4.1.2	RAPPEL DES LIMITES DE L’AN FRANÇAISE.....	30
4.1.3	FLECHES SUR LA BASE DE L’EUROCODE 5 .....	31
4.1.4	UTILISATION DIFFERENCIEE DES COMBINAISONS DE L’EUROCODE 0 POUR LES FLECHES EUROCODE 5.....	32
4.1.5	APPROCHE AVEC REDEFINITION DES FLECHES PROCHE DE L’EUROCODE 0.....	33

## 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.

4.1.6	APPROCHE SIMILAIRE A L'EUROCODE 2 (BETON ARME) ET FLECHE NUISIBLE.....	34
<b>4.2</b>	<b>Flèches des référentiels béton armé.....</b>	<b>35</b>
4.2.1	FLECHE TOTALE SOUS COMBINAISON QUASI-PERMANENTE.....	35
4.2.2	FLECHE NUISIBLE (FD P 18-717).....	35
4.2.3	FLECHE ACTIVE (NF P19-205 ET CPT 3718_V2).....	36
<b>4.3</b>	<b>Revue des principaux NF DTU.....</b>	<b>38</b>
4.3.1	CONSTRUCTION BOIS.....	38
4.3.2	CLOISONS, PLAFONDS ET DOUBLAGES.....	39
4.3.3	COUVERTURE.....	39
4.3.4	ÉTANCHEITE.....	40
4.3.5	FACADE – BARDAGES.....	40
4.3.6	CHAPES A BASE DE LIANTS HYDRAULIQUES.....	41
4.3.7	RETELEMENTS DE SOLS.....	41
<b>4.4</b>	<b>Dispositions des ATec, DTA et Cahiers du CSTB (CPT).....</b>	<b>43</b>
4.4.1	CAHIER DU CSTB 3768 (POUTRES EN I).....	43
4.4.2	CAHIER DU CSTB 3802_P2 (PANNEAUX STRUCTURAUX MASSIFS BOIS).....	43
4.4.3	CAHIER DU CSTB 3814 (SUPPORT D'ÉTANCHEITE).....	44
4.4.4	CAHIER DU CSTB 3729 (ETICS SUR COB).....	44
4.4.5	ATEC ET DTA DE CHAPE SECHE.....	44
<b>4.5</b>	<b>Référentiels complémentaires.....</b>	<b>45</b>
4.5.1	DEFORMATIONS DES ELEMENTS DE MUR DANS LE PLAN.....	45
4.5.2	DEFORMATIONS DES ELEMENTS DE FOB.....	45
<b>5</b>	<b>CRITERE DE FLECHE – SYNTHESE.....</b>	<b>46</b>
<b>5.1</b>	<b>Enseignements relatifs aux définitions comparées des flèches.....</b>	<b>46</b>
5.1.1	FLECHE SPECIFIQUE AU 2 <sup>ND</sup> OEUVRE.....	46
5.1.2	PRISE EN COMPTE DE LA PART QUASI-PERMANENTE DES ACTIONS VARIABLES DANS LES REFERENTIELS BETON.....	47
5.1.3	ELEMENT DIT « FRAGILE ».....	47
<b>5.2</b>	<b>Enseignements de l'approche comparative.....</b>	<b>48</b>
5.2.1	FLECHES TOTALES.....	48
5.2.2	FLECHES SPECIFIQUES AU 2 <sup>ND</sup> OEUVRE.....	48
<b>5.3</b>	<b>Enseignements de la revue des référentiels.....</b>	<b>50</b>
5.3.1	CLOISONS.....	50
5.3.2	PLAFOND.....	50
5.3.3	COUVERTURE.....	51
5.3.4	ÉTANCHEITE.....	52
5.3.5	CHAPE A LIANTS HYDRAULIQUES.....	52
5.3.6	CHAPES SECHES.....	52
5.3.7	SOLS CERAMIQUES OU PIERRE NATURELLE.....	53
5.3.8	SOLS SOUPLES.....	53
5.3.9	SOLS A BASE DE BOIS.....	53
5.3.10	PLANCHERS.....	53
5.3.11	FLECHES HORIZONTALES.....	54
5.3.12	FAÇADES.....	54
<b>5.4</b>	<b>Sujets de considérations futures.....</b>	<b>54</b>
<b>5.5</b>	<b>Proposition de rationalisation.....</b>	<b>55</b>
<b>6</b>	<b>CRITERE VIBRATOIRE - APPROCHE DU DEVELOPPEMENT DE LA METHODE.....</b>	<b>57</b>
<b>6.1</b>	<b>Problématique.....</b>	<b>57</b>
<b>6.2</b>	<b>Excitation due à la marche.....</b>	<b>57</b>
<b>6.3</b>	<b>Acceptabilité.....</b>	<b>59</b>
6.3.1	PERCEPTION HUMAINE.....	59
6.3.2	SEUILS D'ACCEPTABILITE.....	59
<b>6.4</b>	<b>Autres paramètres étudiés et pris en compte.....</b>	<b>61</b>
6.4.1	DEFINITION DE LA MASSE EFFICACE.....	61
6.4.2	PLANCHERS SUR APPUIS RIGIDES OU NON-RIGIDES.....	61
6.4.3	PLANCHERS SUR APPUIS MULTIPLES.....	61

## 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.

6.4.4	CRITERE STATIQUE .....	61
6.5	Approche performancielle .....	61
7	CRITERE VIBRATOIRE - METHODE PROPOSEE.....	62
7.1	Principe général .....	62
7.2	Propriétés du plancher .....	63
7.2.1	PRINCIPAUX PARAMETRES DU PLANCHER .....	63
7.2.2	CALCUL DE LA MASSE EFFICACE.....	63
7.2.3	CALCUL DE LA MASSE MODALE.....	63
7.3	Fréquence fondamentale .....	64
7.4	Accélération.....	65
7.5	Vitesse .....	65
7.6	Déformation sous charge unitaire.....	66
7.6.1	CAS GENERAL .....	66
7.6.2	CAS DES PLANCHERS SUR APPUIS NON-RIGIDES.....	66
7.6.3	CAS DES PORTEES MULTIPLES.....	66
8	THEORIE DE LA VIBRATION.....	67
8.1	Systèmes continus ou discrets.....	67
8.1.1	SYSTEMES CONTINUS.....	67
8.1.2	SYSTEMES DISCRETS.....	67
8.2	Fréquence .....	68
8.2.1	CALCUL DE LA FREQUENCE PROPRE D'UN ELEMENT .....	68
8.2.2	CALCUL DE LA FREQUENCE PROPRE D'UN SYSTEME D'ELEMENTS.....	69
8.3	Modes propres et masse modale .....	71
8.3.1	FORMES DE MODES .....	71
8.3.2	SUPERPOSITION DES MODES .....	71
8.3.3	MASSE MODALE.....	71
8.4	Fonctions d'excitation.....	72
8.4.1	FONCTION D'EXCITATION CONTINUE .....	72
8.4.2	FORCE D'IMPULSION .....	72
8.5	Réponse .....	73
8.5.1	ACCELERATION.....	73
8.5.2	AMORTISSEMENT MODAL .....	73
8.5.3	ÉTAT TRANSITOIRE ET STATIONNAIRE.....	73
8.5.4	REPONSE RESONANTE ET NON-RESONANTE.....	74
8.6	Force d'excitation due à la marche .....	75

## 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.

### LITE DES FIGURES

Fig. 1 Définitions des flèches verticales – NF EN 1990 (Figure A1.1).....	9
Fig. 2 Définitions des déplacements horizontaux NF EN 1990 (Figure A1.2) .....	10
Fig. 3 Définitions des flèches – NF EN 1995-1-1 (Figure 7.1) et NF EN 1990 (Figure A1.1) .....	12
Fig. 4 Définition de la flèche $W_{tot2}$ – AN de la NF EN 1995-1-1 (Figure 1) .....	13
Fig. 5 Définition de la flèche $W_{tot2}$ précisée en différenciant G0 et G1 .....	13
Fig. 6 Définition de la flèche $W_{tot2}$ selon l'AN de la NF EN 1995-1-1 et le FD P18-717 .....	16
Fig. 7 Ecart entre la définition de la flèche $W_{tot2}$ selon l'AN de la NF EN 1995-1-1 et la NF P19-205.....	19
Fig. 8 Figure du NF DTU 53.12 (sols souples) illustrant les flèches à vérifier pour la structure et le panneau support .....	42
Fig. 9 Exemple de fonction d'excitation dynamique due à la marche avec $f_m = 2$ Hz.....	58
Fig. 10 Forme moyenne des 4 premières harmoniques de la marche exprimée avec le coefficient DLF .....	58
Fig. 11 Directions de l'oscillation vibratoire définies dans l'ISO 2631 .....	59
Fig. 12 Courbe de base de l'ISO 10137 (Fig. C1 – Annexe C) pour l'axe z.....	60
Fig. 13 Modèle de système discret à un seul degré de liberté .....	67
Fig. 14 Modélisation d'une solive appuyée sur une poutre d'un côté .....	69
Fig. 15 Modélisation d'une solive appuyée sur une poutre des deux côtés .....	69
Fig. 16 Déformation $\delta_s$ d'une solive appuyée d'un côté sur une poutre porteuse .....	70
Fig. 17 Rapport de l'aire parabolique de la déformée de la poutre à l'aire rectangulaire théorique.....	70
Fig. 18 Forme des 3 premiers modes propres d'une poutre sur deux appuis.....	71
Fig. 19 Principe de la masse modale d'un système unidimensionnel à degré de liberté unique .....	71
Fig. 20 Exemple de série de Fourier pour une activité d'aérobic légère .....	72
Fig. 21 Exemples d'enveloppe de réponse à une excitation régulière.....	73
Fig. 22 Exemple de réponse impulsionnelle .....	74
Fig. 23 Exemple de réponse en fonction de la fréquence d'excitation .....	74
Fig. 24 Exemple de facteur d'amplification dynamique de l'accélération .....	74
Fig. 25 Exemple de fonction d'excitation dynamique due à la marche avec $f_m = 2$ Hz .....	75
Fig. 26 Fonction approchée du coefficient de Fourier de la fonction d'excitation due à la marche.....	76
Fig. 27 Analyse des 3 premières harmoniques de la marche par ARUP.....	76
Fig. 28 Forme moyenne des 4 premières harmoniques de la marche exprimée avec le coefficient DLF .....	76
Fig. 29 Coefficients de Fourier et forme des 4 premières harmoniques.....	77

### Liste des Tableaux

Tableau 1 : Ratio de flèches instantanées et limites équivalentes selon la combinaison d'action Eurocode 0 utilisée .....	22
Tableau 2 : Ratio de flèches long terme et limites équivalentes selon la combinaison d'action Eurocode 0 utilisée .....	22
Tableau 3 : Coefficient de fluage équivalent.....	23
Tableau 4 : Ratio de flèches CB71 et Eurocode 5 et limites équivalentes.....	25
Tableau 5 : Subdivisions de charges permanentes analysées pour la flèche nuisible .....	27
Tableau 6 : Ratio de flèches $W_{tot,2}$ (nuisible) FD P18-717 et Eurocode 5 et limites équivalentes – Hypothèse 1 .....	27
Tableau 7 : Ratio de flèches $W_{tot,2}$ (nuisible) FD P18-717 et Eurocode 5 et limites équivalentes – Hypothèse 2.....	28
Tableau 8 : Ratio de flèches $W_{tot,2}$ (active) NF P19-205 et Eurocode 5 et limites équivalentes .....	29
Tableau 9 : Synthèse des limites de flèche équivalentes des flèches spécifiques de 2 <sup>nd</sup> oeuvre.....	49
Tableau 10 : Tableau synthétique des limites de flèches proposées – Bâtiments courants.....	55
Tableau 11 : Tableau synthétique des limites de flèches proposées – Bâtiments agricoles ou similaires.....	56
Tableau 12 Critères limites selon le niveau de performance visé.....	62
Tableau 13 Amortissement modal $\zeta$ pour les planchers bois courants.....	63
Tableau 14 Coefficients $K_n$ pour poutre de section uniforme.....	68
Tableau 15 Exemples de coefficients de Fourier $\alpha_h$ de la fonction d'excitation due à la marche .....	75

## 1 CONTEXTE

### 1.1 Contexte général

Le critère de service (flèches et critère vibratoire) est fréquemment un critère dimensionnant pour les structures bois dimensionnées à l'Eurocode 5. La multiplicité des vérifications de déformation (3 voire 4 calculs différents) et des référentiels fixant leurs limites (Annexe Nationale, DTUs, règles diverses, ...) augmente à la fois la complexité de ces vérifications et le risque d'erreur. Le critère vibratoire, notamment pour les basses fréquences (inférieures à 8Hz) qui entrent en jeu p. ex. dans les ouvrages de masse importante (CLT, mixte bois-béton, ...) est notoirement incomplet.

Le projet s'est articulé autour de deux axes :

- **Critères de flèche** : une analyse bibliographique sur les critères de flèches applicables en France et ailleurs en Europe, suivie d'une approche comparée d'un point de vue technique, dans le but d'extraire la matière permettant de rationaliser ces critères sur la base d'éléments factuels.
- **Critère vibratoire** : dans le prolongement de l'étude bibliographique réalisée préalablement, et en complément des travaux expérimentaux en cours dans d'autres projets, présenter une méthode applicable aux principaux types de planchers, sur laquelle pourront s'appuyer les concepteurs en attendant la nouvelle version de l'Eurocode 5.

**Le présent rapport final présente :**

- une proposition de rationalisation des vérifications relatives aux critères de flèche tenant compte des évolutions récentes d'un certain nombre de référentiels, avec un rappel de la méthode de calcul des diverses flèches et des critères particuliers à certaines parties d'ouvrage ;
- une proposition de méthode de vérification du critère vibratoire, ainsi que les éléments principaux de background qui y ont mené.

Ces travaux s'inscrivent étroitement dans les travaux de révision de l'Eurocode 0 et de l'Eurocode 5, le rédacteur du présent rapport étant par ailleurs membre actif des CEN TC250/SC5/WG3 (« cluster ») et /WG10 (« Basis of design ») et notamment du sous-groupe CEN TC250/SC5/WG3-SG4 « Vibration ».

En outre, ces travaux prennent en compte les évolutions d'un certain nombre de référentiels entre 2019 (date de début de l'étude) et début 2022.

### 1.2 Contexte particulier aux critères de flèche

On distingue dans la vérification des flèches les critères portant sur les déplacements verticaux et horizontaux.

Si la version actuelle de l'Eurocode 0 définit les bases de calcul des flèches, leur traduction dans les divers Eurocodes matériaux (béton, acier, bois) diffère, d'une part du fait de propriétés intrinsèques du matériau (par exemple par la nécessité ou non de prendre en compte le fluage), d'autre part du fait de pratiques préexistantes différentes dans le dimensionnement des ouvrages par les acteurs des différentes professions.

A ces différences s'ajoute le fait que la version actuelle de l'Eurocode 5 définit au §7.2 trois flèches ( $W_{inst}$ ,  $W_{fin}$ ,  $W_{net,fin}$ ), sans forcément faire expressément le lien avec les définitions de l'Eurocode 0, et permet en outre que les limites mais aussi le contenu exact des flèches puissent être déterminés nationalement. Il résulte de cet état de fait des disparités importantes dans la définition et les limites de flèches pour un même ouvrage bois dans les divers pays Européens.

A ce contexte Européen, vient en outre s'ajouter le contexte national des divers référentiels à même de définir des exigences ou limites de flèches pour les ouvrages : Annexes Nationales et documents d'application nationale des Eurocodes concernés, DTUs des ouvrages de 2<sup>nd</sup> œuvre, Avis Techniques et DTA ou encore CPT des Groupes Spécialisés de la CCFAT, ...

Enfin, les documents particuliers du marché (DPM) peuvent fixer des critères supplémentaires ou exigences particulières plus strictes en fonction de la nature de l'ouvrage considéré.

Il résulte de ce qui précède une certaine complexité à appréhender à la fois de manière sécuritaire et économique la vérification du critère de flèche et à comprendre les raisons des éventuelles disparités d'approche entre matériaux.

Si l'articulation des référentiels susnommés ne permet pas à un référentiel tiers (par exemple l'Annexe Nationale de l'Eurocode 5) de définir des critères différents (ou en tout cas plus libéraux) qui s'imposerait à eux, il semble cependant possible de proposer une rationalisation des critères et une définition (ainsi qu'un mode de calcul) de la flèche à vérifier.

C'est dans cet esprit qu'a été mené cette partie de l'étude.

### 1.3 Contexte particulier au critère vibratoire

Le critère vibratoire de la version en vigueur de l'Eurocode 5 est un critère couplé statique et dynamique, qui 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.s<sup>2</sup>)

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.

Ce critère pose un certain nombre de questions et d'inconnues, développées dans l'étude CODIFAB *Analyse comparative de divers Critères Vibratoires pour les Planchers Bois* (rapport du 17/10/2016).

Il est important de noter que les travaux de S. Ohlsson ayant mené à la proposition de ce critère ont porté principalement sur des planchers à solivage, appuyés sur 4 côtés, de portée n'excédant pas 4 à 5 m.

Plus particulièrement, le critère actuel ne permet pas de traiter correctement les planchers dont la fréquence fondamentale est inférieure à 8Hz, ce qui concerne les planchers les plus lourds comme par exemple les planchers massifs (CLT) ou les planchers mixtes bois-béton, et dans une moindre mesure les planchers à solivage « lourds » (p.ex. avec chape).

En outre, si le critère statique ( $w_{1kN}$ ) est particulièrement pratique dans son utilisation, il est toujours le fruit d'une forme de calibration par rapport à des mesures expérimentales, qui en limitent la portée et posent la question du positionnement d'une performance donnée par rapport à la perception que peuvent en avoir les êtres humains en moyenne.

La réflexion autour de l'évolution du critère vibratoire doit donc permettre de traiter correctement des divers types de plancher cités précédemment, tout en essayant de se rapprocher de référentiels permettant de définir des degrés d'acceptation des phénomènes vibratoires et de confronter le cas échéant l'approche de dimensionnement avec des mesures in situ.

## 2 CRITERE DE FLECHE – APPROPRIATION ET APPROCHE COMPAREE

### Dénominations et terminologies

- Les flèches verticales sont notées « W », les flèches horizontales sont notées « U », elles sont toutes deux accompagnées d'indices selon leur dénomination, leur nature ou l'action concernée :
  - La lettre « G » est utilisée pour les charges permanentes
  - La lettre « Q » est utilisée pour les actions variables et par simplification : « Q » représentera l'action variable principale et « Qi » l'ensemble des actions variables d'accompagnement
- L'indice « inst » correspond à la flèche instantanée et peut être suivi de l'indication de l'action concernée (G, Q, ...)
- L'indice « ∞ » correspond à la flèche due au fluage (appelée  $W_{creep}$  dans l'Eurocode 5)
- On introduit un coefficient de fluage (ou autre effet de long terme)  $\phi$  tel que la flèche finale s'écrive :
 
$$W_{fin} = W_{inst} + W_{\infty} = W_{inst} \cdot (1 + \phi)$$
- Pour la flèche nuisible ou active on considère un unique élément de 2<sup>nd</sup> œuvre donné (élément non structural dit « fragile » appelé ci-après « ENS » ou « ENS fragile ») qui par convention et simplification est considéré comme étant le premier ENS à être installé/liaisonné avec la structure primaire.
- Par simplification et afin de faciliter la lecture des formules et combinaisons :
  - l'indice « inst » et celui de l'action concernée ne sont pas combinés, de sorte que p.ex. «  $W_G$  » indique par convention la flèche instantanée sous charge permanente G
  - les combinaisons d'actions sont présentées sous forme de combinaison des flèches induites par ces actions, supposant l'applicabilité du principe de superposition
  - Les coefficients partiels de combinaison des actions variables ne sont volontairement pas déclinés selon leur indice « Qi » ; par exemple  $\psi_0$  (resp.  $\psi_{0,i}$ ) représente  $\psi_{0,Q}$  (resp.  $\psi_{0,Q,i}$ ) pour l'action variable Q (resp. Qi).

### 2.1 NF EN 1990 : 2003 (Eurocode 0) et son AN – Principes, combinaisons d'actions, définitions

#### 2.1.1 PRINCIPES

Conformément au §3.4 de la NF EN 1990, il convient de distinguer :

- Les déformations qui affectent ou peuvent engendrer des dommages susceptibles de nuire à la fonction de la structure ;
- Les déformations qui affectent ou peuvent engendrer des dommages susceptibles de nuire à l'aspect de l'ouvrage ;
- Les déformations qui peuvent des dommages susceptibles de nuire à la durabilité de l'ouvrage.

Ces dispositions sont complétées par l'Annexe Nationale française §A1.4.2, qui précise que les déformations (horizontales ou verticales) trop importantes peuvent compromettre :

- La durabilité de la structure et la conservation des hypothèses retenues pour son dimensionnement ;
- Le bon comportement des ouvrages de second œuvre auxquels des déformations sont imposées du fait même de leur liaison mécanique aux éléments structuraux ;
- Les performances attendues de l'ouvrage en matière d'aspect, de confort d'usage et de fonctionnement.

Les limites de flèches sont ainsi fixées en relation avec ces critères d'aptitude au service, et sont censés être indépendantes du matériau utilisé pour l'élément structural porteur (§A1.4.2(2)).

#### COMMENTAIRE :

*Les déformations affectant la durabilité et la fonction de la structure conduisent en général aux critères de flèche portant sur la flèche totale, instantanée ou à long terme.*

⇒ L'AN définit à cet effet les flèches limites  $U_{lim,1}$  et  $W_{lim,1}$  et renvoie pour ce faire aux Eurocodes 2 à 6 et 9.

*Les déformations affectant l'aspect ou le bon comportement des ouvrages de second œuvre conduisent à considérer la seule flèche « vue » par les éléments (usuellement de second œuvre) concernés, en tenant compte de l'historique de chargement, et à long terme. Ce principe est posé par le §A1.4.3(3) de l'Eurocode 0.*

⇒ L'AN définit à cet effet  $U_{lim,2}$  et  $W_{lim,2}$  sans faire de renvoi explicite à un autre référentiel.

*L'AN précise en outre la nécessité de vérifier les flèches aussi bien en situation d'exécution (phase provisoire, également appelée situation transitoire) qu'en situation d'exploitation (phase définitive, également appelée situation durable).*



## 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.

### 2.1.2 COMBINAISONS D'ACTION A L'ELS

Les combinaisons d'action à prendre en compte à l'ELS sont définies au §6.5 de la NF EN 1990 et sont rappelées ci-après :

Combinaison caractéristique :  $W_k = W_G + W_Q + \sum \psi_0 \cdot W_{Qi}$

Combinaison fréquente :  $W_{freq} = W_G + \psi_1 \cdot W_Q + \sum \psi_2 \cdot W_{Qi}$

Combinaison quasi-permanente :  $W_{qp} = W_G + \psi_2 \cdot W_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot W_{Qi}$

Il convient d'utiliser la combinaison quasi-permanente pour :

- les seules considérations d'aspect de la structure (§A1.4.3(4)) ; ou
- les déformations à long terme due au retrait, à la relaxation ou au fluage (§A1.4.3(6)).

L'AN renvoie par principe à l'utilisation de la combinaison caractéristique pour les vérifications de  $U_{lim,1}$ ,  $U_{lim,2}$ ,  $W_{lim,1}$  et  $W_{lim,2}$ .

#### COMMENTAIRE :

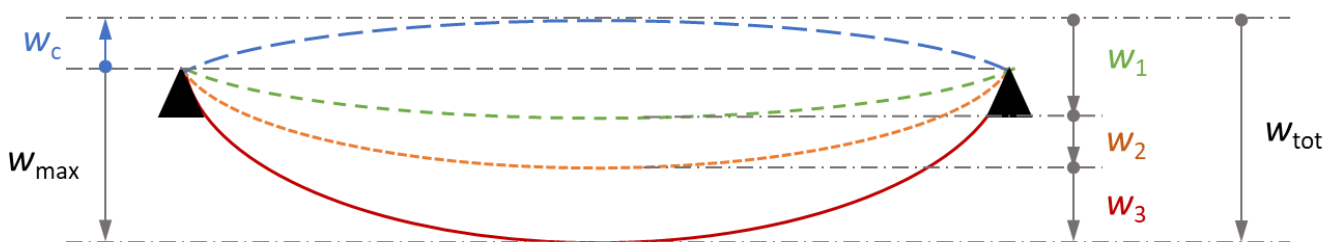
Pour les matériaux ou structures sujets au retrait, à la relaxation ou au fluage, il résulte de ce qui précède que la détermination de la flèche à long terme pour vérifier  $U_{lim,1}$ ,  $U_{lim,2}$ ,  $W_{lim,1}$  et  $W_{lim,2}$  nécessite de prendre en compte à la fois la flèche initiale sous l'effet de la combinaison caractéristique et l'amplification de flèche à long terme sous l'effet du phénomène de long terme concerné.

### 2.1.3 FLECHES VERTICALES

La flèche totale  $W_{tot}$  entre l'état initial (contrefléché ou non) et l'état final est décomposée de deux manières (illustrées en Fig. 1) :

- d'une part en distinguant la contreflèche éventuelle  $W_c$  et la flèche  $W_{max}$  par rapport à la ligne théorique reliant les appuis ;
- d'autre part en distinguant 3 fléchissements successifs  $W_1$ ,  $W_2$  et  $W_3$  liés aux étapes de développement de la flèche selon l'historique de chargement et de déformation :
  - $W_1$  : partie initiale de la flèche sous charges permanentes flèche instantanée (domaine élastique)
  - $W_2$  : partie à long terme de la flèche sous charges permanentes p.ex. flèche due au fluage
  - $W_3$  : partie additionnelle de la flèche due aux actions variables

Fig. 1 Définitions des flèches verticales – NF EN 1990 (Figure A1.1)



$$W_{tot} = W_{max} + W_c = W_1 + W_2 + W_3$$

#### COMMENTAIRE :

On note que les définitions de  $W_1$  et  $W_2$  mériteraient d'être avantageusement étendues pour inclure la part quasi-permanente des actions variables et permettre ainsi de manière adéquate de prendre en compte la déformation à long terme.

De même la définition de  $W_3$  mériterait d'être ajustée pour ne porter que sur la flèche initiale (instantanée) due à la part non quasi-permanente des actions variables.

Il apparaît dans plusieurs référentiels d'ouvrage béton, un amalgame terminologique qui semble considérer comme permanente la part quasi-permanente des actions variables, et ne considère comme « réellement » variable que leur part non quasi-permanente.

Ceci est sans conséquence pour la construction métallique, l'acier ne connaissant pas de flèche différée à long terme.

Cet amalgame et la prépondérance de la construction en béton armé (et métallique) dans la communauté d'ingénierie laisse ainsi à penser que ce même amalgame est présent dans la NF EN 1990 et explique les définitions de  $W_1$  et  $W_2$ .

Ceci semble être confirmé par la nouvelle rédaction retenue dans le prEN 1990 :2020 (cf. §2.2).

Ces définitions ajustées pourraient dès lors s'écrire (ici pour la combinaison caractéristique) :

## 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.

$$w_1 = w_G + \psi_2 \cdot w_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot w_{Qi}$$

$$w_2 = (w_G + \psi_2 \cdot w_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot w_{Qi}) \cdot \phi = w_1 \cdot \phi \quad \text{où } \phi \text{ est le coefficient de fluage (ou effet de long terme)}$$

$$w_3 = (1 - \psi_2) \cdot w_Q + \sum (\psi_{0,i} - \psi_{2,i}) \cdot w_{Qi}$$

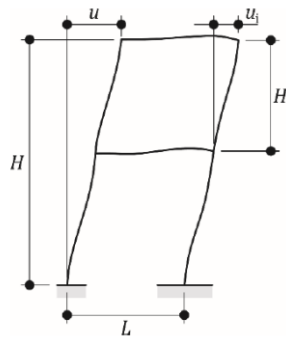
On notera que la somme des trois termes  $w_{tot} = w_1 + w_2 + w_3$  prend la forme connue dans l'Eurocode 5 si l'on prend  $\phi = k_{def}$  :

$$w_{tot} = w_1 + w_2 + w_3 = (1 + \phi) \cdot w_G + (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot w_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot w_{Qi}$$

### 2.1.4 FLECHES HORIZONTALES

Les flèches horizontales (plus souvent considérés comme étant des « déplacements ») suivent les mêmes principes, tenant compte néanmoins d'une possible déclinaison différente selon que la flèche est évaluée sur la hauteur  $H_i$  d'un étage « i » ou la hauteur  $H$  du bâtiment :

Fig. 2 Définitions des déplacements horizontaux NF EN 1990 (Figure A1.2)



## 2.2 prEN 1990 : 2020 (Projet final de révision de l'Eurocode 0)

(cette section est basée sur la version de Septembre 2020 soumise à l'enquête publique)

### 2.2.1 PRINCIPES ET COMBINAISONS D'ACTION A L'ELS

Le projet final de révision de l'Eurocode 0 ne présente pas d'évolution significative des principes décrits au §2.1.1.

Le projet final de révision de l'Eurocode 0 ne présente pas d'évolution significative des principes décrits au §2.1.2.

### 2.2.2 FLECHES VERTICALES

La définition des flèches  $w_1$ ,  $w_2$  et  $w_3$  a été modifiée et se rapproche des ajustements décrits dans le commentaire du §2.1.3, en conservant néanmoins une incertitude importante quant à la répartition des actions quasi-permanentes :

- $w_1$  : partie initiale de la flèche sous charges permanentes
- $w_2$  : partie à long terme de la flèche sous charges permanentes incluant les charges quasi-permanentes
- $w_3$  : partie additionnelle de la flèche due aux actions variables à l'exclusion des charges quasi-permanentes

#### COMMENTAIRE :

Pour ce qui est de  $w_1$  et  $w_2$ , l'incertitude (ou l'amalgame) subsiste quant à l'inclusion de la flèche initiale de la part quasi-permanente des actions variables comme charge « permanente » dans  $w_1$  (ce qui paraîtrait le plus cohérent à première vue) ou comme flèche agissant ultérieurement dans  $w_2$  (qui donnerait plus de sens au calcul de  $w_2 + w_3$ ). On retient donc les deux possibilités :

$$w_1 = w_G + \psi_2 \cdot w_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot w_{Qi} \quad \text{ou} \quad w_1 = w_G$$

$$w_2 = w_G \cdot \phi + (\psi_2 \cdot w_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot w_{Qi}) \cdot \phi \quad \text{ou} \quad w_2 = w_G \cdot \phi + (\psi_2 \cdot w_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot w_{Qi}) \cdot (1 + \phi)$$

Seule la définition de  $w_3$  est sans équivoque et on peut écrire :

$$w_3 = (1 - \psi_2) \cdot w_Q + \sum (\psi_{0,i} - \psi_{2,i}) \cdot w_{Qi}$$

## 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.

Le projet final de révision de l'Eurocode 0 introduit en outre nouvellement des suggestions de flèches verticales (Tableau A.1.10) maximales pour les ouvrages courants, qui restent cependant des paramètres déterminés nationalement.

Ces suggestions visent les flèches suivantes déterminées avec les combinaisons d'actions indiquées ci-après (on décline les flèches en combinaisons des flèches instantanées et non entièrement réduites pour faciliter leur comparaison) :

- Limite d'endommagement des éléments non structuraux :  $W_2 + W_3$  en combinaison caractéristique
  - ⇒ si  $W_1 = W_G$  : 
$$W_2 + W_3 = \phi \cdot W_G + (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi}$$
  - ⇒ si  $W_1 = W_G + \psi_2 \cdot W_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot W_{Qi}$  : 
$$W_2 + W_3 = \phi \cdot W_G + (1 + \psi_2 \cdot (\phi - 1)) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot (\phi - 1)) \cdot W_{Qi}$$
- Confort des utilisateurs :  $W_2 + W_3$  en combinaison fréquente
  - ⇒ si  $W_1 = W_G$  : 
$$W_2 + W_3 = \phi \cdot W_G + (\psi_1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{2,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi}$$
- Apparence :  $W_1 + W_2 - W_c$  en combinaison quasi-permanente
  - ⇒ que l'on peut écrire : 
$$W_1 + W_2 - W_c = (1 + \phi) \cdot W_G + (\psi_2 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{2,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi} - W_c$$

### COMMENTAIRE :

On note que la vérification de  $W_2 + W_3$  en combinaison caractéristique correspond dans l'esprit à la flèche  $W_{lim,2}$  de l'AN de l'Eurocode 0 en vigueur. Dans ce cas, c'est l'approche où  $W_1 = W_G$  qui semble la plus logique,

Par contre, aucune de ces définitions de  $W_1$  et  $W_2$  ne distinguent pas la part de charge permanente due au poids propre des éléments non structuraux dont la flèche initiale est « vue » pour tout ou partie par ces derniers.

En aparté, il apparaît évident que pour une limite de flèche identique, la vérification de  $W_2 + W_3$  en combinaison caractéristique sera systématiquement décisive par rapport à la vérification de  $W_2 + W_3$  en combinaison fréquente.

## 2.2.3 FLECHES HORIZONTALES

Le projet final de révision de l'Eurocode 0 introduit nouvellement des suggestions de flèches horizontales (Tableau A.1.11) maximales pour les ouvrages courants, qui restent cependant des paramètres déterminés nationalement.

Sans que leur définition soit détaillée comme pour les flèches verticales, les valeurs limites suggérées portent également sur les 3 mêmes situations :

- Limite d'endommagement des éléments non structuraux : en combinaison caractéristique
- Confort des utilisateurs : en combinaison fréquente
- Apparence : en combinaison quasi-permanente

## 2.3 NF EN 1995-1-1 : 2005 + A1 : 2008 + A2 : 2014 (Eurocode 5) et son AN

### 2.3.1 PRINCIPES ET COMBINAISON D'ACTION A L'ELS

Bien que se basant sur les principes de l'Eurocode 0, l'Eurocode 5 introduit au §2.2.3 les notions de flèches suivantes :

- Flèche instantanée  $W_{inst}$  combinaison caractéristique
- Flèche due au fluage  $W_{creep}$  combinaison quasi-permanente
- Flèche finale  $W_{fin} = W_{inst} + W_{creep}$  combinaison caractéristique + quasi-permanente

L'articulation de ces flèches et la prise en compte du coefficient de fluage  $k_{def}$  sont illustrées au §2.2.3(5) pour un matériau homogène et sous hypothèse de relation linéaire entre les actions et la flèche :

$$W_{inst} = W_G + W_Q + \sum \psi_{0,i} \cdot W_{Qi}$$

$$W_{creep} = k_{def} \cdot W_G + \psi_2 \cdot k_{def} \cdot W_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot k_{def} \cdot W_{Qi}$$

$$W_{tot} = W_{inst} + W_{creep} = (1 + k_{def}) \cdot W_G + (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot k_{def}) \cdot W_{Qi}$$

**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.

**COMMENTAIRE :**

On voit bien que le séquençage des flèches diffère de celui de l'Eurocode 0 actuel comme de son projet de révision. Cette comparaison et les correspondances éventuelles sont illustrées au §2.3.2.

L'AN française apporte deux modifications supplémentaires en introduisant :

- La flèche instantanée sous actions variables seules  $W_{inst(Q)}$  en lieu et place de  $W_{inst}$  (portant sur toutes les actions) :

$$W_{inst(Q)} = W_Q + \sum W_{Qi}$$

- La flèche  $W_{fin} - W_{Ginst}$  visant l'endommagement des éléments de second œuvre avec  $W_{Ginst}$  la flèche induite par les charges permanentes antérieures au moment de liaison de l'élément de second œuvre ; cette flèche correspondant à la flèche  $W_{lim,2}$  de l'AN de l'Eurocode 0 :

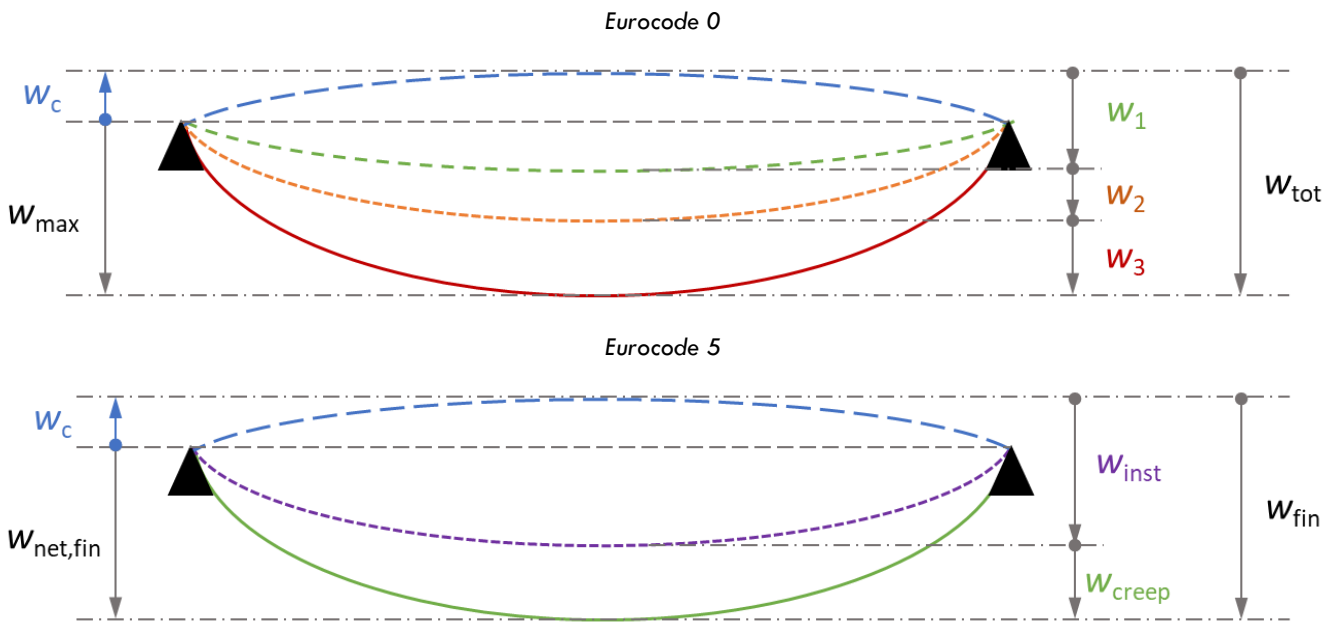
$$W_{tot,2} = W_{fin} - W_{Ginst} = W_{(G-Ginst)} + k_{def} \cdot W_G + (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot k_{def}) \cdot W_{Qi}$$

La Figure 1 de l'AN de l'Eurocode 5 décrit cette décomposition en nommant  $W_{tot2}$  la flèche  $W_{fin} - W_{Ginst}$ . Il faut noter que sa représentation dans cette figure, combinée à la vision de l'Eurocode 0, peut induire une confusion qui est décrite au §2.3.2.

**2.3.2 FLECHES VERTICALES**

Pour faciliter les comparaisons, on remplace  $k_{def}$  par  $\phi$  dans les définitions des flèches vues au §2.3.1. La décomposition des flèches de l'Eurocode 5 est illustrée et comparée à celle de l'Eurocode 0 en Fig. 3.

Fig. 3 Définitions des flèches – NF EN 1995-1-1 (Figure 7.1) et NF EN 1990 (Figure A1.1)



Les correspondances et les différences apparaissent de manière évidente :

Eurocode 0	Eurocode 5	Correspondance
$W_c$	$W_c$	OK
$W_{tot}$	$W_{fin}$	
$W_{max} = W_{tot} - W_c$	$W_{net,fin} = W_{fin} - W_c$	
$W_1 = W_G$ $W_2 = \phi \cdot W_G$ $W_3 = (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi}$	$W_{inst} = W_G + W_Q + \sum \psi_{0,i} \cdot W_{Qi}$ $W_{creep} = \phi \cdot W_G + \psi_2 \cdot \phi \cdot W_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot \phi \cdot W_{Qi}$	$W_{inst} = W_1 + W_{3[inst]}$ $W_{creep} = W_2 + W_{3[\infty]}$

**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.

Cette même comparaison est également intéressante vis-à-vis du projet de révision de l'Eurocode 0 :

prEN 1990 : 2020	Eurocode 5	Correspondance
$W_c$	$W_c$	OK
$W_{tot}$	$W_{fin}$	
$W_{max} = W_{tot} - W_c$	$W_{net,fin} = W_{fin} - W_c$	
$W_1 = W_G$ $W_2 = W_G \cdot \phi + (\psi_2 \cdot W_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot W_{Qi}) \cdot (1 + \phi)$ $W_3 = (1 - \psi_2) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} - \psi_{2,i}) \cdot W_{Qi}$	$W_{inst} = W_G + W_Q + \sum \psi_{0,i} \cdot W_{Qi}$ $W_{creep} = \phi \cdot W_G + \psi_2 \cdot \phi \cdot W_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot \phi \cdot W_{Qi}$	$W_{inst} = W_1 + W_{2(inst)} + W_3$ $W_{creep} = W_2$

Dans les deux cas, et bien qu'il n'y ait pas de correspondance directe, on peut comparer  $W_{tot,2}$  :

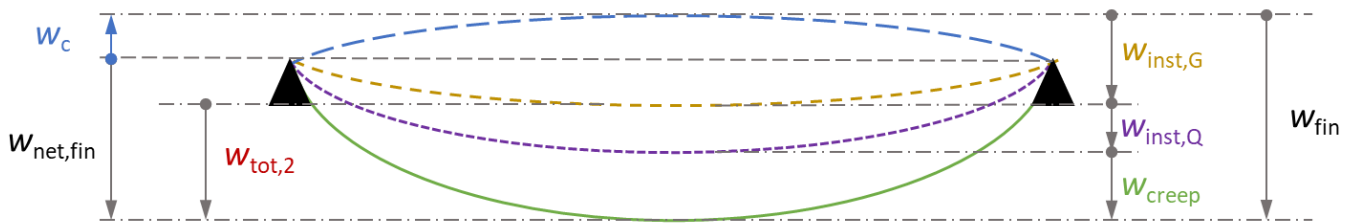
$$W_{tot,2} = W_{fin} - W_{Ginst} = W_{(G-Ginst)} + \phi \cdot W_G + (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi}$$

avec les flèches de l'Eurocode 0 et du prEN 1990 comme suit :

$$W_{tot,2} = W_{(G-Ginst)} + W_2 + W_3$$

La représentation de  $W_{tot,2}$  dans la Figure 1 de l'AN de l'Eurocode 5, combinée à la vision de l'Eurocode 0 qui ne distingue pas explicitement la part de charge permanente de la structure de celles des éléments non structuraux, peut induire une confusion.

Fig. 4 Définition de la flèche  $W_{tot,2}$  – AN de la NF EN 1995-1-1 (Figure 1)



La figure peut laisser supposer que :

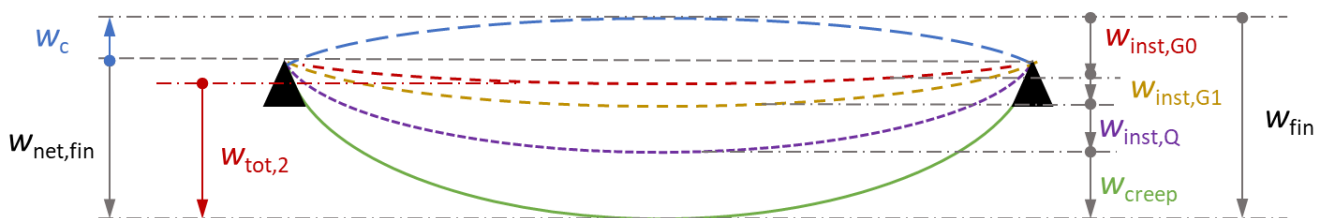
$$W_{tot,2} = W_{inst,Q} + W_{creep}$$

ce qui n'est pas sans rappeler l'EN 1990 et le prEN 1990 qui donneraient :

$$W_{tot,2} = W_2 + W_3$$

Or le texte de l'AN dit clairement que  $W_{tot,2} = W_{fin} - W_{Ginst}$  avec  $W_{Ginst}$  la flèche induite par les charges permanentes antérieures au moment de liaison de l'élément de second œuvre. Une représentation plus précise de  $W_{tot,2}$  serait donc celle-ci :

Fig. 5 Définition de la flèche  $W_{tot,2}$  précisée en différenciant  $G_0$  et  $G_1$



avec :

- $G_0$  : la charge permanente antérieure à la liaison de l'élément de second œuvre (non structural)
- $G_1$  : la charge permanente comprenant le poids propre de l'élément de second œuvre et de tous les autres éléments non structuraux dont la liaison intervient ultérieurement

**COMMENTAIRE :**

En cas de révision de l'AN préalablement à la publication de la révision de l'Eurocode 5, une mise à jour de la Figure 1 avec introduction de  $G_0$  et  $G_1$  serait judicieuse.

## 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.

### 2.3.3 FLECHES HORIZONTALES

L'Eurocode 5 actuel ne comporte pas de disposition particulière relative aux flèches horizontales.

L'AN de son côté précise :

- L'applicabilité des valeurs limites du tableau 7.2 de l'AN aux déplacements horizontaux, y compris pour les éléments individuels soumis au vent pour lesquels on retient  $H / 200$ .
- La nécessité de satisfaire à la clause 9.2.5.3(2) de l'Eurocode 5 pour les systèmes de contreventement, qui limite la déformation à  $L/500$  ou  $H/500$ .

#### COMMENTAIRE :

Ce dernier point est fréquemment omis ou inconnu des concepteurs, alors qu'il est systématiquement repris dans les Avis Technique, DTA, ATEx, ... ainsi que les CPT (ou Cahier du CSTB) correspondants. L'origine de cette incompréhension peut se trouver dans la rédaction de la clause de l'AN, qui est un peu moins explicite que celle des référentiels mentionnés. En cas de révision de l'AN préalablement à la publication de la révision de l'Eurocode 5, une mise à jour de cette clause serait judicieuse.

## 2.4 prEN1995-1-1 : 2021 (Projet de révision de l'Eurocode 5)

### 2.4.1 PRINCIPES

Le projet de révision de l'Eurocode 5 (le document de référence est ici la version consolidée d'octobre 2021 soumise à la dernière enquête informelle au sein du CEN/TC 250/ SC 5 avant passage en enquête publique), est particulièrement intéressant à analyser à la lumière de ce qui précède. La structure de la norme a été profondément réorganisée. Pour ce qui est de la vérification des flèches à l'ELS on note que :

- La clause 4.2.3 renvoie aux principes de prEN 1990 et à la section 9.2 (il n'y a donc plus de répartition des informations dans plusieurs parties de la norme).
- Les clause 4.4 et Tableau 4.4 traitent de la rigidité à prendre en compte pour la vérification des déformations de manière générique.
- La section 9.2 reprend très directement les dénominations des flèches de l'Eurocode 0 (en l'espèce du prEN 1990), dont on présente les éléments clés ci-après.

### 2.4.2 FLECHES VERTICALES

Les dénominations  $W_{fin}$ ,  $W_{net,fin}$ ,  $W_{inst}$ ,  $W_{creep}$  ont été retirées du prEN 1995-1-1 au profit des dénominations du prEN 1990 ( $W_1$ ,  $W_2$ ,  $W_3$ ,  $W_{tot}$ ,  $W_{max}$ ) et la Figure 9.1 est une reprise à l'identique de la Figure A.1.1 du prEN 1990.

La seule différence notable est la clarification du positionnement de la flèche initiale du à la part quasi-permanente des actions variables dans  $W_1$  (et non dans  $W_2$  comme peut le laisser supposer le texte du prEN 1990).

On a donc (ici en combinaison caractéristique et en conservant la notation  $\phi$  en lieu et place de  $k_{def}$ ) :

$$W_1 = W_G + \psi_2 \cdot W_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot W_{Qi} \quad \text{flèche initiale sous actions permanentes et quasi-permanentes}$$

$$W_2 = W_1 \cdot \phi = (W_G + \psi_2 \cdot W_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot W_{Qi}) \cdot \phi \quad \text{flèche de long terme sous actions permanentes et quasi-permanentes}$$

$$W_3 = (1 - \psi_2) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} - \psi_{2,i}) \cdot W_{Qi} \quad \text{flèche initiale sous la part non quasi-permanentes des actions variables}$$

et on vérifie :

$$W_{tot} = W_1 + W_2 + W_3 \quad \text{flèche totale à long terme}$$

$$W_{max} = W_{tot} - W_c \quad \text{flèche totale à long terme par rapport à l'horizontale}$$

Dans le prolongement, on peut ainsi définir  $W_{tot2}$  comme :

$$W_{tot2} = W_{tot} - W_{G0} = W_{G1} + \phi \cdot W_G + (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi} \quad \text{avec } G = G_0 + G_1$$

#### COMMENTAIRE :

Cette nouvelle approche qui considère d'un côté les actions permanentes et quasi-permanentes et de l'autre la part non quasi-permanente des actions facilite en outre le calcul des flèches d'éléments composés avec des comportements à long terme différent, puisque  $W_1$  et  $W_3$  peuvent être calculés avec les valeurs moyennes des raideurs et  $W_2$  avec les valeurs à long terme de ces raideurs.

## 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.

On calcule alors les déformations selon la combinaison choisie avec les charges et raideurs décrites dans le tableau ci-après.

	$W_1$	$W_2$	$W_3$
Raideurs	$E_{mean} ; G_{mean} ; K_{SLS}$	$E_{mean,fin} ; G_{mean,fin} ; K_{SLS,fin}$	$E_{mean} ; G_{mean} ; K_{SLS}$
Caractéristique	$G + \psi_2 \cdot Q + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_i$		$(1 - \psi_2) \cdot Q + \sum (\psi_{0,i} - \psi_{2,i}) \cdot Q_i$
Fréquente	$G + \psi_2 \cdot Q + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_i$		$(\psi_1 - \psi_2) \cdot Q + \sum (\psi_{1,i} - \psi_{2,i}) \cdot Q_i$
Quasi-permanente	$G + \psi_2 \cdot Q + \sum \psi_{2,i} \cdot Q_i$		

## 2.5 NF EN 1992-1-1 (Eurocode 2) et FD P18-717 (Guide d'application national)

### 2.5.1 PRINCIPES

La NF EN 1992-1-1 (Eurocode 2 – Béton armé) requiert la vérification des flèches suivantes :

- Clause 7.4.1(4) : flèche totale sous combinaison quasi-permanente dès lors que l'aspect ou la fonctionnalité d'un élément peuvent être altérés ; une contreflèche peut être prise en compte dans la limite supérieure de  $L / 250$
- Clause 7.4.1(5) : flèche totale sous combinaison quasi-permanente pour limiter les déformations susceptibles d'endommager les éléments de la structure avoisinants ;
- Clause 7.4.1(6) et 7.4.3 (2)P et (7) : flèche nuisible ; selon clause 7.4.3 (7) visant à limiter l'endommagement des éléments non structuraux et prenant en compte l'historique de chargement

Si la description de la méthode de calcul de la flèche totale est claire, la méthode de calcul de la flèche nuisible l'est moins.

A ce titre, le guide d'application national FD P18-717 apporte au 7.4.3(7) – (II) le détail de la méthode de calcul de la flèche nuisible sanctionnée par l'usage en France.

⇒ Dans ce qui suit on retient la définition de  $W_1, W_2, W_3$  du prEN 1990.

Les valeurs limites proposées sont présentées au §4.2.1 (flèche sous combinaison quasi-permanente) et §4.2.2 (flèche nuisible).

### 2.5.2 FLECHE TOTALE

Le FD P18-717 précise au 7.4.1(5) que pour la flèche sous charges quasi-permanentes décrite ci-dessus, il est logique d'appliquer le coefficient de fluage non seulement aux charges permanentes, mais aussi à la part quasi-permanente des actions variables.

Le FD-P18-717 précise également au 7.4.1.(4) et (5)-II que la contreflèche intervient dans le calcul de la flèche visée par la clause 7.4.1(4), mais ne peut être considérée dans le calcul de la flèche (nuisible) visée par la clause 7.4.1 (5).

La flèche totale sous charge quasi-permanente notée  $W_{tot,qp}$  peut donc s'écrire au sens de la clause 7.4.1(5) :

$$W_{tot,qp} = w_1 + w_2 = (1 + \phi) \cdot w_G + (\psi_2 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot w_Q + \sum (\psi_{2,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot w_{Qi}$$

La vérification de flèche visée par la clause 7.4.1(4) ne diffère que par la prise en compte d'une contreflèche éventuelle et donc :

$$W_{tot,qp} - w_c = w_1 + w_2 - w_c = (1 + \phi) \cdot w_G + (\psi_2 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot w_Q + \sum (\psi_{2,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot w_{Qi} - w_c$$

#### COMMENTAIRE :

On note que la vérification de  $W_1 + W_2 - w_c$  en combinaison quasi-permanente correspond à la vérification suggérée pour limiter les déformations ayant un effet sur l'Apparence dans la prEN1990.

La flèche  $W_{tot,qp}$  (avec ou sans prise en compte de la contreflèche), ne répond pas à la méthode conventionnelle de calcul de la flèche nuisible applicable en France et décrite par ailleurs dans le FD P18-717.

### 2.5.3 FLECHE NUISIBLE – FD P 18-717 (AOUT 2021)

La méthode conventionnelle de calcul des flèches nuisibles prenant en compte la valeur caractéristique instantanée des charges variables (d'exploitation dans notre exemple) est décrite au 7.4.3(7) – (II) du FD P18-717 d'août 2021.

⇒ Par analogie avec l'AN de l'EN 1990, on pose la dénomination  $W_{tot2}$  pour la flèche nuisible du FD P 18-717 qui y est notée  $\Delta ft$

(La version précédente de décembre 2013 présentait ce calcul de manière différente, mais la formule retranscrite finale ne diffère de ce qui suit que par la visualisation ou non de l'influence du moment d'inertie efficace, sans intérêt pour la présente analyse).

**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.

On note :

- $G_0$  : le poids propre de la structure primaire (par définition antérieur à la liaison de l'ENS fragile visé)
- $G_1$  : la charge permanente due au poids propre de l'ENS fragile visé
- $G_2$  : la charge permanente due au poids propre de tous les autres ENS dont la liaison intervient ultérieurement

⇒ On note que la charge permanente  $G_1$  décrite au §2.3.2 (NF EN 1995-1-1) et reprise au §2.4.2 (prEN 1995-1-1) est ici subdivisée en  $G_1 + G_2$ , en distinguant le poids propre du seul ENS visé de celui de l'ensembles des ENS dont la liaison intervient ultérieurement. En outre,  $G_0$  pourrait comprendre le poids propre d'ENS mis en œuvre avant l'ENS fragile visé, qui est ici par simplification et convention considéré comme étant le premier liaisonné à la structure.

La définition des charges permanentes ne mentionne pas la prise en compte de la part quasi-permanente des actions variables. Seule la prise en compte de la valeur caractéristique instantanée des charges variables est citée. L'incertitude subsiste donc.

Dans le cas de mise en place tardive des ENS fragiles, il est possible de ne pas tenir compte d'une fraction (pouvant être intégrale) de la flèche de fluage antérieure à cette mise en place. Cette disposition est liée au fait que le fluage du béton est très important dans les premières semaines après sa mise en œuvre, le fluage total étant par conséquent sensible à la fois à la date de retrait de l'étalement (mise en charge par son poids propre et celui de la structure primaire éventuellement portée) et à la date d'application des charges postérieures (poids propre des ENS, mise en service, ...).

En conservant la lecture au 1<sup>er</sup> degré du texte (pas de fluage sous part quasi-permanente des actions variables), la flèche nuisible peut s'écrire :

$$W_{tot,2} = W_{G0} \cdot (1 - \psi) \cdot \phi + W_{G1} \cdot \phi + W_{G2} \cdot (1 + \phi) + W_Q$$

où  $0 \leq \psi = \beta_c(t, t_0) \leq 1$  dépend du temps écoulé entre le décoffrage et la liaison de l'ENS fragile (EC2, Annexe B, (B.7))

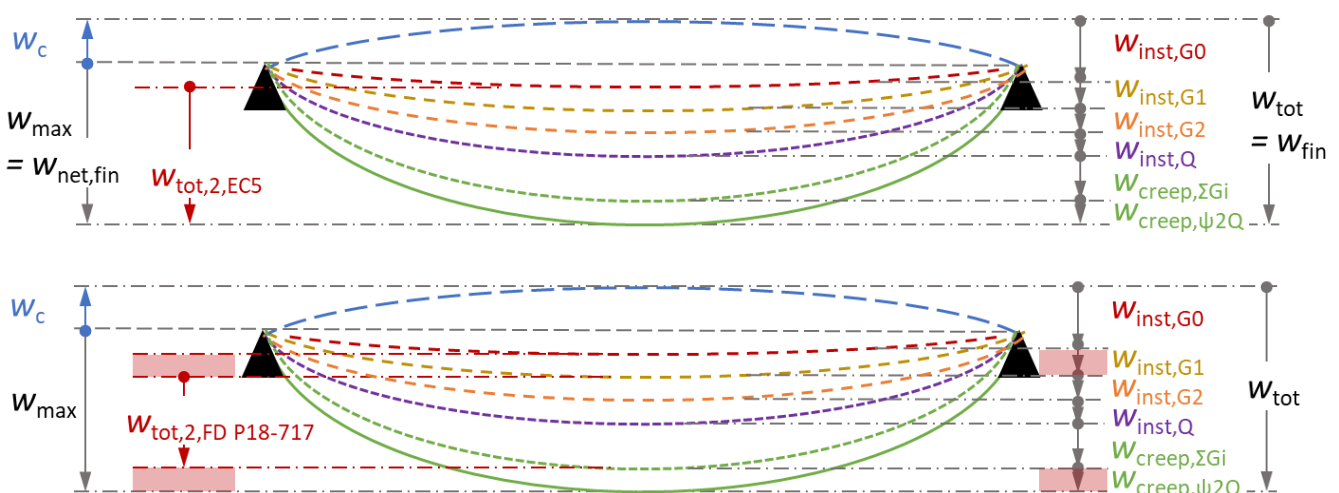
**COMMENTAIRE :**

La vérification de la flèche nuisible correspond dans l'esprit du FD P18-717 à la flèche  $W_{lim,2}$  de l'AN de l'Eurocode 0 en vigueur au même titre que la vérification de la flèche  $W_{tot,2}$  de l'AN de la NF EN 1995-1-1.

- ⇒ La flèche instantanée due au poids propre de l'ENS fragile vérifié est considérée (par convention) comme sans influence sur celui-ci pour le calcul de  $W_{tot,2}$ . Cette hypothèse trouve son origine dans le temps de prise du mortier (ou de la colle) des cloisons maçonnées (ou carreaux de plâtre) ou encore de la chape ciment.
- ⇒ On remarque également que la définition conventionnelle de la flèche nuisible ne comprend a priori pas d'effet du fluage sous la part quasi-permanente des actions variables.

Ces deux hypothèses conventionnelles forment dans le calcul de  $W_{tot,2}$  une différence significative entre l'approche du FD P18-717 et celle de l'AN de la NF EN 1995-1-1, qui est illustrée dans la Fig. 6 ci-dessous.

Fig. 6 Définition de la flèche  $W_{tot,2}$  selon l'AN de la NF EN 1995-1-1 et le FD P18-717



Cette différence de définition conventionnelle est importante lorsque l'on compare les limites de flèche  $W_{tot,2}$  (elles aussi conventionnelles) entre elles.

Néanmoins, si le texte du FD P18-717 est sans équivoque quant à la différenciation entre charges permanentes et charges d'exploitations, le doute quant à la prise en compte de la flèche différée due à la part quasi-permanente des actions variables subsiste.



## 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.

### 2.5.4 FLECHES HORIZONTALES

La NF EN 1992-1-1, son AN française, comme le FD P18-717 ne comportent aucune disposition relative aux flèches horizontales.

#### COMMENTAIRE :

*Cet état de fait est assez étonnant et conduit dans la pratique les concepteurs à ne pas se préoccuper réellement des déplacements horizontaux pour les bâtiments courants, sauf analyse particulière liée aux joints de dilatation, par exemple sou sollicitation sismique.*

## 2.6 NF P19-205 : 2019 et CPT 3718\_V2 : 2018 (Planchers à poutrelles préfabriquées)

### 2.6.1 CONTEXTE

Il est intéressant de considérer également les flèches et leurs limites définies pour le dimensionnement des planchers nervurés à poutrelles préfabriquées en béton (usuellement appelés planchers béton à poutrelles et hourdis ou à poutrelles et entrevous).

Cette appropriation vient compléter la flèche sous combinaison quasi-permanente de la NF EN 1992-1-1 et la flèche nuisible du FD P18-717 par la définition d'une flèche « active », importante car reflétant la pratique de longue date des concepteurs de planchers nervurés.

Ces procédés de plancher ont longtemps relevé de l'Avis Technique, adossés à divers CPT. Par décision de la CCFAT en 2016, la majorité des couples procédé-domaine d'emploi de cette famille est sortie du domaine d'application de la procédure d'ATec pour entrer dans le domaine traditionnel par le biais du (nouveau) NF DTU 23.5 (mai 2019). Subsistent quelques cas particuliers non couverts par le NF DTU 23.5, et qui relèvent encore de l'ATec.

Les référentiels suivants ont été étudiés :

- NF DTU 23.5 (2019) Planchers à poutrelles en béton, qui renvoie pour le dimensionnement à la norme suivante :
- NF P19-205 (2019) Planchers à poutrelles en béton – Règles de calcul ;
- CPT 3718\_V2 (2018) Planchers nervurés à poutrelles préfabriquées, auquel s'adossent les ATec subsistants ;
- CPT 2920 (1996) « Planchers » qui n'est plus appliqué mais a formé la base historique des référentiels précités.

On se concentre dans ce qui suit sur la NF P19-205 et le CPT 3718\_V2, actuellement en vigueur.

### 2.6.2 PRINCIPES

La NF P19-205 (§8.5) et le CPT 3718\_V2 (§106, §207 et §309), requièrent tous deux la vérification des flèches suivantes :

- flèche « absolue » (totale)  $W_{qp}$  sous combinaison quasi-permanente qui correspond à celle visée au 7.4.1.(4) et (5) de la NF EN 1992-1-1 ;
- flèche « active » visant à limiter le risque de désordres dans les ouvrages supportés, donc l'accroissement de flèche pris par le plancher à partir de l'achèvement de l'ouvrage concerné, et qui tient donc compte de l'historique de chargement.

Le détail de ma méthode de calcul diffère selon que la poutrelle soit en béton armé ou en béton précontraint, afin de tenir compte des particularités de comportement de celles-ci. Il reste que dans les deux cas il est possible de transformer ces formules pour les écrire selon la convention de dénomination retenue dans le présent rapport.

La flèche induite par le retrait  $W_r$  est prise en compte dans les deux cas, pouvant être ajustée selon la combinaison de chargement et la temporalité de mise en œuvre de l'ENS fragile.

Pour les poutrelles en béton précontraint, l'effet de la précontrainte est pris en compte sous forme d'une réduction de flèche  $W_p$ , pouvant elle aussi être ajustée selon la combinaison de chargement et la temporalité de mise en œuvre de l'ENS fragile.

On distingue des limites de flèche active différentes selon le type d'ouvrage supporté (fragile, non fragile, toiture).

Les valeurs limites proposées sont présentées au §4.2.3.

#### COMMENTAIRE :

*Si dans la définition textuelle de la flèche active, le doute concernant la flèche différée (fluage) due à la part quasi-permanente des charges variables subsiste, le détail de son calcul est sans équivoque et prend bien en compte cette flèche différée au même titre que celle induite par le poids propre (charges permanentes).*

*Bien qu'étant en réalité une flèche totale, le terme « absolue » est utilisé pour  $W_{qp}$  pour éviter toute confusion, l'une des flèches intermédiaires intervenant dans le calcul de la flèche active étant appelée « totale ».*

## 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.

### 2.6.3 FLECHE TOTALE

La flèche totale sous charge quasi-permanente  $W_{qp}$  notée ici  $W_{tot,qp}$  une fois transformée ne diffère pas significativement de celle décrite au §2.5.2 et peut donc s'écrire :

$$W_{tot,qp} = (1 + \phi) \cdot W_G + (\psi_2 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{2,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi} + W_{qp,r} - W_{qp,p}$$

avec  $G$  la somme des charges permanentes (sans part quasi-permanente des actions variables)

$W_{qp,r}$  la flèche due au retrait, ajustée pour la combinaison quasi-permanente

$W_{qp,p}$  la réduction de flèche due à la précontrainte éventuelle, ajustée pour la combinaison quasi-permanente

⇒ Dans le cas des poutrelles en béton précontraint il faut noter que  $G$  est déterminé en réduisant de moitié le poids propre des poutrelles elles-mêmes (aucune autre réduction de poids propre ne s'applique pour les autres composants)

### 2.6.4 FLECHE ACTIVE (NF P19-205 : 2019 ET CPT 3718\_V2 : 2018)

La méthode conventionnelle simplifiée de calcul de la flèche active prenant en compte l'historique de chargement est décrite au §8.5 de la NF P19-205 et aux §207 et §309 du CPT 3718\_V2.

⇒ Par analogie avec l'AN de l'EN 1990, on pose la dénomination  $W_{tot2}$  pour la flèche active des NF P19-205 et CPT 3718\_V2 qui y est notée  $f_a$

On pose les notations suivantes, en regard des charges correspondantes telles que définies aux NF P19-205 et CPT 3718\_V2 :

- $G_0 = g_1 + g_2 + g_v$  le poids propre de la structure primaire et des ENS installés préalablement à l'ENS fragile visé (poids propre :  $g_1$  de la poutrelle ;  $g_2$  du reste du plancher ;  $g_v$  des ENS installés avant l'ENS visé)
- $G_1 = g_a$  la charge permanente due au poids propre de l'ENS fragile visé
- $G_2 = g_p$  la charge permanente due au poids propre des ENS dont la liaison intervient ultérieurement

Les parts (quasi-) permanente  $g_q$  et variable  $q$  des charges d'exploitation  $Q_B$  appliquées au plancher sont définies dans les NF P19-205 et CPT 3718\_V2 comme suit (en l'absence d'indication dans les DPM) :

$$g_q = 0,5 \cdot \psi_2 \cdot Q_B \quad \text{et} \quad q = Q_B - g_q = (1 - 0,5 \cdot \psi_2) \cdot Q_B$$

#### COMMENTAIRE :

Cette définition de la part quasi-permanente de l'action variable diffère à première vue de celle de la NF EN 1990. Il faut en réalité la mettre en perspective de son utilisation dans les formules de calcul de la flèche active et notamment dans l'usage qui est fait du coefficient de fluage et dans le calcul qui en résulte de la flèche à long terme.

Dans les référentiels de calcul béton français (FD P18-717, NF P19-205, CPT 3718\_V2, ...) on pose usuellement sous diverses manières des dispositions équivalentes quant au module d'élasticité à long terme  $E_{c,eff}$  et au coefficient de fluage  $\phi$  :

$$E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{1 + \phi(\infty, t_0)} \quad \text{et} \quad \phi(\infty, t_0) = 2,0 \quad \text{qui équivaut à} \quad E_{c,eff} = \frac{E_{cm}}{3}$$

Les formules de calcul des flèches tenant compte de l'historique de chargement, tiennent également compte de la part de fluage du béton déjà réalisée avant la mise en œuvre de l'ENS visé ou de la sollicitation par la charge d'exploitation.

Il en résulte que plusieurs coefficients de certains termes des formules de calcul de flèche sont en fait calculés à partir de cette valeur de  $\phi = 2,0$ . On retrouve ainsi des coefficients  $1/3$  multiplicateurs de la partie non variable de la charge d'exploitation, qui viennent compenser la valeur de  $1 + \phi = 3,0$  par laquelle est multipliée la flèche de la charge  $q/3$ .

On peut donc comprendre le coefficient 0,5 dans la définition de  $g_q = 0,5 \cdot \psi_2 \cdot Q_B$  comme la prise en compte indirecte d'un coefficient de fluage réel du béton à partir de l'application de la charge d'exploitation  $\phi_{Q_B} = 1,0$  au lieu de 2,0. En calculant la flèche totale long terme induite par  $g_q$  et  $q$  (sous hypothèse de linéarité entre flèche et charge) on peut en effet écrire :

$$g_q \cdot (1 + \phi) + q = 0,5 \cdot \psi_2 \cdot Q_B \cdot (1 + \phi) + (1 - 0,5 \cdot \psi_2) \cdot Q_B = (1 + \psi_2 \cdot (0,5 \cdot \phi)) \cdot Q_B = (1 + \psi_2 \cdot \phi_{Q_B}) \cdot Q_B \quad \text{et} \quad \phi_{Q_B} = \phi/2.$$

**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.

**Pour les poutrelles en béton armé**

En tenant compte du fait que  $\phi = 2,0$ , la formule de calcul de la flèche active peut s'écrire :

$$w_{tot,2} = w_{G0} \cdot (1 - \psi) \cdot \phi + w_{G1} \cdot \phi + w_{G2} \cdot (1 + \phi) + w_Q \cdot \left(1 + \psi_2 \cdot \frac{\phi}{2}\right) + w_r$$

avec  $\psi = \min\{0,5 ; t / 90\}$  dépend du temps écoulé entre le retrait des étais et la liaison de l'ENS fragile  
 $w_r$  la flèche due au retrait, ajustée selon la temporalité de mise en œuvre de l'ENS fragile

**COMMENTAIRE :**

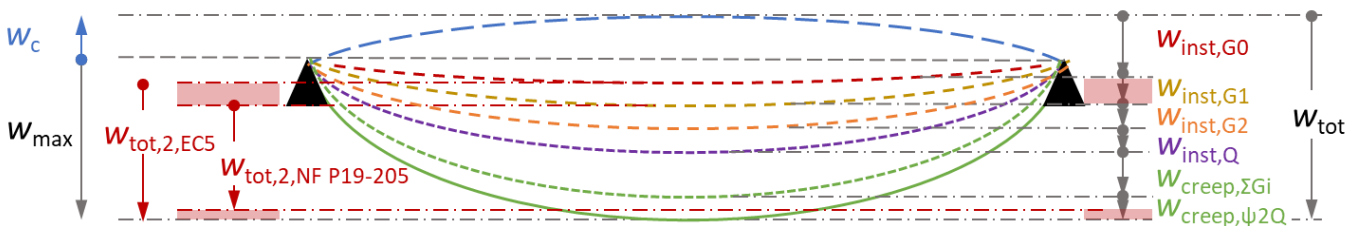
On voit aisément la correspondance avec la flèche nuisible du FD P18-717, sachant qu'il n'y a ici pas d'ambiguïté concernant la prise en compte de la flèche due au fluage sous la part quasi-permanente des actions variables, clairement prise en compte, mais avec un coefficient de fluage réduit.

On voit également que pour  $\psi = 0$  cette formule est similaire à celle de la flèche  $w_{tot,2}$  de l'AN de la NF EN 1995-1-1 à l'exception :

- ⇒ de l'absence de la flèche instantanée sous poids propre de l'ENS fragile visé, et
- ⇒ du coefficient de fluage réduit pour la flèche différée sous part quasi-permanente des charges variables.

Ces deux hypothèses conventionnelles forment dans le calcul de  $w_{tot,2}$  une différence non négligeable entre l'approche de la NF P19-205 et celle de l'AN de la NF EN 1995-1-1 (moins importante cependant que dans le cas de la flèche nuisible du FD P18-717), qui est illustrée dans la Fig. 7 ci-dessous.

Fig. 7 Ecart entre la définition de la flèche  $w_{tot,2}$  selon l'AN de la NF EN 1995-1-1 et la NF P19-205



**Pour les poutrelles en béton précontraint**

La formule de calcul de la flèche active tient compte de la part de flèche due au fluage déjà réalisée avant la pose de l'ENS fragile visé par le biais de coefficients  $k_1, k_2$  et  $k_3$  (inférieurs à 1,0) multiplicateurs respectifs de  $g_1, g_2$  et  $g_v$ . Pour faciliter les comparaisons on introduit alors dans ce qui suit un coefficient  $k_0$  tel que :

$$k_0 = \frac{k_1 \cdot g_1 + k_2 \cdot g_2 + k_3 \cdot g_v}{g_1 + g_2 + g_v} \quad \text{et on a alors :} \quad k_0 \cdot G_0 = k_1 \cdot g_1 + k_2 \cdot g_2 + k_3 \cdot g_v$$

avec :  $k_1 = 1/5$  ou  $1/10$  (selon le tableau E.4.2.3.3 de la NF EN 15037-1) ;  $k_2 = 1/2$  ;  $k_3 = 2/3$

Par ailleurs, cette formule multiplie également la charge  $g_a$  due au poids propre de l'ENS fragile visé par  $k_3 = 2/3$ .

Là encore, en tenant compte du fait que  $\phi = 2,0$  on identifie qu'il s'agit d'une manière indirecte d'écrire  $g_a \cdot \phi$  puisque :

$$\frac{2}{3} \cdot g_a \cdot (1 + \phi) = 2 \cdot g_a = g_a \cdot \phi$$

Ce même coefficient est d'ailleurs appliqué à  $g_v$  (poids des ENS installés avant l'ENS fragile) avec le même effet, ce qui est somme toute logique.

En tenant compte du fait que  $\phi = 2,0$ , la formule de calcul de la flèche active peut s'écrire :

$$w_{tot,2} = w_{G0} \cdot k_0 \cdot (1 + \phi) + w_{G1} \cdot \phi + w_{G2} \cdot (1 + \phi) + w_Q \cdot \left(1 + \psi_2 \cdot \frac{\phi}{2}\right) + w_r - w_p$$

avec  $w_r$  la flèche due au retrait, ajustée selon la temporalité de mise en œuvre de l'ENS fragile  
 $w_p$  la réduction de flèche due à la précontrainte, ajustée selon la temporalité de mise en œuvre de l'ENS fragile

**COMMENTAIRE :**

L'utilisation des poids propres en situations usuelles montre que de manière générale on aura :

$$\frac{1}{3} \leq k_0 \leq \frac{2}{3} \quad \text{et donc} \quad 1,0 \leq k_0 \cdot (1 + \phi) \leq 2,0 \quad \text{qui s'écrit également} \quad \frac{\phi}{2} \leq k_0 \cdot (1 + \phi) \leq \phi$$

## 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.

En posant (de manière totalement hypothétique) un coefficient  $\psi$  variant entre 0 et 0,5 tel que celui défini pour les poutrelles béton armé, et tel que  $(1-\psi) \cdot \phi = k_0 \cdot (1+\phi)$ , on retrouve la formule pour poutrelles en béton armé complétée de la précontrainte.

## 2.7 NF EN 1993-1-1 (Eurocode 3) et son AN

### 2.7.1 PRINCIPES

La NF EN 1993-1-1 est peu diserte sur la vérification des flèches et renvoie d'une part aux flèches définies dans la NF EN 1990 et d'autre part à la définition de limites appropriées pour chaque projet.

L'AN de la NF EN 1993-1-1 complète le texte :

- en rappelant la nécessité de tenir compte des matériaux ou équipement supportés et en stipulant que les limites ainsi définies aux documents du marché doivent l'être en cohérence avec la NF EN 1990 et son AN ;
- en précisant de manière univoque l'utilisation de la combinaison caractéristique pour les actions ;
- en définissant des valeurs limites recommandées, et par là même des vérifications recommandées.

Elle rappelle en outre que la flèche  $W_2$  (partie à long terme sous charges permanentes) est sans objet pour la construction métallique, l'acier n'étant pas sujet aux phénomènes d'amplification des déformations tels que le fluage.

### 2.7.2 FLECHES VERTICALES

Pour les flèches verticales, les principes décrits ci-dessus conduisent à la vérification des flèches suivantes avec les combinaisons d'actions indiquées ci-après (on rappelle que pour l'acier  $W_2 = 0$  car sans objet) :

- Flèche totale par rapport à l'horizontale :  $W_{\max} = W_{\text{tot}} - W_c = W_1 + W_2 + W_3 - W_c$  en combinaison caractéristique  
⇒ que l'on peut écrire :  $W_{\max} = W_G + W_Q + \sum \psi_{0,i} \cdot W_{Qi} - W_c$
- Flèche instantanée sous actions variables :  $W_3$  en combinaison caractéristique  
⇒ que l'on peut écrire :  $W_3 = W_Q + \sum \psi_{0,i} \cdot W_{Qi}$

#### COMMENTAIRE :

Bien que l'AN française mentionne la prise en compte des matériaux et équipements supportés dans la vérification des flèches et l'éventuelle nécessité de définir des limites plus strictes que celles proposées, le Tableau 1 de l'AN ne mentionne pas la vérification d'une flèche de type  $W_{\text{tot},2}$  ou nuisible, qui n'est dans les faits définies nulle part explicitement, et ne se déduit que de manière implicite par le renvoi à une définition des limites dans les documents du marché en cohérence avec la NF EN 1990 et son AN française, cette dernière posant le principe de la flèche  $W_{\text{lim},2}$ .

On note que le principe d'une vérification de la flèche instantanée sous charges variables seules est également présent dans l'AN française de la NF EN 1995-1-1 avec  $W_{\text{inst}(Q)}$  (qui diffère en cela de la définition de  $W_{\text{inst}}$  sous charges totales dans la NF EN 1995-1-1).

### 2.7.3 FLECHES HORIZONTALES

L'AN française de la NF EN 1993-1-1 précise des limites de flèche horizontale entre chaque étage et pour la structure dans son ensemble.

Elle introduit également une définition de parois fragiles ayant des exigences plus sévères en termes de déformation ou de compatibilité avec les éléments support. Elle ne suggère cependant de limites que pour les parois non fragiles.

#### COMMENTAIRE :

En définissant des limites de flèche horizontale entre chaque étage et pour la structure dans son ensemble, l'AN française de la NF EN 1993-1-1 est donc la seule pour les 3 matériaux couverts dans le présent document à proposer des limites pour les flèches horizontales à ce niveau de détail.

### 3 CRITERE DE FLECHE – ELEMENTS POUR LA COMPARAISON DES FLECHES ET DE LEUR LIMITE

La comparaison directe des limites de flèches est fréquemment source d'erreur et nécessite pour être judicieuse de prendre en compte l'effet de la combinaison d'actions (Eurocode 0) utilisée.

Une analyse a donc été menée pour évaluer l'effet de ces combinaisons pour un spectre raisonnablement large de situations de chargement et de classes de service, et permettre de proposer les tableaux ci-dessous qui donnent un ordre de grandeur des équivalences pour un certain nombre de valeurs limites répandues.

#### 3.1 Principe et cadre de la comparaison

##### Cadre de la comparaison

L'analyse est menée :

- Pour les flèches long terme en Classe de service 1 et en Classe de service 2 ( $k_{def}$  du bois massif, LC, LVL)
- En plancher (catégories d'usage A à D) et en toiture non accessible (catégorie d'usage H)
- Pour les plages d'intensité des charges et actions suivantes :
  - G compris entre 0,35 (plancher à solivage léger sans cloisons) à 3,00 (plancher massif avec chape et cloisons) kN/m<sup>2</sup> ;
  - Q (plancher) = 1,50 (cat. A) / 2,50 (cat. B, C1) / 4,00 (cat. C2, C3) / 5,00 (cat. C4, C5, D) kN/m<sup>2</sup> ;
  - S (neige) compris entre 0,45 et 1,10 kN/m<sup>2</sup> (altitude ≤ 600 m en région A, B, C ; altitude ≤ 400 m en région D) ;
  - W (vent - pression) compris entre 0,30 et 1,00 kN/m<sup>2</sup> (couvre notamment les toitures de pente ≤ 45° hors catégorie de terrain 0 pour des hauteurs de bâtiment respectivement de 28m en Région 1 et 2, de 18 m en Région 3 et de 9 m en Région 4).

##### Principe de la comparaison

Pour chaque domaine d'application, en balayant les plages d'intensité des charges et actions, on calcule le rapport entre la flèche de référence  $W_{ref}$  (pour laquelle une limite  $L / K$  est définie) et la flèche cible  $W_x$  (à comparer) dont on indique dans un premier temps les valeurs minimum, moyenne et maximum obtenues. Puis pour une valeur de  $K$  donnée (pour  $W_{ref}$ ) on calcule son équivalent (minimum, moyen ou maximum)  $K_x$  pour  $W_x$  :

On calcule :  $\alpha = \frac{W_{ref}}{W_x}$  ; puis on se pose à la limite de  $W_{ref}$  :  $W_{ref} = \frac{L}{K}$  ; et on déduit l'équivalent :  $K_x = \alpha \cdot K$

⇒ Les flèches de base de l'Eurocode 5 ainsi que celles de son AN française étant basées sur l'utilisation de la combinaison caractéristique pour la part de déformation instantanée, on mène l'analyse avec celle-ci comme flèche cible, ce qui permet de convertir approximativement une limite donnée dans un autre pays pour une combinaison autre que caractéristique en valeur équivalente en France pour  $W_{inst}$  ou pour  $W_{tot} = W_{fin}$ .

#### 3.2 Flèches Eurocode comparées selon leur combinaison d'actions et limites équivalentes

L'analyse comparée des flèches définies dans l'Eurocode selon la combinaison d'actions utilisée.

##### Flèches instantanées (sans fluage) $W_{inst}$

$$W_{inst} = W_G + W_Q + \sum \psi_{0,i} \cdot W_{Qi} \quad \text{combinaison caractéristique}$$

$$W_{inst, freq} = W_G + \psi_1 \cdot W_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot W_{Qi} \quad \text{combinaison fréquente}$$

$$W_{inst, cp} = W_G + \psi_2 \cdot W_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot W_{Qi} \quad \text{combinaison quasi-permanente}$$

##### Flèches long terme (avec fluage) $W_{tot} = W_{fin}$

$$W_{tot} = W_{inst} + W_{creep} = W_G \cdot (1 + \phi) + (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi} \quad \text{combinaison caractéristique}$$

$$W_{tot, freq} = W_{inst, freq} + W_{creep} = W_G \cdot (1 + \phi) + (\psi_1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{2,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi} \quad \text{combinaison fréquente}$$

$$W_{tot, qp} = W_{inst, qp} + W_{creep} = W_G \cdot (1 + \phi) + (\psi_2 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{2,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi} \quad \text{combinaison quasi-permanente}$$

⇒  $W_{creep}$  est toujours déterminé à partir de la combinaison quasi-permanente ;  $\phi = k_{def}$

**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.

Le résultat de l'analyse décrite précédemment est synthétisé ci-dessous avec comme cible la combinaison caractéristique.

Tableau 1 : Ratio de flèches instantanées et limites équivalentes selon la combinaison d'action Eurocode 0 utilisée

Flèche instantanée $W_{inst}$ (combinaison caractéristique)	$\alpha_{1,inst} = \frac{W_{inst,freq}}{W_{inst}}$ (combinaison fréquente)			$\alpha_{2,inst} = \frac{W_{inst,qp}}{W_{inst}}$ (combinaison quasi-permanente)		
	Minimum	Moyen	Maximum	Minimum	Moyen	Maximum
Plancher (cat. A & B)	0,56	0,69	0,83	0,39	0,57	0,77
Plancher (cat. C & D)	0,72	0,78	0,86	0,63	0,71	0,82
Toiture (neige seule)	0,39	0,69	0,90	0,24	0,61	0,87
Toiture (neige et vent (+))	0,28	0,58	0,85	0,17	0,51	0,83
<b>Retenu pour comparaisons</b>	<b>0,65</b>	<b>0,70</b>	<b>0,85</b>	<b>0,40</b>	<b>0,60</b>	<b>0,80</b>
Limite pour $W_{inst,freq}$ ou $W_{inst,cp}$	Flèche équivalente pour $W_{inst}$ (combinaison caractéristique)					
L / 150	L / 80	L / 105	L / 130	L / 60	L / 90	L / 120
L / 200	L / 110	L / 140	L / 170	L / 80	L / 120	L / 160
L / 250	L / 135	L / 175	L / 215	L / 100	L / 150	L / 200
L / 300	L / 165	L / 210	L / 255	L / 120	L / 180	L / 240
L / 350	L / 190	L / 245	L / 300	L / 140	L / 210	L / 280
L / 400	L / 220	L / 280	L / 340	L / 160	L / 240	L / 320
L / 500	L / 275	L / 350	L / 425	L / 200	L / 300	L / 400

Exemple de lecture :

Une limite de L/300 pour  $W_{inst,freq}$  (fréquente) équivaut en moyenne à une limite de L/210 pour  $W_{inst}$  (caractéristique).

Une limite de L/300 pour  $W_{inst,qp}$  (quasi-permanente) équivaut en moyenne à une limite de L/180 pour  $W_{inst}$  (caractéristique).

Tableau 2 : Ratio de flèches long terme et limites équivalentes selon la combinaison d'action Eurocode 0 utilisée

Flèche long terme $W_{tot}$ (combinaison caractéristique + quasi-permanente)	$\alpha_{1,tot} = \frac{W_{tot,freq}}{W_{tot}}$ (combinaison fréquente + quasi-permanente)			$\alpha_{2,tot} = \frac{W_{tot,qp}}{W_{tot}}$ (combinaison quasi-permanente)		
	Minimum	Moyen	Maximum	Minimum	Moyen	Maximum
Plancher (cat. A & B)	0,64	0,78	0,90	0,50	0,69	0,86
Plancher (cat. C & D)	0,80	0,85	0,92	0,73	0,80	0,89
Toiture (neige seule)	0,47	0,77	0,94	0,34	0,71	0,92
Toiture (neige et vent (+))	0,35	0,68	0,91	0,25	0,63	0,90
<b>Retenu pour comparaisons</b>	<b>0,65</b>	<b>0,78</b>	<b>0,92</b>	<b>0,50</b>	<b>0,70</b>	<b>0,90</b>
Limite pour $W_{tot,freq}$ ou $W_{tot,cp}$	Flèche équivalente pour $W_{tot} = W_{fin}$ (combinaison caractéristique + quasi-permanente)					
L / 150	L / 95	L / 115	L / 140	L / 75	L / 105	L / 135
L / 200	L / 130	L / 155	L / 185	L / 100	L / 140	L / 180
L / 250	L / 160	L / 195	L / 230	L / 125	L / 175	L / 225
L / 300	L / 195	L / 235	L / 280	L / 150	L / 210	L / 270
L / 350	L / 225	L / 275	L / 325	L / 175	L / 245	L / 315
L / 400	L / 260	L / 310	L / 370	L / 200	L / 280	L / 360
L / 500	L / 325	L / 390	L / 460	L / 250	L / 350	L / 450

Exemple de lecture :

Une limite de L/500 pour  $W_{tot,freq}$  (fréq. + quasi-p.) équivaut en moyenne à une limite de L/390 pour  $W_{tot}$  (caract. + quasi-p.).

Une limite de L/500 pour  $W_{tot,cp}$  (quasi-permanente) équivaut en moyenne à une limite de L/350 pour  $W_{tot}$  (caract. + quasi-p.).

## 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 Coefficient de fluage moyen

Pour les mêmes applications et plages d'intensité on détermine un coefficient de fluage moyen  $\phi_{eq}$  tel que l'on puisse écrire  $W_{tot} = W_{inst} \cdot (1 + \phi_{eq})$  en différenciant les Classes de service 1 et 2.

On calcule :  $(1 + \phi_{eq}) = \frac{W_{tot}}{W_{inst}}$  ; puis on se pose à la limite de  $W_{inst}$  :  $W_{inst} = \frac{L}{K}$  ; et on déduit l'équivalent :  $K_{eq} = \frac{K}{\phi_{eq}}$

Les valeurs obtenues sont synthétisées ci-dessous.

Tableau 3 : Coefficient de fluage équivalent

Flèche instantanée $W_{inst}$ (combinaison caractéristique) et long terme $W_{tot}$ (combinaison caractéristique + quasi-permanente)	$(1 + \phi_{eq,Cl.S.1}) = \frac{W_{tot,Cl.S.1}}{W_{inst}}$			$(1 + \phi_{eq,Cl.S.2}) = \frac{W_{tot,Cl.S.2}}{W_{inst}}$		
	Minimum	Moyen	Maximum	Minimum	Moyen	Maximum
Plancher (cat. A & B)	1,23	1,34	1,46	1,31	1,46	1,61
Plancher (cat. C & D)	1,38	1,42	1,49	1,50	1,56	1,65
Toiture (neige seule)	1,14	1,36	1,52	1,19	1,49	1,70
Toiture (neige et vent (+))	1,10	1,31	1,50	1,14	1,41	1,66
<b>Retenu pour comparaisons</b>	<b>1,20</b>	<b>1,35</b>	<b>1,50</b>	<b>1,30</b>	<b>1,50</b>	<b>1,70</b>
Limite pour $W_{inst}$	Flèche équivalente pour $W_{tot} = W_{fin}$ (combinaison caractéristique + quasi-permanente)					
L / 200	L / 165	L / 150	L / 135	L / 150	L / 135	L / 120
L / 250	L / 205	L / 185	L / 170	L / 190	L / 165	L / 150
L / 300	L / 250	L / 220	L / 200	L / 230	L / 200	L / 180
L / 350	L / 290	L / 260	L / 235	L / 265	L / 235	L / 210
L / 400	L / 330	L / 295	L / 270	L / 305	L / 265	L / 240
L / 500	L / 415	L / 370	L / 335	L / 380	L / 335	L / 295
L / 600	L / 500	L / 445	L / 400	L / 460	L / 400	L / 355

Exemple de lecture :

Une limite de L/600 pour  $W_{inst}$  (caractéristique) équivaut en moyenne à une limite de L/445 pour  $W_{tot} = W_{fin}$  (caract. + quasi-p.) en Classe de service 1 et de L / 400 en classe de service 2.

### 3.4 Flèches des Règles CB71 et Eurocode 5

La comparaison est ici présente pour les flèches de plancher, afin de permettre une comparaison entre les limites de la flèche calculée selon les Règles CB71, de la flèche quasi-permanente selon l'Eurocode 2, de la flèche nuisible selon le FD P18-717 et de la flèche  $W_{fin}$  de l'Eurocode 5.

Le calcul de la flèche totale à long terme en application des Règles CB71 tenait compte des dispositions de la NF P06-001 alors contemporaine qui considérait 20% des charges d'exploitation comme (quasi) permanente.

On pose la fonction  $f_w(L, E_{ef})$ , notée ensuite par simplicité  $f_w$  telle que la flèche  $W_{inst,q}$  sous charge  $q$  d'une poutre de rigidité efficace  $E_{ef}$  sur une portée  $L$  s'écrive  $W_{inst,q} = f_w \cdot q$ . On reprend dans ce qui suit les notations communes du présent document.

On considère un cas de plancher et donc une charge permanente  $G$  et une charge d'exploitation  $Q$  et un matériau bois unique.

#### Règles CB71

$$W_{tot} = W_{inst} + W_{creep} \quad \text{avec :}$$

$$W_{inst} = f_w \cdot (1 - 0,2) \cdot Q = f_w \cdot (0,8 \cdot Q) \quad \text{flèche instantanée due à la part non (quasi) permanente de la charge d'exploitation}$$

$$W_{creep} = f_w \cdot (G + 0,2 \cdot Q) \cdot \theta \quad \text{flèche long terme due aux charges (quasi) permanentes ; } \theta \text{ le coefficient de fluage}$$

**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.

et donc :  $W_{tot} = W_{inst} + W_{creep} = f_w \cdot (0,8 \cdot Q) + f_w \cdot (G + 0,2 \cdot Q) \cdot \theta$

on pose :  $r_{CB71} = \frac{G + 0,2 \cdot Q}{G + Q}$  ratio des charges (quasi) permanentes aux charges totales

on a donc :  $G + 0,2 \cdot Q = (G + Q) \cdot r_{CB71}$  et  $0,8 \cdot Q = (G + Q) - (G + 0,2 \cdot Q) = (G + Q) \cdot (1 - r_{CB71})$

En substituant dans le calcul de  $W_{tot}$  on obtient :

$$W_{tot} = W_{inst} + W_{creep} = f_w \cdot (G + Q) \cdot (1 - r_{CB71}) + f_w \cdot (G + Q) \cdot r_{CB71} \cdot \theta$$

qui se réarrange en :  $W_{tot} = f_w \cdot (G + Q) \cdot [(1 - r_{CB71}) + r_{CB71} \cdot \theta]$  et finalement :

$$W_{tot} = f_w \cdot (G + Q) \cdot [1 + (\theta - 1) \cdot r_{CB71}]$$

On rappelle en outre que le coefficient de fluage  $\theta$  est défini comme suit :

$$\theta = 1 + \left[ \frac{\frac{H + \Delta H}{12}}{1 - \frac{\Delta H - 5}{\Delta H + 15}} \right] \cdot \left( \frac{\sigma_{max,qp}}{\sigma_{adm}} - 0,2 \right) \geq 1,0$$

avec :  $H$  l'humidité moyenne du bois

$\Delta H$  la variation totale d'humidité en service

$\frac{\sigma_{max,qp}}{\sigma_{adm}}$  le ratio de la contrainte de flexion maximale sous charge (quasi) permanentes et de la contrainte admissible

Les conditions de la Classe de service 1 peuvent se traduire en :  $H = 10\%$  et  $\Delta H = +/- 2\%$

Les conditions de la Classe de service 2 peuvent se traduire en :  $H = 16\%$  et  $\Delta H = +/- 4\%$

On obtient ainsi les valeurs suivantes pour le coefficient de fluage  $\theta$  :

$\frac{\sigma_{max,qp}}{\sigma_{adm}}$	0,20	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55	0,60	0,70	0,80	0,90	1,00
Classe service 1	1,17	1,26	1,30	1,34	1,38	1,43	1,47	1,51	1,60	1,68	1,77	1,85
Classe service 2	1,32	1,48	1,55	1,63	1,71	1,79	1,87	1,95	2,11	2,27	2,43	2,58

Le passage en Classe de service 2 n'entraîne pas de diminution de résistance, mais une augmentation du coefficient de fluage et donc de la flèche.

En se plaçant à la portée maximale limitée par la flèche en Classe de service 1, on montre aisément (pour une poutre isostatique sous chargement uniforme) que le rapport de la portée maximale  $L_{max,2}$  en Classe de service 2 à celle ( $L_{max,1}$ ) en Classe de service 1 à charges et section identiques peut se calculer comme suit :

$$\frac{L_{max,2}}{L_{max,1}} = \left( \frac{1 + (\theta_1 - 1) \cdot r_{CB71}}{1 + (\theta_2 - 1) \cdot r_{CB71}} \right)^{1/3} \quad \text{et donc que le ratio des contraintes maximales de flexion est : } \frac{\sigma_{max,SC2}}{\sigma_{max,SC1}} = \left( \frac{L_{max,2}}{L_{max,1}} \right)^2$$

On calcule ces ratios pour les configurations de charges décrites précédemment (§3.1).

L'analyse montre que pour un taux de travail en flexion des solives et poutres en travée entre 40% et 60% en Classe de service 1,

à charges et section identiques, le ratio moyen  $\frac{L_{max,2}}{L_{max,1}}$  est de l'ordre de 0,95 et le ratio moyen  $\frac{\sigma_{max,SC2}}{\sigma_{max,SC1}}$  de l'ordre de 0,90.



## 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.

Par conséquent, si l'on retient les valeurs de  $\theta$  pour des taux de travail de 40%, 50% et 60% à  $L_{max,1}$  en Classe de service 1, le taux de travail à la portée  $L_{max,2}$  de la même section sous les mêmes charges sera de l'ordre de 35%, 45% et 55% respectivement.

En émettant l'hypothèse d'une portée maximale pilotée par la vérification de flèche (cas usuel), le taux de travail en flexion des solives et poutres en travée se situe généralement entre 40% et 60% en Classe de service 1, et on peut donc retenir une valeur de  $\theta = 1,4 \pm 0,10$  et par conséquent (avec les valeurs entre 35% et 55%)  $\theta = 1,7 \pm 0,15$  en Classe de service 2.

### Eurocode 5

$$W_{tot} = W_{inst} + W_{creep} = W_G \cdot (1 + k_{def}) + (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) \cdot W_Q \quad \text{que l'on peut donc écrire :}$$

$$W_{tot} = f_w \cdot G \cdot (1 + k_{def}) + f_w \cdot Q \cdot (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) \quad \text{et réarranger en :}$$

$$W_{tot} = f_w \cdot (G + Q) + f_w \cdot (G + \psi_2 \cdot Q) \cdot k_{def}$$

$$\text{on pose :} \quad r_{EC5} = \frac{G + \psi_2 \cdot Q}{G + Q} \quad \text{on a donc :} \quad G + \psi_2 \cdot Q = (G + Q) \cdot r_{EC5}$$

substituant dans le calcul de  $W_{tot}$  on obtient :

$$W_{tot} = f_w \cdot (G + Q) + f_w \cdot (G + Q) \cdot r_{EC5} \cdot k_{def} \quad \text{et finalement :} \quad W_{tot} = f_w \cdot (G + Q) \cdot (1 + r_{EC5} \cdot k_{def})$$

On rappelle que  $k_{def} = 0,6$  en Classe de service 1 et  $k_{def} = 0,8$  en Classe de service 2 pour le Bois massif, lamellé-collé ou LVL.

On rappelle également que  $\psi_2 = 0,3$  pour les catégories d'usage A et B et  $\psi_2 = 0,6$  pour les catégories d'usage C et D.

### Comparaison directe

Sous la forme transformée décrite ci-dessus, il est possible de comparer aisément les deux flèches :

$$\text{On a :} \quad W_{tot,CB71} = f_w \cdot (G + Q) \cdot [1 + (\theta - 1) \cdot r_{CB71}] \quad \text{et} \quad W_{tot,EC5} = f_w \cdot (G + Q) \cdot (1 + r_{EC5} \cdot k_{def})$$

$$\text{On calcule :} \quad \alpha = \frac{W_{tot,CB71}}{W_{tot,EC5}} \quad ; \quad \text{puis on se pose à la limite de } W_{tot,CB71} : W_{tot,CB71} = \frac{L}{K} \quad ; \quad \text{et on déduit l'équivalent : } K_{EC5} = \alpha \cdot K$$

$$\alpha = \frac{W_{tot,CB71}}{W_{tot,EC5}} = \frac{1 + (\theta - 1) \cdot r_{CB71}}{1 + r_{EC5} \cdot k_{def}}$$

Tableau 4 : Ratio de flèches CB71 et Eurocode 5 et limites équivalentes

Flèche long terme $W_{tot}$	$\alpha_3 = \frac{W_{tot,CB71}}{W_{tot,EC5}}$ Classe de service 1			$\alpha_3 = \frac{W_{tot,CB71}}{W_{tot,EC5}}$ Classe de service 2		
	$\theta = 1,3$	$\theta = 1,4$	$\theta = 1,5$	$\theta = 1,65$	$\theta = 1,80$	$\theta = 1,95$
Plancher (cat. A & B)	0,86	0,90	0,93	0,88	0,93	0,98
Plancher (cat. C & D)	0,79	0,82	0,85	0,78	0,82	0,86
<b>Retenu pour comparaisons</b>	<b>0,79</b>	<b>0,86</b>	<b>0,93</b>	<b>0,78</b>	<b>0,88</b>	<b>0,98</b>
Limite pour $W_{tot,freq}$ ou $W_{tot,cp}$	Flèche équivalente à $W_{tot,CB71} \leq L / 400$ pour $W_{tot,EC5} = W_{fin}$					
Plancher (cat. A & B)	L / 340	L / 360	L / 375	L / 350	L / 370	L / 395
Plancher (cat. C & D)	L / 315	L / 325	L / 340	L / 310	L / 330	L / 345
<b>Retenu pour comparaisons</b>	<b>L / 315</b>	<b>L / 345</b>	<b>L / 375</b>	<b>L / 310</b>	<b>L / 350</b>	<b>L / 395</b>

Exemple de lecture :

La limite de  $L/400$  pour  $W_{tot,CB71}$  équivaut en moyenne en Classe de service 1 pour un plancher de catégorie d'usage A et B à une limite de  $L/315$  à  $L/375$  pour  $W_{tot,EC5} = W_{fin}$  avec une moyenne à  $L/345$ .

### 3.5 Flèche nuisible

La comparaison est menée uniquement pour les planchers (de catégories d'usage A, B, C et D).

On rappelle la subdivision du poids propre :

- $G_0$  : le poids propre de la structure primaire (par définition antérieur à la liaison de l'élément non structural - ENS)
- $G_1$  : la charge permanente comprenant le poids propre du seul ENS visé
- $G_2$  : la charge permanente comprenant le poids propre de tous les autres ENS dont la liaison intervient ultérieurement

On rappelle que la flèche  $W_{fin} - W_{Ginst}$  visant l'endommagement des éléments de second œuvre (avec  $W_{Ginst}$  la flèche induite par les charges permanentes antérieures à la liaison de l'ENS) définie par l'AN française de la NF EN 1995-1-1, ici notée  $W_{tot,2}$ , utilise la combinaison caractéristique + quasi-permanente et s'écrit (cf. §2.3.1 et 2.3.2) :

$$W_{tot,2} = W_{fin} - W_{Ginst} = W_{(G-Ginst)} + W_G \cdot \phi + (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi} \quad \text{avec } \phi = k_{def}$$

On rappelle (cf. §2.5.3) qu'une incertitude subsiste quant à la prise en compte ou non de la part quasi-permanente des actions variables dans la flèche due au fluage sous charges permanentes postérieures à la mise en œuvre de l'ENS fragile visé.

#### Hypothèse 1 : absence de flèche due au fluage sous la part quasi-permanente des actions variables

On rappelle (cf. §2.5.3) que la flèche nuisible conventionnelle  $\Delta ft$  au sens du FD- P18-717 notée ici  $W_{tot,2}$  peut s'écrire comme suit et est vérifiée pour la limite indiquée :

$$W_{tot,2} = (W_{G0} + W_{G1}) \cdot \phi + W_{G2} \cdot (1 + \phi) + W_Q \leq L / 500 \text{ si } L \leq 5 \text{ m et } 5 \text{ mm} + L/100 \text{ si } L > 5 \text{ m}$$

On réécrit, développe et réarrange ces deux flèches avec la subdivision du poids propre pour faciliter la comparaison :

$$W_{tot,2,EC5} = \phi \cdot W_{G0} + (1 + \phi) \cdot W_{G1} + (1 + \phi) \cdot W_{G2} + (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi} = W_{tot} - W_{G0}$$

$$W_{tot,2,FD} = \phi \cdot W_{G0} + \phi \cdot W_{G1} + (1 + \phi) \cdot W_{G2} + W_Q + \sum \psi_{0,i} \cdot W_{Qi}$$

Il apparait l'écart suivant entre les deux formules :

$$\Delta W_{tot,2} = W_{tot,2,EC5} - W_{tot,2,FD} = W_{G1} + \psi_2 \cdot \phi \cdot W_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot \phi \cdot W_{Qi}$$

#### Hypothèse 2 : part quasi-permanente des actions variables considérée comme permanente dans $G_2$

Dans ce cas, la flèche nuisible conventionnelle  $\Delta ft$  au sens du FD- P18-717 notée ici  $W_{tot,2}$  est corrigée de la flèche due au fluage sous la part quasi-permanente des actions variables (en rouge ci-dessous) et peut s'écrire comme suit :

$$W_{tot,2} = (W_{G0} + W_{G1}) \cdot \phi + W_{G2} \cdot (1 + \phi) + W_Q \cdot (1 + \psi_2 \cdot \phi) \leq L / 500 \text{ si } L \leq 5 \text{ m et } 5 \text{ mm} + L/100 \text{ si } L > 5 \text{ m}$$

En reprenant le même déroulé que pour l'hypothèse 1, il apparait alors l'écart suivant entre les deux formules :

$$\Delta W_{tot,2} = W_{tot,2,EC5} - W_{tot,2,FD} = W_{G1}$$

#### Analyse comparée

On déduit de ce qui précède :  $W_{tot,FD} = W_{tot,2,EC5} - \Delta W_{tot,2}$

On calcule :  $\alpha = \frac{W_{tot,2,FD}}{W_{tot,2,EC5}}$  ; puis on se pose à la limite de  $W_{tot,2,FD}$  :  $W_{tot,2,FD} = \frac{L}{K}$  ; et on déduit l'équivalent :  $K_{EC5} = \alpha \cdot K$

$$\alpha = \frac{W_{tot,2,FD}}{W_{tot,2,EC5}} = 1 - \frac{\Delta W_{tot,2}}{W_{tot,2,EC5}} = 1 - \frac{\Delta W_{tot,2}}{W_{tot} - W_{G0}}$$

On réalise l'analyse pour une série de scénarios de chargement et d'ENS fragiles vérifiés.

**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.

Le poids propre décrit dans le cadre d'analyse décrit au §3.1 est subdivisé comme décrit au Tableau 5 ci-après (données en kN/m<sup>2</sup>).

Tableau 5 : Subdivisions de charges permanentes analysées pour la flèche nuisible

Poids propre total	$G = \sum Gi$	0,35	0,50	0,75	1,00	1,25	1,50	2,00	2,50	3,00	
Cas [1] : l'ENS visé est le plafond posé avant le revêtement de sol (et la chape le cas échéant)											
Structure et ENS antérieurs	G0	0,25		0,35			1,10				
ENS visé	G1	0,10		0,10			0,10		0,20		
ENS postérieurs	G2	0,00	0,15	0,30	0,55	0,80	1,05	0,80	1,30	1,70	
Cas [2] : l'ENS visé est une chape (sèche ou ciment) posée après le plafond et avant le revêtement de sol											
Structure et ENS antérieurs	G0	sans objet		sans objet		0,45		1,20		1,30	
ENS visé	G1					0,35		0,85	0,35	0,85	1,25
ENS postérieurs	G2					0,20	0,45	0,20	0,45		
Cas [3] : l'ENS visé est le revêtement de sol posé en dernier											
Structure et ENS antérieurs	G0	sans objet	0,35	0,45	0,80		1,30	1,55	2,05	2,55	
ENS visé	G1		0,15	0,30	0,20	0,45	0,20	0,45			
ENS postérieurs	G2		0,00	0,00			0,00				

Les tableaux ci-après synthétisent le résultat de l'analyse (Tableau 6 pour l'hypothèse 1 ; Tableau 7 pour l'hypothèse 2), et distinguent d'une part les planchers de catégorie d'usage A/B et C/D, et d'autre part le Cas [1] (plafond) des Cas [2] et [3] combinés (chape, revêtement de sol), pour lesquels à chaque fois les valeurs obtenues sont homogènes.

Tableau 6 : Ratio de flèches  $W_{tot,2}$  (nuisible) FD P18-717 et Eurocode 5 et limites équivalentes – Hypothèse 1

Flèche nuisible $W_{tot,2}$ Hypothèse 1		$\alpha_4 = \frac{W_{tot,2,FD}}{W_{tot,2,EC5}}$ Classe de service 1			$\alpha_4 = \frac{W_{tot,2,FD}}{W_{tot,2,EC5}}$ Classe de service 2		
		Minimum	Moyen	Maximum	Minimum	Moyen	Maximum
		Plancher (cat. A & B)	Cas [1]	0,82	0,88	0,92	0,79
Cas [2]	0,70		0,78	0,84	0,71	0,77	0,83
Cas [3]	0,76		0,81	0,84	0,76	0,80	0,83
Global	0,70		0,83	0,92	0,71	0,81	0,91
Plancher (cat. C & D)	Cas [1]	0,73	0,78	0,85	0,68	0,74	0,83
	Cas [2]	0,67	0,72	0,77	0,66	0,70	0,75
	Cas [3]	0,71	0,74	0,76	0,67	0,70	0,75
	Global	0,67	0,75	0,85	0,66	0,71	0,83
Flèche équivalente à $W_{tot,2,FD} \leq L / 500$ pour $W_{tot,2,EC5}$							
Plancher (cat. A & B)	Cas [1]	L / 410	L / 440	L / 465	L / 395	L / 430	L / 460
	Cas [2]	L / 345	L / 390	L / 420	L / 350	L / 385	L / 420
	Cas [3]	L / 375	L / 405	L / 420	L / 375	L / 400	L / 415
	Global	L / 345	L / 415	L / 465	L / 350	L / 405	L / 460
Plancher (cat. C & D)	Cas [1]	L / 365	L / 390	L / 425	L / 335	L / 370	L / 415
	Cas [2]	L / 335	L / 360	L / 385	L / 325	L / 350	L / 375
	Cas [3]	L / 350	L / 370	L / 385	L / 335	L / 350	L / 375
	Global	L / 335	L / 375	L / 425	L / 325	L / 355	L / 415

Exemple de lecture :

La limite de L/500 pour  $W_{tot,2,FD}$  équivaut en moyenne en Classe de service 1 pour un plancher de catégorie d'usage A et B dans le Cas [1] (ENS visé = plafond posé avant les sols) à une limite de L/410 à L/465 pour  $W_{tot,2,EC5}$  avec une moyenne à L/440.

La limite de L/500 pour  $W_{tot,2,FD}$  équivaut en moyenne en Classe de service 1 pour un plancher de catégorie d'usage A et B dans les Cas [2] (ENS visé = chape) à une limite de L/345 à L/420 pour  $W_{tot,2,EC5}$  avec une moyenne à L/390. En se limitant aux chapes à liants hydrauliques, L/500 pour  $W_{tot,2,FD}$  équivaut à une limite de L/345 à L/385 pour  $W_{tot,2,EC5}$  avec une moyenne à L/365.

**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 7 : Ratio de flèches  $W_{tot,2}$  (nuisible) FD P18-717 et Eurocode 5 et limites équivalentes – Hypothèse 2

Flèche nuisible $W_{tot,2}$ Hypothèse 2		$\alpha_4 = \frac{W_{tot,2,FD}}{W_{tot,2,EC5}}$ Classe de service 1			$\alpha_4 = \frac{W_{tot,2,FD}}{W_{tot,2,EC5}}$ Classe de service 2		
		Minimum	Moyen	Maximum	Minimum	Moyen	Maximum
Plancher (cat. A & B)	Cas [1]	0,95	0,97	0,98	0,96	0,97	0,98
	Cas [2]	0,76	0,86	0,93	0,79	0,87	0,94
	Cas [3]	0,85	0,91	0,96	0,86	0,92	0,96
	Global	0,76	0,92	0,98	0,79	0,93	0,98
Plancher (cat. C & D)	Cas [1]	0,97	0,98	0,99	0,98	0,98	0,99
	Cas [2]	0,82	0,91	0,96	0,84	0,92	0,96
	Cas [3]	0,90	0,95	0,98	0,91	0,95	0,98
	Global	0,82	0,95	0,99	0,84	0,96	0,99
		Flèche équivalente à $W_{tot,2,FD} \leq L / 500$ pour $W_{tot,2,EC5}$					
Plancher (cat. A & B)	Cas [1]	L / 475	L / 485	L / 495	L / 475	L / 485	L / 495
	Cas [2]	L / 380	L / 430	L / 465	L / 395	L / 435	L / 470
	Cas [3]	L / 420	L / 455	L / 480	L / 430	L / 460	L / 480
	Global	L / 380	L / 460	L / 495	L / 395	L / 465	L / 495
Plancher (cat. C & D)	Cas [1]	L / 485	L / 490	L / 495	L / 485	L / 490	L / 500
	Cas [2]	L / 405	L / 455	L / 485	L / 415	L / 460	L / 485
	Cas [3]	L / 450	L / 475	L / 490	L / 455	L / 475	L / 495
	Global	L / 405	L / 475	L / 495	L / 415	L / 480	L / 500

Exemple de lecture :

La limite de  $L/500$  pour  $W_{tot,2,FD}$  équivaut en moyenne en Classe de service 1 pour un plancher de catégorie d'usage A et B dans le Cas [1] (ENS visé = plafond posé avant les sols) à une limite de  $L/475$  à  $L/495$  pour  $W_{tot,2,EC5}$  avec une moyenne à  $L/485$ .

La limite de  $L/500$  pour  $W_{tot,2,FD}$  équivaut en moyenne en Classe de service 1 pour un plancher de catégorie d'usage A et B dans les Cas [2] (ENS visé = chape) à une limite de  $L/380$  à  $L/465$  pour  $W_{tot,2,EC5}$  avec une moyenne à  $L/430$ . En se limitant aux chapes à liants hydrauliques,  $L/500$  pour  $W_{tot,2,FD}$  équivaut à une limite de  $L/380$  à  $L/430$  pour  $W_{tot,2,EC5}$  avec une moyenne à  $L/405$ .

### 3.6 Flèche active

On procède selon le même principe que pour la comparaison avec la flèche nuisible.

On rappelle que la flèche  $W_{fin} - W_{Ginst}$  visant l'endommagement des éléments de second œuvre (avec  $W_{Ginst}$  la flèche induite par les charges permanentes antérieures à la liaison de l'ENS) définie par l'AN française de la NF EN 1995-1-1, ici notée  $W_{tot,2}$ , utilise la combinaison caractéristique + quasi-permanente et s'écrit (cf. §2.3.1 et 2.3.2) :

$$W_{tot,2} = W_{fin} - W_{Ginst} = W_{(G-Ginst)} + W_G \cdot \phi + (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi} \quad \text{avec } \phi = k_{def}$$

On rappelle (cf. §2.6.4) que la flèche active conventionnelle  $f_a$  au sens de al NF P19-205 et du CPT 3718-V2 notée ici  $W_{tot,2}$  peut s'écrire comme suit (ici pour les poutrelles en béton armé) :

$$W_{tot,2} = W_{G0} \cdot (1 - \psi) \cdot \phi + W_{G1} \cdot \phi + W_{G2} \cdot (1 + \phi) + W_Q \cdot \left( 1 + \psi_2 \cdot \frac{\phi}{2} \right) + W_r$$

On néglige dans ce qui suit l'effet du retrait  $W_r$  et on se positionne dans le cas (défavorable) où  $\psi = 0$ .

On réécrit, développe et réarrange ces deux flèches avec la subdivision du poids propre pour faciliter la comparaison :

$$W_{tot,2,EC5} = \phi \cdot W_{G0} + (1 + \phi) \cdot W_{G1} + (1 + \phi) \cdot W_{G2} + (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi} = W_{tot} - W_{G0}$$

$$W_{tot,2,FD} = \phi \cdot W_{G0} + \phi \cdot W_{G1} + (1 + \phi) \cdot W_{G2} + \left( 1 + \psi_2 \cdot \frac{\phi}{2} \right) \cdot W_Q + \sum \left( \psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \frac{\phi}{2} \right) \cdot W_{Qi}$$

Il apparait l'écart suivant entre les deux formules :

$$\Delta W_{tot,2} = W_{tot,2,EC5} - W_{tot,2,FD} = W_{G1} + \psi_2 \cdot \frac{\phi}{2} \cdot W_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot \frac{\phi}{2} \cdot W_{Qi}$$

**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.

On calcule :  $\alpha = \frac{W_{tot,2,FD}}{W_{tot,2,EC5}}$  ; puis on se pose à la limite de  $W_{tot,2,FD}$  :  $W_{tot,2,FD} = \frac{L}{K}$  ; et on déduit l'équivalent :  $K_{EC5} = \alpha \cdot K$

On réalise l'analyse pour la même série de scénarios de chargement et d'ENS fragiles vérifiés et les subdivisions de poids propre décrites au Tableau 5.

Le tableau ci-après synthétise le résultat de l'analyse, et distingue d'une part les planchers de catégorie d'usage A/B et C/D, et d'autre part le Cas [1] (plafond) des Cas [2] et [3] combinés (chape, revêtement de sol), pour lesquels à chaque fois les valeurs obtenues sont homogènes.

En outre, les valeurs équivalentes sont données pour deux des trois limites de flèche active de la NF P19-205 :

- L/500 pour les cloisons, plafonds et sols fragiles *traité dans le tableau ci-dessous*
- L/350 pour les cloisons, plafonds et sols non fragiles *traité dans le tableau ci-dessous*
- L/250 pour les éléments en toiture (qui s'applique donc également à une toiture terrasse avec étanchéité)

Tableau 8 : Ratio de flèches  $W_{tot,2}$  (active) NF P19-205 et Eurocode 5 et limites équivalentes

Flèche nuisible $W_{tot,2}$ Hypothèse 2		$\alpha_4 = \frac{W_{tot,2,FD}}{W_{tot,2,EC5}}$ Classe de service 1			$\alpha_4 = \frac{W_{tot,2,FD}}{W_{tot,2,EC5}}$ Classe de service 2		
		Minimum	Moyen	Maximum	Minimum	Moyen	Maximum
Plancher (cat. A & B)	Cas [1]	0,89	0,92	0,95	0,88	0,92	0,95
	Cas [2]	0,74	0,82	0,88	0,75	0,82	0,88
	Cas [3]	0,80	0,86	0,90	0,81	0,86	0,89
	Global	0,74	0,88	0,95	0,75	0,87	0,95
Plancher (cat. C & D)	Cas [1]	0,85	0,88	0,91	0,83	0,86	0,90
	Cas [2]	0,75	0,82	0,86	0,76	0,81	0,84
	Cas [3]	0,80	0,84	0,86	0,80	0,83	0,84
	Global	0,75	0,85	0,91	0,76	0,84	0,90
Flèche équivalente à $W_{tot,2,FD} \leq L / 500$ pour $W_{tot,2,EC5}$							
Plancher (cat. A & B)	Cas [1]	L / 440	L / 460	L / 475	L / 435	L / 460	L / 475
	Cas [2]	L / 365	L / 410	L / 445	L / 370	L / 410	L / 445
	Cas [3]	L / 400	L / 430	L / 450	L / 400	L / 430	L / 445
	Global	L / 365	L / 440	L / 475	L / 370	L / 435	L / 475
Plancher (cat. C & D)	Cas [1]	L / 425	L / 440	L / 460	L / 410	L / 430	L / 455
	Cas [2]	L / 375	L / 410	L / 430	L / 375	L / 405	L / 425
	Cas [3]	L / 400	L / 420	L / 435	L / 395	L / 415	L / 425
	Global	L / 375	L / 425	L / 460	L / 375	L / 420	L / 455
Flèche équivalente à $W_{tot,2,FD} \leq L / 350$ pour $W_{tot,2,EC5}$							
Plancher (cat. A & B)	Cas [1]	L / 310	L / 325	L / 335	L / 305	L / 320	L / 335
	Cas [2]	L / 255	L / 285	L / 310	L / 260	L / 290	L / 310
	Cas [3]	L / 280	L / 300	L / 315	L / 280	L / 300	L / 315
	Global	L / 255	L / 305	L / 335	L / 260	L / 305	L / 335
Plancher (cat. C & D)	Cas [1]	L / 295	L / 310	L / 320	L / 285	L / 300	L / 320
	Cas [2]	L / 260	L / 285	L / 305	L / 260	L / 285	L / 300
	Cas [3]	L / 280	L / 295	L / 305	L / 275	L / 290	L / 300
	Global	L / 260	L / 300	L / 320	L / 260	L / 290	L / 320

Exemple de lecture :

La limite de L/500 pour  $W_{tot,2,FD}$  équivaut en moyenne en Classe de service 1 pour un plancher de catégorie d'usage A et B dans le Cas [1] (ENS visé = plafond posé avant les sols) à une limite de L/440 à L/475 pour  $W_{tot,2,EC5}$  avec une moyenne à L/460.

La limite de L/500 pour  $W_{tot,2,FD}$  équivaut en moyenne en Classe de service 1 pour un plancher de catégorie d'usage A et B dans les Cas [2] (ENS visé = chape) à une limite de L/365 à L/445 pour  $W_{tot,2,EC5}$  avec une moyenne à L/410. En se limitant aux chapes à liants hydrauliques, L/500 pour  $W_{tot,2,FD}$  équivaut à une limite de L/365 à L/410 pour  $W_{tot,2,EC5}$  avec une moyenne à L/385.

## 4 CRITERE DE FLECHE – REVUE ETENDUE DES REFERENTIELS ET SYNTHESE

### 4.1 Revue des Annexes Nationales de l'Eurocode 5

#### 4.1.1 PREAMBULE

On présente dans ce qui suit une revue des Annexes Nationales (AN) de l'Eurocode 5 (EN 1995-1-1) en vigueur dans une sélection de pays européens (dont les principaux pays d'Europe de l'Ouest et du Nord), qui font apparaître une grande disparité d'approche à la fois de la définition des flèches à vérifier, de la combinaison d'action utilisée avec celles-ci (au sens de l'Eurocode 0) et de la limite de flèche fixée ou suggérée.

- Ces AN sont regroupés sous forme de familles d'approche suivie, avec une présentation synthétique (tableau).
- Les 3 premières colonnes du tableau présentent, dans la mesure du possible, les flèches  $W_{inst}$ ,  $W_{fin}$  et  $W_{net,fin}$  définies dans l'EN 1995-1-1 ou leur équivalent (ou remplaçant) dans l'AN concernée.
- Si une flèche spécifique au pays est définie, elle est précisée dans une colonne séparée.
- Lorsque cela est jugé pertinent, le calcul de la flèche est indiqué sous forme de combinaison de flèches instantanées, en utilisant les notations définies en introduction au §2.
- Pour chaque flèche, la combinaison utilisée est inscrite entre crochets :
  - [Caract.] combinaison caractéristique
  - [Fréq.] combinaison fréquente
  - [QP] combinaison quasi-permanente
  - [Caract. + QP] combinaison caractéristique pour la flèche instantanée et quasi-permanente pour celle due au fluage
- L'indication d'une valeur en millimètres correspond à une limite absolue soit directe, soit combinée à une limite en  $L / xx$ .
- On subdivise les charges permanentes tel que défini au §2.3.2 :
  - $G_0$  : la charge permanente antérieure à la liaison de l'élément de second œuvre (non structural)
  - $G_1$  : la charge permanente comprenant le poids propre de l'élément de second œuvre et de tous les autres éléments non structuraux dont la liaison intervient ultérieurement

Dans ce qui suit, les comparaisons ou limites approximativement équivalentes pour  $W_{inst}$  ou pour  $W_{tot} = W_{fin}$  sont basées sur les valeurs moyennes de conversion décrites au §3.2.

#### COMMENTAIRE :

*La comparaison directe des limites de flèches est fréquemment source d'erreur et nécessite pour être judicieuse de prendre en compte l'effet de la combinaison d'actions (Eurocode 0) utilisée. On rappelle que les flèches de base de l'Eurocode 5 et celles de son AN française sont basées sur l'utilisation de la combinaison caractéristique pour la part de déformation instantanée.*

*L'analyse menée au §3 donne au Tableau 1 et au Tableau 2 des éléments permettant de convertir approximativement une limite de flèche donnée dans un autre pays pour une combinaison autre que caractéristique en valeur équivalente en France.*

#### 4.1.2 RAPPEL DES LIMITES DE L'AN FRANÇAISE

On rappelle les limites de l'AN Française de la NF EN 1995-1-1 pour les flèches verticales et horizontales (où H remplace L) :

Typologie de bâtiments	Courants			Agricoles et similaires		
	$W_{inst(Q)}$ [caract.]	$W_{fin}$ [caract. + QP]	$W_{net,fin}$ [caract. + QP]	$W_{inst(Q)}$ [caract.]	$W_{fin}$ [caract. + QP]	$W_{net,fin}$ [caract. + QP]
Chevrons	-	L / 125	L / 150	-	L / 100	L / 150
Éléments structuraux	L / 300	L / 125	L / 200	L / 200	L / 100	L / 150

En outre on limite :

- La flèche  $W_{net,fin}$  des panneaux de plancher ou supports de toiture à L/250 sous charge répartie ;
- La flèche horizontale des éléments individuels soumis au vent à H/200.

#### COMMENTAIRE :

*Il faut comprendre par « chevrons » les éléments de faible section support de couverture portés par des pannes peu espacées et non les chevrons autoporteurs. Ces derniers sont à considérer comme des éléments structuraux.*

*La limite  $W_{net,fin} \leq L/250$  était à l'origine prévue pour les éléments structuraux de plancher. Cette disposition a été transformée dans la version finale de l'AN.*

*La clause 9.2.5.3(2) de l'Eurocode 5 pour les systèmes de contreventement s'applique et limite leur déformation à L/500 ou H/500.*

## 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.

### 4.1.3 FLECHES SUR LA BASE DE L'EUROCODE 5

Les pays tels que le Royaume-Uni, le Danemark, la Finlande (mais aussi l'Estonie, la Lituanie, la Bulgarie) ont calqué la définition des flèches à vérifier sur celles de l'EN 1995-1-1.

Elément/Ouvrage	$W_{inst}$ [caract.]	$W_{fin}$ [caract. + QP]	$W_{net,fin}$ [caract. + QP]	Spécifique
<b>Royaume - Uni</b>				
Avec plafond plaques de plâtre	L/333	-	L/250	L/480
Sans plafond plaques de plâtre	max 12/14mm	-	L/150	
			[caract.]	$W_{inst(Q)} = W_Q + \sum \psi_o * W_{Qi}$
<b>Danemark</b>				
Plancher – 1,5 kN/m <sup>2</sup>	L/600			1,7mm sous 1kN
Toiture – Gk seul (sans contreflèche)		L/400		
Toiture – Gk seul (avec contreflèche)		L/250		
Toiture – Neige	L/400			
Toiture – Vent	L/250			
<b>Finlande / Estonie / Lituanie</b>				
Porteurs principaux	L/400 (plancher)	L/200	L/300	
Solives, chevrons, pannes		L/150	L/200	
<b>Irlande</b>				
Eléments fragiles	L/300	L/250 + $W_c$	L/250	
Eléments non fragiles		L/200 + $W_c$	L/200	
Couverture – Chevron - Panne	L/250 - L/300			
<b>Bulgarie</b>				
Porteurs principaux	L/400	L/250	L/300	
Solives, chevrons, pannes	L/300	L/150	L/250	

#### COMMENTAIRE :

Au Royaume-Uni, la vérification de flèche instantanée  $W_{inst}$  limitée à L/333 et au maximum 12 mm (solivages en poutres en I ou composites) ou 14 mm (solivage en bois massif) est issue de la norme de calcul bois nationale BS 5268-2 qui coexiste avec l'Eurocode 5.

De même la vérification spécifique  $W_{inst(Q)}$  (flèche instantanée sous actions variables seule) limitée à L/480 provient également de la pratique de la BS 5268-2.

Au Danemark, la vérification spécifique sous charge concentrée unitaire de 1 kN correspond à la pratique antérieure à l'Eurocode 5 visant à couvrir le confort vibratoire à la marche.

En appliquant la conversion du Tableau 3 on note que les limites pour  $W_{inst}$  correspondent en moyenne pour  $W_{tot}$  (qui est égale à  $W_{net,fin}$  en l'absence de contreflèche) aux valeurs suivantes :

- Royaume-Uni : L/333 pour  $W_{inst}$  ⇔ environ L/250 pour  $W_{tot}$  en Classe de service 1 et L/220 en Classe de service 2.
- Danemark : L/600 pour  $W_{inst}$  ⇔ environ L/450 pour  $W_{tot}$  en Classe de service 1 et L/400 en Classe de service 2.
- Finlande ou Toiture : L/400 pour  $W_{inst}$  ⇔ environ L/300 pour  $W_{tot}$  en Classe de service 1 et L/270 en Classe de service 2.
- Toiture : L/300 pour  $W_{inst}$  ⇔ environ L/220 pour  $W_{tot}$  en Classe de service 1 et L/200 en Classe de service 2.

Aucun de ces pays n'a implémenté de vérification de flèche nuisible de type  $W_{tot,2}$ .

## 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.

### 4.1.4 UTILISATION DIFFERENCIEE DES COMBINAISONS DE L'EUROCODE 0 POUR LES FLECHES EUROCODE 5

Les pays germaniques se distinguent par l'utilisation de la combinaison quasi-permanente pour la flèche long terme  $W_{net,fin}$ .

La Suisse se distingue en outre par une utilisation de la combinaison fréquente pour  $W_{fin}$  dans certains cas et par la vérification de  $W_{inst(Q)}$  (actions variables seule) en lieu et place de  $W_{inst}$  (charges totales).

#### ALLEMAGNE, AUTRICHE

Élément/Ouvrage	$W_{inst}$ [caract.]	$W_{fin}$ [caract. + QP]	$W_{net,fin}$ [QP]	Spécifique [caract.]
<b>Allemagne</b>				
Cas general	L/300	L/200	L/300	
Eléments secondaires, bât. agricole,...	L/200	L/150	L/250	
[Quasi-P.] $(W_{G0}+W_{G1})*(1+\phi) + W_Q*(\psi_2 + \psi_2*\phi)$				
<b>Autriche</b>				
Plancher, toitures accessibles	L/300		L/250	
Eléments secondaires, bât. agricole,...	L/200		L/150	
[Quasi-P.] $(W_{G0}+W_{G1})*(1+\phi) + W_Q*(\psi_2 + \psi_2*\phi)$ $W_{G0}$ peut être déduit si sans influence sur les éléments de 2 <sup>nd</sup> oeuvre (= flèche nuisible)				

#### COMMENTAIRE :

En appliquant la conversion du Tableau 3 on note que les limites pour  $W_{inst}$  correspondent en moyenne pour  $W_{tot}$  (qui est égale à  $W_{net,fin}$  en l'absence de contreflèche) aux valeurs suivantes :

- L/200 pour  $W_{inst}$   $\Leftrightarrow$  environ L/150 pour  $W_{tot}$  (caract. + Quasi-p.) en Classe de service 1 et L/135 en Classe de service 2.
- L/300 pour  $W_{inst}$   $\Leftrightarrow$  environ L/220 pour  $W_{tot}$  (caract. + Quasi-p.) en Classe de service 1 et L/200 en Classe de service 2.

En appliquant la conversion du Tableau 2 on note que les limites pour  $W_{net,fin} = W_{tot,qp}$  (en l'absence de contreflèche) en combinaison quasi-permanente correspondent en moyenne pour  $W_{tot}$  en combinaison caractéristique + quasi-permanente aux valeurs suivantes :

- L/300 pour  $W_{net,fin} = W_{tot,qp}$  (quasi-p.)  $\Leftrightarrow$  environ L/210 pour  $W_{tot}$  en combinaison (caract. + quasi-p.).
- L/250 pour  $W_{net,fin} = W_{tot,qp}$  (quasi-p.)  $\Leftrightarrow$  environ L/175 pour  $W_{tot}$  en combinaison (caract. + quasi-p.).

On note en outre qu'en Autriche, le concept de flèche nuisible est introduit sur la base de la combinaison quasi-permanente.

#### SUISSE

Élément/Ouvrage	$W_{inst}$ [caract.]	$W_{fin}$ [divers]	$W_{net,fin}$ [QP]	Spécifique [caract.]
Déformation irréversible – [caract]		L/500		
Déformation Réversible – [fréquente]		L/350		L/300
Déformation Réversible – [QP]			L/300	
[fréq.] $W_{inst(Q)} = \psi_1 * W_Q + \sum \psi_2 * W_{Qi}$				
[fréquente] $(W_{G0}+W_{G1})*(1+\phi) + W_Q*(\psi_1 + \psi_2*\phi)$				
[Quasi-P.] $(W_{G0}+W_{G1})*(1+\phi) + W_Q*(\psi_2 + \psi_2*\phi)$				

#### COMMENTAIRE :

En appliquant la conversion du Tableau 2 on note que la limite pour  $W_{fin} = W_{tot,req}$  en combinaison fréquente correspond en moyenne pour  $W_{tot}$  en combinaison caractéristique + quasi-permanente aux valeurs suivantes :

- L/350 pour  $W_{fin} = W_{tot,req}$  (fréquente)  $\Leftrightarrow$  environ L/275 pour  $W_{tot}$  en combinaison (caract. + quasi-p.).

Par ailleurs, la limite de L/300 pour  $W_{inst(Q)}$  (fréquente)  $\Leftrightarrow$  environ L/150 (plancher) voire L/50 en toiture pour  $W_{inst(Q)}$  (caract.)



## 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.

### 4.1.5 APPROCHE AVEC REDEFINITION DES FLECHES PROCHE DE L'EUROCODE 0

La Belgique et les Pays-Bas ont calqué les flèches et combinaisons à vérifier sur les définitions de base de l'Eurocode 0, introduisant l'utilisation de la combinaison fréquente pour l'une des flèches à vérifier et disposant de la vérification d'une flèche s'apparentant à une flèche nuisible.

#### BELGIQUE

La Belgique se distingue par l'existence d'une norme nationale NBN B03-003 qui définit les flèches à vérifier (proches de celles définies dans l'Eurocode 0, mais avec des dénominations différentes et une définition particulière de  $W_a$ ) et les limites correspondantes pour diverses parties d'ouvrage, indépendamment du matériau formant la structure.

Le tableau ci-dessous est un extrait de cette norme pour les cas les plus courants.

Élément/Ouvrage	$W_{abc} + W_1$ [caract.]	$W_{abc}$ [Fréq.]	$W_b + W_c$ [caract. + QP]	Spécifique [caract.]
Cas général	L/300	L/300		
Cloisons fragiles – non fragiles			L/500 – L/250	
Menuiseries sans jeu – avec jeu			L/1000 – L/350	
Plafonds enduits – suspendus			L/350 – L/250	
Sols fragiles – petit format			L/500 - L/300	
Sols non fragiles			L/250	

Correspondances des dénominations:

$$\begin{aligned}
 W_1 &= W_c \text{ (contreflèche)} & \text{et donc :} \\
 W_a &= W_{G0} \cdot (1 + \phi) - W_1 & W_{abc} + W_1 = W_{tot} = W_{fin} & \text{(caractéristique + quasi-p.)} \\
 W_b &= (W_{G1} + W_{G2}) \cdot (1 + \phi) & W_{abc} = W_{tot} - W_c = W_{max} = W_{net,fin} & \text{(fréquente)} \\
 W_c &= W_Q \cdot (1 + \psi_2 \cdot \phi) & W_b + W_c = W_{tot} - W_{G0} \cdot (1 + \phi) & \text{(caractéristique + quasi-p.)}
 \end{aligned}$$

#### COMMENTAIRE :

On note que la flèche  $W_b + W_c$  peut s'apparenter à une flèche nuisible, qui considère cependant que le fluage de la structure primaire ( $G_0$ ) ne sera pas vu par l'ENS. Néanmoins, le texte de la NB N03-003 mentionne une flèche différée partielle laissant sous-entendre une approche qui s'apparente plus à la prise en compte de la partie du fluage déjà matérialisée au moment de la mise en œuvre de l'ENS, la partie restante étant alors vue par l'ENS. Ceci s'apparenterait alors aux dispositions du FD P18-717 en France dans le cas de mise en place tardive des ENS fragiles où l'on a  $W_{tot,2} = W_{G0} \cdot (1 - \psi) \cdot \phi + W_{G1} \cdot \phi + W_{G2} (1 + \phi) + W_Q \cdot (1 - \psi) \cdot \phi$  la part de fluage vue par l'ENS.

En appliquant la conversion du Tableau 2 on note que la limite pour  $W_{abc} = W_{net,fin} = W_{tot,freq}$  (en l'absence de contreflèche) en combinaison fréquente correspond en moyenne pour  $W_{tot}$  en combinaison caractéristique + quasi-permanente aux valeurs suivantes :

- L/300 pour  $W_{abc} = W_{tot,freq}$  (fréquente)  $\Leftrightarrow$  environ L/235 pour  $W_{tot}$  en combinaison (caract. + quasi-p.).

Il est intéressant de noter la limite de L/500 pour  $W_b + W_c$  pour les cloisons fragiles et sols fragiles, qui s'apparente aussi bien dans sa limite que dans sa définition à la flèche nuisible définie en France (son calcul différant de celui du FD P18-717 en ce que  $W_c$  comporte la part de la flèche due au fluage sous l'effet de la part quasi-permanente des actions variables absente de  $\Delta f_t$ ).

Il est dès lors également intéressant de noter la limite de L/250 pour  $W_b + W_c$  concernant les cloisons non fragiles, plafonds suspendus, sols non fragiles.

#### PAYS-BAS

Aux Pays-Bas se distingue c'est l'AN de l'EN 1990 qui définit les flèches à vérifier (celles définies dans le prEN 1990), mais avec des dénominations différentes et une approche différenciée de la combinaison à utiliser en toiture non accessible par rapports aux planchers et toitures accessibles) et les limites correspondantes, indépendamment du matériau formant la structure.

Le tableau ci-après est un extrait de cette norme pour les cas les plus courants.

## 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.

Élément/Ouvrage	$W_2+W_3$ [caract.]	$W_2+W_3$ [Fréq.]	$W_{max}$ [caract. + QP]	Spécifique [caract.]
Planchers avec cloisons fragiles		L/500 Maxi 15mm		
Planchers, toitures accessibles		L/333		
Toiture non accessible	L/250			
Apparence générale			L/250	

Correspondances des dénominations:

$$W_1 = W_c \text{ (contreflèche)}$$

et donc :

$$W_1 = W_{G0} + W_{G1} + W_{G2} = W_{\Sigma Gi}$$

$$W_1 + W_2 + W_3 = W_{tot} = W_{fin}$$

(non vérifiée)

$$W_2 = W_{\Sigma Gi} \cdot \phi + W_Q \cdot (\psi_2 + \psi_2 \cdot \phi)$$

$$W_{max} = W_{tot} - W_c = W_{net,fin}$$

(caractéristique + quasi-p.)

$$W_3 = W_Q \cdot (1 - \psi_2)$$

et on vérifie :

$$W_2 + W_3 = W_{tot} - W_{\Sigma Gi} = W_{\Sigma Gi} \cdot \phi + W_Q \cdot (1 + \psi_2 \cdot \phi)$$

(caract. + quasi-p.)

$$W_3 = W_Q \cdot (\psi_1 - \psi_2)$$

et on vérifie :

$$W_2 + W_3 = W_{tot, freq} - W_{\Sigma Gi} = W_{\Sigma Gi} \cdot \phi + W_Q \cdot (\psi_1 + \psi_2 \cdot \phi)$$

(fréquente + quasi-p.)

### COMMENTAIRE :

On note que la flèche  $W_2 + W_3$  peut s'apparenter à une flèche nuisible, qui considère cependant que l'intégralité de la flèche instantanée due au poids propre (structure primaire ( $G_0$ ), ENS visé ( $G_1$ ) et ENS postérieurs ( $G_2$ )) ne sera pas vue par l'ENS.

Par analogie avec la conversion du Tableau 2 on note que la limite pour  $W_2 + W_{3, freq}$  en combinaison fréquente correspond en moyenne pour  $W_2 + W_3$  en combinaison caractéristique aux valeurs suivantes :

- L/333 pour  $W_2 + W_{3, freq}$  (fréquente + quasi-p.)  $\Leftrightarrow$  environ L/260 pour  $W_2 + W_3$  en combinaison (caract. + quasi-p.).
- L/500 pour  $W_2 + W_{3, freq}$  (fréquente + quasi-p.)  $\Leftrightarrow$  environ L/390 pour  $W_2 + W_3$  en combinaison (caract. + quasi-p.).

### 4.1.6 APPROCHE SIMILAIRE A L'EUROCODE 2 (BETON ARME) ET FLECHE NUISIBLE

En Espagne, les flèches à vérifier sont inspirées d'une part de l'EN 1992-1-1, d'autre part du concept de flèche nuisible.

Élément/Ouvrage	$W_{inst}$ [caract.]	$W_{fin}$ [QP]	$W_{net,fin}$ [QP]	Spécifique [caract.]
Totale quasi-permanente (idem EC2)		L/300 + $W_c$	L/300	
Éléments fragiles				L/500
Éléments "ordinaires" (?)				L/400
Plafond plaque de plâtre				L/300
Sans plafond plaque de plâtre				L/200
		Flèche active : [Quasi-Perm.] $W_{G0} \cdot \phi + W_{G1} \cdot \phi + W_{G2} \cdot (1 + \phi) + W_Q$		

### COMMENTAIRE :

On note que la limite de flèche  $W_{fin} = W_{tot}$  est donnée sous forme L/300 +  $W_c$  (contreflèche). Comme  $W_{fin} - W_c = W_{net,fin} = W_{max}$ , ceci revient en fait à considérer la vérification  $W_{max} = W_{net,fin} \leq L/300$ . Les deux vérifications sont donc redondantes.

En appliquant la conversion du Tableau 2 on note que la limite pour  $W_{fin} - W_c = W_{net,fin} = W_{tot, freq}$  (en l'absence de contreflèche) en combinaison fréquente correspond en moyenne pour  $W_{tot}$  en combinaison caractéristique + quasi-permanente aux valeurs suivantes :

- L/300 pour  $W_{tot, freq}$  (fréquente)  $\Leftrightarrow$  environ L/235 pour  $W_{tot}$  en combinaison (caract. + quasi-p.).

On remarque que la définition de la flèche nuisible est identique à celle du FD P18-717.

Il est intéressant de noter la limite de flèche nuisible L/300 pour les plafonds en plaque de plâtre.

## 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 Flèches des référentiels béton armé

La comparaison avec les flèches vérifiées pour les ouvrages en béton armé et leurs limites telles que définies dans l'Eurocode 2, son AN, le FD P18-717 ou encore la NF P19-205 (et le CPT 3718\_V2) est particulièrement intéressante dans la mesure où elles forment le référentiel historique sur lequel se sont appuyés nombre de NF DTUs pour fixer les exigences relatives au support des ENS du 2<sup>nd</sup> œuvre.

### 4.2.1 FLECHE TOTALE SOUS COMBINAISON QUASI-PERMANENTE

On rappelle (cf. §2.5.2) que la flèche totale sous charge quasi-permanente notée  $W_{tot,qp}$  au sens de la clause 7.4.1(5) de la NF EN 1992-1-1 peut s'écrire comme suit et est vérifiée pour la limite indiquée :

$$W_{tot,qp} = w_1 + w_2 = w_G \cdot (1 + \phi) + (\psi_2 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot w_Q + \sum (\psi_{2,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot w_{Qi} \leq L/250 \text{ ou } L/500$$

On rappelle en outre que la flèche totale long terme  $W_{fin}$  de la NF EN 1995-1-1 ici notée  $W_{tot}$  utilise la combinaison caractéristique + quasi-permanente et peut s'écrire (cf. §2.3.1) :

$$W_{tot} = w_{inst} + w_{creep} = w_G \cdot (1 + \phi) + (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot w_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot w_{Qi} \quad \text{avec } \phi = k_{def}$$

#### COMMENTAIRE :

En appliquant directement la conversion du Tableau 2 on note que la limite pour  $W_{tot,qp}$  (en l'absence de contreflèche) en combinaison quasi-permanente correspond en moyenne pour  $W_{fin} = W_{tot}$  en combinaison caractéristique + quasi-permanente à la valeur suivante :

- $L/500$  pour  $W_{tot,qp}$  (quasi-p.)  $\Leftrightarrow$  environ  $L/350$  pour  $W_{tot}$  en combinaison (caract. + quasi-p.).

Cette conversion directe utilisant une valeur moyenne retenue du Tableau 2, il est intéressant de compléter la comparaison en reprenant les valeurs minimum, moyenne et maximum observées pour les différentes applications, ce qui donne le tableau suivant :

Flèche long terme $W_{tot}$ (combinaison caractéristique + quasi-permanente)	$\alpha_{2,tot} = \frac{W_{tot,cp}}{W_{tot}}$ (combinaison quasi-permanente)			Flèche équivalente à $W_{tot,qp} \leq L/500$ pour $W_{tot} = W_{fin}$ (combinaison caractéristique + quasi-p.)		
	Minimum	Moyen	Maximum	Minimum	Moyen	Maximum
Plancher (cat. A & B)	0,50	0,69	0,86	L / 250	L / 345	L / 430
Plancher (cat. C & D)	0,73	0,80	0,89	L / 360	L / 400	L / 450
Toiture (neige seule)	0,34	0,71	0,92	L / 165	L / 355	L / 465
Toiture (neige et vent (+))	0,25	0,63	0,90	L / 120	L / 315	L / 450
<b>Retenu pour comparaisons</b>	<b>0,50</b>	<b>0,70</b>	<b>0,90</b>	<b>L / 250</b>	<b>L / 350</b>	<b>L / 450</b>

Comme décrit au §3.4, une limite de flèche de  $L/350$  pour  $W_{tot} = W_{fin}$  correspond en moyenne à une limite de  $L/400$  en application des Règles CB71. On rappelle que la limite de  $L/400$  était celle communément utilisée pour le dimensionnement des ouvrages de plancher et toitures supportant des revêtements et plafonds.

On note donc une réelle équivalence en moyenne entre une limite de  $L/500$  pour  $W_{tot,qp}$  selon NF EN 1992-1-1, une limite de  $L/400$  pour  $W_{tot}$  selon les Règles CB71 et une limite de  $L/350$  pour  $W_{tot} = W_{fin}$  selon NF EN 1995-1-1.

### 4.2.2 FLECHE NUISIBLE (FD P 18-717)

On rappelle la subdivision du poids propre :

- $G_0$  : le poids propre de la structure primaire (par définition antérieur à la liaison de l'élément non structural - ENS)
- $G_1$  : la charge permanente comprenant le poids propre du seul ENS visé
- $G_2$  : la charge permanente comprenant le poids propre de tous les autres ENS dont la liaison intervient ultérieurement

On rappelle que la flèche  $W_{fin} - W_{Ginst}$  visant l'endommagement des éléments de second œuvre (avec  $W_{Ginst}$  la flèche induite par les charges permanentes antérieures à la liaison de l'ENS) définie par l'AN française de la NF EN 1995-1-1, ici notée  $W_{tot,2}$ , utilise la combinaison caractéristique + quasi-permanente et s'écrit (cf. §2.3.1 et 2.3.2) :

$$W_{tot,2} = W_{fin} - W_{Ginst} = w_{(G-Ginst)} + w_G \cdot \phi + (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot w_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot w_{Qi} \quad \text{avec } \phi = k_{def}$$

On rappelle (cf. §2.5.3) qu'une incertitude subsiste quant à la prise en compte ou non de la part quasi-permanente des actions variables dans la flèche due au fluage sous charges permanentes postérieures à la mise en œuvre de l'ENS fragile visé.

On se penchera donc sur les deux hypothèses.

## 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.

### Hypothèse 1 : absence de flèche due au fluage sous la part quasi-permanente des actions variables

On rappelle (cf. §3.5) que la flèche nuisible conventionnelle  $\Delta f_t$  au sens du FD- P18-717 notée ici  $W_{tot,2}$  peut alors s'écrire comme suit et est vérifiée pour la limite indiquée :

$$w_{tot,2,FD} = \phi \cdot w_{G0} + \phi \cdot w_{G1} + (1 + \phi) \cdot w_{G2} + w_Q \leq L / 500 \text{ si } L \leq 5 \text{ m et } 5 \text{ mm} + L/100 \text{ si } L > 5 \text{ m}$$

Il apparait l'écart suivant entre les deux formules :

$$\Delta w_{tot,2} = w_{tot,2,EC5} - w_{tot,2,FD} = w_{G1} + \psi_2 \cdot \phi \cdot w_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot \phi \cdot w_{Qi}$$

L'analyse comparée est détaillée au §3.5.

#### COMMENTAIRE :

*On ne considère ici pas le cas particulier de mise en place tardive des ENS fragiles décrit au §2.5.3, qui aura néanmoins pour effet d'amplifier les différences entre les deux formules.*

*On note à la lecture du Tableau 6 que la limite de flèche  $W_{tot,2,FD}$  de  $L/500$  (selon FD P18-717) correspond en moyenne en Classe de service 1 (cas le plus courant pour des planchers bois) aux valeurs suivantes pour  $W_{tot,2,EC5}$  (selon l'AN de la NF EN 1995-1-1) :*

- *indépendamment de l'ENS visé : environ  $L/415$  en catégorie d'usage A & B et  $L/375$  en catégorie d'usage C & D*
- *pour un plafond posé avant les sols (revêtement et/ou chape) : environ  $L/440$  (cat. A & B) et  $L/390$  (cat. C & D)*
- *pour une chape et/ou un revêtement de sol posé en dernier : environ  $L/400$  (cat. A & B) et  $L/365$  (cat. C & D)*
- *pour une chape à liants hydrauliques posée en dernier : environ  $L/365$  (cat. A & B)*

### Hypothèse 2 : part quasi-permanente des actions variables considérée comme permanente dans G2

Dans ce cas, la flèche nuisible conventionnelle  $\Delta f_t$  au sens du FD- P18-717 notée ici  $W_{tot,2}$  est corrigée de la flèche due au fluage sous la part quasi-permanente des actions variables (en rouge ci-dessous) et peut s'écrire comme suit :

$$w_{tot,2} = (w_{G0} + w_{G1}) \cdot \phi + w_{G2} \cdot (1 + \phi) + w_Q \cdot (1 + \psi_2 \cdot \phi) \leq L / 500 \text{ si } L \leq 5 \text{ m et } 5 \text{ mm} + L/100 \text{ si } L > 5 \text{ m}$$

En reprenant le même déroulé que pour l'hypothèse 1, il apparait alors l'écart suivant entre les deux formules :

$$\Delta w_{tot,2} = w_{tot,2,EC5} - w_{tot,2,FD} = w_{G1}$$

L'analyse comparée est détaillée au §3.5.

#### COMMENTAIRE :

*On ne considère ici pas le cas particulier de mise en place tardive des ENS fragiles décrit au §2.5.3, qui aura néanmoins pour effet d'amplifier les différences entre les deux formules.*

*On note à la lecture du Tableau 7 que la limite de flèche  $W_{tot,2,FD}$  de  $L/500$  (selon FD P18-717) correspond en moyenne en Classe de service 1 (cas le plus courant pour des planchers bois) aux valeurs suivantes pour  $W_{tot,2,EC5}$  (selon l'AN de la NF EN 1995-1-1) :*

- *indépendamment de l'ENS visé : environ  $L/460$  en catégorie d'usage A & B et  $L/475$  en catégorie d'usage C & D*
- *pour un plafond posé avant les sols (revêtement et/ou chape) : environ  $L/485$  (cat. A & B) et  $L/490$  (cat. C & D)*
- *pour une chape et/ou un revêtement de sol posé en dernier : environ  $L/445$  (cat. A & B) et  $L/470$  (cat. C & D)*
- *pour une chape posée en dernier : environ  $L/405$  (cat. A & B)*

### 4.2.3 FLECHE ACTIVE (NF P19-205 ET CPT 3718\_V2)

On rappelle que la flèche  $W_{fin} - W_{Ginst}$  visant l'endommagement des éléments de second œuvre (avec  $W_{Ginst}$  la flèche induite par les charges permanentes antérieures à la liaison de l'ENS) définie par l'AN française de la NF EN 1995-1-1, ici notée  $W_{tot,2}$ , utilise la combinaison caractéristique + quasi-permanente et s'écrit (cf. §2.3.1 et 2.3.2) :

$$w_{tot,2} = w_{fin} - w_{Ginst} = w_{(G-Ginst)} + w_G \cdot \phi + (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot w_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot w_{Qi} \quad \text{avec } \phi = k_{def}$$

On rappelle (cf. §2.6.4) que la flèche active conventionnelle  $f_a$  au sens de al NF P19-205 et du CPT 3718-V2 notée ici  $W_{tot,2}$  peut s'écrire comme suit (ici pour les poutrelles en béton armé) :

$$w_{tot,2} = w_{G0} \cdot (1 - \psi) \cdot \phi + w_{G1} \cdot \phi + w_{G2} \cdot (1 + \phi) + w_Q \cdot \left(1 + \psi_2 \cdot \frac{\phi}{2}\right) + w_r$$

## 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 NF P19-205 définit trois limites de flèche active selon l'ouvrage supporté :

- L/500 pour les cloisons, plafonds et sols fragiles
- L/350 pour les cloisons, plafonds et sols non fragiles
- L/250 pour les éléments en toiture (qui s'applique donc également à une toiture terrasse avec étanchéité)

On néglige dans ce qui suit l'effet du retrait  $W_r$  et on se positionne dans le cas (défavorable) où  $\psi = 0$ .

Il apparait l'écart suivant entre les deux formules :

$$\Delta w_{tot,2} = w_{tot,2,EC5} - w_{tot,FD} = w_{G1} + \psi_2 \cdot \frac{\phi}{2} \cdot w_Q + \sum \psi_{2,i} \cdot \frac{\phi}{2} \cdot w_{Qi}$$

L'analyse comparée est détaillée au §3.6.

### COMMENTAIRE :

*On ne considère ici pas le cas particulier de mise en place tardive des ENS fragiles décrit au §2.6.4, qui aura néanmoins pour effet d'amplifier les différences entre les deux formules.*

*On note à la lecture du Tableau 8 que la limite de flèche  $w_{tot,2,FD}$  de L/500 pour ENS fragiles (selon NF P19-205) correspond en moyenne en Classe de service 1 (cas le plus courant pour des planchers bois) aux valeurs suivantes pour  $w_{tot,2,EC5}$  (selon l'AN de la NF EN 1995-1-1) :*

- indépendamment de l'ENS visé : environ L/440 en catégorie d'usage A & B et L/425 en catégorie d'usage C & D
- pour un plafond posé avant les sols (revêtement et/ou chape) : environ L/460 (cat. A & B) et L/440 (cat. C & D)
- pour une chape et/ou un revêtement de sol posé en dernier : environ L/425 (cat. A & B) et L/415 (cat. C & D)
- pour une chape à liants hydrauliques posée en dernier : environ L/385 (cat. A & B)

*On note à la lecture du Tableau 8 que la limite de flèche  $w_{tot,2,FD}$  de L/350 pour ENS non fragiles (selon NF P19-205) correspond en moyenne en Classe de service 1 (cas le plus courant pour des planchers bois) aux valeurs suivantes pour  $w_{tot,2,EC5}$  (selon l'AN de la NF EN 1995-1-1) :*

- indépendamment de l'ENS visé : environ L/305 en catégorie d'usage A & B et L/300 en catégorie d'usage C & D
- pour un plafond posé avant les sols (revêtement et/ou chape) : environ L/325 (cat. A & B) et L/310 (cat. C & D)
- pour une chape et/ou un revêtement de sol posé en dernier : environ L/295 (cat. A & B) et L/290 (cat. C & D)
- pour une chape sèche posée en dernier : environ L/300 (cat. A & B)

### 4.3 Revue des principaux NF DTU

Cette section passe en revue les principaux NF DTUs en débutant par ceux relatifs à la construction bois, puis en s'attachant à regrouper les NF DTUs par grandes familles d'ouvrages de second œuvre.

Le cas échéant, ces référentiels sont complétés de Règles Professionnelles ou Recommandations Professionnelles RAGE/PACTE.

#### 4.3.1 CONSTRUCTION BOIS

##### NF DTU 31.1

Le NF DTU 31.1 P1-1 (juin 2017) renvoie de manière générale au tableau de l'AN de l'Eurocode 5 et aux NF DTUs et autres référentiels pour la flèche  $W_{tot,2}$ . Il fournit en outre dans son Annexe C (informatif) un tableau qui rappelle les limites de l'AN, et propose les limites suivantes pour  $W_{tot,2}$  en l'absence de spécification dans un autre référentiel :

- $W_{tot,2} \leq L/350$  pour les éléments supportant un plafond en plaque de plâtre ou similaire
- $W_{tot,2} \leq L/400$  pour les éléments supportant un plafond en plâtre projeté sur briquettes ou un carrelage sur chape désolidarisée
- $W_{tot,2} \leq L/500$  pour les éléments supportant une chape humide sans désolidarisation

Il rappelle en outre que pour une console ou un porte-à-faux, la limite ainsi calculée ne peut être inférieure à 5 mm.

##### NF DTU 31.2

Le NF DTU 31.2 P1-1 (mai 2019) renvoie au dimensionnement de la structure bois conformément à l'Eurocode 5 et son AN, mais précise néanmoins une limite complémentaire pour certains éléments :

- $W_{fin} \leq \text{MIN} \{ L/500 ; 10 \text{ mm} \}$  pour les linteaux de menuiserie

##### NF DTU 31.3

Le NF DTU 31.3 P3 (janvier 2012) précise dans son Tableau 4 l'application des limites de flèche de l'Eurocode 5 et son AN aux divers éléments d'une ferme selon diverses configurations :

- $W_{net,fin} \leq L/200$  (idem élément structural selon AN EC5) pour les arbalétriers ( avec L = longueur totale), les entrails et le déplacement vertical d'un nœud de triangulation ;
- $W_{net,fin} \leq \text{MAX} \{ L/100 = 2.L/200 ; 6 \text{ mm} \}$  (idem élément structural selon AN EC5) pour console et appui en flexion
- $W_{net,fin} \leq L/150$  (idem chevron selon AN EC5) pour chaque travée individuelle d'un arbalétrier sur plus de 2 appuis ;
- $W_{inst,Q} \leq L/300$  (idem élément structural selon AN EC5) pour tous les éléments ;

et précise les déplacements limites des nœuds :

- $W_{net,fin} \leq 12 \text{ mm}$  pour le déplacement horizontal d'un nœud de triangulation ;
- $W_{fin} \leq \text{MIN} \{ L/400 ; 12 \text{ mm} \}$  pour qu'une poutre puisse être considérée comme appui de ferme rigide

Il est intéressant de noter que le Tableau C3 rappelle les flèches applicables aux Règles CB71, notamment :

- $W_{net,fin} \leq L/400$  pour les entrails, arbalétriers, pannes, poutres, linteaux et solives de plancher avec plafond et/ou plancher ;
- $W_{net,fin} \leq \text{MIN} \{ L/500 ; 10 \text{ mm} \}$  pour les entrails et solives avec plafond peu flexible (p.ex. plâtre sur briquettes) ou cloisons maçonnées (par ailleurs exclues des NF DTU 31.2 ou 51.3)

#### Reco. Pro. Planchers mixte bois-béton

Les Règles Professionnelles RAGE Isolation des planchers mixtes bois-béton de mars 2015 proposent les limites suivantes :

- $W_{net,fin} \leq L/250$  (issue de l'Eurocode 2 et plus stricte que le L/200 de l'AN EC5) ;
- $W_{inst,Q} \leq L/300$  (idem élément structural selon AN EC5) ;
- $W_{tot,2} \leq L/500$  décrite comme la flèche active ou nuisible (et référant ainsi implicitement au FD P18-717) .

#### COMMENTAIRE :

*Les limites proposées dans le NF DTU 31.1 sont à comparer avec celles des autres référentiels disponibles, qui peuvent différer.*

*Les limites du NF DTU 31.3 sont globalement celles définies dans l'AN de la NF EN 1995-1-1. On remarque que ce NF DTU a pris en compte la différence de calcul du fluage entre les Règles CB71 et la NF EN 1995-1-1 en adaptant les limites correspondantes.*

*Les limites proposées dans les Reco. Pro. Planchers mixte bois-béton sont cohérentes avec la pratique des ATec correspondants.*

## 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.

### 4.3.2 CLOISONS, PLAFONDS ET DOUBLAGES

On rappelle que les NF DTUs suivants ont annulé et abrogé les NF DTU 25.221, 25.222, 25.232 de mai 1993.

Les NF DTUs de la série 25 stipulent de manière générale une limite de flèche des parois support de L/500, avec un certain nombre de nuances décrites dans le tableau ci-dessous, et sans que soit précisé d'une quelconque manière à quelle flèche (totale, nuisible, ...) il est fait allusion.

NF DTU	Clause	Ouvrage	Flèche limite	Remarque
Cloisons, plafonds, doublage et habillage en plaques ou carreaux de plâtre				
25.31	§5.4 et §6.4.4.2	Ouvrages en carreaux de plâtre	L/500 si L ≤ 5 m 5mm + L/1000 au-delà	Correspond aux limites de flèche nuisible du FD P18-717
25.41	§5.4 (note)	Ouvrages en plaques de plâtre	L/500	Ces limites sont mentionnées dans une note et ne concernent que les cloisons
25.42	§4.4 (note)	Doublage et habillage en complexes et sandwichs isolant et plaque de plâtre		
Plafonds avec enduit plâtre ou staff				
25.1	§6.2.1	Enduit plâtre intérieur : plafond sur support d'enduit tel qu'un lattis bois	L/500	Flèche sous poids propre <sup>(*)</sup> et charge ponctuelle de 100 daN
25.231	§6	Plafonds suspendus en éléments en terre cuite enduits		
25.51	§5 .3.2.1	Ouvrages en staff traditionnel : plafond		

(\*) Poids propre s'entend ici comme le poids propre du plafond

#### COMMENTAIRE :

La différence notable de traitement entre les ouvrages en carreaux de plâtre (prescription et limite relative plus sévère pour L > 5 m) et les ouvrages à base de plaques de plâtre (note qui mentionne une limite fixe par l'expérience acquise) conduire à un distinguo entre cloisons dites « fragiles » (carreaux de plâtre) et cloisons pouvant être considérées comme « non fragiles » (plaques de plâtre).

On note par ailleurs l'absence de disposition pour les plafonds à base de plaques de plâtre, alors que les plafonds avec enduit ou en staff, communément considérés comme « fragiles » font l'objet d'exigences relatives à la flèche de leur support.

Il paraît indéniable (notamment de par la cohérence évidente avec le FD P18-717) que la flèche concernée est la flèche nuisible et correspond ainsi à  $W_{tot,2}$ .

### 4.3.3 COUVERTURE

Les NF DTUs de la série 40 renvoient de manière générale pour la conception de la structure aux référentiels de conception de cette dernière (NF EN 1995-1-1 + AN, Règles CB71, NF DTUs de la série 31), et ne précisent de limites de flèches que pour les éléments non structuraux (secondaires) formant support direct de la couverture (litage, volige, planche, ...). Ces dispositions sont rappelées dans le tableau ci-après.

NF DTU	Clause	Ouvrage	Flèche limite	Remarque
Couverture de petits éléments				
40.11	§1 et C.1.1	Ardoises naturelles	L/300 (**) (pp <sup>(*)</sup> + neige)	Structure : EC5 + AN
40.13	§1 et C.1	Ardoises fibres-ciment		Structure : règles en vigueur
40.14	§1 et C.1.1	Bardeaux bitumés	(aucune)	(aucune disposition)
40.21 40.211	§5.3.1 et C.1.1	Tuiles terre cuite à - glissement/emboitement longitudinal - à emboitement et pureau plat	L/300 (**) (pp <sup>(*)</sup> + neige ; personnel)	Structure : EC5 + AN
40.22	§1.2	Tuiles terre cuite canal		
40.23	§1	Tuiles terre cuite plates	(aucune)	Structure : CB71 ; DTU 31.1
40.24 40.241	§1 et §3.1.1	Tuiles béton - à glissement/emboitement - planes à glissement/emboitement	L/300 (**) (pp <sup>(*)</sup> + neige)	Structure : CB71 ; DTU 31.2
40.25	§1.1	Tuiles béton plates		
Couverture en plaques				
40.3		Plaques nervurées aluminium	(aucune)	Ni renvoi aux référentiels de structure, ni dispositions relatives à la flèche du support.
40.35		Plaques nervurées tôles d'acier revêtues		
40.37		Plaques ondulées fibres-ciment		

## 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.

Couverture en feuilles et longues feuilles ou similaires				
40.41	§1 et C	Feuilles et longues feuilles zinc	L/300 (**) (pp <sup>(*)</sup> + neige)	Structure : CB71 ; DTU 31.1/31.3
40.44		Feuilles et longues feuilles inox		
40.45	§1.3	Feuilles et longues feuilles cuivre	(aucune)	Structure : CB71 ; DTU 31.1
40.46	§1	Plomb sur support continu		Structure : CB71 ; DTU 31.1/31.3

(\*) Poids propre de la couverture

(\*\*) Flèche des éléments de support direct de la couverture (litesaux, volige, planches, ...)

### COMMENTAIRE :

La différence entre les dispositions de ces divers NF DTU tient principalement à des dates de dernière révision qui peuvent différer fortement. Ceux mentionnant l'EC5 + NA et la limite de L/300 pour la flèche du support direct sont les plus récents.

Il convient donc de considérer de manière générale que la structure primaire est dimensionnée selon la NF EN 1995-1-1 et son AN (et les limites de flèche correspondantes), et que la flèche sous poids propre et neige (ou sous poids propre et charge de personnel) des litesaux, volige ou planches support de couverture doit rester inférieure à L/300 pour l'ensemble des couvertures susvisées.

### 4.3.4 ETANCHEITE

On rappelle que, dans l'esprit des référentiels des ouvrages d'étanchéité, l'élément porteur correspond au support direct de l'étanchéité, donc usuellement les planches, lames ou panneaux à base de bois (a priori non structuraux) recevant l'étanchéité.

Le NF DTU 43.4 (§6.2.1.2.1, §6.2.2.2.1, §6.2.2.2.2) précise des portées maximales pour les éléments porteurs tenant compte d'une flèche instantanée de L/400 ou différée de L/200, que l'on peut traduire par :

- $W_{net,fin} \leq L/200$  ;
- $W_{inst,Q} \leq L/400$ .

Les Recommandations Professionnelles RAGE *Isolation thermique des sous-faces des toitures chaudes à élément porteur bois* (juillet 2014) et les Recommandations Professionnelles PACTE *Toitures-terrasses accessibles aux piétons avec élément porteur en bois et panneaux à base de bois avec revêtement d'étanchéité* (mai 2019) viennent compléter le NF DTU 43.4 et renvoient pour la structure porteuse (support des « éléments porteurs ») au dimensionnement selon la NF EN 1995-1-1 et son AN, fixant les valeurs limites de flèche à l'intersection de la colonne « Bâtiments courants » et de la ligne « Eléments structuraux du Tableau 7.2 de l'AN, soit :

- $W_{net,fin} \leq L/200$  (et  $W_{fin} \leq L/125$ ) ;
- $W_{inst,Q} \leq L/300$ .

### COMMENTAIRE :

Le NF DTU 43.4 est en cours de révision à la date de rédaction du présent rapport. Les éventuelles évolutions des limites de flèche ne sont pas connues, mais compte-tenu de la proximité (2019) des Reco. Pro. PACTE, il est probable que les dispositions soient proches de ce référentiel plus récent.

Il convient de noter que des dispositions complémentaires ont été définies pour l'étanchéité de toitures terrasses sur élément porteur constitué de panneaux structuraux massifs bois ou de plancher à caisson en bois sous ATec ou DTA (voir plus loin CPT 3814).

### 4.3.5 FAÇADE – BARDAGES

Le NF DTU 41.2 (bardage bois) ne présente aucune disposition relative aux flèches du support.

Les différentes parties du NF DTU 45.4 traitant des systèmes d'ITE en bardage rapporté avec lame d'air ventilée ne visent que le support maçonnerie ou béton. Les ATec visant la mise en œuvre sur COB ne présentent aucune disposition relative aux flèches du support.

Le NF DTU 55.2 traitant des façades en pierre mince attachée ne vise lui aussi que le support béton et la pose par le biais d'une ossature métallique (dont la flèche est limitée à L/400).

Le NF DTU 33.1 traitant des façades rideau ne vise pas le support bois. Il est néanmoins pertinent de rappeler qu'il précise au §5.1.5 que les déplacements maximaux que devront pouvoir reprendre les façades rideaux posées et réglées sont de 5 mm (façades cadres) et 2 mm (façades grilles). Cette exigence relative à la structure porteuse est fréquemment retenue comme exigence pour les Façades à ossature bois non porteuse (FOB), et s'appliquerait également à une structure primaire bois.

### COMMENTAIRE :

Les référentiels de façade ne présentent pas de dispositions spécifiques à la structure bois.

On retiendra la limite de flèche de 5 mm (qui s'entend comme une flèche  $W_{tot,2}$ ) pour les façades rideau, potentiellement applicable à la FOB également selon le revêtement de façade.

Les systèmes d'ETICS relèvent de leur ATec et du CPT 3729 (cf. §4.4.4).



## 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.

### 4.3.6 CHAPES A BASE DE LIANTS HYDRAULIQUES

On rappelle que l'on distingue pour les chapes à base de liants hydrauliques :

- la pose adhérente (contact direct entre la chape et le support),
- la pose désolidarisée (existence d'une couche mince interposée entre la chape et son support, p.ex. film polyéthylène ou sous-couche acoustique mince),
- et la pose flottante (interposition d'un isolant ou d'un ravaillage entre la chape et son support).

Le NF DTU 26.2 traite exclusivement des chapes (adhérentes, désolidarisées ou flottantes) sur support béton et présente donc aucune disposition relative à la flèche du support.

Les Recommandations Professionnelles RAGE Chapes et dalles sur plancher bois (juillet 2013) visent les chapes en pose désolidarisée ou flottante sur support bois conformes au NF DT 51.3 ou en panneaux structuraux massifs bois (CLT) et proposent, en l'absence d'exigence dans les documents du marché de limiter la flèche (dénommée ici active) à :

- $W_{tot,2} \leq L/500$

#### COMMENTAIRE :

*L'absence de dispositions relatives à la flèche du support béton dans le NF DTU 26.2 doit être interprétée comme une mise en application implicite du critère de flèche nuisible du FD P18-717.*

*On notera que la limite de flèche active des Reco. Pro. diffère quelque peu de la limite fixée usuellement par les ATec et DTA des procédés de plancher à base de bois et notamment ceux des panneaux CLT, ainsi que de la limite telle que définie au FD P18-717.*

*Les systèmes de chape sèche relèvent de l'ATec ou DTA (cf. §4.4.5)*

### 4.3.7 REVETEMENTS DE SOLS

Le NF DTU 51.3 est à considérer à part des autres NF DTUs de la série 51, puisqu'il sert de référentiel aux supports des revêtements visés par les NF DTU 51.1, 51.2 et 51.11. Il renvoie au dimensionnement de la structure porteuse selon NF EN 1995-1-1 et son AN ou les Règles CB71. Le NF DTU 51.4 visant les platelages bois est également particulier, mais renvoie lui aussi pour la structure porteuse à la NF EN 1995-1-1 et son AN.

Les NF DTUs visant les sols céramiques ou pierre naturelle en pose scellée ou collé ne visent que les supports béton ou chape à base de liants hydraulique, ce qui renvoie par effet de ricochet à la flèche nuisible du FD P18-717.

La révision récente du NF DTU 53.12, tronc commun aux NF DTU de la série 53 visant les sols souples, est notable puisqu'elle introduit une double exigence sur la structure porteuse bois, avec une vérification de flèche  $W_{tot,2}$  pour la structure porteuse mais aussi pour le panneau à base de bois support de revêtement.

L'ensemble de ces dispositions est rappelé de manière synthétique dans le tableau suivant.

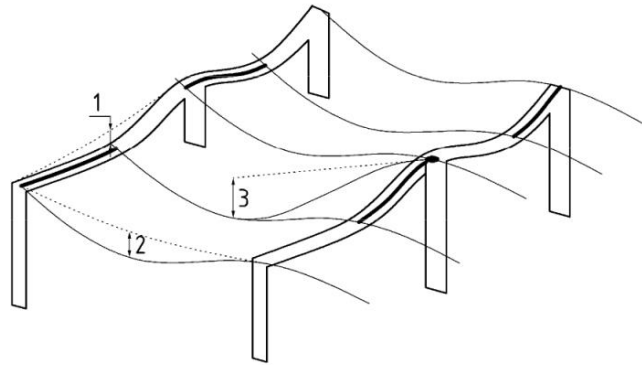
NF DTU	Clause	Ouvrage	Flèche limite	Remarque
<b>Revetements à base de bois</b>				
51.3	§5.1.2.1, 5.3.2.1, 5.4.2.1	Plancher en bois ou panneaux à base de bois	(cf. structure)	Structure : EC5 + NA ; CB71
51.4	5.1.2 ; A.5	Platelages bois	$W_{fin} \leq L/400$ (lambourdes) $W_{fin} \leq 3$ ou 5 mm (type 2 ou 1)	Structure : EC5 + NA ; CB71 Type 1 = résidentiel ; 2 = bureau
51.1	6.2.2.1, 6.2.2.3	Parquet cloué		NF DTU 51.3, 31.1, 31.2, 31.3
51.2	5.3.1, 5.3.2	Parquet collé		NF DTU 51.3 et référentiels
51.11	6.3.1, 6.3.2	Parquet flottant		NF DTU 51.3
<b>Revetements céramiques ou pierre naturelle</b>				
52.1	6.3.1	Sols scellés	$L/500$ si $L \leq 5$ m $5\text{mm} + L/1000$ au-delà	Support béton ou chape NF DTU 26.2 : renvoi au FD P18-717
52.2P1-3	6.2.1	Pose collée – sols		
<b>Revetements souples</b>				
53.12	5.1	Préparation du support et sols souples	$L/400$ si $L \leq 4$ m $5\text{mm} + L/800$ au-delà	Exigence sur le panneau <sup>(*)</sup> et sur la structure (voir Fig. 8ci-dessous)
<b>Sols coulés en résine</b>				
54.1		Sols coulés en résine	(aucune)	Uniquement support béton ou chape

(\*) Flèche du panneau  $W_{tot,2} \leq mn \{ L/400 ; 2 \text{ mm} \}$

## 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.

Fig. 8 Figure du NF DTU 53.12 (sols souples) illustrant les flèches à vérifier pour la structure et le panneau support



### Légende

- 1  $w_{2s}$  – flèche de structure
- 2  $w_{2p}$  – flèche de panneau
- 3  $w_{2s} + w_{2p}$

NOTE 3 La déformation des panneaux est exagérée pour une meilleure compréhension du schéma.

### COMMENTAIRE :

Les flèches limites des NF DTU 52.1 et 52.2 pour les sols céramiques ou pierre naturelle en pose scellée ou collée sur chape étant plus restrictive pour les portées  $L > 5$  m (cf. FD P18-717) que celles des Reco. Pro RAGE Chapes et dalles sur plancher bois, elles s'imposent de facto pour ces ouvrages.

La limite de flèche pour les sols souples est une évolution notable, qui vient ajouter une catégorie de limites pour les planchers bois. Cette évolution est avant tout motivée par des problématiques esthétiques au droit des joints de panneaux de plancher pour les planchers à solivage, notamment au droit des appuis de panneau sur les solives (rotation aux appuis).

## 4.4 Dispositions des ATec, DTA et Cahiers du CSTB (CPT)

Il est intéressant de considérer également les limites usuellement définies par les GS 3.1 (plancher), 3.2 (mur) et 3.3 (structures tridimensionnelles) voire 5.1 (couverture) ou 5.2 (étanchéité) dans les Avis Techniques (ATec), Documents Techniques d'Application (DTA) et CPT (Cahier de Prescriptions Techniques ou Cahier du CSTB) pour les procédés structuraux à base de bois, et qui sont souvent méconnues.

### 4.4.1 CAHIER DU CSTB 3768 (POUTRES EN I)

Le Cahier 3768 de janvier 2018 dit « CPT poutres en I » vise les planchers et toitures en poutres en I à base de bois et sert de support aux ATec et DTA de cette famille de produit.

Il renvoie pour  $W_{inst(Q)}$ ,  $W_{fin}$  et  $W_{net,fin}$  aux valeurs limites de l'AN Française dans la ligne « éléments structuraux » et précise en outre ce qui suit concernant la flèche  $W_{tot,2}$  (appelée  $W_{d2,fin}$  dans le Cahier 3768).

En l'absence d'une limite de déformation définie pour  $W_{d2,fin}$  (aussi appelée  $W_2$ ) dans les référentiels concernés (DTU, Avis Techniques, etc.), calibrée pour un calcul selon la NF EN 1995-1-1, les limites suivantes sont recommandées :

- L/250 en présence d'un plafond suspendu, de cloisons légères, de revêtement de sol souple (p.ex. moquette, sol pvc,...) ou désolidarisé (p.ex. parquet flottant, etc.) ou d'éléments de couverture de petite dimension ;
- L/350 en présence d'un revêtement de sol rigide (p.ex. carrelage, etc.) sans couche de désolidarisation ;
- L/350 et 12mm maximum au-dessus d'un linteau de porte ou de fenêtre (en rappelant que dans ce cas, le NF DTU 31.2 limite la déformation totale  $W_{fin}$  à L/500 et 10 mm maximum) ;
- L/500 en présence d'une chape humide sans couche de désolidarisation.

#### COMMENTAIRE :

*Le principe sous-jacent est de considérer (conformément à l'AN Française de l'Eurocode 5) que les limites de déformation des supports qui peuvent être définies dans les référentiels des ouvrages de second œuvre tels que les NF DTUs, Recommandations Professionnelles, ATec et DTA, ... sont à vérifier avec  $W_{tot,2}$ .*

*Ces valeurs ont été définies sur la base de comparaisons similaires à celles décrites au §3 complétée d'un retour d'expérience et de comparaisons avec les pratiques d'autres pays Européens. Elles ont été suivies de jurisprudences des GS 3.1 et 3.3 postérieures reprenant dans les DTA les limites de flèche active.*

*Ces limites sont donc à manier avec précaution. Le Cahier 3768 sera amené à être révisé dans un futur proche.*

### 4.4.2 CAHIER DU CSTB 3802\_P2 (PANNEAUX STRUCTURAUX MASSIFS BOIS)

Le Cahier 3802\_P2 de janvier 2018 dit « CPT CLT » vise les planchers et murs en panneaux massifs structuraux bois (CLT ou panneaux cloués) et sert de support aux ATec et DTA de cette famille de produit.

Pour les flèches définies dans la NF EN 1995-1-1 et son AN il fixe les limites suivantes :

- Pour les murs :
  - H/300 pour la flèche  $W_{inst(Q)}$  dans tous les cas ;
  - H/500 dans le plan et hors plan pour les éléments supportant un revêtement de façade ou ayant une fonction de contreventement, et ce quelle que soit la combinaison considérée.
- Pour les planchers :
  - L/300 pour  $W_{inst(Q)}$  ;
  - L/250 pour  $W_{net,fin} = W_{fin} - W_c$  ;

Pour les planchers, il reprend en outre le principe de flèche active décrit au §2.6.4 et stipule qu'en l'absence de précision fournie par la NF EN 1995-1-1 ou son Annexe Nationale il convient de limiter la flèche active  $W_{tot,2}$  (appelée  $W_{2,fin}$  dans le Cahier 3768 et dénommée  $f_a$  dans la NF P19-205) comme suit :

- Pour les planchers supports de revêtements de sols rigides <sup>(1)</sup> :
  - soit la valeur fixée par le NF DTU correspondant si elle est disponible ;
  - soit L/500 pour  $L \leq 5,0$  m ou 5 mm + L/1000 pour  $L > 5,0$  m (dispositions du FD P18 717:2021-08) <sup>(2)</sup>.
- Pour les planchers n'ayant pas à supporter des revêtements de sols rigides et pour les éléments de toiture support d'étanchéité, la flèche active ne doit pas dépasser :
  - soit la valeur fixée par le NF DTU correspondant si elle est disponible;
  - soit L/350 pour  $L \leq 7,0$  m ou 10 mm + L/700 pour  $L > 7,0$  m.

## 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.

### COMMENTAIRE :

La limite de  $H/500$  pour les murs supportant un revêtement de façade peut paraître sévère de prime abord : le GS 3.3 a considéré peu probable que les murs supports de revêtement de façade en panneaux massifs structuraux bois ne soient pas à fonction de contreventement, laquelle en vertu du § 9.2.5.3(2) de l'Eurocode 5 pour les systèmes de contreventement repris par l'AN Française fixe une limite à  $H/500$ .

<sup>(1)</sup> Le domaine d'emploi des ATec et DTA des panneaux massifs structuraux bois exclut que les planchers puissent être support de cloisons maçonnées dites « fragiles ». Le terme « fragile » est habituellement utilisé par le GS 3.1 ou 3.3 pour les revêtements de sol également. Le choix a été fait d'utiliser le terme « rigide », les cloisons maçonnées étant exclues. Pour les procédés à même de supporter des cloisons fragiles et/ou revêtement de sol fragiles (p.ex. plancher mixte bois-béton), les ATec du GS 3.1 fixent la même limite de  $L/500$ , ramenée à  $L/350$  en l'absence cloisons ou revêtements de sol fragiles.

<sup>(2)</sup> Les valeurs indiquées sont celles de la version d'août 2021 du FD P18-717. Le Cahier 3802 ayant été rédigé antérieurement, il reprend la limite de la version de décembre 2013 du FD P18-717 :  $L/500$  pour  $L \leq 7,0$  m ou  $7$  mm +  $L/1000$  pour  $L > 7,0$  m.

On note que pour les valeurs limites retenues sont en fait un mélange :

- de l'approche du FD P18-717 pour la flèche nuisible avec une limite relative qui devient plus sévère au-delà d'une certaine portée ;
- des valeurs limites de la flèche active de la NF P19-205 pour les éléments fragiles ou non fragiles, lesquelles sont des limites relatives en  $L/K$  qui ne sont pas évolutives à partir d'un palier de portée.

Le Cahier 3802 comporte également une disposition visant à limiter la flèche finale des porte-à-faux de plancher  $W_{fin}$  à  $L/500$ . La jurisprudence récente du GS 3.3 a revu cette disposition pour revenir à une limite de  $2.L / K$  lorsque la portée courante est limitée à  $L/K$ , sans pour autant que la limite qui en résulte soit inférieure à  $5$  mm ou excède les limites de déformation des NF DTUs.

#### 4.4.3 CAHIER DU CSTB 3814 (SUPPORT D'ETANCHEITE)

Le Cahier 3814 de novembre 2019 dit « CPT Etanchéité sur plancher bois » vise l'étanchéité de toitures terrasses sur élément porteur constitué de panneaux structuraux massifs bois ou de plancher à caisson en bois (et faisant l'objet d'un ATec ou DTA). Il sert de support aux ATec et DTA de ces deux familles de produit lorsque l'utilisation comme support d'étanchéité est revendiquée.

Il fixe les limites suivantes pour  $W_{net,fin}$  en fonction des pentes nominales minimales :

- $L/250$  pour une pente de 3% minimale
- $L/400$  pour une pente de 1,8% minimale (hors toitures végétalisées)
- $L/500$  pour une pente de 1,6% minimale (hors toitures végétalisées)

### COMMENTAIRE :

On considère uniquement la flèche  $W_{net,fin}$  car l'objectif est de limiter le risque de contrepenne du plan d'étanchéité du fait de la flèche à long terme, et c'est donc la flèche par rapport à la ligne théorique reliant les appuis qui importe. Les valeurs ont ensuite été définies sur la base d'une analyse géométrique en s'appuyant sur les limites de flèches « usuelles » pour définir des pentes minimales.

Dans les ATec et DTA de procédés de plancher mixte bois-béton visant l'utilisation en support d'étanchéité les GS 3.1 et 5.2 ont pour habitudes de limiter la flèche  $W_{net,fin}$  (appelée dans ces référentiels flèche totale) à  $L/350$ .

#### 4.4.4 CAHIER DU CSTB 3729 (ETICS SUR COB)

Le Cahier du CSTB 3729 (décembre 2014) dit « ETICS sur COB », vise la mise en œuvre en œuvre de systèmes d'isolation thermique par l'extérieur par enduit sur isolant appliqués sur parois de COB conforme au NF DTU 31.2, et fixe pour la structure un déplacement horizontal maximal dans le plan et hors plan n'excédant pas  $H/500$  (avec  $H$  la hauteur d'étage).

### COMMENTAIRE :

Cette disposition visant à limiter le déplacement différentiel entre points de fixation, elle s'applique par extension aux linteaux dont la flèche doit ainsi être également limitée à  $L/500$ .

Il est important de noter que le Cahier 3729 ne porte à ce jour que sur les murs porteurs et ne s'applique pas à la FOB.

#### 4.4.5 ATEC ET DTA DE CHAPE SECHE

Les quatre procédés bénéficiant d'un ATec ou DTA en cours de validité au moment de la rédaction du présent rapport visent la mise en œuvre de ces systèmes sur support bois (conforme au NF DTU 51.3, et dans un cas sur panneaux structuraux massifs bois) dont la flèche (de nature non précisée, mais que l'on assimilera à la  $W_{tot,2}$ ) est limitée à  $L/400$

### COMMENTAIRE :

Cette limitation est a priori directement issue des pratiques courantes lors de l'application des Règles CB71 en plancher, les premiers ATec de cette famille datant de 2011.

## 4.5 Référentiels complémentaires

Certains référentiels plus ou moins récents présentent également un intérêt dans les vérifications du critère de service, notamment pour ce qui est des déformations des éléments de murs porteurs (COB) ou des éléments de FOB non porteuse.

### 4.5.1 DEFORMATIONS DES ELEMENTS DE MUR DANS LE PLAN

Conformément au §9.2.5.3(2) de la NF EN 1995-1-1 et son Annexe Nationale, il convient de vérifier que la déformation horizontale maximale dans le plan des éléments de contreventement ne dépasse pas 1/500 de la hauteur d'étage (et donc de la hauteur totale du bâtiment).

La déformation horizontale en tête d'un diaphragme de mur soumis à un effort de contreventement peut être déterminée comme suit (méthode du Guide AQCEN – Ossature bois) :

$$W_{tot} = W_p + W_{anc}$$

où :  $W_{tot}$  déplacement horizontal total en tête de mur

$W_{anc}$  déplacement lié à la raideur des ancrages

$W_p = 1/K_{ser,p}$  déplacement lié à la raideur en contreventement du mur ossature bois seul  $K_{ser,p}$  :

$$K_{ser,p} = \left[ \frac{2}{\frac{K_{ser,f}}{s} \cdot \left( b_p + \frac{h}{3} \right) + \frac{K_{ser,f}}{s'} \cdot \frac{h}{6}} + \frac{2 \cdot h^2}{\frac{K_{ser,f}}{s} \cdot b_p^2 \cdot \left( h + \frac{b_p}{3} \right)} \right]^{-1}$$

avec :  $b_p$  largeur du panneau

$h$  hauteur du panneau

$s$  espacement des fixations du voile travaillant en périphérie (150 mm maxi)

$s'$  espacement des fixations du voile travaillant sur le montant intermédiaire (300 mm maxi)

$K_{ser,f}$  module de glissement de la fixation du voile dans le montant

### 4.5.2 DEFORMATIONS DES ELEMENTS DE FOB

Si le NF DTU 31.4 renvoie aux vérifications selon la NF EN 1995-1-1 et son AN et ne fixe pas d'exigences vis-à-vis de la structure formant son support, les diverses ATEx de cas A et B qui ont été instruites dans les 18 mois précédant la rédaction du présent rapport ainsi que l'émergence de Guides d'aide à la conception (ETICS et bardage en terre cuite) dits « Guides JOP », élaborés à l'occasion de la conception du Village des Athlètes (JO Paris 2024) ont clairement indiqué des tendances et exigences quant à la déformabilité de la FOB elle-même, et par conséquent celle de sa structure support.

Le sujet est d'autant plus important qu'aucun référentiel des ouvrages de façade (NF DTU, Règles Professionnelles, ...) à la date de rédaction du présent rapport ne vise la mise en œuvre des procédés de bardage ou ETICS sur FOB.

Le sujet étant par nature évolutif, il est difficile de fixer des exigences définitives. Les dispositions suivantes restent des points d'orientation importants qui doivent permettre au concepteur une première appréhension des problématiques à étudier :

- La déformation différentielle entre deux montants d'ossature successifs ne doit pas excéder la déformabilité admissible du bardage ou de l'ETICS : à cet effet une limite de 3 mm est jugée adaptée dans la majorité des cas, sauf dans le cas des bardeaux en terre cuite (grand format), où une limite de 1 mm est prescrite sauf démonstration expérimentale contraire.
- L'élément de FOB étant solidaire de la structure porteuse, ces déformations différentielles sont intimement liées à la disposition des éléments de FOB et de ses ferrures d'appui par rapport aux appuis et zone fléchies de la structure. Il en résulte que la limitation de déformabilité entre montants voisins implique une limitation de la flèche  $W_{tot,2}$  de la structure.
- Un rapide calcul montre aisément que limiter  $W_{tot,2}$  à L/500 pour  $L \leq 5$  m et 5 mm + L/1000 au-delà est une exigence minimale qui peut dans certains cas ne pas être suffisante.
- Il n'est pas rare que l'on applique le critère du NF DTU 33.1 (cf. §4.3.5) qui équivaut à  $W_{tot,2} \leq 5$  mm.

## 5 CRITERE DE FLECHE – SYNTHESE

La synthèse présente les enseignements clés de chacune des parties précédentes, assortis le cas échéant de commentaires ou recommandations pour aller plus loin.

Dans un second temps, on présente une proposition de rationalisation dont l'objectif est de guider le concepteur en synthétisant en un seul et même tableau des critères permettant de gérer la large majorité des cas courants.

### 5.1 Enseignements relatifs aux définitions comparées des flèches

#### 5.1.1 FLECHE SPECIFIQUE AU 2<sup>ND</sup> ŒUVRE

L'Eurocode 0 (NF EN 1990 : 2003) distingue :

- Les déformations qui affectent ou peuvent engendrer des dommages susceptibles de nuire à la fonction de la structure ;
- Les déformations qui affectent ou peuvent engendrer des dommages susceptibles de nuire à l'aspect de l'ouvrage ;
- Les déformations qui peuvent des dommages susceptibles de nuire à la durabilité de l'ouvrage.

Les déformations affectant la durabilité et la fonction de la structure conduisent en général aux critères de flèche portant sur la flèche totale, instantanée ou à long terme.

- ⇒ L'AN française définit à cet effet les flèches limites  $U_{lim,1}$  et  $W_{lim,1}$  et renvoie pour ce faire aux limites de flèche des Eurocodes 2 à 6 et 9 et de leur AN respective.

Les déformations affectant l'aspect ou le bon comportement des ouvrages de second œuvre conduisent à considérer la seule flèche « vue » par les éléments (usuellement de second œuvre) concernés, en tenant compte de l'historique de chargement, et à long terme. Ce principe est posé par le §A1.4.3(3) de l'Eurocode 0.

- ⇒ L'AN française définit à cet effet  $U_{lim,2}$  et  $W_{lim,2}$  sans faire de renvoi explicite à un autre référentiel.
- ⇒ Il apparaît cependant logique que les limites de flèche définies dans les référentiels de 2<sup>nd</sup> œuvre (NF DTUs, Règles et Recommandations Professionnelles, ATec et DTA, Cahiers du CSTB, ...) relèvent au premier chef de ces limites  $U_{lim,2}$  et  $W_{lim,2}$  sauf mention contraire explicite.

Pour une approche fine de ces déformations, il convient donc de calculer une flèche totale à long terme (effets différés compris) « vues » par les éléments de 2<sup>nd</sup> œuvre (ENS) considérés et tenant compte de l'historique de chargement, que l'on dénomme (par convention)  $W_{tot,2}$  dans le présent rapport.

Il apparaît que ni l'Eurocode 0 ni les Eurocodes matériaux ne définissent les modalités de calcul d'une telle flèche.

Au mieux l'approche de la prEN 1990 : 2020 laisse entrevoir avec la flèche  $W_2 + W_3$  une approche allant dans cette direction, sans pour autant que la temporalité fine de l'empilement des charges et des effets de long terme ne soient pris en compte.

Il existe plusieurs définitions d'une flèche de type  $W_{tot,2}$  dans les référentiels français :

(note : les présentations sont uniformisées pour en faciliter la comparaison, selon la convention décrite au §2)

- Flèche  $W_{tot,2}$  visant l'endommagement des éléments de second œuvre de l'AN de la NF EN 1995-1-1 (§2.3.2):

$$W_{tot,2,EC5} = \phi \cdot W_{G0} + (1 + \phi) \cdot W_{G1} + (1 + \phi) \cdot W_{G2} + (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi} = W_{tot} - W_{G0}$$

- Flèche nuisible  $\Delta f_t$  du FD P18-717 (document d'application de la NF EN 1992-1-1) (§2.5.3) :

$$W_{tot,2,FD} = (1 - \psi) \cdot \phi \cdot W_{G0} + \phi \cdot W_{G1} + (1 + \phi) \cdot W_{G2} + W_Q + \sum \psi_{0,i} \cdot W_{Qi}$$

où  $0 \leq \psi = \beta_c(t, t_0) \leq 1$  dépend du temps écoulé entre le décoffrage et la liaison de l'ENS fragile

(rappel : une incertitude subsiste quant à la prise en compte du fluage de la part quasi-permanente des actions variables)

- Flèche active  $f_a$  de la NF P19-205 (et du Cahier 3718\_V2) pour les planchers nervurés à poutrelles en béton (§2.6.4) :

$$W_{tot,2,NF} = (1 - \psi) \cdot \phi \cdot W_{G0} + \phi \cdot W_{G1} + (1 + \phi) \cdot W_{G2} + \left(1 + \psi_2 \cdot \frac{\phi}{2}\right) \cdot W_Q + \sum \left(\psi_{0,i} + \psi_2 \cdot \frac{\phi}{2}\right) \cdot W_{Q,i} + W_r - W_p$$

où  $\psi = \min\{0,5 ; t / 90\}$  dépend du temps écoulé entre le retrait des étais et la liaison de l'ENS fragile

(note :  $W_r$  est l'accroissement de flèche du au retrait ;  $W_p$  est la réduction de flèche due à la précontrainte éventuelle)

#### COMMENTAIRE :

La flèche  $W_{tot,2}$  est donc bien définie. Par contre la disparité de définition conduit par convention à des écarts performanciers qu'il conviendrait de gommer.

## 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.

On note notamment que :

- ⇒ Dans les deux référentiels béton, la flèche instantanée due au poids propre de l'ENS fragile vérifié est considérée (par convention) comme sans influence sur celui-ci pour le calcul de  $W_{tot,2}$ . Cette hypothèse trouve son origine dans le temps de prise du mortier (ou de la colle) des cloisons maçonnées (ou carreaux de plâtre) ou encore de la chape ciment.
- ⇒ La définition conventionnelle de la flèche nuisible ne comprend a priori (cf. §5.1.2) pas d'effet du fluage sous la part quasi-permanente des actions variables.
- ⇒ La définition conventionnelle de la flèche active prend en compte l'effet du fluage sous la part quasi-permanente des actions variables mais avec un coefficient de fluage divisé par 2.
- ⇒ Dans les deux référentiels béton, il est admis de déduire la part de flèche due au fluage déjà réalisée au moment de la liaison de l'ENS visé par la vérification.

Les deux concepts (non influence du poids propre de l'ENS visé ; prise en compte d'une part de fluage déjà réalisé au moment de la liaison de l'ENS visé) sont par principe extensible à la construction bois. Le sujet du fluage nécessite cependant une étude attentionnée.

### 5.1.2 PRISE EN COMPTE DE LA PART QUASI-PERMANENTE DES ACTIONS VARIABLES DANS LES REFERENTIELS BETON

Il apparaît dans plusieurs référentiels d'ouvrage béton, un amalgame (ou à tout le moins une imprécision) terminologique qui semble considérer comme permanente la part quasi-permanente des actions variables, et ne considère comme « réellement » variable que leur part non quasi-permanente.

Ceci est sans conséquence pour la construction métallique, l'acier ne connaissant pas de flèche différée à long terme.

Cet amalgame et la prépondérance de la construction en béton armé (et métallique) dans la communauté d'ingénierie laisse ainsi à penser que ce même amalgame est présent dans la NF EN 1990 et explique les définitions de  $W_1$  et  $W_2$ .

Ceci semble être confirmé par la nouvelle rédaction retenue dans le prEN 1990 : 2020 (cf. §2.2.2).

C'est à n'en pas douter cette imprécision qui a conduit le FD P18-717 à préciser au 7.4.1(5) que pour la vérification de la flèche sous combinaison quasi-permanente de la NF EN 1992-1-1 (la seule décrite dans cet Eurocode) « il est logique d'appliquer le coefficient de fluage non seulement aux charges permanentes, mais aussi à la part quasi-permanente des actions variables ».

Il reste que ce même FD P18-717 décrit la méthode conventionnelle (le texte insiste sur ce terme) de calcul des flèches nuisibles comme « prenant en compte la valeur caractéristique instantanée des charges variables », et scinde dans toutes ses définitions les charges permanentes et actions variables, sans qu'il soit à aucun moment fait mention de la prise en compte de la part quasi-permanente de ces dernières.

L'amplitude de fluage du béton est fortement impactée notamment par le retrait et la temporalité de retrait de l'étaie. On pourrait donc comprendre la non prise en compte d'une flèche due au fluage de la part quasi-permanente des actions variables, comme une hypothèse selon laquelle celle-ci serait (par convention) négligeable compte-tenu du délai entre le coulage du béton, le retrait de l'étaie et la mise en service de l'ouvrage.

Il faut noter que cette ambiguïté n'existe pas dans la NF P19-205 (et le Cahier 3718\_V2) où les formules de flèche active prennent bien en compte l'effet du fluage sous la part quasi-permanente des actions variables mais avec un coefficient de fluage divisé par 2. Ce dernier point va dans le sens d'une amplitude de fluage moins importante passé un certain temps.

#### COMMENTAIRE :

*Cette incertitude n'a pu être levée au moment de la finalisation du présent rapport.*

### 5.1.3 ELEMENT DIT « FRAGILE »

Ce terme revêt dans les référentiels plus récent un caractère quelque peu vague, ne mentionnant que les cloisons ou revêtements de sol fragiles (ou non fragiles).

Pour les cloisons, il apparaît très clairement dans les référentiels plus anciens (Règles BAEL 91 révisées 99, Cahier 2920 édition 1996) qu'il était destiné à décrire les cloisons maçonnées (en briques ou carreaux de plâtre), et par extension que le terme « autres cloisons » (parfois qualifiées de « légères ») s'entendait comme « non maçonnées ».

La reprise de cloisons maçonnée étant usuellement exclue des domaines d'emploi des ATec et DTA des procédés de plancher bois, c'est le terme « rigide » ou « non rigide » qui a été retenu pour les revêtements de sols, pendant que les cloisons ne sont plus mentionnées.

Pour les revêtements de sol, il semble donc logique de considérer aussi bien les revêtements céramique ou pierre naturelle que les chapes à base de liants hydrauliques comme entrant dans la catégorie dite « fragile » ou « rigide ».

#### COMMENTAIRE :

*Il paraît également logique de faire entrer dans la catégorie « fragile » les plafonds à base d'enduit au plâtre (sur lattis ou briquettes) ou en staff traditionnel.*

## 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.

*Bien que le sujet soit sensible au regard des NF DTUs concernés, il semble judicieux de clarifier dans un référentiel de structure les éléments qui sont usuellement considérés comme « fragiles/rigides » ou « non fragiles/rigides ».*

## 5.2 Enseignements de l'approche comparative

### 5.2.1 FLECHES TOTALES

Il est intéressant de comparer les flèches totales vérifiées par les référentiels suivants :

- Flèche sous combinaison quasi-permanente de la NF EN 1992-1-1  $W_{tot,qp}$  (appelée « absolue » dans la NF P19-205 et le Cahier 3718\_V2) :

$$W_{tot,qp} = W_{inst,qp} + W_{creep} = (1 + \phi) \cdot W_G + (\psi_2 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{2,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi} \leq L/500$$

(la limite de L/500 s'applique lorsque l'on recherche la limitation des dommages ; sinon on utilise L/250)

- Flèche totale à long terme des Règles CB 71  $W_{tot,CB}$  :

$$W_{tot,CB} = W_{inst(0,8Q)} + W_{\infty(G+0,2Q)} = \theta \cdot W_G + (1 + 0,2 \cdot (\theta - 1)) \cdot W_Q \leq L/400$$

(on retient ici la limite L/400 utilisée usuellement en cas de plafond ou sols ; sinon on utilise L/300 voire L/200)

- Flèche totale à long terme de la NF EN 1995-1-1  $W_{fin}$  (=  $W_{net,fin}$  en l'absence de contreflèche) :

$$W_{tot} = W_{inst} + W_{creep} = (1 + k_{def}) \cdot W_G + (1 + \psi_2 \cdot k_{def}) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot k_{def}) \cdot W_{Qi}$$

La comparaison dans les divers scénarios de chargement a montré que les limites de L/500 pour  $W_{tot,qp}$  et L/400 pour  $W_{tot,CB}$  correspondent toutes deux en moyenne à une limite de L/350 (voire L/300) pour  $W_{fin}$  selon NF EN 1995-1-1, avec les valeurs mini || moyenne || maxi suivantes :

- $W_{tot,qp} \leq L/500 \Leftrightarrow$  Mini || Moyenne || Maxi      L/250 || L/350 || 450
- $W_{tot,CB} \leq L/400 \Leftrightarrow$  Mini || Moyenne || Maxi      L/315 || L/350 || 395

#### COMMENTAIRE :

*Si dans de nombreux cas la flèche totale n'est pas la vérification décisive, elle entre malgré tout en compte pour certains ouvrages tels que la structure support de couverture ou d'étanchéité, ou les planchers supports de revêtements de sols à base de bois. La correspondance des trois limites et flèches est remarquable.*

### 5.2.2 FLECHES SPECIFIQUES AU 2<sup>ND</sup> ŒUVRE

Le tableau ci-dessous présente de manière synthétique les limites de flèche équivalentes (en moyenne des scénarios étudiés) pour les flèches spécifiques de 2<sup>nd</sup> œuvre suivantes :

(note : les présentations sont uniformisées pour en faciliter la comparaison, selon la convention décrite au §2)

- Flèche  $W_{tot,2}$  visant l'endommagement des éléments de second œuvre de l'AN de la NF EN 1995-1-1 (§2.3.2):

$$W_{tot,2,EC5} = \phi \cdot W_{G0} + (1 + \phi) \cdot W_{G1} + (1 + \phi) \cdot W_{G2} + (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi}$$

- Flèche nuisible  $\Delta f_t$  du FD P18-717 (document d'application de la NF EN 1992-1-1) (§2.5.3) :

Hypothèse 1 : absence de flèche due au fluage sous la part quasi-permanente des actions variables

$$W_{tot,2,FD,1} = (1 - \psi) \cdot \phi \cdot W_{G0} + \phi \cdot W_{G1} + (1 + \phi) \cdot W_{G2} + W_Q + \sum \psi_{0,i} \cdot W_{Qi}$$

Hypothèse 2 : part quasi-permanente des actions variables considérée comme permanente dans G2

$$W_{tot,2,FD,2} = (1 - \psi) \cdot \phi \cdot W_{G0} + \phi \cdot W_{G1} + (1 + \phi) \cdot W_{G2} + (1 + \psi_2 \cdot \phi) \cdot W_Q + \sum (\psi_{0,i} + \psi_{2,i} \cdot \phi) \cdot W_{Qi}$$

comparé avec  $\psi = 0$  (cas défavorable dépend du temps écoulé entre le décoffrage et la liaison de l'ENS fragile)

- Flèche active  $f_a$  de la NF P19-205 (et du Cahier 3718\_V2) pour les planchers nervurés à poutrelles en béton (§2.6.4) :

$$W_{tot,2,NF} = (1 - \psi) \cdot \phi \cdot W_{G0} + \phi \cdot W_{G1} + (1 + \phi) \cdot W_{G2} + \left(1 + \psi_2 \cdot \frac{\phi}{2}\right) \cdot W_Q + \sum \left(\psi_{0,i} + \psi_2 \cdot \frac{\phi}{2}\right) \cdot W_{Qi} + W_r - W_p$$

comparé avec  $\psi = 0$  (cas défavorable dépend du temps écoulé entre le décoffrage et la liaison de l'ENS fragile)

(note :  $W_r$  est l'accroissement de flèche du au retrait ;  $W_p$  est la réduction de flèche due à la précontrainte éventuelle)



**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 9 : Synthèse des limites de flèche équivalentes des flèches spécifiques de 2<sup>nd</sup> œuvre

Flèche spécifique de 2 <sup>nd</sup> œuvre $W_{tot,2}$		Classe de service 1			Classe de service 2		
		$W_{tot,2,FD,1}$	$W_{tot,2,FD,2}$	$W_{tot,2,NF}$	$W_{tot,2,FD,1}$	$W_{tot,2,FD,2}$	$W_{tot,2,NF}$
		Flèche équivalente à $W_{tot,2,\dots} \leq L / 500$ pour $W_{tot,2,EC5}$					
Plancher (cat. A & B)	Cas [1]	L / 440	L / 485	L / 460	L / 430	L / 485	L / 460
	Chape sèche	L / 405	L / 450	L / 430	L / 400	L / 455	L / 430
	Chape liant hyd.	L / 365	L / 400	L / 385	L / 370	L / 410	L / 390
	Sols rigides	L / 400	L / 440	L / 420	L / 395	L / 450	L / 420
	Global	L / 415	L / 460	L / 440	L / 405	L / 465	L / 435
Plancher (cat. C & D)	Cas [1]	L / 390	L / 490	L / 440	L / 370	L / 490	L / 430
	Chape sèche	L / 370	L / 470	L / 420	L / 350	L / 475	L / 415
	Chape liant hyd.	L / 350	L / 435	L / 390	L / 340	L / 440	L / 390
	Sols rigides	L / 365	L / 465	L / 415	L / 350	L / 470	L / 410
	Global	L / 375	L / 475	L / 425	L / 355	L / 480	L / 420
		Flèche équivalente à $W_{tot,2,\dots} \leq L / 400$ pour $W_{tot,2,EC5}$					
Plancher (cat. A & B)	Chape sèche			L / 340			L / 340
	Sols bois/souples			L / 345			L / 345
	Sols rigides			L / 335			L / 335
Plancher (cat. C & D)	Chape sèche			L / 335			L / 330
	Sols bois/souples			L / 335			L / 330
	Sols rigides			L / 330			L / 325
		Flèche équivalente à $W_{tot,2,\dots} \leq L / 350$ pour $W_{tot,2,EC5}$					
Plancher (cat. A & B)	Cas [1]			L / 325			L / 320
	Chape sèche			L / 300			L / 300
	Sols bois/souples			L / 305			L / 300
	Global			L / 305			L / 305
Plancher (cat. C & D)	Cas [1]			L / 310			L / 300
	Chape sèche			L / 295			L / 290
	Sols bois/souples			L / 295			L / 285
	Global			L / 300			L / 290

Notes : Le cas [2] a ici été scindé en chape sèche (env. 35 kg/m<sup>2</sup>) et chape à liant hydraulique (env. 80 à 120 kg/m<sup>2</sup>)

Le cas [3] a été scindé en sols bois ou souples ( $\leq 30$  kg/m<sup>2</sup>) et sols rigides (env. 45 kg/m<sup>2</sup>)

On remarque que :

- Plafond « fragile » (cas [1] – L/500) :
  - ⇒ l'écart est faible, suggérant que l'application d'une limite de L/500 reste adaptée indépendamment de la formule exacte de calcul de la flèche  $W_{tot,2}$ .
- Plafond « non fragile » (cas [2] – L/350) :
  - ⇒ l'écart est notable, suggérant que l'application d'une limite de L/300 ou L/350 pourrait être comparable selon la formule exacte de calcul de la flèche  $W_{tot,2}$ .
- Chape à liant hydraulique et Sols « fragiles » (rigides) (L/500) :
  - ⇒ l'écart est notable dans les deux cas et suggère (fortement pour la chape) qu'une limite de  $W_{tot,2,EC5}$  de L/400 correspond à la limite de L/500 des référentiels béton, quelle que soit la formule exacte de calcul de  $W_{tot,2}$ .
  - ⇒ *Ce constat est à nuancer pour les sols « fragiles » : il n'est pas réaliste de considérer un sol « fragile » en pose directe sur le plancher bois ; il convient plutôt de se référer à la chape (sèche ou à liant hydraulique) qui le supportera.*
- Chape sèche et Sols « non fragiles » (bois ou souples) (L/400 ou L/350) :
  - ⇒ il apparaît clairement qu'une limite de  $W_{tot,2,EC5}$  de L/350 resp. L/300 correspond à la limite de L/400 resp. L/350 des référentiels béton, quelle que soit la formule exacte de calcul de  $W_{tot,2}$ .

## 5.3 Enseignements de la revue des référentiels

### 5.3.1 CLOISONS

En combinant la lecture des NF DTUs de la série 25 et le principe sous-jacent à l'utilisation du terme « fragile » (cf. §5.1.3), il est possible de distinguer :

- Cloisons « fragiles » : les cloisons en carreaux de plâtres pour lesquelles le NF DTU 25.31 reprend la limite de flèche nuisible du FD P18-717 :  $L/500$  si  $L \leq 5$  m ;  $5$  mm +  $L/1000$  au-delà
  - ⇒ Cette limitation se retrouve p.ex. en Espagne ou en Belgique
- Cloisons « non fragiles » : les cloisons en plaque de plâtre ou celles supportant un habillage ou un doublage avec plaque de plâtre, pour lesquelles :
  - les NF DTU 25.41 et 25.42 mentionnent dans une note que « l'expérience acquise conduit à limiter » la flèche du support à  $L/500$  sans que cette dernière soit précisée (on peut donc aussi bien y voir la flèche totale sous combinaison quasi-permanente que la flèche nuisible ou active) ;
  - la NF P19-905 (et le Cahier 3718\_V2) limite la flèche active à  $L/350$ .

En termes « d'expérience acquise » sur les planchers bois, on peut rappeler que les pratiques suivantes ont (eu) cours sans que ne soient rapportés des dommages répétés aux cloisons en plaques de plâtre :

- aux Règles CB71, il était d'usage courant de limiter la flèche des planchers support de plafond en plaques de plâtre à  $L/400$ , ce qui correspond en moyenne (cf. §3.4 et §5.2.1) à une flèche sous combinaison quasi-permanente  $W_{tot,qp}$  (Eurocode 2) limitée à  $L/500$  et à une flèche  $W_{fin}$  (Eurocode 5) limitée à  $L/350$  (voire  $L/300$ ) ;
- nombre de planchers en poutres I ont été dimensionnés conformément aux indications du Cahier 3768 qui propose de limiter la flèche  $W_{tot,2}$  à  $L/250$  en présence de cloisons légères ;
- plusieurs pays Européens (Royaume-Uni, Irlande, Finlande ...) limitent la flèche  $W_{fin}$  ou  $W_{net,fin}$  sous combinaison caractéristique des planchers à  $L/250$  (voire  $L/200$ ) indépendamment de la présence de cloisons en plaques de plâtre ;
- l'Allemagne, l'Autriche et les Pays-Bas limitent la flèche  $W_{net,fin,qp}$  des planchers sous combinaison quasi-permanente à  $L/250$  ou  $L/300$ , permettant même que soit déduite la flèche initiale de la structure pour une flèche de 2<sup>nd</sup> œuvre, ce qui équivaut à limiter la flèche  $W_{net,fin}$  sous combinaison caractéristique à  $L/200$  voire moins ;
- la Belgique limite la flèche  $W_b + W_c$  (qui est une flèche de 2<sup>nd</sup> œuvre) à  $L/250$  pour les planchers supportant des cloisons non fragiles.

Par ailleurs, compte-tenu de la charge uniformément répartie moyenne constatée pour les cloisons légères sur plancher bois ( $0.35$  kN/m<sup>2</sup> plutôt que les  $0.50$  kN/m<sup>2</sup> pris en compte habituellement dans le calcul), on peut extraire du Tableau 9 par équivalence de charge avec la chape sèche qu'une flèche active de  $L/350$  selon NF P19-205 correspond à une flèche  $W_{tot,2,EC5}$  de  $L/300$  selon NF EN 1995-1-1 et son AN.

#### COMMENTAIRE :

*Pour les cloisons « fragiles » (maçonnées, carreaux de plâtre), il convient de limiter  $W_{tot,2}$  à  $L/500$  si  $L \leq 5$  m et  $5$  mm +  $L/1000$  au-delà. On rappelle cependant que la reprise de cloisons maçonnées est usuellement exclue des domaines d'emploi ou d'application des référentiels de construction bois.*

*Pour les cloisons « non fragiles », il apparaît que rien ne justifie de considérer les notes des NF DTU 24.41 et 25.42 comme s'appliquant à la flèche  $W_{tot,2}$ .*

*En outre l'expérience des planchers nervurés à poutrelles béton limitant la flèche active pour ces ouvrages à  $L/350$  indique une limite sécuritaire dans tous les cas. L'expérience en construction bois de limites inférieures allant jusqu'à  $L/250$  (voire  $L/200$ ) aussi bien en France que dans les pays voisins (Royaume-Uni, Belgique, Pays-Bas, Allemagne, Autriche) qui construisent nombre de planchers en bois conduit à pouvoir envisager une limite de  $L/300$  ou  $L/250$ .*

*La correspondance entre limite de  $L/350$  pour la flèche active et  $L/300$  pour  $W_{tot,2,EC5}$  conduit à la même conclusion.*

### 5.3.2 PLAFOND

En combinant la lecture des NF DTUs de la série 25 et le principe sous-jacent à l'utilisation du terme « fragile » (cf. §5.1.3), il est possible de distinguer :

- Plafonds « fragiles » : les plafonds avec enduit plâtre (sur lattis ou briquettes) ou en staff traditionnel pour lesquels les NF DTU 25.1, 25.231 et 25.51 fixent une limite de flèche de  $L/500$ , qu'il convient de considérer pour  $W_{tot,2}$  ;
- Plafonds « non fragiles » : les plafonds en plaque de plâtre, pour lesquels :
  - les NF DTU 25.41 et 25.42 ne précisent aucune limite de flèche du support explicite ;

## 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 NF P19-905 (et le Cahier 3718\_V2) limite la flèche active à L/350.

En termes « d'expérience acquise » sur les planchers bois, on peut rappeler que les pratiques suivantes ont (eu) cours sans que ne soient rapportés des dommages répétés aux cloisons en plaques de plâtre :

- aux Règles CB71, il était d'usage courant de limiter la flèche des planchers support de plafond en plaques de plâtre à L/400, ce qui correspond en moyenne (cf. §3.4 et §5.2.1) à une flèche sous combinaison quasi-permanente  $W_{tot,qp}$  (Eurocode 2) limitée à L/500 et à une flèche  $W_{fin}$  (Eurocode 5) limitée à L/350 (voire L/300) ;
- nombre de planchers en poutres I ont été dimensionnés conformément aux indications du Cahier 3768 qui propose de limiter la flèche  $W_{tot,2}$  à L/250 en présence d'un plafond suspendu ;
- plusieurs pays Européens (Royaume-Uni, Irlande, Finlande ...) limitent la flèche  $W_{fin}$  ou  $W_{net,fin}$  sous combinaison caractéristique des planchers à L/250 (voire L/200) indépendamment de la présence de plaques de plâtre, qui peuvent par ailleurs être suspendues ou fixées directement ;
- l'Allemagne, l'Autriche et les Pays-Bas limitent la flèche  $W_{net,fin,qp}$  des planchers sous combinaison quasi-permanente à L/250 ou L/300, permettant même que soit déduite la flèche initiale de la structure pour une flèche de 2<sup>nd</sup> œuvre, ce qui équivaut à limiter la flèche  $W_{net,fin}$  sous combinaison caractéristique à L/200 voire moins ;
- la Belgique limite la flèche  $W_b + W_c$  (qui est une flèche de 2<sup>nd</sup> œuvre) à L/250 pour les planchers supportant des plafonds suspendus ;
- L'Espagne limite sa flèche de 2<sup>nd</sup> œuvre (identique à la flèche nuisible du FD P18-717) pour les plafonds avec plaque de plâtre à L/300.

On note que le NF DTU 31.1 propose dans son Annexe de limiter la flèche  $W_{tot,2,EC5}$  à L/350 pour les éléments supportant un plafond en plaque de plâtre ou similaire et L/400 pour les plafonds en plâtre projeté sur briquettes.

⇒ Cette dernière disposition n'est pas corroborée par l'analyse comparative décrite au §5.2.2

Par ailleurs, on peut extraire du Tableau 9 dans le cas [1] qu'une flèche active de L/350 selon NF P19-205 correspond à une flèche  $W_{tot,2,EC5}$  entre L/295 et L/325 selon NF EN 1995-1-1 et son AN.

### COMMENTAIRE :

Pour les plafonds « fragiles » (enduit plâtre, staff traditionnel), il convient de limiter  $W_{tot,2}$  à L/500.

Pour les plafonds « non fragiles », il apparaît que rien ne justifie de considérer que les notes des NF DTU 24.41 et 25.42 visant les cloisons comme s'appliquant aux plafonds et a fortiori à la flèche  $W_{tot,2}$  dans ce cas.

En outre l'expérience des planchers nervurés à poutrelles béton limitant la flèche active pour ces ouvrages à L/350 indique une limite sécuritaire dans tous les cas. L'expérience en construction bois de limites inférieures allant jusqu'à L/250 (voire L/200) aussi bien en France que dans les pays voisins (Royaume-Uni, Belgique, Pays-Bas, Allemagne, Autriche) qui construisent nombre de planchers en bois conduit à pouvoir envisager une limite de L/300 ou L/250.

La correspondance entre limite de L/350 pour la flèche active et L/295 à L/320 pour  $W_{tot,2,EC5}$  conduit à la même conclusion.

### 5.3.3 COUVERTURE

Les NF DTUs de la série 40 :

- renvoient pour la flèche de la structure primaire aux règles de dimensionnement en vigueur, donc à la NF EN 1995-1-1 et son AN, sans fixer de limite de flèche particulière ;
- fixent une limite de flèche pour les éléments supports directs de couverture (lîteaux, planches, voliges) sous poids-propre et charge de neige (parfois sous charge unipersonnelle d'entretien) à L/300, cette limite n'étant pas stipulée dans la version actuelle des NF DTUs visant les bardeaux bitumés, les tuiles terre cuite canal, le tuiles plates (béton ou terre cuite), les couvertures en plaques.

### COMMENTAIRE :

Bien que certains NF DTUs ne fixent pas de limites à la flèche des éléments les supportant directement (lîteaux, planches, voliges), cette absence de disposition pouvant notamment s'expliquer par l'ancienneté des dernières versions de ces NF DTUs, il paraît logique de considérer que ces éléments supports doivent satisfaire à une exigence commune, indépendamment du type de couverture.

Seule exception à considérer : les couvertures en plaques qui n'ont en général pas d'éléments supports en bois autres que la structure primaire.

La vérification sous charge unipersonnelle d'entretien paraît également judicieuse dans tous les cas.

## 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.

### 5.3.4 ETANCHEITE

Les référentiels d'étanchéité sur élément porteur bois renvoient pour la flèche de la structure primaire aux règles de dimensionnement en vigueur, donc à la NF EN 1995-1-1 et son AN, sans fixer de limite de flèche particulière.

#### COMMENTAIRE :

*Il paraît cependant logique de veiller au respect des limites de flèche  $W_{net,fin}$  définies dans le Cahier 3814 (planchers massifs et caissons en bois) en fonction de la pente minimale du support d'étanchéité pour éviter les phénomènes d'accumulation (dits « de mare ») :*

- *L/250 pour une pente de 3% minimale*
- *L/400 pour une pente de 1,8% minimale (hors toitures végétalisées)*
- *L/500 pour une pente de 1,6% minimale (hors toitures végétalisées)*

*En outre, il paraît également logique de limiter  $W_{tot,2}$  avec la limite de flèche active de L/250 de la NF P19-205 .*

### 5.3.5 CHAPE A LIANTS HYDRAULIQUES

Les divers référentiels visant les chapes à liants hydrauliques fixent une limite de flèche pour le support basée sur la valeur L/500 :

- les chapes à liants hydrauliques entrent dans la catégories « fragile » ou « rigide » des FD P18-717, NF P19-205, Cahier 3718\_V2, Cahier 3802 et ATec ou DTA des procédés de planchers relevant des GS 3.1 et 3.3 ;
- le NF DTU 26.2 (ne visant que le support béton) renvoie au FD P18-717 et donc à une flèche nuisible  $\leq L/500$  si  $L \leq 5$  m et 5 mm + L/1000 au-delà ;
- la NF P19-205 et le Cahier 3718\_V2 limitent la flèche active à L/500 ;
- les Recommandations Professionnelles RAGE Chapes sur plancher bois proposent de limiter la flèche  $W_{tot,2,EC5}$  à L/500.

On retrouve des limitations similaires en Belgique et en Espagne notamment, ainsi qu'en Suisse.

Par ailleurs, on peut extraire du Tableau 9 dans le cas correspondant qu'une flèche nuisible ou active de L/500 selon FD P18-717 et NF P19-205 respectivement correspondent à une flèche  $W_{tot,2,EC5}$  de L/400 en moyenne selon NF EN 1995-1-1 et son AN.

On note que les dispositions proposées par le Cahier 3768 et le NF DTU 31.1 revêtent une possible confusion entre le terme « désolidarisé » et ce qui s'apparente dans l'esprit à une chape flottante dans le vocable du NF DTU 26.2. En tout état de cause, les limites qui sont proposées ne peuvent être justifiées par l'analyse comparative.

#### COMMENTAIRE :

*Sur le principe il apparaît logique de retenir la limite du FD P18-717 (qui est celle du NF DTU 26.2) pour la flèche nuisible.*

*Les écarts significatifs entre méthodes de calcul de la flèche nuisible (FD P18-717) ou active (NF P19-205) et celle de l'AN de la NF EN 1995-1-1 conduisent cependant à considérer :*

- *soit de modifier la méthode de calcul de l'AN de la NF EN 1995-1-1 en conservant la limite de L/500 si  $L \leq 5$  m et 5 mm + L/1000 au-delà ;*
- *soit de conserver la méthode actuelle de calcul et de retenir comme limite L/400 pour  $L \leq 4$  m et 5 mm + L/800 au-delà (qui pourrait alors être la même que celle fixée par le NF DTU 53.12 pour les sols souples)*

### 5.3.6 CHAPES SECHES

Les procédés de chape sèche relèvent de l'ATec ou du DTA. Ces derniers fixent une limite de flèche pour le support bois à L/400 sans que ne soit précisé de quelle flèche il s'agit, ni s'il s'agit de la flèche du panneau support ou de celle de la structure primaire.

Compte-tenu de la date des premiers ATec de cette famille, la probabilité est grande que cette limite provienne de la pratique de dimensionnement des planchers bois aux Règles CB 71.

Les procédés de chape sèche n'entrent a priori pas dans le champ des sols « fragiles » ou « rigides ». L'application de al NF P19-205 conduit à limiter le flèche active à L/350 dans ce cas, ce qui est cohérent avec l'approche CB 71.

Par ailleurs, on peut extraire du Tableau 9 dans le cas correspondant qu'une flèche active de L/400 ou L/350 selon NF P19-205 correspond à une flèche  $W_{tot,2,EC5}$  moyenne de L/330 – L/340 ou L/300 selon NF EN 1995-1-1 et son AN.

#### COMMENTAIRE :

*Sur le principe il apparaît logique de retenir une limite de L/350 pour  $W_{tot,2,EC5}$ .*

*Une autre approche pourrait être de considérer :*

- *soit de modifier la méthode de calcul de l'AN de la NF EN 1995-1-1 en conservant la limite de L/350 ;*
- *soit de conserver la méthode actuelle de calcul et de retenir comme limite L/400 pour  $L \leq 4$  m et 5 mm + L/800 au-delà (qui pourrait alors être la même que celle fixée par le NF DTU 53.12 pour les sols souples ou les chapes humides)*

## 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.

### 5.3.7 SOLS CERAMIQUES OU PIERRE NATURELLE

Les référentiels pour la pose des revêtements de sols céramiques ou pierre naturelle, collée ou scellée, ne visent que la chape à liants hydrauliques (NF DTU 26.2, Reco. Pro. RAGE) ou sèche (ATec ou DTA). La pose directe est exclue.

En outre, ces revêtements entre indubitablement dans le champ des sols « fragiles » ou « rigides ».

Par ailleurs, on peut extraire du Tableau 9 dans les cas correspondants que les limites de flèche nuisible, active ou  $W_{tot,2,EC5}$  de la chape à liants hydrauliques et du sol « rigide » sont en moyenne identiques deux à deux, quelle que soit la méthode de calcul.

⇒ *Il paraît donc approprié de se référer aux limites du procédé de chape utilisé pour les sols céramiques ou pierre naturelle.*

### 5.3.8 SOLS SOUPLES

La révision récente du NF DTU 53.12, tronc commun aux NF DTU de la série 53 visant les sols souples, est notable puisqu'elle introduit une double exigence sur la structure porteuse bois, avec une vérification de flèche  $W_{tot,2}$  pour la structure porteuse mais aussi pour le panneau à base de bois support de revêtement :

- $W_{tot,2,EC5} \leq L/400$  si  $L \leq 4$  m et 5 mm +  $L/800$  au-delà pour la structure ;
- $W_{tot,2,EC5} \leq \min \{ L/400 ; 2 \text{ mm} \}$  pour le panneau à base de bois support de revêtement.

Par ailleurs, on peut extraire du Tableau 9 dans le cas correspondant qu'une flèche active de  $L/400$  ou  $L/350$  selon NF P19-205 correspond à une flèche  $W_{tot,2,EC5}$  moyenne de  $L/350$  ou  $L/300$  selon NF EN 1995-1-1 et son AN.

Les conditions exactes de comparaison qui ont conduit à la définition des limites du NF DTU 53.12 n'ont pu être analysée et peuvent conduire à des conclusions opposées.

#### COMMENTAIRE :

*Il convient de procéder à une analyse des conditions (et comparaisons éventuelles avec le support béton) qui ont conduit à fixer ces exigences dans le NF DTU 53.12, étant entendu que des problématiques diverses liées notamment aux panneaux et leur rotation aux appuis (et autres joints) sont à l'origine a minima des exigences pour les panneaux.*

*Selon le résultat de cette analyse, une approche pourrait être de considérer :*

- *soit de modifier la méthode de calcul de l'AN de la NF EN 1995-1-1 en s'appuyant sur la limite de flèche active de  $L/350$  ;*
- *soit de conserver la méthode actuelle de calcul et de retenir comme limite  $L/400$  pour  $L \leq 4$  m et 5 mm +  $L/800$  au-delà (qui pourrait alors être la même que celle suggérée pour les chapes humides)*

#### COMMENTAIRE :

*L'AN de la NF EN 1993-1-1 fixe également des limites pour les bâtiments industriels ou à un seul niveau, mais qui sont pour la plupart moins sévères que la limite de  $H/200$  de l'AN de la NF EN 1995-1-1.*

### 5.3.9 SOLS A BASE DE BOIS

Les référentiels de revêtement de sol à base de bois (NF DU 51.3 et 51.1/51.11/51/2) renvoient pour la flèche de la structure primaire aux règles de dimensionnement en vigueur, donc à la NF EN 1995-1-1 et son AN, sans fixer de limite de flèche particulière.

#### COMMENTAIRE :

*Il est recommandable de prendre en compte les limites recommandées pour les planchers ci-après.*

### 5.3.10 PLANCHERS

Les Cahier 3768 (planchers en poutres en I) et 3802 (panneaux structuraux massifs bois) ainsi que les ATec ou DTA des planchers mixtes bois-béton ou encore des planchers nervurés ou caissons à base de bois fixent les limites suivent qui sont identiques ou plus restrictives que celles permises par l'AN de la NF EN 1995-1-1 pour les bâtiments courants :

- $W_{ints(Q)} \leq L/300$  identique au Tableau 7.2 de l'AN EC5
- $W_{net,fin} \leq L/250$  limite du 7.2 l'AN EC5 pour les panneaux de plancher au lieu de  $L/200$  pour les éléments structuraux

La limite  $W_{net,fin} \leq L/250$  était à l'origine prévue pour les éléments structuraux de plancher. Cette disposition a été transformée dans la version finale de l'AN. C'est cet esprit d'origine qui a été repris par les référentiels susnommés.

La limite de  $L/200$  peut difficilement se justifier dans le cadre de la comparaison avec les Règles CB 71, et n'était pas non plus envisagée au moment de l'étude de calibration EC5/CB71 conduite entre 2003 et 2005.

L'intérêt d'autoriser une flèche  $W_{net,fin}$  à  $L/200$  pour des éléments structuraux de plancher est en outre assez limité puisque la flèche  $W_{tot,2}$  sera forcément plus restrictive dans la quasi-totalité des configurations (seuls les planchers sans plafond, sans cloisons

## 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.

et avec revêtement de sol bois étant exempts de vérification de cette flèche), et que l'expérience montre que le critère vibratoire est quasiment impossible à vérifier avec une telle souplesse de plancher.

Cette limite de  $L/200$  conserve un intérêt pour les éléments structuraux supports de couverture.

### COMMENTAIRE :

*Il est donc recommandable de retenir la limite  $W_{net,fin} \leq L/250$  pour les éléments structuraux de planchers comme initialement envisagé pour l'AN EC5 et en cohérence avec les autres référentiels de procédés de plancher bois.*

### 5.3.11 FLECHES HORIZONTALES

Conformément au § 9.2.5.3(2) de l'Eurocode 5 repris par l'AN Française de la NF EN 1995-1-1 et par le Cahier 3802 (panneaux structuraux massifs bois), il convient de limiter en tout état de cause la déformation dans le plan des systèmes de contreventement (et donc des murs formant voile de contreventement) à  $H/500$ .

Cette limitation est également attendue par le Cahier 3729 et les ATec des procédés d'ETICS sur COB.

La flèche horizontale des éléments individuels est limitée à :

- aux limites du Tableau 7.2 de l'AN de la NF EN 1995-1-1 et à  $H/200$  pour les éléments individuels soumis au vent
- $H/300$  par le Cahier 3802 (panneaux structuraux massifs bois).

Il est également possible de prendre en compte les limites de flèche de l'AN de la NF EN 1993-1-1, qui fixe notamment les limites suivantes pour les bâtiments autres qu'industriels à plusieurs niveaux :

- pour un seul étage de hauteur  $H_i$  :  $H_i/300$
- pour un bâtiment de hauteur  $H$  :  $H/300$  si  $H \leq 10$  m ;  $H(200 + 10.H)$  si  $10$  m  $\leq H \leq 30$  m ;  $H/500$  au-delà

### 5.3.12 FAÇADES

De manière générale, les référentiels de façades ne fixent pas de limite de flèche pour la structure primaire, à l'exception notable du NF DTU 33.1 pour les façades rideaux qui limite la flèche (assimilable à  $W_{tot,2}$ ) à 5 mm.

On notera cependant que le Cahier 3729 et les ATec d'ETICS sur COB limitent la flèche dans le plan et hors plan à  $H/500$  (et par extension celles des linteaux à  $L/500$ ).

On rappelle en outre que le NF DTU 31.2 limite la flèche  $W_{fin} \leq \text{MIN} \{ L/500 ; 10 \text{ mm} \}$  pour les linteaux de menuiserie.

Par ailleurs, pour les FOB, des référentiels émergents fixent progressivement des limites notamment au déplacement différentiel entre montants d'ossature voisins (1 ou 3 mm) qui reviennent à limiter  $W_{tot,2}$  à  $L/500$  pour  $L \leq 5$  m et  $5 \text{ mm} + L/1000$  au-delà, voire plus strictement encore.

## 5.4 Sujets de considérations futures

Il apparaît à la lecture de ce qui précède, qu'un certain nombre d'arbitrage, clarifications ou évolutions seraient les bienvenus afin de repositionner les diverses technologies sur un pied d'égalité quant aux limites et au mode de calcul de la flèche spécifique de 2<sup>nd</sup> œuvre. Les écarts significatifs entre méthodes de calcul de la flèche nuisible (FD P18-717) ou active (NF P19-205) et celle de l'AN de la NF EN 1995-1-1 conduisent à considérer :

- soit de modifier la méthode de calcul de l'AN de la NF EN 1995-1-1 pour se rapprocher de l'approche retenue par ces référentiels tout en tenant compte du comportement en fluage des matériaux à base de bois, en conservant alors les limites de ces référentiels ; ces évolutions concerneraient :
  - la non prise en compte de la flèche instantanée due au poids propre de l'ENS fragile vérifié ;
  - l'éventuelle correction de prise en compte totale ou partielle de la flèche due au fluage sous part quasi permanente des actions variables ;
  - l'éventuelle prise en compte (réduction) de la flèche due au fluage de la structure (et des ENS) déjà réalisée de manière irréversible au moment de la liaison de l'ENS visé.
- soit de conserver la méthode actuelle de calcul et de retenir des limites équivalentes modifiées.

### COMMENTAIRE :

*En tout état de cause, ce qui précède a démontré un écart performanciel plus ou moins important entre les approches des référentiels béton qui forment le socle historique des limites de flèche des NF DTU et autres référentiels de 2<sup>nd</sup> œuvre et le calcul de  $W_{tot,2}$  selon l'AN de la NF EN 1995-1-1 au détriment de la structure bois.*

*Se pose également la question du type de document qui pourrait être à même de gérer ces évolutions : l'AN semble la plus appropriée. Un Fascicule de Documentation (FD) AFNOR serait également une possibilité offrant peut-être plus de flexibilité.*

## 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.

### 5.5 Proposition de rationalisation

Afin de guider le concepteur, le tableau ci-dessous est une proposition de rationalisation des critères vus précédemment par type d'élément et d'ouvrage supporté (ou réalisé), volontairement synthétique, et donc par endroit éventuellement quelque peu sécuritaire. Le tableau est basé sur la formule de calcul de  $W_{tot,2}$  de l'AN de la NF EN 1995-1-1.

Tableau 10 : Tableau synthétique des limites de flèches proposes – Bâtiments courants

Ouvrage bois	Ouvrage de 2 <sup>nd</sup> œuvre	Élément bois	Limites			
			$W_{inst(Q)}$	$W_{net,fin}$	$W_{fin}$	$W_{tot,2}$
Plancher	Cloisons ou plafonds fragiles <sup>(1)</sup>	Éléments structuraux	L/300	L/250	L/125	L/500 si $L \leq 5$ m ; 5 mm + L/1000 au-delà
	Chapes à liants hydrauliques <sup>(2)</sup>					L/500 si $L \leq 5$ m ; 5 mm + L/1000 au-delà ( L/400 si $L \leq 4$ m ; 5 mm + L/800 au-delà )
	Chapes sèches <sup>(2)</sup>					L/400 si $L \leq 4$ m ; 5 mm + L/800 au-delà ( L/350 si $L \leq 7$ m ; 10 mm + L/700 au-delà )
	Sols souples <sup>(3)</sup>					L/350 si $L \leq 7$ m ; 10 mm + L/700 au-delà ( L/300 voire L/250 )
	Cloisons ou plafonds non fragiles <sup>(4)</sup>					
	Sols bois <sup>(5)</sup>					
Platelage bois (NF DTU 51.4)	Lambourdes			L/400		
	Lames			5 ou 3 mm (type 1 ou 2)		
Toiture	Etanchéité	Éléments structuraux	L/300	L/250 si pente $\geq 3,0\%$ L/400 si pente $\geq 1,8\%$ L/500 si pente $\geq 1,6\%$	L/125	L/250
		Éléments structuraux <sup>(6)</sup>		L/200		
	Couverture	Chevrons <sup>(7)</sup>		L/150		
		Liteaux, volige, planches <sup>(8)</sup>			L/300	
Mur porteur	Bardages à lame d'air ventilée	Éléments courants <sup>(9)</sup>	H/300		H/125	
		Contreventement	H/500			
		Liteaux de menuiserie	L/300	L/250 $\leq 10$ mm	L/500 $\leq 10$ mm	
		Éléments isolés soumis au vent	H/200			
	ETICS	Éléments structuraux	H/500			H/500

Les valeurs indiquées en bleu italique peuvent être considérées comme équivalentes aux référentiels béton (du fait de l'écart entre formules de calcul) ou appropriées de manière générale.

- (1) Plafonds à base d'enduit plâtre sur lattes (NF DTU 25.1) ou brique (NF DTU 25.231) ou en staff traditionnel (NF DTU 25.51) ; Cloisons en carreaux de plâtre (NF DTU 25.31) ou maçonnées
- (2) Chapes à liants hydrauliques (NF DTU 26.2 et Reco. Pro RAGE), chapes sèches (ATec ou DTA) ; limites valables pour les sols céramique ou pierre naturelle en pose collée (NF DTU 52.2) ou scellée (NF DTU 52.1)
- (3) Sols relevant du NF DU 53.12 : textile, PVC et linoléum. Il convient en outre de limiter la flèche  $W_{tot,2}$  des panneaux à base de bois support re revêtement à L/400 et 2 mm maximum
- (4) Cloisons et plafonds en plaques de plâtres (NF DTU 25.41), doublage et habillage en complexe et sandwich isolants et plaque de plâtre (NF DTU 25.42)
- (5) Planchers à base de bois (NF DTU 51.3) et parquets cloué (NF DTU 51.1), collé (NF DTU 51.2) ou flottant (NF DTU 51.11)
- (6) Poutres, pannes et chevrons autoporteurs et pour la charpente industrielle : arbalétriers (L = longueur totale), les entrails et le déplacement vertical d'un nœud de triangulation
- (7) Éléments de faible section support de couverture portés par des pannes peu espacées ou pour la charpente industrielle : travées individuelles des arbalétriers
- (8) Ne s'applique pas aux couvertures pour lesquelles il n'y a ni liteaux, ni volige, ni lame (p.ex. couverture en plaques nervurées ou ondulées des NF DTU 40.3, 40.35 ou 40.37)
- (9) On limite en outre le déplacement inter-étages à H/300 et celui de l'ensemble de la structure à H/300 si  $H \leq 10$  m ;  $H/(200 + 10.H)$  si  $10 \leq H \leq 30$  m ; H/500 au-delà

### 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 11 : Tableau synthétique des limites de flèches proposes – Bâtiments agricoles ou similaires

Ouvrage bois	Ouvrage de 2 <sup>nd</sup> œuvre	Élément bois	Limites			
			$W_{inst(Q)}$	$W_{net,fin}$	$W_{fin}$	$W_{tot,2}$
Structure		Éléments structuraux <sup>(10)</sup>	L/200 ou H/200	L/150	L/100	
Toiture		Chevrons <sup>(11)</sup>		L/150	L/100	

(10) On limite en outre le déplacement inter-étages à H/200 et celui de l'ensemble de la structure à H/200 si  $H \leq 20$  m ; H/(200 + 5.H) si  $20 \leq H \leq 40$  m ; H/300 au-delà

(11) Éléments de faible section support de couverture portés par des pannes peu espacées ou pour la charpente industrielle : travées individuelles des arbalétriers



## 6 CRITERE VIBRATOIRE - APPROCHE DU DEVELOPPEMENT DE LA METHODE

Afin de répondre aux enjeux de contexte décrits précédemment, il est apparu pertinent de repartir des bases théoriques et des référentiels d'acceptabilité existants pour développer une méthode de vérification adaptée aux divers types de planchers tout en restant la plus cohérente possible.

On présente dans ce qui suit de manière synthétique les étapes de raisonnement ayant permis de développer la méthode proposée. Il convient de se référer au §8 pour une meilleure compréhension des principaux éléments théoriques qui y sont plus détaillés que dans la présente section.

### 6.1 Problématique

La problématique du critère vibratoire pour un plancher (dit confort à la marche) peut être posée de la manière suivante : un système (ici le plancher) est excité par une source d'excitation (ici me marcheur), et sa réponse à cette excitation est perçue par un récepteur (un autre occupant) qui peut ou non en ressentir un inconfort.

- Le système (plancher) est caractérisé par :
  - sa rigidité ;
  - sa masse et plus particulièrement sa masse modale (§8.3.3) ;
  - son amortissement modal (§8.5.2) ;
  - ses fréquences propres (§8.2)
  - ses modes propres (§8.3), et leur forme.
- L'excitation (marcheur) est caractérisée par (§8.6) :
  - son amplitude (force statique induite par le poids du marcheur) ;
  - sa fréquence ;
  - sa durée, qui détermine la quantité d'oscillation perçue par le récepteur ;
  - sa fonction représentative (§8.4), l'excitation étant rarement une simple fonction sinusoïdale.
- La réponse peut être caractérisée par (§8.5):
  - l'accélération (§8.5.1);
  - la vitesse ;
  - le déplacement ;
 elle diffère selon que la fréquence fondamentale du système soit
  - proche de celle de l'excitation : on parle alors de réponse résonante (§8.5.4);
  - nettement plus élevée que celle de l'excitation : on parle alors de réponse non-résonante ou transitoire (§8.5.4).

En outre, un plancher est rarement un système oscillatoire continu à un seul élément. Il s'agit le plus souvent d'un ensemble d'éléments dont le comportement peut être décomposée en une série de systèmes discrets à un seul degré de liberté.

Au-delà de la modélisation du système décrite ci-dessus et du calcul de sa réponse, se pose la question de la perception par le récepteur, et du positionnement de ce niveau de perception par rapport à divers niveaux de sensibilité pouvant mener à l'inconfort, et donc des limites pour le critère vibratoire.

Enfin, d'un point de vue plus pragmatique pour les planchers de structure bois, le critère doit permettre de répondre de la manière la plus cohérente possible aussi bien à des planchers de masse et/ou rigidité transversale faibles (p.ex. plancher à solivage) ou élevées (p.ex. CLT ou mixte bois-béton).

### 6.2 Excitation due à la marche

NOTE : Les informations de cette section sont une synthèse des éléments décrits au §8.6.

De nombreuses études ont montré que la fréquence de la marche  $f_m$  se situe entre 1,5 et 2,5 Hz, 3 Hz pour une marche très rapide proche de la course.

Une fréquence  $f_m$  de 2,5 Hz ne peut être atteinte que sur des planchers d'une longueur suffisante, tels que ceux de couloirs de bureaux ou d'ERP.

Pour un plancher résidentiel classique, la fréquence de la marche  $f_m$  se situera autour de 1,5Hz (2,0 Hz maximum).

## 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 fonction de la force d'excitation due à la marche est complexe et illustrée ci-dessous. Elle peut être décomposée en série de Fourier, une série d'ondes sinusoïdales dont la fréquence est à chaque fois un multiple entier (ou harmonique) de la fréquence d'excitation  $f_m$ . Chaque harmonique a donc ses propres paramètres : fréquence (multiple de  $f_m$ ), amplitude et déphasage.

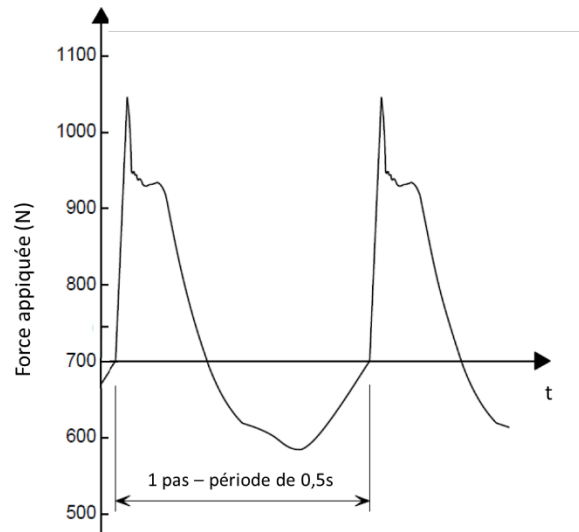


Fig. 9 Exemple de fonction d'excitation dynamique due à la marche avec  $f_m = 2$  Hz

Le graphe ci-dessous illustre la forme moyenne des 4 premières harmoniques de la marche exprimée sur la base du coefficient dynamique de force statique DLF (rapport de l'amplitude à la force statique du marcheur pour normaliser les données indépendamment du poids du marcheur) :

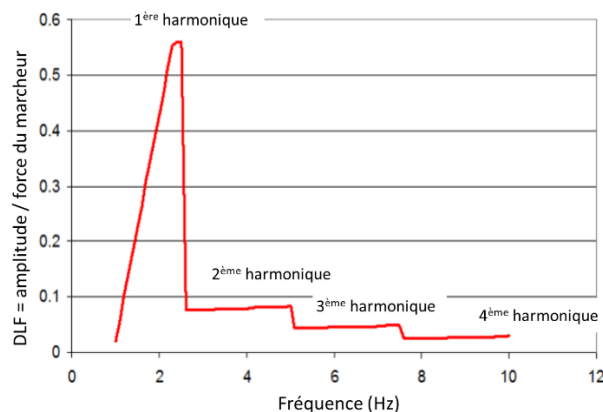


Fig. 10 Forme moyenne des 4 premières harmoniques de la marche exprimée avec le coefficient DLF

On peut tirer de ces éléments et analyses les conclusions suivantes :

- La conception des planchers doit viser une fréquence fondamentale supérieure à :
  - 3 Hz dans tous les cas pour éviter tout phénomène de résonance,
  - 4,5 à 5 Hz de préférence, afin de limiter l'influence de la 2<sup>de</sup> harmonique et de réduire l'impact de la réponse non-résonante liée à la 1<sup>ère</sup> harmonique.
- Pour l'excitation due à la marche, les harmoniques au-delà de la 3<sup>ème</sup> ou 4<sup>ème</sup> peuvent être négligées.
- Le comportement des planchers peut être catégorisé selon que leur fréquence fondamentale  $f_1$  est supérieure ou inférieure à 4 fois la fréquence de la marche  $f_m$  :
  - Si  $f_1 \leq 8$  à 10 Hz (fréquence faible) : le plancher est en mode de réponse résonante
  - Si  $f_1 > 8$  à 10 Hz (fréquence élevée) : le plancher est en mode de réponse transitoire

NOTE : On remarque que l'on retrouve la valeur remarquable de 8 Hz comme niveau de fréquence fondamentale séparant deux modes de réponse des planchers et qui est en quelque sorte une limite du critère actuel de l'Eurocode 5

## 6.3 Acceptabilité

### 6.3.1 PERCEPTION HUMAINE

La perception du phénomène vibratoire et l'inconfort qui peut en résulter varient d'un individu à un autre, il est donc difficile de fixer des limites strictes à l'acceptabilité qui garantissent la satisfaction de tout individu pendant la durée de vie de l'ouvrage.

Les évaluations subjectives menées dans diverses études permettent de calibrer des paramètres et/ou limites de critères proposés, mais sont très difficiles à traduire en termes qui soient, d'une part, mesurables mathématiquement dans le cadre d'une vérification, et, d'autre part, compréhensibles par l'individu ou le maître d'ouvrage.

La perception du phénomène vibratoire par l'être humain a fait l'objet de nombreuses études qui ont permis de définir un certain nombre de référentiels normatifs (notamment l'ISO 10137, la BS 6472, l'ANSI S3.29) qui décrivent l'inconfort en termes d'accélération perçue.

Les niveaux de perception et d'inconfort sont décrits sous forme d'accélération quadratique moyenne  $a_{rms}$ , qui est préférée à l'accélération maximale (de pic)  $a_{peak}$  car elle est plus représentative de l'oscillation perçue dans le temps et plus aisément mesurable que la vitesse ou le déplacement.

La valeur de base de l'accélération qui peut être perçue par l'être humain dépend de la direction d'incidence sur le corps illustrée ci-dessous. Dans le cas d'un plancher, on se concentrera sur la direction de l'axe z.

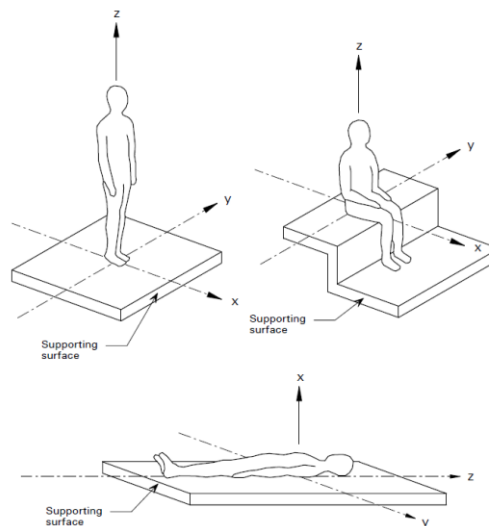


Fig. 11 Directions de l'oscillation vibratoire définies dans l'ISO 2631

La perception de l'oscillation dépend également de sa fréquence, car la sensibilité du corps humain à une certaine amplitude d'oscillation varie avec sa fréquence. Ce phénomène est comparable avec celui d'un sifflet usuel et d'un sifflet à ultrasons : bien que le volume sonore (l'amplitude) des deux sifflets soit le même, l'être humain ne pourra pas percevoir (entendre) le sifflet à ultrason car la fréquence élevée de l'onde sonore n'est pas dans la plage de sensibilité de l'oreille humaine. Il en est de même pour la perception du phénomène vibratoire par le corps humain dans sa globalité.

Cette variation de sensibilité peut être prise en compte soit en atténuant la réponse calculée (fréquences de moindre sensibilité) soit en amplifiant la valeur de base de l'accélération. Le degré d'atténuation ou d'amplification est appelé « pondération en fréquence ». Des valeurs de pondération en fréquence sont données dans l'ISO 2631 (ou encore BS 6841) en fonction (notamment) de la direction de l'oscillation et de l'activité de l'être humain (p.ex. travail de précision, travail de bureau, déplacement, ...).

### 6.3.2 SEUILS D'ACCEPTABILITE

Les seuils d'acceptabilité ont fait l'objet de nombreux travaux qui ont permis de définir des valeurs de base de l'accélération auxquelles on applique ensuite une pondération de fréquence pour obtenir des courbes de base en fonction de la direction de l'oscillation et de la fréquence reprises dans les normes citées précédemment.

Les valeurs de base de l'accélération sont :

- $a_{rms,base} = 5,00 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$  pour l'oscillation selon l'axe z
- $a_{rms,base} = 3,57 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$  pour l'oscillation selon l'axe x ou l'axe y

**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.

Les courbes de base obtenue par application de la pondération en fréquence forment une ligne qui représente un niveau constant de perception, dite ligne d'iso-perception (Fig. 12).

Le Tableau C.1 de l'ISO 10137 indique des coefficients multiplicateurs de la courbe de base pour des vibrations continues et correspondent à des niveaux de faible probabilité d'insatisfaction. Les vibrations continues ne sont pas communes dans la réalité et représentent le cas le plus défavorable d'excitation.

A l'inverse, le rapport entre la réponse d'un système à une oscillation à la valeur de base (pour la fréquence fondamentale du système) permet de mesurer un niveau de perception et donc de performance. On appelle ce rapport le facteur de réponse R qui peut donc s'écrire :

$$R = \frac{a_{rms}}{a_{rms,base}} \quad \text{ou encore :} \quad R = \frac{v_{rms}}{v_{rms,base}} \quad (1)$$

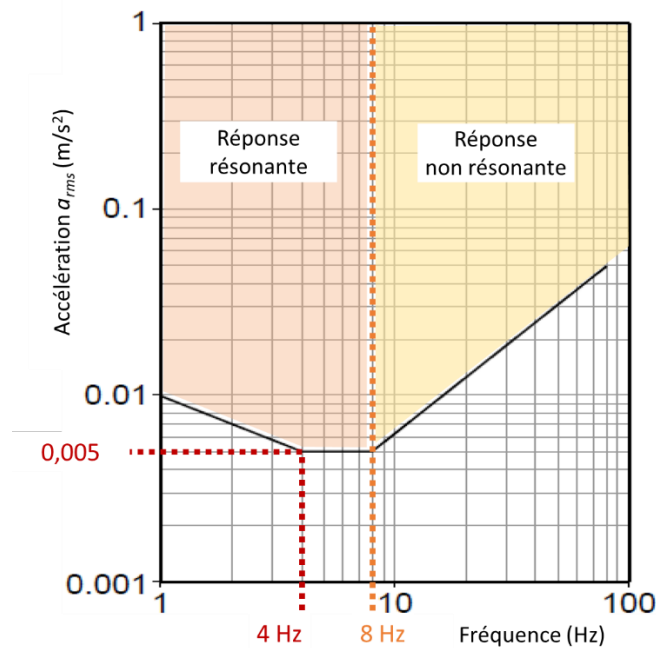


Fig. 12 Courbe de base de l'ISO 10137 (Fig. C1 – Annexe C) pour l'axe z

On observe :

- que pour une fréquence comprise entre 4Hz et 8 Hz, la valeur de l'accélération  $a_{rms}$  est constante et égale à la valeur de base de  $5,00 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$
- que pour une fréquence  $\geq 8 \text{ Hz}$ , la valeur de l'accélération  $a_{rms} \text{ (m/s}^2\text{)}$  croit linéairement avec la fréquence ( $\text{s}^{-1}$ ), fonction dont la dérivée sera en  $\text{m/s}$ , donc une vitesse, et donc que la vitesse  $v_{rms}$  sera constante

Note : pour la courbe de base ci-dessus et  $f \geq 8 \text{ Hz}$  on a  $v_{rms} = 1,0 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$

- que le comportement des planchers peut être catégorisé selon leur fréquence fondamentale  $f_1$  en deux catégories :
  - si  $f_1 \leq 8 \text{ Hz}$  : le plancher est en mode de réponse résonante, la valeur de base de  $a_{rms}$  est constante =  $0,005 \text{ m/s}^2$
  - si  $f_1 > 8 \text{ Hz}$  : le plancher est en mode de réponse transitoire, la valeur de base de  $v_{rms}$  est constante =  $0,0001 \text{ m/s}$

Note : cette catégorisation est en accord avec les conclusions du §8.6

A partir de ces observations et en inversant l'équation (1) il est donc possible de définir un critère de performance (un niveau de perception) d'un plancher sur la base d'un multiple de la valeur de base de l'accélération ou de la vitesse quadratique moyenne selon la fréquence fondamentale du plancher :

- si  $f_1 < 8 \text{ Hz}$  :  $a_{rms,lim} = R \times 0,005$
- si  $f_1 \geq 8 \text{ Hz}$  :  $v_{rms,lim} = R \times 0,0001$

- ⇒ plus R est faible, plus le niveau de perception est faible et plus la performance du plancher est élevée.
- ⇒ il est particulièrement intéressant de relever que ces critères sont indépendants du type de plancher bois

## 6.4 Autres paramètres étudiés et pris en compte

### 6.4.1 DEFINITION DE LA MASSE EFFICACE

La masse joue un rôle prépondérant à la fois dans la détermination de la fréquence fondamentale (et donc dans le mode de réponse résonant ou non-résonant du plancher) et dans la masse modale qui impacte directement le calcul de l'accélération et de la vitesse quadratiques moyennes.

On définit ainsi la notion de masse efficace prise en compte dans le calcul pouvant être composée :

- du poids propre de la structure du plancher et de l'ensemble des couches suspendues au ou supportées par le plancher ;
- d'une éventuelle contribution d'une fraction de la charge d'exploitation correspondant à une estimation raisonnable de la charge quasi-permanente réellement présente à tout instant (qui peut différer de  $\psi_2 \cdot Q_k$ ) ;
- d'une éventuelle contribution des cloisons légères, dont l'influence est réelle, mais la prise en compte dans le calcul structural faite par le biais d'une charge surfacique additionnelle approximée, dont il convient de ne retenir qu'une fraction réaliste.

*NOTE :* Ces deux dernières contributions ont un impact significatif sur la réponse des planchers légers de type plancher à solivage.

Il est impératif d'utiliser la même masse efficace pour l'ensemble des calculs de la vérification du critère vibratoire.

### 6.4.2 PLANCHERS SUR APPUIS RIGIDES OU NON-RIGIDES

La fréquence fondamentale d'un plancher comme celle des éléments qui le composent est significativement dépendante des conditions d'appuis. Ceci concerne aussi bien le caractère simplement appuyé ou encastré de ces appuis, que leur rigidité (p.ex. murs) ou non-rigidité (p.ex. poutre).

### 6.4.3 PLANCHERS SUR APPUIS MULTIPLES

Il est fréquent qu'un plancher soit continu sur plusieurs appuis, afin de tirer profit de la rigidité additionnelle fournie par cette configuration dans le calcul structural.

Dans le cas du comportement vibratoire, un plancher sur appuis multiples peut d'une part positivement profiter d'une rigidité accrue, mais également être source d'inconfort lorsque p.ex. le marcheur se trouve sur une portée et le récepteur sur une autre, tous deux étant en outre dans une pièce voire un logement différent(e).

### 6.4.4 CRITERE STATIQUE

Bien qu'il semble possible et suffisant de prime abord de baser la méthode de vérification sur les seuls critères dynamiques d'accélération et de vitesse quadratiques moyennes, deux facteurs plaident pour le maintien d'un critère statique combiné :

- d'une part la préexistence de ce critère dans la version actuelle de l'Eurocode 5, qui peut nécessiter de permettre une transition rendue plus aisée par la combinaison de deux vérifications ;
- d'autre part le retour d'expérience expérimental (notamment dans le cas d'évaluations subjectives) qui montre que dans certains cas le critère statique correctement défini serve de garde-fou complémentaire à une vérification dynamique a priori satisfaite mais conduisant à une évaluation subjective de qualité moindre.

Le critère statique a pour principal défaut d'être essentiellement empirique et de devoir donc être raisonnablement borné pour éviter une utilisation en dehors de son domaine de validité.

## 6.5 Approche performancielle

Une difficulté dans l'usage d'un critère vibratoire est le caractère binaire d'un critère (limite) unique, qui ne permet en outre pas de concevoir des planchers plus ou moins performants dans ce domaine, par manque d'éléments de comparaison.

En outre, il existe des différences intrinsèques importantes entre les différents types de planchers et leur mode de réponse, mais aussi entre les niveaux d'excitation et donc de sollicitation selon la destination du plancher.

Une approche de limite unique est donc jugée inappropriée.

La méthode proposée s'est penchée sur la définition de classes de performance, correspondant à des facteurs de réponse R et donc des critères limites progressifs, permettant à la fois :

- de positionner des exigences différentes selon les types de plancher et/ou leur destination (p.ex. par le biais de l'AN), et
- de fournir des niveaux de performances prédéterminés et « palpables » permettant une conception sous le prisme performanciel.

## 7 CRITERE VIBRATOIRE - METHODE PROPOSEE

### 7.1 Principe général

Ce critère est applicable aux planchers des bâtiments des catégories d'usage A, B, C1, C3 et D (EN 1991-1-1) soumis aux vibrations causées par la marche pour les planchers à travée unique (2 appuis) ou double (3 appuis).

**Il est toujours possible de vérifier un plancher à travées multiples comme un plancher à travée unique dont la portée L est alors la plus grande des portées des différentes travées.**

Il convient de considérer que la fréquence de la marche  $f_w$  est :

- d'au moins 1,5 Hz pour un plancher résidentiel (catégorie d'usage A) ;
- d'au moins 2,0 Hz pour les planchers d'autres catégories d'usage (B, C1, C3 et D);
- d'au moins 2,5 Hz s'il est possible de parcourir plus de 10 m sans obstruction dans une direction donnée (toutes catégories)

On détermine préalablement :

- Le facteur de réponse R correspondant au niveau de performance du plancher visé (Tableau 12) ;
- La fréquence fondamentale du plancher  $f_1$  ;
- Le seuil de réponse non résonante :
  - $f_{1,lim} = \max \{ 4 \cdot f_w ; 8 \text{ Hz} \}$  pour les niveaux de performance I à V ;
  - $f_{1,lim} = \max \{ 4 \cdot f_w ; 7 \text{ Hz} \}$  pour le niveau de performance VI ;
- Selon la valeur de la fréquence fondamentale :
  - si  $f_1 < f_{1,lim}$  (mode de réponse résonant) l'accélération quadratique moyenne  $a_{rms}$  ;
  - la vitesse quadratique moyenne  $v_{rms}$  ;
- La déformation sous charge unitaire  $w_{1kN}$ .

Tableau 12 Critères limites selon le niveau de performance visé

Valeurs limites	Classes de performance du plancher						
	Niveau I	Niveau II	Niveau III	Niveau IV	Niveau V	Niveau VI	Niveau VII
$W_{lim,max}$ [mm]	0,25		0,5	1,0	1,5	2,0	Pas de critère
Facteur de réponse – R	4	8	12	24	36	48	
$f_{1,min}$ [Hz]	4,5						
si $f_1 < 8 \text{ Hz}$ $a_{rms,lim}$ [ $m/s^2$ ]	$R \times 0,005$						
si $f_1 \geq 8 \text{ Hz}$ $v_{rms,lim}$ [ $m/s$ ]	$R \times 0,0001$						

On vérifie ensuite :

$$f_1 \geq f_{1,min} = 4,5 \text{ Hz}$$

PUIS

$$(1) a_{rms} \leq a_{rms,lim} = R \times 0,005$$

si  $f_1 < f_{1,lim}$  (mode de réponse résonant)

$$(2) v_{rms} \leq v_{rms,lim} = R \times 0,0001$$

quelle que soit la valeur de  $f_1$  (mode de réponse non-résonant)

$$(3) w_{1kN} \leq w_{1kN,lim} = \max \left\{ 0,5 ; \min \left( w_{lim,max} ; 150 \cdot R / L \right) \right\}$$

#### COMMENTAIRE :

Une recommandation d'affectation des types de planchers aux niveaux de performance pourrait être :

Catégorie d'usage	Type	Niveau minimal	Niveau moyen	Niveau élevé
A (résidentiel)	Maison individuelle	Niveau VI	Niveau V	Niveau I à IV
	Plancher séparatif	Niveau V	Niveau IV	Niveau I à III
B (bureau)	Tous	Niveau V	Niveau III à IV	Niveau I à II

## 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.

## 7.2 Propriétés du plancher

### 7.2.1 PRINCIPAUX PARAMETRES DU PLANCHER

Les principaux paramètres du plancher entrant dans les calculs du critère vibratoire proposé sont :

- $b$  la largeur du plancher, en m
- $L$  la longueur (portée) du plancher (la plus grande en cas de plancher à travées multiples), en m
- $(EI)_L$  la rigidité efficace apparente de flexion longitudinale par mètre de largeur, en  $N.m^2/m$ 
  - (a) Dans le cas de plancher à solivage ou nervures à entraxe régulier, la rigidité par mètre de largeur s'obtient en divisant la rigidité du tronçon efficace correspondant à une solive, poutre ou nervure  $EI_{eff,joist}$  (en  $N.m^2$ ) par l'entraxe (en m)
  - (b) Le terme « apparent » fait référence à la rigidité globale tenant compte à la fois de la déformation (ou rigidité) due à la flexion pure et de la déformation due au tranchant (ou rigidité de cisaillement)
  - (c) Le terme « efficace » fait référence à la prise en compte du glissement de cisaillement longitudinal d'une connexion imparfaite d'élément composite ou de type CLT
  - (d) Il convient de tenir compte de l'ensemble de ces facteurs pour déterminer  $(EI)_L$
- $(EI)_T$  la rigidité de flexion transversale par mètre de largeur,  $(EI)_T < (EI)_L$ , en  $N.m^2/m$
- $m$  la masse efficace ( $kg/m^2$ )
- $\zeta$  amortissement modal du plancher – a défaut de valeur plus appropriée, celles du s'appliquent

Tableau 13 Amortissement modal  $\zeta$  pour les planchers bois courants

Type de plancher bois	$\zeta$
Plancher à solivage <sup>(1)</sup>	0,020
Plancher massif ou nervuré bois et mixte bois-béton	0,025
Plancher à solivage avec couche flottante <sup>(2)</sup>	0,030
Plancher massif ou nervuré bois et mixte bois-béton avec couche flottante <sup>(2)</sup>	0,040

(1) Plancher à solivage : plancher formé d'un panneau support de plancher supporté par des solives parallèles à entraxe restreint

(2) Couche flottante : couche non-structurale simplement posée (non fixée) sur la structure porteuse (habituellement posée sur une couche isolante)

### 7.2.2 CALCUL DE LA MASSE EFFICACE

La masse efficace du plancher doit être une seule et même valeur pour toutes les vérifications du présent critère vibratoire.

La masse efficace  $m$  du plancher :

- correspond a minima à la masse induite par les charges permanentes, incluant le poids propre du plancher ainsi que celui des couches horizontales qu'il supporte ou suspendues à lui (revêtements de sol, plafonds, ...)
- peut inclure le poids propre des cloisons légères, sans excéder la masse induite par une charge uniforme de  $0,35 \text{ kN/m}^2$  ;
- doit inclure la masse induite par les charges quasi-permanentes sans excéder 10% de la charge d'exploitation totale.

#### COMMENTAIRE :

L'Annexe Nationale de la NF EN 1990 §A1.4.4 demande la prise en compte de 20% de la charge d'exploitation. L'augmentation de la masse est défavorable pour la fréquence fondamentale mais favorable pour la masse modale et donc l'accélération. La clause correspondante du prEN 1995-1-1 limiter cette augmentation à 10%.

La limitation de la masse des cloisons à celle induite par une charge uniforme de  $0,35 \text{ kN/m}^2$  correspond aux cas usuels réels et est plus sécuritaire d'un point de vue du critère vibratoire que la charge de  $0,50 \text{ kN/m}^2$  de la NF EN 1991-1-1.

### 7.2.3 CALCUL DE LA MASSE MODALE

La masse modale du plancher peut être déterminée comme suit :

$$M^* = m \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{L}{2} = \frac{m \cdot b \cdot L}{4} \quad \text{pour plancher simplement appuyé sur 4 côtés} \quad (2)$$

#### COMMENTAIRE :

La formule est valable dans tous les cas courants, que le plancher soit de type laque ou à solivage. En effet, un plancher (plateforme) léger à solivage à faible rigidité transversale a un comportement beaucoup plus proche d'un plancher appuyé sur 4 côtés que sur 2 côtés. Si le plancher devait réellement n'être appuyé que sur 2 côtés (aucune liaison le long de son bord parallèle à la portée), le diviseur 4 peut être remplacé par 2 dans la formule ci-dessus.

### 7.3 Fréquence fondamentale

La fréquence fondamentale d'un plancher sur appuis rigides simples (non encastrés) peut être calculée comme suit :

$$f_1 = k_{e,1} \cdot k_{e,2} \cdot \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{(EI)_L}{m}} \tag{3}$$

avec :  $k_{e,1}$  un coefficient multiplicateur pour un plancher sur appuis multiples ;  $k_{e,1} = 1,0$  pour un plancher sur 2 appuis

L <sub>2</sub> /L (*)	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4	0,3	0,2
$k_{e,1}$	1,00	1,09	1,16	1,21	1,25	1,28	1,32	1,36	1,41

(\*) L est la portée la plus longue et L<sub>2</sub> la portée la plus courte d'un plancher sur 3 appuis

$$k_{e,2} = \sqrt{1 + \left(\frac{L}{b}\right)^4 \cdot \frac{(EI)_T}{(EI)_L}}$$

NOTE : Lorsque la rigidité transversale du plancher est très faible au regard de sa rigidité longitudinale  $(EI)_T \ll (EI)_L$  comme par exemple pour un plancher à solivage  $k_{e,2}$  tend vers 1,0 et on retrouve l'équation de fréquence fondamentale du critère vibratoire actuel de l'Eurocode 5

COMMENTAIRE :

L'équation (3) ci-dessus n'est valable que pour un plancher sur appuis rigides (p.ex. murs) et ne permet pas d'approcher correctement la fréquence fondamentale d'un plancher sur appuis non-rigides (p.ex. poutres).

La fréquence fondamentale d'un plancher sur un ou plusieurs appuis non-rigides peut être calculée comme suit :

$$f_1 = k_{e,1} \cdot k_{e,2} \cdot \frac{18}{\sqrt{\delta_{sys}}} \tag{4}$$

avec :  $\delta_{sys}$  la déformation totale du plancher, sous l'effet de la masse efficace  $m$  (appliquée sur la seule portée la plus longue en cas de travées multiples), en mm

(cette déformation doit tenir compte de tous les facteurs l'influençant tels que la déformation des appuis, la déformation due à l'effort tranchant, l'éventuel glissement d'assemblages de poutres composites)

COMMENTAIRE :

L'équation (4) est valable aussi bien sur appuis rigides que non-rigides, dès lors que le calcul de la déformation totale est réalisé uniquement sous hypothèse de travée unique ( $k_{e,1} = 1,0$ ) et tient compte de la réalité des déformations des divers composants du plancher. Par exemple pour un plancher à solivage ceci peut s'écrire (avec  $\delta_s$  et  $\delta_p$  les déformations respectives de la solive et de la poutre) :

$$f_1 = \frac{18}{\sqrt{\delta_s + \delta_p}}$$

Il est également possible de calculer la fréquence fondamentale d'un plancher sur un ou deux appuis non-rigides à partir de la fréquence fondamentale sur appuis rigides de chacun de ses éléments calculée séparément à partir de l'équation (3) comme suit :

$$f_1 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{1,s}^2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{f_{1,p[1]}^2}}} \tag{5}$$

(cas d'une portée de plancher appuyée sur appui non-rigide d'un seul côté)

$$f_1 = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{1,s}^2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{f_{1,p[1]}^2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{f_{1,p[2]}^2}}} \tag{6}$$

(cas d'une portée de plancher appuyée sur appui non-rigide des deux côtés)

où :  $f_{1,s}$  est la fréquence fondamentale sur appui rigides du plancher (p.ex. solive), et  $f_{1,p[1]}$  et  $f_{1,p[2]}$  celle des appuis non-rigides (p.ex. poutre) [1] et [2] (dans le cas d'un plancher appuyé sur une poutre des deux côtés)



## 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.

### 7.4 Accélération

Dans la plage de fréquence  $f_1 < 8$  Hz, on calcule l'accélération moyenne quadratique  $a_{rms}$  comme suit :

$$a_{rms} = \frac{k_{res} \cdot \mu \cdot F_h}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \zeta \cdot M^*} \quad \text{en m/s}^2 \quad (7)$$

avec :  $k_{res} = \max \left\{ 1,0 ; 0,192 \cdot \left( \frac{b}{L} \right) \cdot \left( \frac{(EI)_L}{(EI)_T} \right)^{0,25} \right\}$  un facteur tenant compte des modes propres plus élevés

$\mu$  = 0,4 est un facteur prenant en compte du fait que la réponse résonante intégrale n'est pas possible et du fait que la trajectoire de marche est rarement exactement au centre de la travée ; il convient de prendre une valeur de 0,8 s'il est possible de parcourir plus de 10 m sans obstruction dans une direction donnée

$F_h$  la force dynamique induite par le marcheur, qu'il convient de prendre égale à 50 N

(la force dynamique est obtenue en multipliant la force statique du marcheur  $F_0 = 700$  N par un facteur de force dynamique fonction de l'harmonique prise en compte et de sa fréquence ; la valeur de 50 N est une valeur enveloppe sécuritaire)

$\zeta$  le coefficient d'amortissement modal

$M^*$  la masse modale, en kg

NOTE : Le calcul de l'accélération selon l'équation (7) reste valable pour  $f_1 \geq 8$  Hz.

### 7.5 Vitesse

Dans la plage de fréquence  $f_1 \geq 8$  Hz, on calcule la vitesse quadratique moyenne  $V_{rms}$  comme suit :

$$V_{rms} = \beta \cdot K_{imp} \cdot K_{red} \cdot \frac{I_m}{(M^* + 70)} \quad \text{en m/s} \quad (8)$$

avec :  $K_{red} = 0,7$  : un coefficient réducteur tenant compte de la différence de positionnement entre la source de l'excitation et la personne qui la perçoit

$M^*$  la masse modale, en kg

et :  $I_m = 42 \cdot \frac{f_w^{1,43}}{f_1^{1,3}}$  en N.s

où :  $f_w$  est la fréquence de la marche, en Hz

$f_1$  est la fréquence fondamentale du plancher, en Hz

$$K_{imp} = \max \left\{ 1,0 ; 0,48 \cdot \left( \frac{b}{L} \right) \cdot \left( \frac{(EI)_L}{(EI)_T} \right)^{0,25} \right\}$$

$$\beta = (0,65 - 0,01 \cdot f_1) \cdot (1,22 - 11,0 \cdot \zeta) \cdot \eta$$

où : pour un plancher à solivage :  $\eta = 1,35 - 0,4 \cdot K_{imp}$  lorsque  $1,0 \leq K_{imp} \leq 1,9$  ; sinon  $\eta = 0,59$

pour les autres types de plancher :  $\eta = 1,35 - 0,4 \cdot K_{imp}$  lorsque  $1,0 \leq K_{imp} \leq 1,7$  ; sinon  $\eta = 0,67$

## 7.6 Déformation sous charge unitaire

### 7.6.1 CAS GENERAL

La déformation du plancher sous charge unitaire  $w_{1kN}$  peut être calculée comme suit :

$$w_{1kN} = \frac{F \cdot L^3}{48 \cdot (EI)_L \cdot b_{ef}} \quad \text{en mm} \quad (9)$$

avec :

- $F$  la charge statique unitaire  $F = 1$  kN positionnée à l'endroit le plus défavorable
- $L$  la longueur (portée) du plancher (la plus grande en cas de plancher sur appuis multiples), en m
- $(EI)_L$  la rigidité efficace apparente de flexion longitudinale par mètre de largeur, en N.m<sup>2</sup>/m
- $(EI)_T$  la rigidité efficace apparente de flexion transversale par mètre de largeur, en N.m<sup>2</sup>/m
- $b_{ef}$  la largeur efficace, en m

$$b_{ef} = \min \left\{ b ; 0,95 \cdot L \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_T}{(EI)_L}} \right\}$$

Dans le cas de plancher à solivage avec une fourrure continue à mi-travée fixée à chaque solive en partie basse, la contribution de cette fourrure peut être prise en compte en calculant la largeur efficace du plancher comme suit :

$$b_{ef} = \min \left\{ b ; 1,07 \cdot L^{0,75} \cdot \sqrt[4]{\frac{(EI)_{ST} + 0,63 \cdot (EI)_T}{(EI)_L}} \right\}$$

#### COMMENTAIRE :

L'équation (9) s'applique directement aux planchers sur deux appuis rigides, et peuvent par extension s'appliquer aux planchers sur plusieurs appuis rigides avec  $L$  étant la portée la plus longue. Dans ce cas on ne tire pas profit de l'apport mécanique de la configuration sur appuis multiples, mais on s'affranchit également des risques de nuisance causés par un marcheur présent sur une portée et un récepteur présent sur l'autre, les deux étant dans une pièce voire un logement différent(e).

### 7.6.2 CAS DES PLANCHERS SUR APPUIS NON-RIGIDES

Il est possible de calculer la déformation totale d'un plancher sur un ou deux appuis non-rigides à partir de la déformation sur appuis rigides de chacun de ses éléments calculée séparément à partir de l'équation (9) comme suit :

$$w_{1kN} = w_{1kN,s} + 0,5 \cdot w_{1kN,p} \quad (\text{cas d'une portée de plancher appuyée sur appui non-rigide d'un seul côté}) \quad (10)$$

$$w_{1kN} = w_{1kN,s} + 0,5 \cdot (w_{1kN,p[1]} + w_{1kN,p[2]}) \quad (\text{cas d'une portée de plancher appuyée sur appui non-rigide des deux côtés}) \quad (11)$$

où :  $w_{1kN,s}$  est la fréquence fondamentale sur appuis rigides du plancher (p.ex. solive), et  $w_{1kN,p[1]}$  et  $w_{1kN,p[2]}$  celle des appuis non-rigides (p.ex. poutre) [1] et [2] (dans le cas d'un plancher appuyé sur une poutre des deux côtés)

#### COMMENTAIRE :

Les équations (10) et (11) suivent la même approche que les équations (5) et (6) de la fréquence fondamentale dans la même configuration, qui est décrite au §8.2.2..

### 7.6.3 CAS DES PORTEES MULTIPLES

Dans le cas général, la déformation sous charge unitaire de plancher à travées multiples est approchée par le calcul sur la seule portée  $L$  de la travée la plus longue, afin notamment de tenir compte du fait que l'apport de rigidité des travées adjacentes est contrebalancé par le risque de propagation de l'onde vibratoire d'une travée sur l'autre.

Dans les cas où l'on considère que le risque de nuisance causé par un marcheur présent sur une portée et un récepteur présent sur l'autre, les deux étant dans une pièce voire un logement différent(e) n'est pas significatif (par exemple au sein du même logement sur un plancher peu ou pas cloisonné), ou dans des cas où les configurations de chargement (et donc de masse) des deux portées sont différentes ou complexes (p.ex. une portée avec chape et une portée sans chape), il est possible de déterminer la déformation sous charge unitaire par application de la mécanique des structures en considérant le plancher sur appuis multiples.

## 8 THEORIE DE LA VIBRATION

On présente dans ce qui suit de manière synthétique les principaux éléments théoriques s'appliquant au cas étudié, et les étapes de raisonnement ayant permis de développer la méthode proposée.

### 8.1 Systèmes continus ou discrets

La vibration est de manière générale liée au mouvement d'une masse. On distingue par conséquent deux types de systèmes :

- Les systèmes continus pour lesquels la totalité de la masse considérée est directement liée :
  - ceci concerne par exemple la vibration d'une poutre ou d'une corde d'instrument à corde
  - les problèmes de systèmes continus peuvent en général être résolus par intégration de fonctions mathématiques
- Les systèmes discrets dans lesquels les différentes masses sont indépendantes :
  - ceci concerne par exemple la vibration d'un plancher (la masse) sur ses appuis (le ressort)
  - les problèmes de systèmes discrets peuvent en général être résolus par calcul matriciel

#### 8.1.1 SYSTEMES CONTINUS

Les équations mathématiques qui régissent le comportement des systèmes continus mettent en relation :

- une réponse en termes de déplacement, vitesse et accélération à un lieu et un instant donnés
- à la masse et la rigidité du système
- et à la force initiale à l'origine de l'excitation

Dans le cas d'une poutre en flexion par exemple, l'équation de base est :

$$m \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \cdot \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = F(x, t) \quad (12)$$

où :	$x$	la position le long de la poutre
	$t$	le temps
	$m$	la masse
	$w$	le déplacement de la poutre, fonction de $x$ et $t$
	$EI$	la rigidité de flexion
	$F(x, t)$	la fonction d'excitation (force appliquée en fonction du temps et de la position)

On détermine p.ex. la fréquence propre de la poutre en résolvant l'équation (12) selon les conditions aux limites appropriées et en annulant la fonction d'excitation.

#### 8.1.2 SYSTEMES DISCRETS

Les systèmes discrets sont usuellement modélisés au moyen de trois composants :

- la masse  $m$
- le ressort de rigidité  $k$
- l'amortisseur d'amortissement  $\zeta$

excités par une force  $F(t)$  et induisant un déplacement de la masse  $x(t)$ .

On distingue les systèmes à un seul degré de liberté de ceux à degrés de libertés multiples. On se concentrera sur le modèle à un seul degré de liberté.

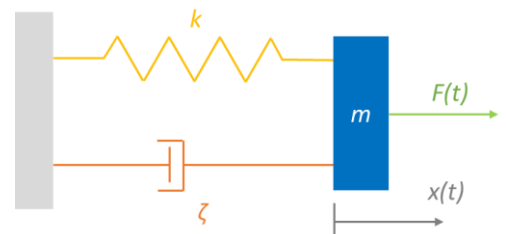


Fig. 13 Modèle de système discret à un seul degré de liberté

Le modèle à un seul degré de liberté permet de discrétiser d'un système continu en une série de systèmes discrets simples correspondant à chacun des modes propres du système continu, avec ses paramètres propres, permettant d'évaluer la réponse du système à chaque fréquence propre.

## 8.2 Fréquence

Les fréquences propres d'un système, habituellement données en Hz (nombre de cycles par seconde), sont une mesure de la manière dont un système oscille. Elles sont un paramètre essentiel de l'analyse du phénomène vibratoire, puisqu'il est impossible d'étudier la réponse du système à une excitation donnée sans connaître ces fréquences.

A titre d'exemple, une excitation correspondant à une force appliquée pendant 1 seconde puis retirée, engendrera une réponse forte sur un système ayant une fréquence propre de 1Hz, alors qu'elle n'aura aucun effet sur un système dont la fréquence propre est de 0,01 Hz (1 cycle toutes les 100 secondes) et qui n'aura donc pas le temps de réagir à l'excitation, ou de 100 Hz (100 cycles par seconde) et pour lequel la force sera quasi statique.

### 8.2.1 CALCUL DE LA FREQUENCE PROPRE D'UN ELEMENT

En résolvant l'équation (12) avec une fréquence radiale  $\omega_n = 2 \cdot \pi \cdot f_n$  on obtient la fréquence propre  $f_n$  du n<sup>ième</sup> mode propre d'une poutre de section uniforme en oscillation élastique libre :

$$f_n = \frac{K_n}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m}} \tag{13}$$

- avec :  $EI$  la rigidité de flexion dynamique de la poutre (N.m<sup>2</sup>)
- $m$  la masse efficace (kg/m)
- $L$  la portée de la poutre (m)
- $K_n$  une constante représentant les conditions d'appui du n<sup>ième</sup> mode propre, dont certaines valeurs sont indiquées ci-dessous

Tableau 14 Coefficients  $K_n$  pour poutre de section uniforme

Conditions d'appui	$K_1$	$K_2$	$K_3$
Appuis simples (rotule)	$\pi^2$ ( $\approx 9,9$ )	$4 \pi^2$ ( $\approx 39,5$ )	$9 \pi^2$ ( $\approx 88,8$ )
Encastrement	22,4	61,7	121

NOTE : On retrouve avec  $K_1 = \pi^2$  la formule connue de la fréquence fondamentale  $f_1 = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI}{m}}$  du critère actuel de l'EC5.

Il est possible de simplifier et d'exprimer de manière approchée la fréquence fondamentale d'une poutre de section uniforme sur appuis simples en fonction de sa flèche maximale sous l'effet de la masse linéique  $m$  :

On pose :  $\delta = \frac{5 \cdot m \cdot g \cdot L^4}{384 \cdot EI}$  la déformation (mm) d'une poutre sur deux appuis sous chargement uniformément réparti (14)

(où  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  est l'accélération due à la gravité)

En réarrangeant l'équation (14) pour exprimer  $m$  en fonction des autres paramètres, puis en introduisant  $m$  et  $K_1 = \pi^2$  dans l'équation (13) on obtient :

$$f_1 = \frac{\pi^2}{2 \cdot \pi \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{EI \cdot 5 \cdot g \cdot L^4}{384 \cdot EI \cdot \delta \cdot 10^{-3}}} = \frac{\pi}{2} \cdot \sqrt{\frac{5000 \cdot g}{384}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\delta}} = \frac{17,753}{\sqrt{\delta}}$$

et donc :  $f_1 \approx \frac{18}{\sqrt{\delta}}$  (15)

On peut aisément démontrer que la valeur d'environ 18 au numérateur est également atteinte pour d'autres conditions d'appuis en tenant compte de la valeur de  $K_n$  appropriée et en utilisant l'équation de la flèche adéquate.

Il est donc possible de retenir l'équation (15) comme équation généralisée de la fréquence propre d'un élément en fonction de sa flèche  $\delta$  sous l'effet de la masse efficace  $m$  (comprenant le poids propre de l'élément et une fraction appropriée des charges quasi-permanentes).

8.2.2 CALCUL DE LA FREQUENCE PROPRE D'UN SYSTEME D'ELEMENTS

L'approximation de Dunkerley permet de déterminer la fréquence propre d'un système composé de plusieurs éléments distincts à partir de la fréquence propre individuelle de chaque élément. Cette approximation est illustrée ci-après dans pour un plancher composé d'une poutre (p) et de solives (s) :

$$\frac{1}{f_{1,pl}^2} = \frac{1}{f_{1,s}^2} + \frac{1}{f_{1,p}^2} \quad \text{où } f_{1,pl}, f_{1,s} \text{ et } f_{1,p} \text{ sont les fréquences propres respectives du plancher, de la solive et de la poutre}$$

qui s'écrit également :

$$f_{1,pl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{1,s}^2} + \frac{1}{f_{1,p}^2}}} \tag{16}$$

On voit qu'en substituant l'équation (15) calculée séparément pour la solive et la poutre avec leurs flèches respectives  $\delta_s$  et  $\delta_p$  on retrouve :

$$\frac{1}{f_{1,pl}^2} = \frac{1}{f_{1,s}^2} + \frac{1}{f_{1,p}^2} = \frac{\delta_s}{18^2} + \frac{\delta_p}{18^2} = \frac{\delta_s + \delta_p}{18^2} \quad \text{et donc :} \quad f_{1,pl} \approx \frac{18}{\sqrt{\delta_s + \delta_p}} = \frac{18}{\sqrt{\delta_{pl}}}$$

Il est donc également possible de retenir l'équation (15) comme équation généralisée de la fréquence propre d'un plancher composé de plusieurs éléments, dès lors que la flèche est calculée de manière appropriée.

L'approximation de Dunkerley n'est valable que pour les systèmes unidimensionnels ou sur appuis rigides, or dans le cas d'un plancher à solivage sur poutre porteuse, le système global est bi-dimensionnel et l'un des appuis au moins est non-rigide.

On rencontre principalement deux configurations :

- La solive est appuyée d'un côté sur un appui rigide (p.ex. mur) et de l'autre sur une poutre porteuse qui peut être modélisée par un ressort (Fig. 14). Ceci s'applique aussi bien :
  - à une solive sur 3 appuis, dont l'appui intermédiaire est une poutre porteuse
  - à deux solives sur 2 appuis, partageant le même sur une poutre porteuse
  - à une solive sur 2 appuis, dont un appui est une poutre porteuse

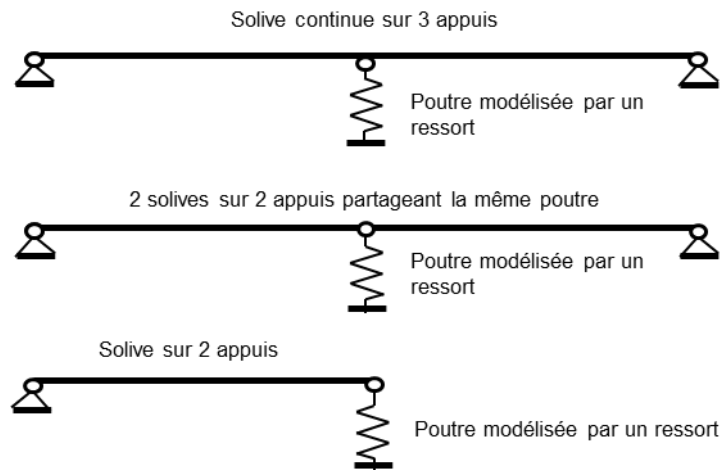


Fig. 14 Modélisation d'une solive appuyée sur une poutre d'un côté

- La solive est appuyée des deux côtés sur une poutre porteuse qui peut être modélisée par un ressort (Fig. 15)

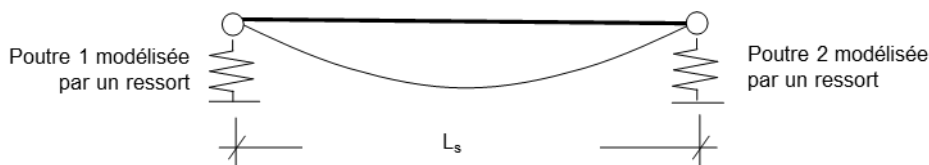


Fig. 15 Modélisation d'une solive appuyée sur une poutre des deux côtés

**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.

Winter/Hamm/Richter ont proposé une approche pour adapter l'équation de Dunkerley à cette configuration, en prenant en compte le fait que la déformation maximale de la solive et de la poutre sont localisées différemment et que la flèche de la poutre varie selon sa longueur.

Dans le cas d'une solive appuyée d'un côté sur appui rigide (p.ex. un mur) et de l'autre sur une poutre porteuse fléchie on considère que la déformation du plancher correspond à la déformation de la solive  $\delta_s$  augmentée de la moitié de la déformation moyenne de la poutre  $w_p$  (Fig. 16).

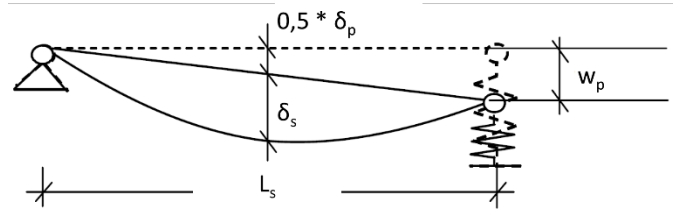


Fig. 16 Déformation  $\delta_s$  d'une solive appuyée d'un côté sur une poutre porteuse

On détermine la déformation moyenne de la poutre  $w_p$  en fonction de la déformation totale  $\delta_p$  en approchant la variation de cette dernière le long de la poutre par le ratio entre l'aire parabolique de la déformée et l'aire rectangulaire théorique (Fig. 17).

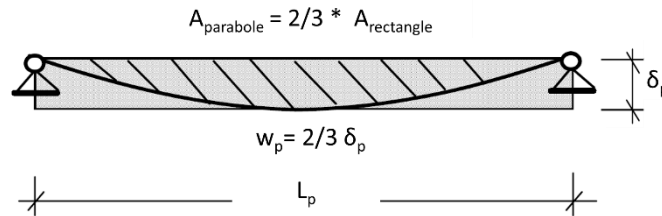


Fig. 17 Rapport de l'aire parabolique de la déformée de la poutre à l'aire rectangulaire théorique

Ceci s'écrit :

$$f_{1,pl} \approx \frac{18}{\sqrt{\delta_{pl}}} = \frac{18}{\sqrt{\delta_s + w_p}} = \frac{18}{\sqrt{\delta_s + 0,5 \cdot \frac{2}{3} \cdot \delta_p}}$$

dont on déduit :

$$\frac{1}{f_{1,pl}^2} = \frac{\delta_s + 0,5 \cdot \frac{2}{3} \cdot \delta_p}{18^2} = \frac{\delta_s}{18^2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{\delta_p}{18^2} = \frac{1}{f_{1,s}^2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{f_{1,p}^2}$$

et enfin :

$$f_{1,pl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{1,s}^2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{f_{1,p}^2}}} \quad \text{(solive appuyée sur une poutre d'un seul côté)} \quad (17)$$

En réappliquant le même raisonnement au cas d'une solive appuyée des deux côtés sur une poutre, et en tenant bien compte du fait que les fréquences fondamentales  $f_{1,p[1]}$  et  $f_{1,p[2]}$  des deux poutres peuvent être différentes on obtient :

$$f_{1,pl} = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{f_{1,s}^2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{f_{1,p[1]}^2} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{f_{1,p[2]}^2}}} \quad \text{(solive appuyée sur une poutre des deux côtés)} \quad (18)$$

Les équations (16), (17) et (18) peuvent être utilisées de manière générale pour déterminer la fréquence fondamentale du plancher selon qu'il soit appuyé sur appuis rigide des deux côtés (16), sur appui non-rigide sur un (17) ou deux (18) côtés.

## 8.3 Modes propres et masse modale

### 8.3.1 FORMES DE MODES

Un système continu démontre une série de fréquences propres et donc de modes propres, chacun d'entre eux ayant sa forme spécifique. Chaque mode de forme décrit la forme du système au moment de sa déformation maximale. Le mode 1 correspondant à la fréquence fondamentale correspond toujours à la forme de mode la plus simple.

On décrit usuellement chaque forme de mode propre avec une amplitude unitaire adimensionnelle de 1.

Les modes propres d'une poutre de section uniforme sur deux appuis sont de forme sinusoïdale et peuvent être exprimés par la fonction suivante :

$$\mu_n(x) = \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \quad \text{où } n = 1, 2, 3, \dots \text{ est le numéro du mode et } x \text{ la position le long de la poutre de longueur } L$$

Cette fonction de forme peut être multipliée par une fonction d'amplitude variable dans le temps  $g_n(t)$  pour donner le déplacement en tout point  $x$  à tout instant  $t$ , par exemple une fonction sinusoïdale simple :

$$g_n(t) = u_n \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \quad \text{où } u_n \text{ est l'amplitude maximale du mode } n \text{ et } f \text{ la fréquence de la fonction d'excitation}$$

pour donner la fonction de forme d'un mode donné :

$$w_n(x, t) = g_n(t) \cdot \mu_n(x) = u_n \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \quad (19)$$

Les formes des 3 premiers modes d'une poutre de section uniforme sur deux appuis sont illustrés en Fig. 18 ci-dessous.

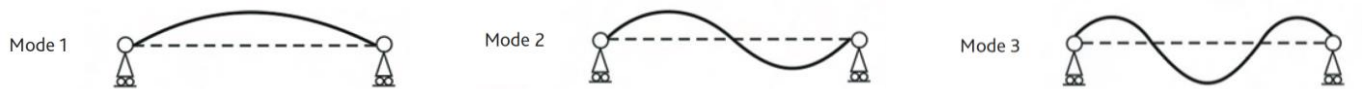


Fig. 18 Forme des 3 premiers modes propres d'une poutre sur deux appuis

On rappelle que sous une force extérieure d'excitation donnée, chaque mode propre réagira différemment selon sa propre fonction de forme.

### 8.3.2 SUPERPOSITION DES MODES

Pour déterminer le déplacement du système à un instant donné, il est nécessaire de superposer les différentes formes de mode propre, en tenant compte de leur éventuel décalage de phase  $\varphi_n$  p.ex. sous l'effet de la force d'excitation sinusoïdale décrite plus haut :

$$w(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} u_n \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi_n) \cdot \sin\left(\frac{n \cdot \pi \cdot x}{L}\right) \quad (20)$$

### 8.3.3 MASSE MODALE

La masse modale d'un système est une mesure de la masse réellement mobilisée dans un mode propre donné, et donc de la quantité d'énergie cinétique comprise dans le système.

La masse modale est déterminée pour chaque mode propre d'un système continu discrétisé sous forme d'une série de systèmes discrets à degré de liberté unique, à partir de l'équation d'énergie cinétique maximum.

**NOTE :** Afin de ne pas alourdir inutilement cette section, on ne décrira pas ici plus avant les aspects théoriques et mathématiques du calcul de la masse modale. Il est avant tout important de mentionner ce paramètre important dans le calcul de l'accélération.

Pour un système unidimensionnel à degré de liberté unique, la masse modale correspond à la moitié de la masse totale :

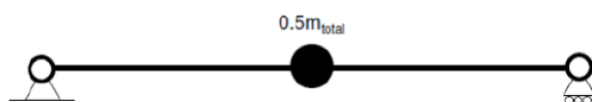


Fig. 19 Principe de la masse modale d'un système unidimensionnel à degré de liberté unique

## 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.

Ce type de système correspond à la configuration d'une solive sur 2 appuis. On détermine alors la masse modale  $M_s^*$ :

$$M_s^* = m \cdot \frac{L}{2} \quad \text{pour une solive avec } m \text{ la masse en kg/m de longueur (portée) } L \text{ en m}$$

En ramenant cette masse modale par solive à une masse modale par mètre de largeur de plancher, et pour un plancher de largeur  $b$  (en m) on déduit finalement la masse modale  $M^*$  du plancher simplement appuyé sur 2 côtés :

$$M^* = m \cdot b \cdot \frac{L}{2} = \frac{m \cdot b \cdot L}{2} \quad \text{plancher simplement appuyé sur 2 côtés avec } m \text{ en kg/m}^2 \quad (21)$$

Dans le cas d'un plancher de type plaque simplement appuyé sur les 4 côtés, la même approche donne :

$$M^* = m \cdot \frac{b}{2} \cdot \frac{L}{2} = \frac{m \cdot b \cdot L}{4} \quad \text{plancher simplement appuyé sur 4 côtés avec } m \text{ en kg/m}^2 \quad (22)$$

## 8.4 Fonctions d'excitation

### 8.4.1 FONCTION D'EXCITATION CONTINUE

Dans la pratique il est assez rare qu'une fonction d'excitation externe soit aussi simple que la fonction sinusoïdale simple (19). Les fonctions d'excitation plus complexes peuvent être décomposées en une série d'ondes sinusoïdales dont la fréquence est à chaque fois un multiple entier (ou harmonique) de la fréquence d'excitation  $f$ .

Chaque harmonique a donc ses propres paramètres : fréquence (multiple de  $f$ ), amplitude et déphasage.

La série d'ondes sinusoïdales simples décomposant la fonction d'excitation complexe ainsi définie est connue sous le terme de série de Fourier.

A titre d'exemple la Fig. 20 ci-dessous décrit les 4 premiers termes de la série de Fourier correspondant à la force d'excitation d'une activité d'aérobic légère, ainsi que la forme de l'excitation totale.

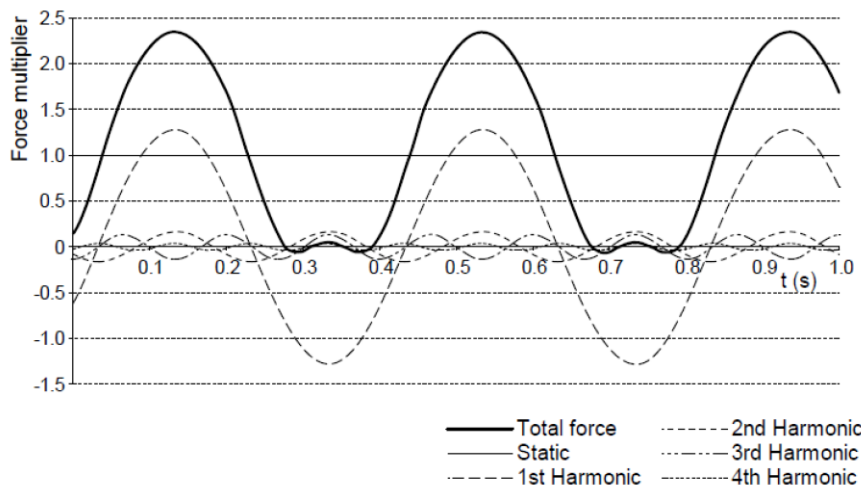


Fig. 20 Exemple de série de Fourier pour une activité d'aérobic légère

On peut observer que l'amplitude de chaque harmonique successive diminue rapidement, et que l'essentiel de l'énergie est donc concentré sur les premières harmoniques.

### 8.4.2 FORCE D'IMPULSION

Pour des planchers de fréquence fondamentale élevée (voir note ci-dessous) la réponse à l'impact d'un pas diminue en général jusqu'à devenir négligeable avant l'impact du prochain pas.

La fonction d'excitation s'apparentera alors à une série d'évènements discrets et non à une fonction continue.

Ces forces peuvent être modélisées sous forme d'impulsions (grandeur théorique correspondant à une force d'intensité infinie pendant une durée infinitésimale).

NOTE : On définit habituellement les planchers dont la fréquence fondamentale est supérieure à celle de la 4ème harmonique de la marche comme plancher de fréquence fondamentale élevée). Ceci est démontré au §8.6.



## 8.5 Réponse

Les niveaux de perception et d'acceptabilité de la vibration par l'être humain étant usuellement définis sous forme d'accélération, c'est ce type de réponse plutôt que le déplacement ou la vitesse qui sera étudié dans ce qui suit.

### 8.5.1 ACCELERATION

L'accélération est la dérivée seconde par rapport au temps du déplacement (p.ex. de l'équation (20)).

L'accélération peut être présentée de multiples manières comme par exemple l'accélération maximale ou de pic  $a_{peak}$ . Cependant une telle représentation ne permet pas d'estimer une durée pendant laquelle le système est soumis à ce niveau d'accélération.

C'est la raison pour laquelle on lui préfère l'accélération quadratique moyenne (en anglais « root-mean-square ») notée  $a_{rms}$  calculée comme suit :

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T a(t)^2 dt} \quad \text{où } T \text{ est la période considérée, et } a(t) \text{ la fonction descriptive de l'accélération} \quad (23)$$

La période  $T$  de calcul doit être suffisamment longue pour couvrir un cycle complet. La fréquence de la marche se situant entre 1,5 et 2Hz, l'ISO 2631-1 recommande de prendre  $T = 1$  seconde.

### 8.5.2 AMORTISSEMENT MODAL

L'amortissement est un terme général relatif à la dispersion ou dissipation d'énergie d'un système, qui conduit à la réduction progressive de l'oscillation vibratoire puis à son arrêt.

L'amortissement critique correspond à l'amortissement total nécessaire pour ramener un système à sa position d'équilibre sans aucune oscillation dans le temps le plus court possible.

On exprime généralement l'amortissement modal  $\zeta$  d'un système par un pourcentage de l'amortissement critique.

Les facteurs causant l'amortissement des structures (frottement, glissement des assemblages, ductilité, mobilier qui entre en vibration et disperse ainsi une partie de l'énergie, ...) sont très variables. Les valeurs d'amortissement utilisées dans le calcul sont en général issues d'essais et reconnus par expérience. Sur la base de nombreux travaux et mesures in situ, les valeurs suivantes d'amortissement modal pour les planchers bois courants peuvent être prise dans le Tableau 13.

L'amortissement peut également être causé par la présence humaine, mais nécessite une densité d'occupation importante, et est par conséquent usuellement négligé dans le calcul, puisqu'il n'est pas possible de garantir un certain niveau d'occupation à tout instant.

### 8.5.3 ETAT TRANSITOIRE ET STATIONNAIRE

Chaque réponse peut être décomposée en deux parties :

- l'état stationnaire qui comme son nom l'indique est la réponse une fois que l'oscillation s'est stabilisée
- l'état transitoire qui est la réponse avant que le système n'atteigne l'état stationnaire

La réponse d'un système à une excitation régulière prendra la forme d'un des deux graphes illustrés ci-dessous.

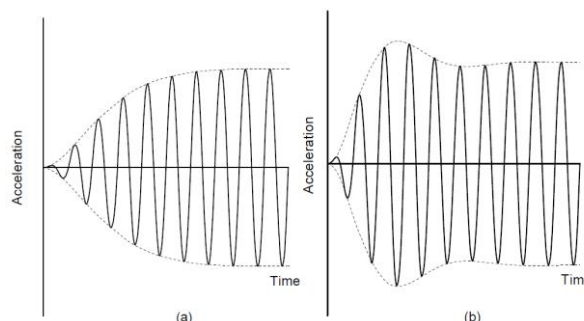


Fig. 21 Exemples d'enveloppe de réponse à une excitation régulière

Dans les deux graphes de la Fig. 21 l'état stationnaire est identique et les 3 dernières oscillations se situent dans l'état stationnaire.

Lorsque la fréquence fondamentale du plancher est élevée (au regard de la fréquence de la marche), la réponse à l'état stationnaire sera négligeable comparée à celle à l'état transitoire et la force appliquée s'apparentera plus à une série d'impulsions, comme illustré ci-dessous :

## 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.

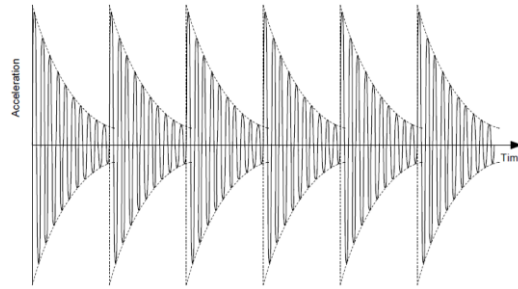


Fig. 22 Exemple de réponse impulsionnelle

### 8.5.4 REPONSE RESONANTE ET NON-RESONANTE

Lorsque la fréquence d'une excitation cyclique constante et continue est identique à une des fréquences propres du système, la réponse du système sera élevée et on parle de réponse résonante. Lorsque la fréquence de l'excitation ne coïncide pas avec une fréquence propre du système, la réponse est dite non-résonante.

Lorsqu'on trace l'évolution de la réponse (exprimée comme accélération  $a_{rms}$ ) à l'état stationnaire d'un système continue soumis à une excitation cyclique constante et continue dont on fait varier la fréquence, on observe une courbe similaire à celle de la figure ci-dessous :

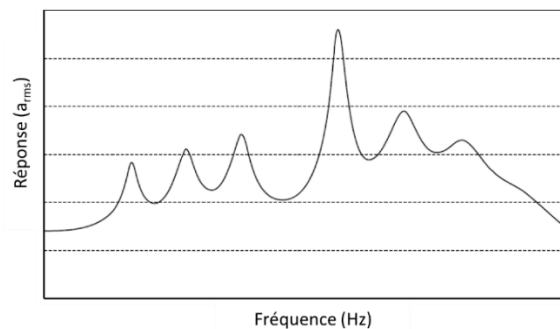


Fig. 23 Exemple de réponse en fonction de la fréquence d'excitation

Chacun des pics de la figure correspond à une réponse résonante.

On observe que bien qu'inférieures aux réponses résonantes, les réponses non-résonantes ne sont pas négligeables.

L'intensité de la réponse de chaque mode propre à une fréquence d'excitation quelconque est déterminée par le facteur d'amplification dynamique, calculé à partir de la fréquence d'excitation  $f$ , de la fréquence propre  $f_n$  du mode considéré et de l'amortissement  $\zeta$ . La figure ci-après illustre le facteur d'amplification dynamique pour diverses valeurs d'amortissement en fonction du rapport des deux fréquences  $\beta = f/f_n$ .

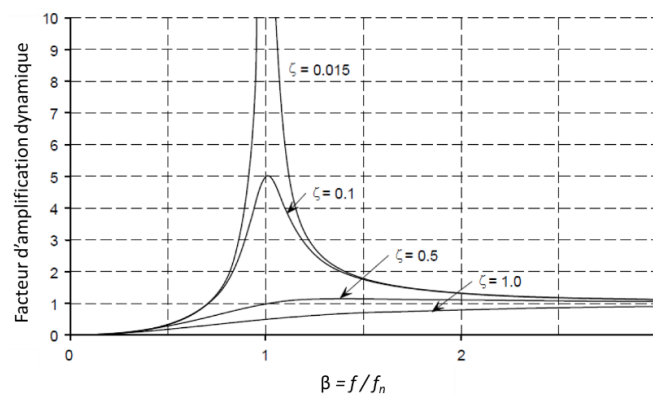


Fig. 24 Exemple de facteur d'amplification dynamique de l'accélération

On appelle résonance la situation pour laquelle le rapport  $\beta = 1,0$ .

## 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.

La plupart des planchers ont un amortissement  $\zeta$  relativement faible, inférieur à 10%. La Fig. 24 illustre bien le caractère critique du facteur d'amplification dynamique (qui peut atteindre des valeurs allant jusqu'à 50) pour les structures à amortissement faibles lorsque la fréquence d'excitation est proche de leur fréquence propre.

La fréquence de la marche se situant entre 1,5 et 2,5 Hz (3 Hz pour une marche très rapide), il est donc impératif de concevoir les planchers avec une fréquence fondamentale supérieure à 3 Hz.

### 8.6 Force d'excitation due à la marche

De nombreuses études ont montré que la fréquence de la marche  $f_m$  se situe entre 1,5 et 2,5 Hz, 3 Hz pour une marche très rapide proche de la course.

Une fréquence  $f_m$  de 2,5 Hz ne peut être atteinte que sur des planchers d'une longueur suffisante, tels que ceux de couloirs de bureaux ou d'ERP.

Pour un plancher résidentiel classique, la fréquence de la marche  $f_m$  se situera autour de 1,5 Hz (2,0 Hz maximum).

La fréquence de la marche varie avec les individus, la vitesse et l'équipement (chaussures) ou encore le revêtement de sol.

La force d'excitation continue correspondant à la marche est considérée comme parfaitement périodique et peut être représentée par la courbe ci-dessous pour une fréquence  $f_m$  de 2 Hz. Elle peut en outre être décomposée en série de Fourier en harmoniques.

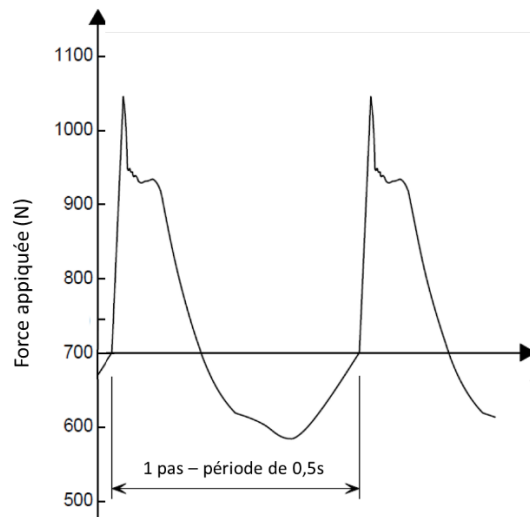


Fig. 25 Exemple de fonction d'excitation dynamique due à la marche avec  $f_m = 2$  Hz

Cette fonction peut être exprimée par ses 4 premières harmoniques calculés à partir d'une analyse de Fourier. L'amplitude de la force  $F_h$  de la  $h^{\text{ième}}$  harmonique peut s'écrire :

$$F_h = \alpha_h \cdot Q$$

où :  $Q$  est la force statique exercée par une « personne moyenne » usuellement prise égale à 700 N ( $\approx 70$  kg)

$\alpha_h$  est le coefficient de Fourier de la  $h^{\text{ième}}$  harmonique (voir Tableau 15 ci-dessous)

Tableau 15 Exemples de coefficients de Fourier  $\alpha_h$  de la fonction d'excitation due à la marche

Harmonique	Fréquence d'excitation $h \cdot f_m$	Coefficient de Fourier $\alpha_h$	Déphasage $\varphi_h$	Force $F_h$ pour $f_m = 2$ Hz
1	1,8 – 2,2 Hz	$0,436 \cdot (h \cdot f_m - 0,95)$	0	320,5 N
2	3,6 – 4,4 Hz	$0,006 \cdot (h \cdot f_m + 12,3)$	$-\pi/2$	68,5 N
3	5,4 – 6,6 Hz	$0,007 \cdot (h \cdot f_m + 5,2)$	0	54,9 N
4	7,2 – 8,8 Hz	$0,007 \cdot (h \cdot f_m + 2,0)$	$\pi/2$	49,0 N

On observe que les niveaux d'amplitude de la force statique diminuent rapidement au fur et à mesure des harmoniques.

Murray et Allen ont proposé une fonction approchée du coefficient de Fourier de la fonction d'excitation due à la marche en fonction de la fréquence de l'harmonique après une étude de leur variabilité (Fig. 26) adaptée par Kreuzinger et Mohr.

**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.

$$\alpha_h = e^{(-0,4 \cdot f_m)} \tag{24}$$

Cette fonction a été reprise dans l'Annexe Nationale autrichienne de l'Eurocode 5 (ÖNORM EN 1995-1-1/NA).

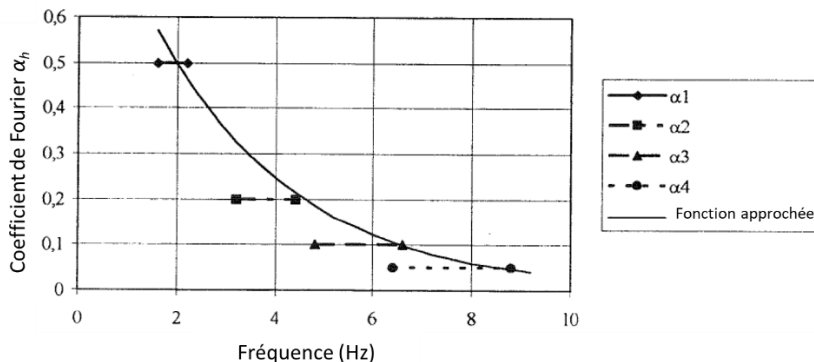


Fig. 26 Fonction approchée du coefficient de Fourier de la fonction d'excitation due à la marche

Le cabinet d'ingénierie ARUP a étudié les données des harmoniques issus de divers travaux de mesures (Kerr, Galbraith & Barton, Wheeler, Ohlssen, rainer, Ellis) pour analyser la forme moyenne des 4 premières harmoniques (Fig. 27), en introduisant un coefficient dynamique de force statique (appelé DLF pour « dynamic load factor ») :

$$DLF = \frac{\text{amplitude de l'harmonique}}{\text{force statique du marcheur}}$$

Ce coefficient permet de normaliser l'amplitude et la force statique en s'affranchissant de la variabilité du poids du marcheur.

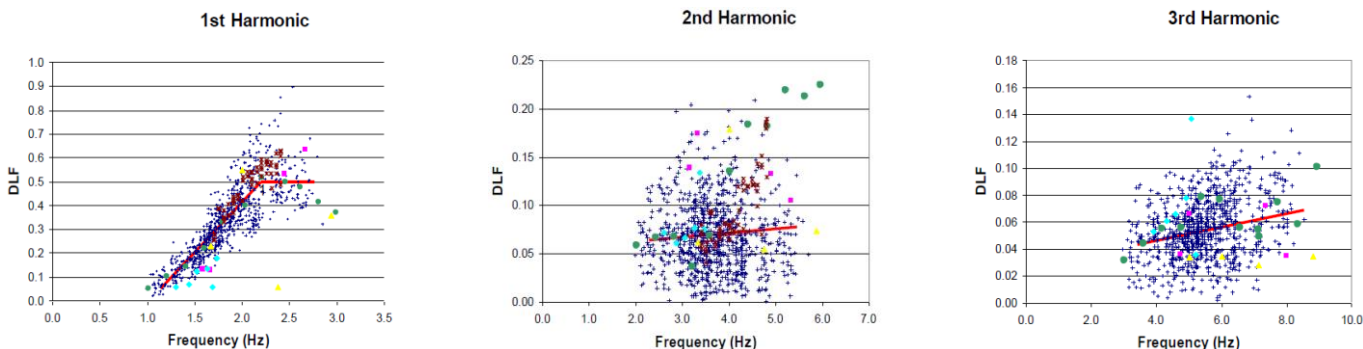


Fig. 27 Analyse des 3 premières harmoniques de la marche par ARUP

ARUP déduit ainsi la forme moyenne des 4 premières harmoniques de la marche exprimée sur la base du coefficient dynamique de force statique DLF :

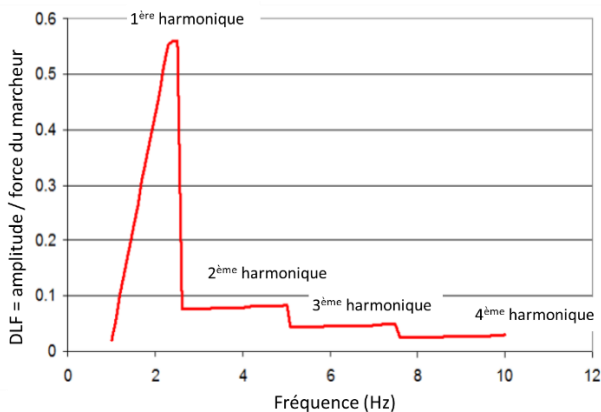


Fig. 28 Forme moyenne des 4 premières harmoniques de la marche exprimée avec le coefficient DLF

## 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.

Enfin, ce qui précède se base sur l'hypothèse défavorable que la force d'excitation et le lieu de la perception de l'oscillation sont toujours identiques, et que la durée d'excitation est infinie. Dans la pratique ceci n'est pas le cas puisque le marcheur se déplace et que l'excitation a une durée finie.

Kreuziger et Mohr ont analysé cette hypothèse et justifié que pour le calcul de l'accélération  $\alpha_{rms}$ , coefficient de Fourier  $\alpha_h$  pouvait être multiplié par un coefficient 0,4. Ceci est illustré dans la figure ci-dessous.

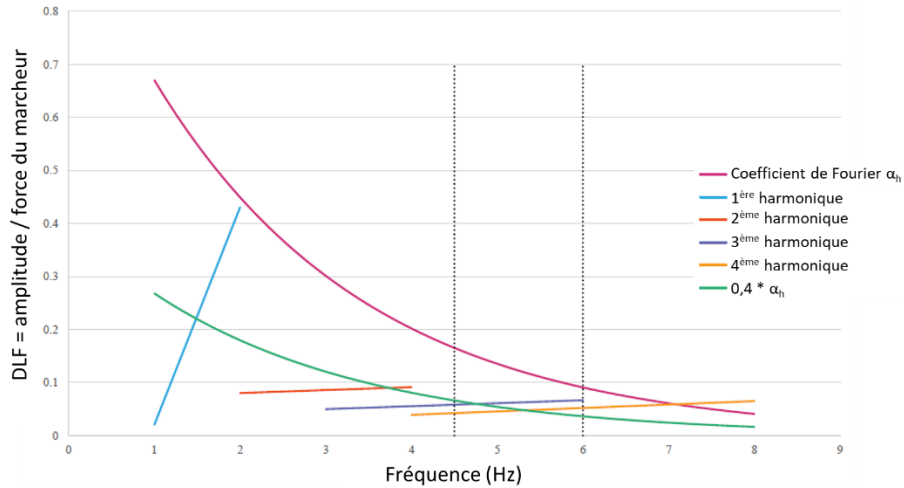


Fig. 29 Coefficients de Fourier et forme des 4 premières harmoniques

## Conclusions

Ceci confirme ou complète certaines observations faites précédemment :

- La conception des planchers doit viser une fréquence fondamentale supérieure à :
  - 3 Hz dans tous les cas pour éviter tout phénomène de résonance,
  - 4,5 à 5 Hz de préférence, afin de limiter l'influence de la 2<sup>ème</sup> harmonique et de réduire l'impact de la réponse non-résonante liée à la 1<sup>ère</sup> harmonique.
- Pour l'excitation due à la marche, les harmoniques au-delà de la 3<sup>ème</sup> ou 4<sup>ème</sup> peuvent être négligées.
- Le comportement des planchers peut être catégorisé selon que leur fréquence fondamentale  $f_1$  est supérieure ou inférieure à 4 fois la fréquence de la marche  $f_m$  :
  - Si  $f_1 \leq 8$  à 10 Hz (fréquence faible) : le plancher est en mode de réponse résonante
  - Si  $f_1 > 8$  à 10 Hz (fréquence élevée) : le plancher est en mode de réponse transitoire