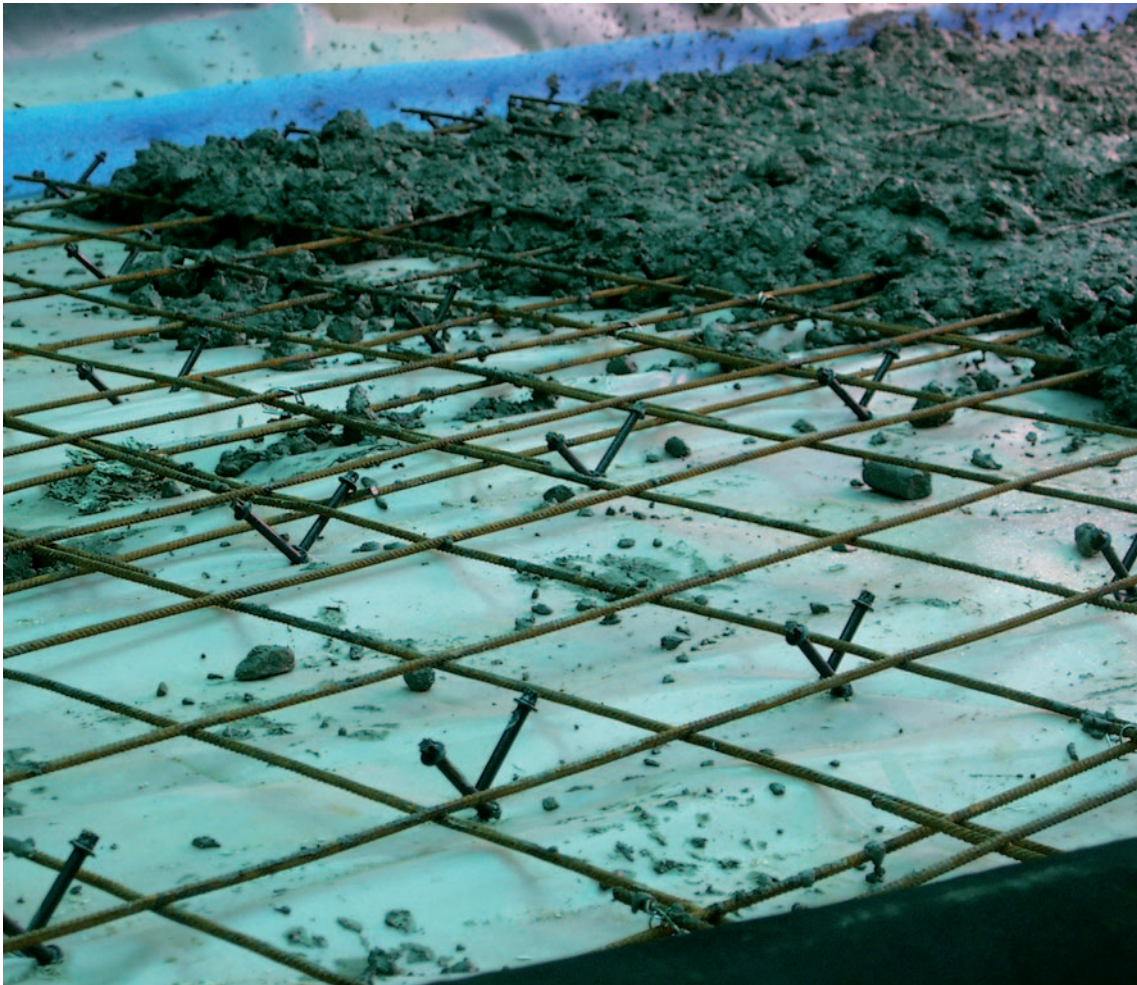


CSTC



UNE ÉDITION DU CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION



RAPPORT

COMPORTEMENT PHYSIQUE ET MÉCANIQUE DES PLANCHERS MIXTES EN BOIS-BÉTON

RAPPORT

COMPORTEMENT PHYSIQUE ET MÉCANIQUE DES PLANCHERS MIXTES EN BOIS-BÉTON

Le présent rapport a été établi par :

Audrey Skowron, ir., chercheur, laboratoire 'Structures', CSTC

Yves Martin, ir., chef de la division 'Enveloppe du bâtiment et menuiserie', CSTC

Benoit Parmentier, ir., chef de la division 'Structures', CSTC

en collaboration avec

Patrick Van den Bossche, ir., CTIB (Centre technique de l'industrie du bois)

CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION

CSTC, établissement reconnu en application de l'arrêté-loi du 30 janvier 1947

Siège social : Rue du Lombard 42 à 1000 Bruxelles



Publication à caractère scientifique visant à faire connaître les résultats des études et recherches menées dans le domaine de la construction en Belgique et à l'étranger.



La reproduction ou la traduction, même partielles, du présent Rapport n'est autorisée qu'avec le consentement de l'éditeur responsable.



Sommaire

1. Introduction	3
2. Principes du plancher mixte en bois-béton	5
3. Etude des performances des planchers mixtes en bois-béton	9
4. Performances mécaniques des planchers mixtes en bois-béton	11
4.1 Essai de cisaillement à court terme	11
4.2 Essai de cisaillement à long terme	13
4.3 Essais de flexion à court terme.....	13
4.4 Essais de flexion de longue durée (étude des effets différés).....	16
4.5 Méthode de calcul simplifiée pour le dimensionnement des planchers	19
5. Performances acoustiques des planchers mixtes en bois-béton	21
5.1 Isolation aux bruits aériens.....	21
5.2 Isolation aux bruits de choc.....	22
6. Résistance au feu des planchers mixtes en bois-béton	24
7. Performances vibratoires des planchers mixtes en bois béton	26
8. Performances thermiques des planchers mixtes en bois béton	28
9. Conclusions	30
Bibliographie	31
Annexe Exemple pratique : dimensionnement d'un plancher mixte en bois-béton	33

1. Introduction

Au cours des dernières années, les projets de rénovation de bâtiments résidentiels en Belgique ont égalé, voire dépassé en nombre la construction de bâtiments résidentiels neufs. En 2008, par exemple, on a recensé 51 % de chantiers de rénovation contre 49 % de constructions neuves (figure 1). Parmi les structures à rénover, les anciens planchers traditionnels en bois constituent un élément important à traiter, étant donné leurs performances globales généralement faibles par rapport aux exigences actuelles accrues en termes de performances.

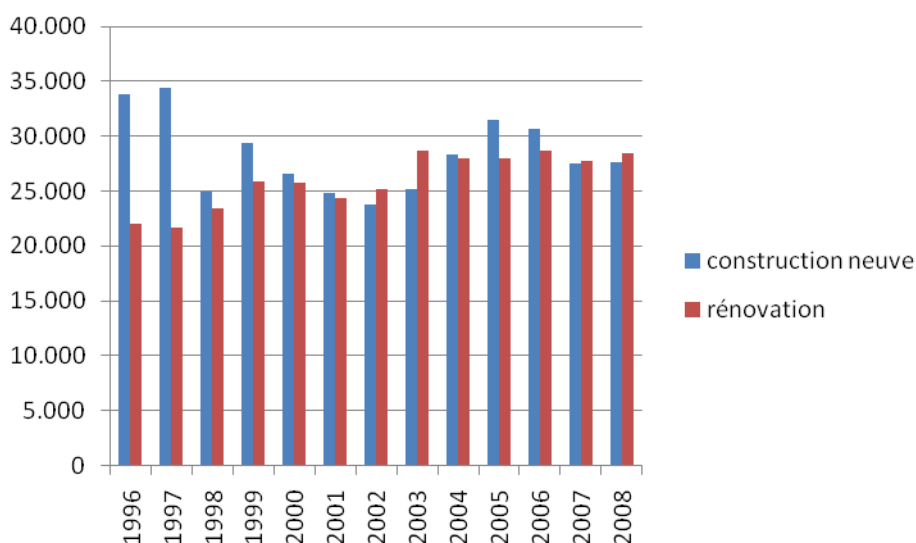


Figure 1 Nombre de permis de bâtir (2001-2008) [11].

Une seconde tendance marquée est la démarche de construction durable, dont la notion apparaît à la fin des années 1960 et se pratique de plus en plus couramment en Belgique. Elle consiste à limiter l'impact sur l'environnement à chaque stade de la vie d'un bâtiment, de sa conception jusqu'à sa démolition ou sa rénovation (réaffectation), en passant par sa mise en œuvre et son exploitation.

Ce type de construction implique, entre autres, le choix de matériaux peu énergivores de par leur provenance et leur mise en œuvre, recyclables en fin de vie, ou encore l'utilisation de techniques de construction favorisant la main-d'œuvre plutôt que d'importantes quantités d'énergie.

Le bois est un matériau bien adapté à ces préoccupations environnementales, mais limité sous sa forme brute au point de vue mécanique et dimensionnel.

Afin de dépasser les limitations imposées par l'arbre et de conférer au produit fini les caractéristiques d'un matériau industriel, sans lui ôter ses qualités intrinsèques, de nouveaux produits de haute technologie, tels que les panneaux structuraux (OSB, MDF, multiplex, ...), les poutres à base de bois

(poutres recomposées ⁽¹⁾, poutres en lamellé-collé, ...), les systèmes de plancher (autoportants, à caissons, mixtes), etc. ont vu le jour ces dernières décennies.

En particulier, les nouveaux systèmes de plancher réalisés en grande partie ou complètement en bois se différencient des planchers en bois traditionnels de par leurs meilleures performances globales (résistance mécanique, isolation acoustique, sécurité en cas d'incendie, etc.) et permettent de respecter des exigences croissantes au-delà de la simple capacité portante. Le plancher mixte en bois-béton fait partie de ces systèmes modernes.

Néanmoins, son application reste limitée en Belgique, étant donné les insuffisances normatives concernant ce type de plancher. En effet, aucune méthode de calcul permettant de prendre en compte l'effet mixte engendré par les connecteurs ne figure, par exemple, dans l'Eurocode 5 (NBN EN 1995), la référence actuelle en matière de calcul des ouvrages en bois.

Dans le cadre d'une récente recherche menée au CSTC en collaboration avec le CTIB, une étude expérimentale a permis d'évaluer différentes performances particulièrement importantes des planchers mixtes en bois-béton. En ce qui concerne les performances mécaniques, une méthode de calcul simple aux états limites de service (ELS) et aux états limites ultimes (ELU) a par ailleurs été développée pour le dimensionnement de ces planchers. L'ensemble des résultats sera présenté dans la suite du présent Rapport.

⁽¹⁾ Poutres dont les membrures sont, par exemple, des composants dérivés du bois et dont l'âme est constituée d'un panneau OSB.

2. Principes du plancher mixte en bois-béton

Le plancher mixte en bois-béton se rapproche du plancher traditionnel en bois sur lequel une dalle en béton est coulée. La différence essentielle réside dans la collaboration entre les deux matériaux grâce à la liaison mécanique obtenue par des connecteurs (voir figure 2).

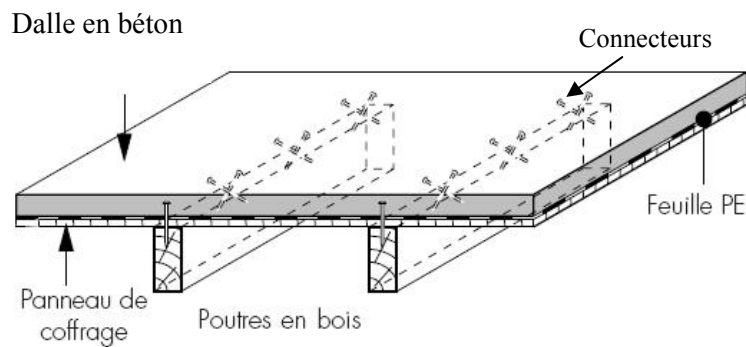


Figure 2 Schéma de principe d'un plancher mixte en bois-béton.

Afin de comprendre le rôle joué par ces connecteurs, il paraît intéressant de représenter le comportement d'une poutre simple soumise à flexion telle que celle illustrée à la figure 3.



Figure 3 Représentation schématique du rôle joué par des connecteurs dans une poutre simple.

Soit une poutre fléchie simplement appuyée, constituée de deux sections rectangulaires superposées de hauteur équivalente et d'un matériau identique, respectivement sans connexion dans le cas (a) et parfaitement solidarisiées dans le cas (b).

Si on admet un comportement élastique, il est aisé de montrer qu'à moment de flexion équivalent, la présence d'une liaison parfaite entre les deux composants réduit les contraintes normales maximales de moitié et divise la flèche par quatre tel que l'illustre le tableau 1.

Tableau 1 Influence d'une connexion parfaite dans une poutre sur les valeurs de contraintes et de déformations.

Cas	Distribution des contraintes	Contraintes	Flèche (charge ponctuelle centrée sur poutre isostatique)
Limite supérieure (monolithique)		$\sigma_a = \frac{M \frac{h}{2}}{\frac{b(h)^3}{12}} = \frac{6M}{bh^2}$	$f_{i,a} = \frac{PL^3}{48E \frac{bh^3}{12}} = \frac{PL^3}{4Ebh^3}$
Limite inférieure (glissement parfait)		$\sigma_b = \frac{M/2 \frac{h}{4}}{\frac{b\left(\frac{h}{2}\right)^3}{12}} = \frac{12M}{bh^2}$	$f_{i,b} = \frac{P/2L^3}{48E \frac{b\left(\frac{h}{2}\right)^3}{12}} = \frac{PL^3}{Ebh^3}$
Rapport $\frac{Lim_{sup}}{Lim_{inf}}$	-	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{4}$

Ainsi, une façon économique d'augmenter la résistance et la rigidité en flexion d'un plancher en bois consiste à connecter mécaniquement une dalle en béton au plancher en bois existant. Comme l'illustre la figure 4, la contribution des connecteurs permet notamment de diminuer l'ensemble des contraintes dans les deux matériaux (mais surtout dans le bois), afin d'exploiter ces derniers de manière optimale. Les connecteurs permettent de transférer les efforts (de cisaillement) entre le bois et le béton.

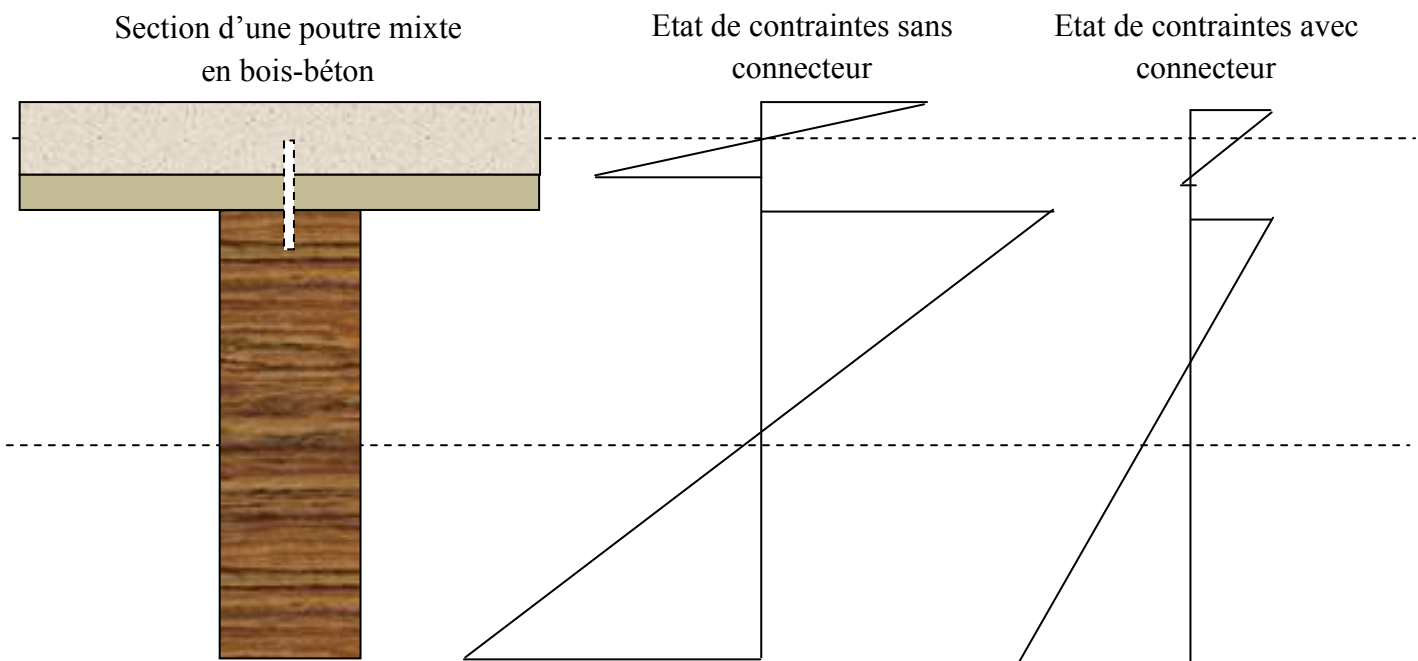
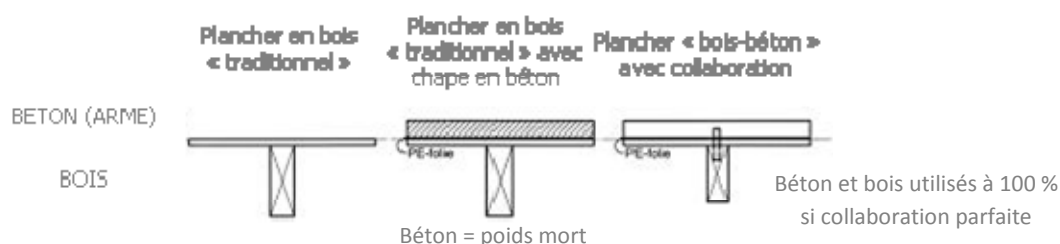


Figure 4 Etat de contraintes sans connecteur et avec connecteur dans une poutre mixte en bois-béton.

La figure 5 illustre schématiquement le gain de matière et de hauteur obtenu sur un plancher mixte en bois-béton par rapport à des planchers traditionnels en bois, pour un même moment de flexion

sollicitant, grâce à la mise en place d'une collaboration (plus ou moins parfaite) entraînant la réduction de la section de la poutre en bois.



Concrètement, la dalle en béton remplit, en travée, la fonction de table de compression, alors que la poutre en bois, située dans la partie inférieure, est essentiellement tendue. Par conséquent, les deux matériaux sont soumis à des contraintes en parfait accord avec leurs meilleures propriétés pour former une dalle 'nervurée'. Dans le cas où la poutre est continue sur appuis, la participation de la dalle à la résistance est obtenue par une armature supérieure capable de reprendre les efforts de traction, la poutre en bois étant alors partiellement comprimée.

Pour obtenir l'effet mixte souhaité, c'est-à-dire une collaboration optimale entre le bois et le béton, il convient que la liaison entre la poutre et la dalle soit réalisée de façon à transmettre les efforts rasants et à limiter les glissements à l'interface. Sans liaison, les solives en bois doivent supporter à elles seules toutes les charges. Par contre, si une connexion est mise en place, on réalise une poutre mixte dont la rigidité est sensiblement accrue. Pratiquement, pour assurer cet effet mixte, un étaieage est nécessaire durant la phase de construction jusqu'à la prise du béton.

L'utilisation du plancher mixte en bois-béton peut constituer, dans certains cas, une solution économique, tant en construction neuve qu'en rénovation.

En effet, le principe de base de la conception des structures selon les Eurocodes repose sur le contrôle des états limites ultimes (ELU) et des états limites de service (ELS) [16]. En rénovation, par exemple, la capacité portante des anciens planchers traditionnels en bois peut s'avérer souvent insuffisante car ils ont été réalisés à l'origine pour supporter des charges d'exploitation généralement incompatibles avec les exigences imposées par les Eurocodes actuels (NBN EN 1991).

En outre, pour les structures dont le matériau constitutif prépondérant est le bois, la vérification aux états limites de service peut constituer, dans de nombreuses situations, le critère dimensionnant. En particulier, les exigences imposées dans la norme NBN B 03-003 fixant les déformations maximales autorisées des éléments de structure – exigences qui sont reprises dans l'annexe nationale belge de l'Eurocode 5-1-1 [5] [6] concernant le dimensionnement des structures en bois – peuvent dans certains cas se révéler difficiles à satisfaire dans les planchers traditionnels en bois.

La solution du plancher mixte en bois-béton peut donc se révéler économiquement intéressante, étant donné qu'elle permet d'augmenter la capacité portante, tout en évitant le remplacement complet du plancher, et limite ainsi les interventions sur site.

Des initiatives ont vu le jour ces dernières années à l'étranger, visant à mettre au point des planchers mixtes en bois-béton collaborants. Différents systèmes de connecteurs parfois brevetés ⁽²⁾ sont ainsi commercialisés en Italie, en France, en Suisse, ...

⁽²⁾ Notamment connecteurs SFS®, Tecnaria®, procédé Sylvabat®, ...

3. Etude des performances des planchers mixtes en bois-béton

Pour répondre à la demande du secteur et en particulier à celle des Comités techniques ‘Gros œuvre’ et ‘Menuiserie’, le CSTC a entrepris, avec la collaboration du CTIB, une étude subsidiée par le SPF Economie en vue d’élaborer des prescriptions pour l’application en Belgique du système de plancher mixte en bois-béton intégrant la conception, le dimensionnement et la mise en œuvre.


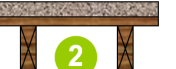



Au cours de cette recherche, les performances fondamentales du plancher portant ont été évaluées et comparées aux exigences en vigueur dans la normalisation et la réglementation belges. Il s’agit :

- de la performance mécanique à court terme et à long terme, tant pour les états limites ultimes (rupture) que pour les états limites de services (flèche)
- des propriétés vibratoires vis-à-vis des sources internes et externes
- de la performance acoustique vis-à-vis du bruit de choc et du bruit aérien
- de la performance thermique (plus particulièrement la masse thermique)
- du comportement au feu (plus particulièrement la résistance au feu).

Pour chaque performance, les prestations des planchers mixtes en bois-béton ont été successivement comparées à celles des planchers en bois traditionnels et des planchers en bois comportant une chape à l’anhydrite⁽³⁾ sans collaboration mécanique ou une dalle en béton avec collaboration mécanique.

Les différentes configurations de l’ensemble des sections de plancher (ou poutres) testées en laboratoire sont présentées dans le tableau 2. Les propriétés des matériaux utilisés sont spécifiées dans le tableau 3.

Tableau 2 Types de planchers et paramètres testés.

Types de planchers testés	Configuration type	Paramètres testés
	Poutres en bois + OSB = plancher de référence	
	Référence + chape à l’anhydrite (pas de liaison)	
	Référence + éléments de connexion + chape à l’anhydrite	Entraxe des poutres (400 ou 600 mm)
	Référence + éléments de connexion + béton armé	<ul style="list-style-type: none"> • Entraxe des poutres (400 ou 600 mm) • Type de connecteur (SFS®, barre d’armature ou tire-fond) • Entraxe des connecteurs (100 ou 200 mm) • Fixation des panneaux OSB (collés ou cloués) • Epaisseur du béton (40 ou 70 mm) • Type de béton (normal ou léger) • Type de poutre (poutre recomposée ou bois résineux C22)
	Référence + éléments de connexion + béton armé + chape flottante	

⁽³⁾ La chape à l’anhydrite est utilisée très couramment dans la construction en bois, car elle présente une résistance en compression plus élevée qu’une chape en mortier de ciment et permet une mise en œuvre aisée et rapide. Pour les essais, ce choix se justifiait car il convenait d’éviter toute rupture prématurée en compression.

Tableau 3 Propriétés des matériaux utilisés lors de l'étude.

Type de matériau	Section ou épaisseur [mm]	Densité [kg/m ³]	Module d'élasticité (flexion) [N/mm ²]	Résistance à la compression moyenne [N/mm ²]	Résistance à la traction [N/mm ²]	Résistance caractéristique à la flexion [N/mm ²]
Poutre en bois recomposée (Parallam®)	68 x 241	767	14162	–	24,0	43,2
Poutre en bois résineux C22	72 x 220	340	10000	–	13,0	22
Panneau OSB/3	18	625	3500	–	–	5,3
Anhydrite	40 à 70	± 2100	± 20000	± 20	–	–
Béton normal	40 à 70	± 2300	± 30000	± 48	–	–
Béton léger	40 à 70	1660	18600	26	–	–

4. Performances mécaniques des planchers mixtes en bois-béton

Une campagne d'essais de **cisaillement** et de **flexion** à court et à long terme a été réalisée pour mettre en évidence, respectivement, les phénomènes de glissement à l'interface bois-béton et l'influence de la connexion sur la résistance mécanique et la déformation des planchers mixtes en bois-béton. Différents paramètres, présentés dans le tableau 2, ont été étudiés afin d'évaluer leur influence sur le comportement du plancher mixte : type de connecteur, espacement entre connecteurs, épaisseur de la chape à l'anhydrite ou de la couche de béton, type de fixation entre les panneaux OSB et la poutre en bois, etc.

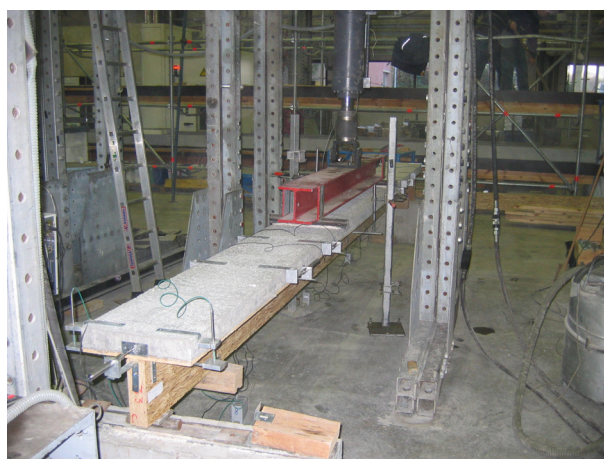


Figure 6 Détermination des performances mécaniques en laboratoire.

4.1 Essai de cisaillement à court terme

Un essai de cisaillement consiste à appliquer une charge verticale sur la poutre en bois d'un élément mixte de 400 mm de longueur, de manière à engendrer un effort de cisaillement au niveau de la connexion entre les deux matériaux et à mesurer le glissement longitudinal à l'interface bois-béton; le déplacement vertical de la couche de béton est empêché (voir figure 7).

Cet essai permet de caractériser la collaboration entre le bois et le béton à l'aide de la résistance au cisaillement caractéristique du connecteur P_{Rk} ⁽⁴⁾ et du module de glissement de service K_{ser} (voir figure 8).

⁽⁴⁾ P_{Rk} est pris égal à la charge de ruine minimale (divisée par le nombre de connecteurs), réduite de 10 % selon l'annexe B de l'Eurocode 4.1.1



Figure 7 Dispositif d'essai de cisaillement sur échantillon.

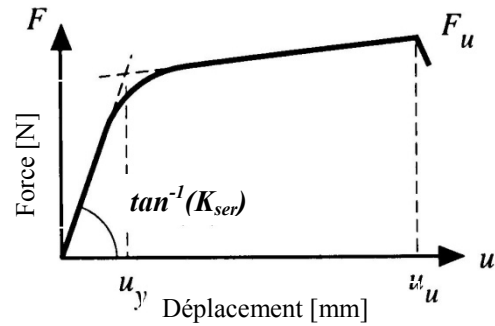


Figure 8 Courbe typique lors d'un essai de cisaillement.

Un certain nombre de paramètres, tels que le type de connexion, la section de bois et de béton, le type de matériau ou la présence d'une couche intermédiaire, ont été pris en compte dans la campagne d'essais afin de mettre en évidence leur influence sur le module de glissement K_{ser} et la résistance au cisaillement P_{Rk} .

Le tableau 4 regroupe les valeurs mesurées des termes K_{ser} et P_{Rk} pour deux types de connecteurs testés. Les caractéristiques des connecteurs brevetés sont fournies par les fabricants.

Tableau 4 Valeurs de P_{Rk} et de K mesurées lors de la recherche pour différents connecteurs.

Connecteur	Type de béton	Type de poutre en bois	P_{Rk} (N)	K_{ser} (N/mm)
Tire-fond Ø 10 mm h:120 mm	C25/30 - 70 mm	Parallam 68 x150 mm ² OSB3 18 mm collé	7000	10000
Tire-fond Ø 10 mm h:120 mm	C25/30 - 70 mm	Résineux C22 72 x150 mm ² OSB3 18 mm	7000	7000
Tire-fond Ø 10 mm h:120 mm	LC 16/18 - 70 mm	Résineux C22 72 x150 mm ² OSB3 18 mm	7000	7000
Armature Ø 12 mm h:150 mm	C25/30 - 70 mm	Parallam 68 x150 mm ² OSB3 18 mm	10000	6000
Armature Ø 12 mm h:150 mm	LC16/18 - 70 mm	Résineux C22 72 x150 mm ² OSB3 18 mm	9000	4500
Connecteur	Type de béton	Type de poutre en bois	P_{adm} (N) (*)	K_{ser} (N/mm)
Connecteur SFS®45°/90°	S'adresser au fabricant		5000	8000
Connecteur SFS®45°/135°	S'adresser au fabricant		7000	25000
Tecnaria® avec crampons BASE directement sur la poutre	S'adresser au fabricant	Résineux C16	7500	20800
Tecnaria® avec crampons BASE sur un plancher de 20 mm	S'adresser au fabricant	Résineux C16 Plancher de 20 mm	5100	3140
Tecnaria® avec crampons MAXI directement sur la poutre	S'adresser au fabricant	Résineux C16	8500	20800
Tecnaria® avec crampons MAXI sur un plancher de 20 mm	S'adresser au fabricant	Résineux C16 Plancher de 20 mm	6500	8390

(*) $P_{adm} = P_{Rd} = P_{Rk}/\gamma_M$.

4.2 Essai de cisaillement à long terme

Les essais de cisaillement à long terme ont permis de déterminer des coefficients de fluage ⁽⁵⁾ pour la connexion de l'ordre de 0,3, dans le cas d'un plancher mixte composé d'une couche en béton normal, et de 0,6 pour un plancher composé d'une couche en béton léger. Ces coefficients sont nécessaires pour prendre en compte l'effet du fluage sur les caractéristiques mécaniques du connecteur. Plus précisément, le module de glissement du connecteur est réduit, à long terme, par un facteur $k_{def,connexion}$ représentant le coefficient de fluage du connecteur tel qu'exprimé dans la formule ci-après :

$$K_{ser,connexion,final} = \frac{K_{ser,connexion}}{1 + k_{def,connexion}}$$

avec

$$k_{def,connexion} = \frac{u_{fin} - u_{inst}}{u_{inst}}$$

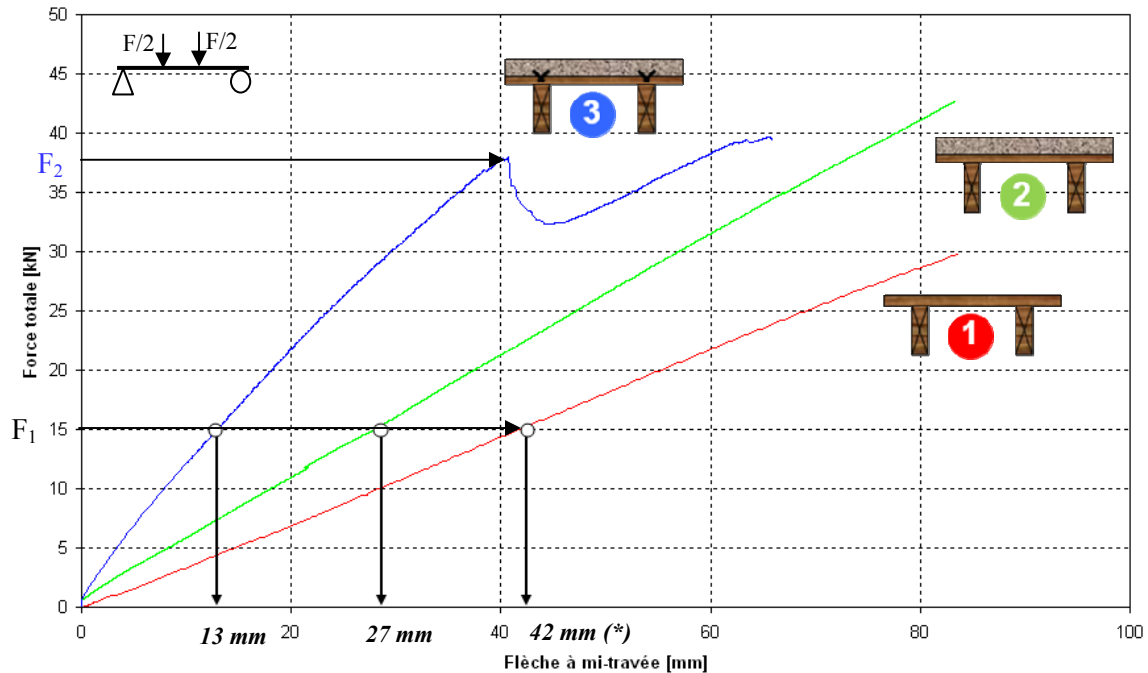
Notons que le fluage intrinsèque des matériaux n'est pas encore pris en compte.

4.3 Essais de flexion à court terme

Afin de mettre en évidence l'influence de la collaboration entre le plancher en bois et la couche en béton, des essais de flexion quatre points ont été réalisés sur des échantillons de plancher de 5,70 mètres de portée.

Le graphique de la figure 9 présente les courbes «force-déplacement» de trois types de poutres soumises à un essai de flexion quatre points. La première observation la plus évidente concerne le gain important de rigidité – caractérisé par la pente des parties linéaires des courbes – apporté par l'intégration des connecteurs (configuration 3) par rapport à la rigidité mesurée sur une poutre traditionnelle en bois (configuration 1) ou sur une poutre en bois munie d'une chape sans connecteur (configuration 2). Les connecteurs permettent en effet à la couche en béton de collaborer mécaniquement avec les poutres en bois.

⁽⁵⁾ Les essais ont duré 4000 heures, soit 166 jours avec une extrapolation sur 10 ans. L'épaisseur des dalles en béton était de 70 mm.



(*) 32 mm pour un plancher en bois d'une hauteur utile équivalant à celle du plancher mixte 2 ou 3.

Figure 9 Influence des connecteurs (configuration 3) sur la rigidité des poutres mixtes en bois-béton par rapport à la rigidité d'un plancher traditionnel en bois avec chape (configuration 2) et sans chape (configuration 1).

Globalement, l'ajout de connecteurs permettant la collaboration entre le bois et la couche supérieure en béton ou la chape à l'anhydrite (configuration 3) améliore nettement la rigidité flexionnelle de la poutre (pente des courbes de la figure 9) et réduit ainsi considérablement la flèche sous charge d'exploitation. Par exemple, sous un chargement F_1 de 15 kN ⁽⁶⁾ et pour une poutre en bois d'une hauteur utile équivalant à celle d'un plancher mixte, la réduction de la flèche est de l'ordre de 25 % par rapport à un plancher mixte sans connecteur d'une hauteur totale de 241 mm (configuration 2) et d'environ 60 % ⁽⁷⁾ par rapport à un plancher mixte 'bois + chape à l'anhydrite' (configuration 3).

Le mode de rupture des poutres mixtes en bois-béton a également pu être caractérisé et confronté à celui des poutres sans collaboration.

Ainsi, pour la configuration testée de poutres mixtes 'bois + chape à l'anhydrite' (configuration 3), la première rupture survient par dépassement de la résistance en compression de la chape au niveau des connecteurs (voir figure 10). Cette rupture peut être observée par la discontinuité sur la courbe «force-déplacement» de la poutre mixte (F_2 à la figure 9). Au-delà de cette charge de première rupture, la collaboration entre les deux matériaux disparaît progressivement. Le système se comporte alors comme une poutre en bois seule (rigidité

⁽⁶⁾ Ce qui correspond à une charge répartie d'exploitation à l'ELU de 4 kN/m² équivalant à la catégorie d'utilisation C2 selon l'Eurocode 1-1.

⁽⁷⁾ Cette réduction est également valable à long terme puisque, comme nous le verrons dans le § 4.4, le coefficient de fluage d'un plancher mixte en bois-béton est proche de celui d'un plancher en bois traditionnel ($k_{def} = 0,6$).

équivalant à la configuration 1 : les courbes bleue et rouge deviennent parallèles) et la rupture finale survient par dépassement de la contrainte de traction dans la fibre inférieure de la poutre en bois (voir figure 11). Pour une poutre mixte en bois-béton (configuration 4), la rupture survient seulement dans la poutre en bois en traction; il n'y a pas de première rupture dans la couche en béton.

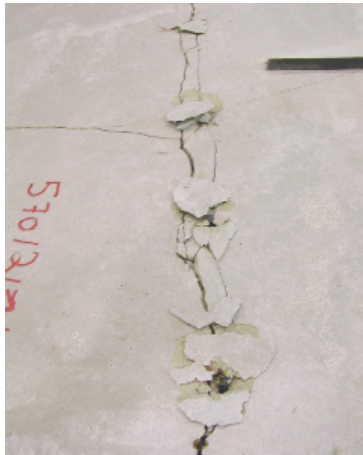


Figure 10 Rupture au niveau de la chape à l'anhydrite.



Figure 11 Rupture au niveau de la poutre en bois.

Lors des essais de flexion quatre points, différents paramètres tels que ceux définis dans le tableau 2 ont été étudiés afin d'évaluer le degré d'influence de chacun d'entre eux sur les performances mécaniques du plancher à l'ELS et à l'ELU.

Un résumé de l'influence de ces paramètres dans la gamme testée dans le cadre de cette recherche est présenté de manière qualitative au tableau 5.

Tableau 5 Influence des différents paramètres sur les ELU et les ELS.

Paramètres étudiés	Influence à l'ELS ⁽¹⁾	Influence à l'ELU ⁽²⁾
Types de connecteurs et espacement des connecteurs	+++	+++
Collage du panneau OSB sur la poutre en bois	+/-	+/-
Epaisseur et qualité de la couche supérieure ⁽³⁾ ⁽⁴⁾	+	+/-
Type de poutre en bois	++	+++ ⁽³⁾

⁽¹⁾ Flèche maximale.
⁽²⁾ Charge de rupture sous flexion simple.
⁽³⁾ Pour une qualité de béton 'standard', la rupture du système en flexion se produit généralement par dépassement de la contrainte de traction du bois.
⁽⁴⁾ La comparaison entre un béton normal et un béton léger montre une faible réduction de la flèche et une légère augmentation de la résistance en flexion simple. Toutefois, ce résultat ne peut être généralisé faute d'un nombre suffisant de résultats d'essai.

4.4 Essais de flexion de longue durée (étude des effets différés)

Des essais de fluage sur des échantillons de plancher (portée de 4,9 m/largeur de 0,6 m) et sur un plancher complet ($\pm 15 \text{ m}^2$) ont été réalisés pendant 425 jours.

Durant ces essais, les prototypes ont été soumis à deux niveaux de chargement : un premier de 2 kN/m^2 représentant la charge d'exploitation pour les bâtiments de catégorie A et un second de 4 kN/m^2 représentant la charge d'exploitation pour les bâtiments de catégorie C2 (voir figure 12).

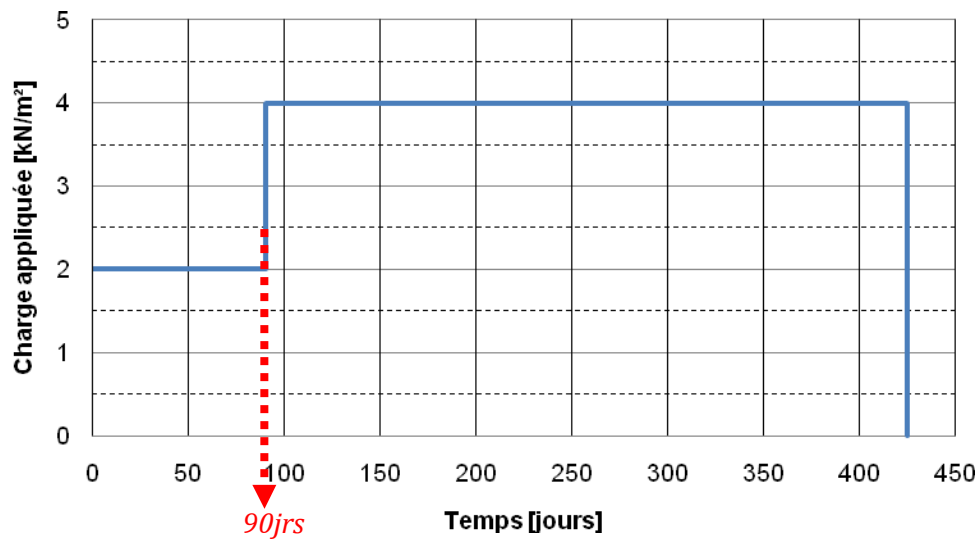


Figure 12 Evolution du chargement durant l'essai de fluage.

Les résultats des essais de fluage sont illustrés à la figure 13, qui présente l'évolution de la flèche en fonction du temps, en incluant les phases de chargement et de déchargement. Le principal paramètre étudié lors de ces essais est le type de béton utilisé dans les poutres mixtes.

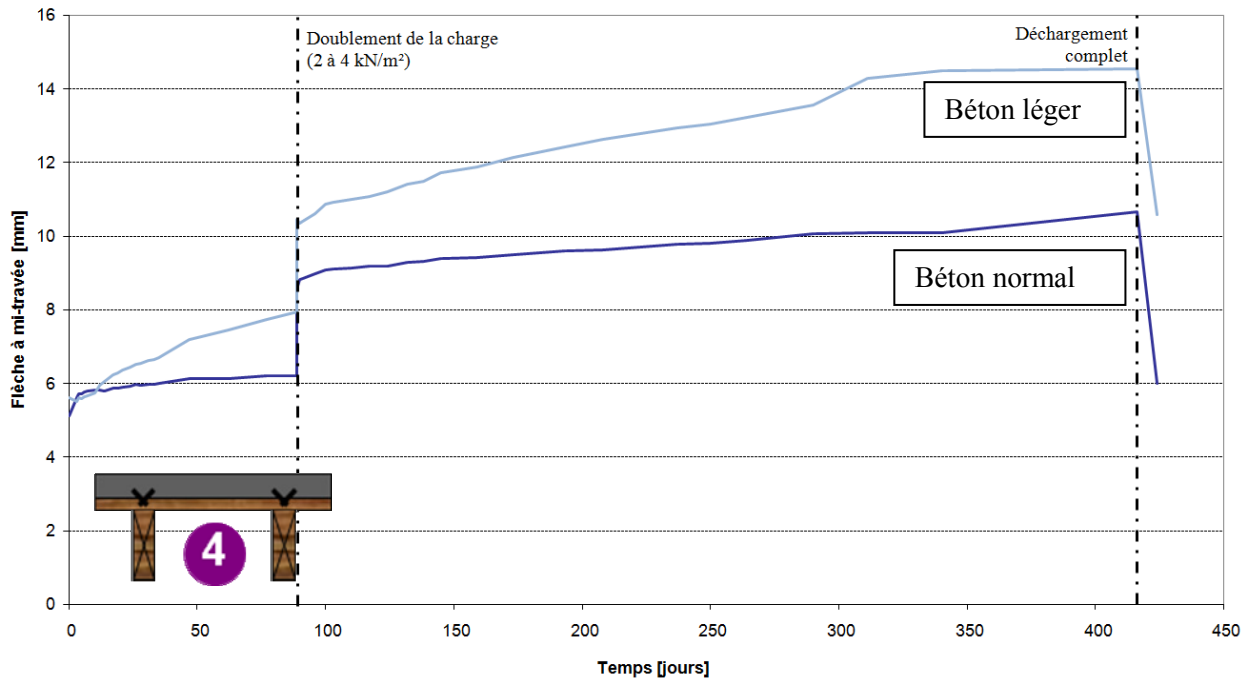


Figure 13 Essais de fluage sur les poutres en bois-béton.

Les essais ont ainsi permis de quantifier le fluage après 420 jours de chargement par l'intermédiaire du coefficient de fluage de la poutre mixte complète pour $t = 425$ jours que l'on nommera $\varphi_{\text{poutre mixte}}$, défini tel que :

$$\varphi_{\text{poutre mixte}} = \frac{f_{\text{fin}} - f_{\text{inst}}}{f_{\text{inst}}}$$

Le coefficient de fluage de la poutre mixte complète vaut, en moyenne, après cette durée de chargement :

- 0,4 pour l'élément de plancher réalisé avec du béton normal C25/30
- 0,85 pour l'élément de plancher réalisé avec du béton léger LC16/18.

Le fluage des poutres mixtes comportant du béton léger est plus important que celui constaté sur les poutres mixtes avec du béton normal. Outre le fluage intrinsèque plus élevé du béton léger (de l'ordre de 30 %), il est vraisemblable que d'autres paramètres (qui n'ont pas pu être pris en compte lors de cette étude) jouent un rôle prépondérant pour expliquer cette différence significative.

Néanmoins, afin d'évaluer la vraisemblance de ces valeurs, les valeurs théoriques du coefficient de fluage à long terme ont été déterminées ci-après à l'aide de la méthode de calcul développée dans le § 4.5.

Pour une poutre mixte en béton normal, la valeur de k_{def} se détermine à l'aide de la relation suivante :

$$k_{def,fin} = \frac{(EI)_{eff,CT,TH}}{(EI)_{eff,LT,TH}} - 1$$

avec

$k_{def,fin}$ = le facteur de déformation

$(EI)_{eff,CT,TH}$ = la rigidité flexionnelle efficace théorique à court terme

$(EI)_{eff,LT,TH}$ = la rigidité flexionnelle efficace théorique à long terme.

En appliquant les formules du point B.2 de l'annexe B de l'Eurocode 5-1-1, et sur la base des caractéristiques des poutres soumises aux essais, on obtient :

$$(EI)_{eff,CT,TH} = E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2 + E_2 I_2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2 = 4,29 \cdot 10^{12} \text{ N / mm}^2$$

$$(EI)_{eff,LT,TH} = E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2 + E_2 I_2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2 = 2,63 \cdot 10^{12} \text{ N / mm}^2$$

avec

$$A_i = b_i h_i, \text{ pour } i = 1 \text{ ou } 2$$

$$I_i = (b_i h_i^3) / 12, \text{ pour } i = 1 \text{ ou } 2$$

$$\gamma_1 = [1 + \pi^2 E_i A_i s_i / (K_i \ell^2)]^{-1}$$

$$\gamma_2 = 1.$$

Ainsi,

$$k_{def,fin} = \frac{4,29 \cdot 10^{12}}{2,63 \cdot 10^{12}} - 1 = 0,63$$

De la même manière, le coefficient de fluage théorique d'une poutre mixte constituée d'une semelle en béton léger vaudrait 0,71.

On constate que le coefficient de fluage théorique des poutres comportant du béton normal est plus élevé que celui déterminé expérimentalement. Ce résultat semble logique étant donné que le fluage théorique est calculé à long terme et non à 420 jours.

Par contre, la différence entre les coefficients de fluage théorique et expérimental de la poutre comportant du béton léger est moins évidente à justifier; une des raisons de cette incohérence pouvant provenir de certains paramètres non maîtrisés durant l'essai, comme précisé ci-avant.

4.5 Méthode de calcul simplifiée pour le dimensionnement des planchers

Sur la base des résultats d'essai de cisaillement explicités ci-dessus et de la théorie des Eurocodes 4 (structures mixtes acier-béton) et 5 (bois), l'objectif était de mettre sur pied un modèle de calcul destiné au dimensionnement (à froid) des planchers mixtes en bois-béton. Ce modèle permet de dimensionner rapidement tout type de plancher mixte en bois-béton, tant aux états limites ultimes (rupture dans le bois, le béton ou les connecteurs) qu'aux états limites de service (flèche maximale à mi-travée à court terme et à long terme après fluage des matériaux).

Le modèle suit les étapes énumérées dans l'organigramme de la figure 14.

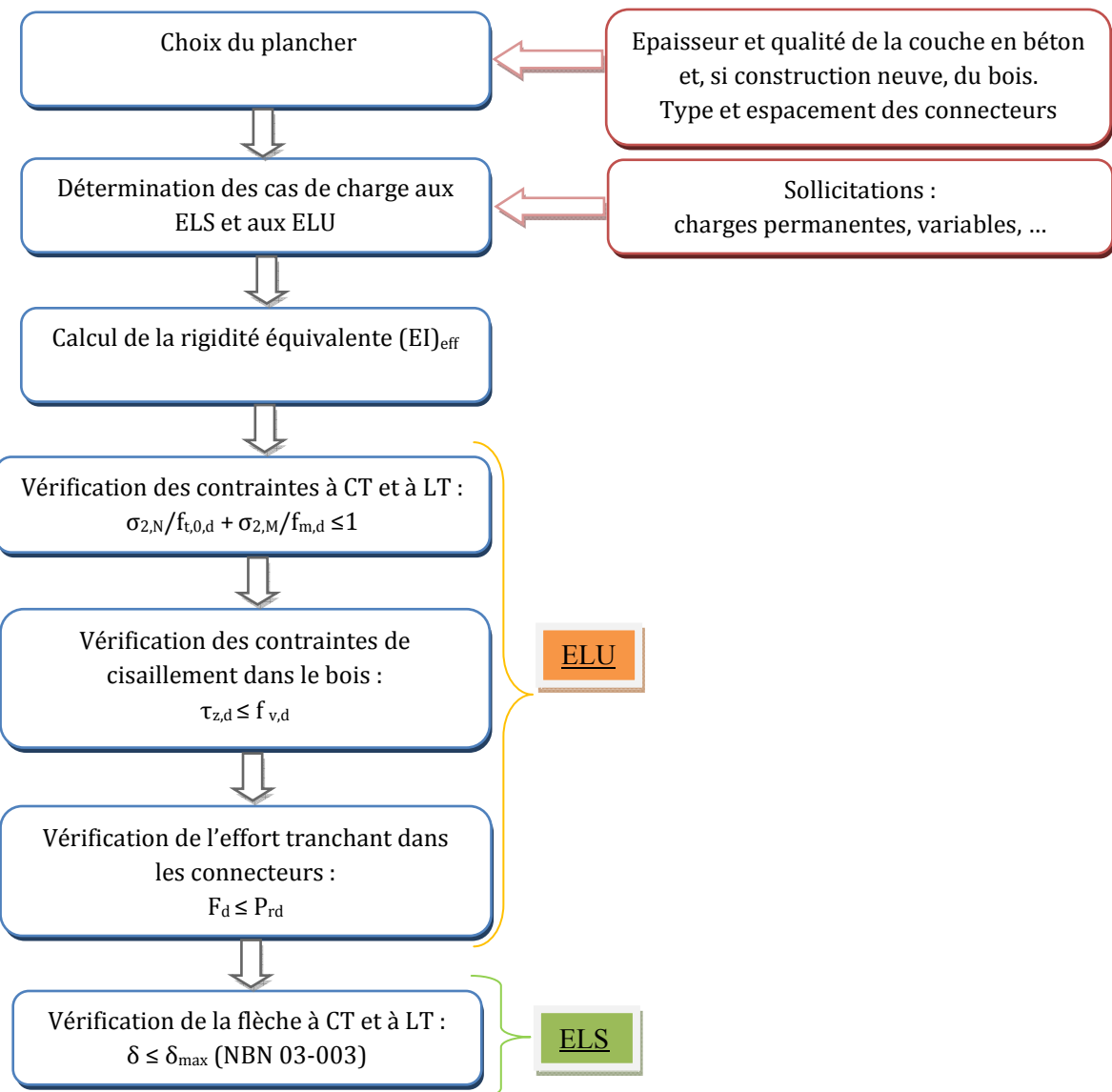


Figure 14 Organigramme de calcul des planchers mixtes en bois-béton.

Ce modèle suppose que le comportement de tous les matériaux soit élastique jusqu'à la rupture (domaine élastique linéaire). Il fournit des résultats en concordance avec les résultats expérimentaux.

Le dimensionnement des planchers mixtes en bois-béton est développé sous forme de programme Excel®. Un exemple pratique de dimensionnement est fourni en Annexe.

5. Performances acoustiques des planchers mixtes en bois-béton

Une isolation acoustique suffisante entre habitations mitoyennes est très difficile à atteindre avec les planchers traditionnels en bois. Cette performance est en outre devenue plus contraignante encore depuis l'entrée en vigueur des nouvelles normes acoustiques (NBN S 01-400) plus sévères qu'auparavant, afin d'assurer un confort acoustique satisfaisant pour les occupants.

Dans le cas d'immeubles d'habitation, la norme NBN S 01-400-1 «Critères acoustiques pour les immeubles d'habitation» fixe les exigences en matière d'isolation aux bruits aériens et aux bruits de choc auxquelles doit répondre un bâtiment achevé. Notons que ces performances doivent être mesurées sur site.

Afin d'évaluer les performances acoustiques des planchers mixtes en bois-béton face aux bruits de choc et aux bruits aériens, une série d'essais en laboratoire ont été réalisés sur différents prototypes de planchers (voir tableau 2).

5.1 Isolation aux bruits aériens

En matière d'isolation aux bruits aériens, le confort normal destiné à satisfaire une majorité de personnes (70 % des utilisateurs) est fixé à 35 dB au minimum entre un local et une chambre à coucher d'une même habitation, et à 54 dB entre deux locaux d'habitations mitoyennes.

Comme on peut le constater à la figure 15, la mise en œuvre d'un plancher traditionnel en bois doté d'une chape à l'anhydrite (configuration 2) ne permet pas d'atteindre le confort normal dans une même habitation. Un plancher mixte en bois-béton (configuration 4) permet par contre de satisfaire à cette exigence.

Entre deux habitations, un plancher mixte en bois-béton recouvert d'une chape flottante (configuration 5) n'est pas suffisant pour atteindre l'exigence fixée à 54 dB. Un système «masse-ressort-masse» via la mise en œuvre d'une chape flottante et d'un plafond suspendu, par exemple, s'avérera dès lors nécessaire.

Remarque : la configuration 6 représente une dalle en béton de 30 cm d'épaisseur.

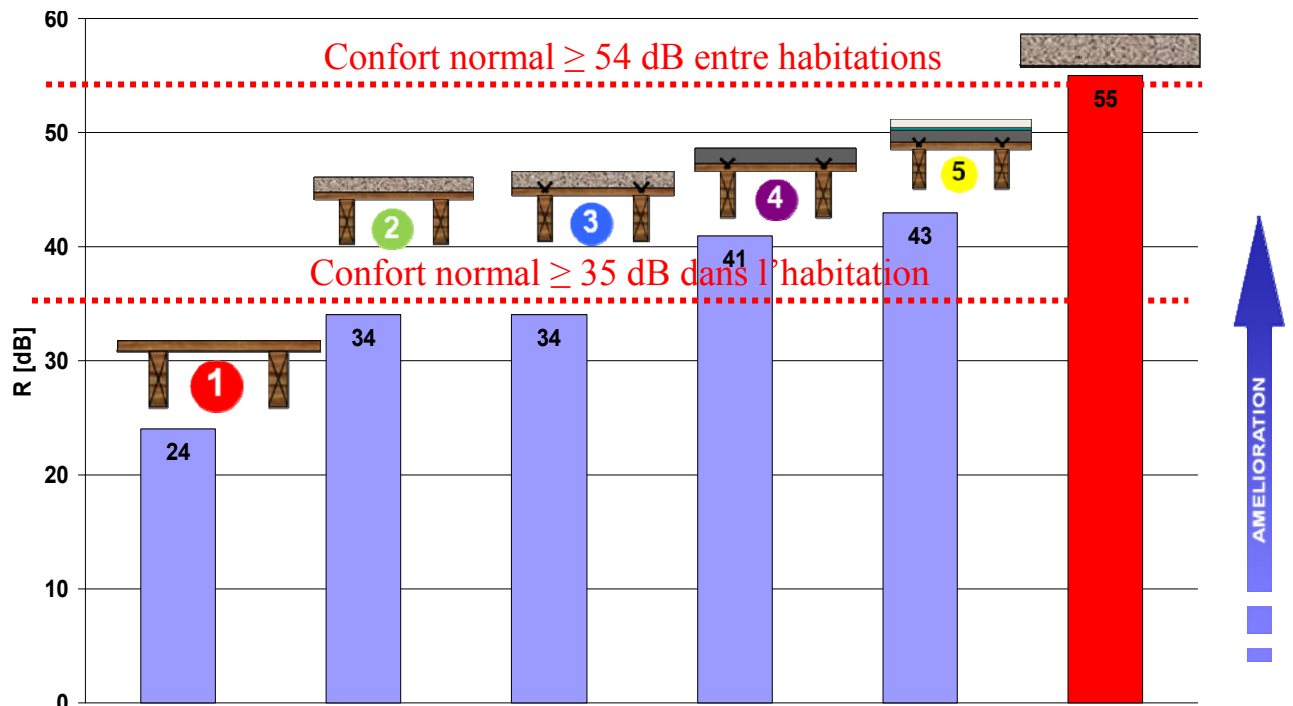


Figure 15 Influence de la composition du plancher sur l'isolation aux bruits aériens.

5.2 Isolation aux bruits de choc

Concernant l'isolation aux bruits de choc, la norme ne fixe pas de limite pour le confort normal entre un local et une chambre à coucher d'une même habitation. Par contre, pour l'isolation entre habitations, la norme fixe une valeur de 58 dB (tout type de local) et de 54 dB (chambre à coucher) pour un confort normal.

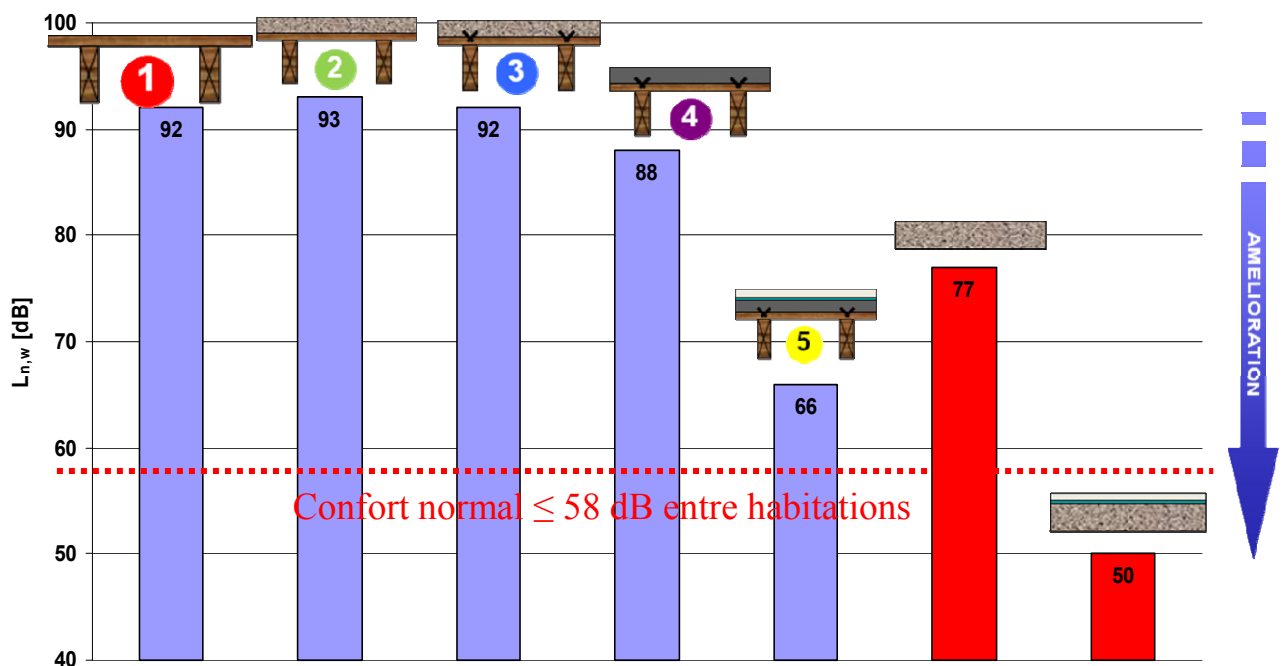


Figure 16 Influence de la composition du plancher sur l'isolation aux bruits de choc.

Comme on peut le constater à la figure 16, les configurations en bois testées, y compris le plancher mixte en bois-béton recouvert d'une chape flottante (configuration 5), se révèlent insuffisantes pour répondre au critère de confort normal. La mise en œuvre d'un revêtement de sol souple, afin d'amortir le choc, et d'un système «masse-ressort-masse» s'avérera nécessaire, d'autant plus si un confort supérieur est exigé (50 dB *in situ*).

Remarquons néanmoins qu'une dalle en béton d'une hauteur utile équivalant à celle d'un plancher mixte en bois-béton (configuration 4) ne permet pas non plus d'atteindre le critère minimum, à moins de lui adjoindre une chape flottante.

Par ailleurs, on s'aperçoit, au vu des résultats présentés ci-dessus, que la mise en œuvre des connecteurs ne pénalise pas l'isolation aux bruits aériens et aux bruits de choc.

6. Résistance au feu des planchers mixtes en bois-béton

La conception d'un compartimentage correct est primordiale pour assurer la sécurité à l'incendie d'un bâtiment. Cela implique une résistance au feu suffisante des parois formant le compartiment (critère R – stabilité, critère E – étanchéité au feu, critère I – isolation thermique). Les exigences imposées en Belgique concernant la résistance au feu des planchers porteurs dans les bâtiments (hormis les habitations unifamiliales) sont principalement de REI 60 et REI 120. Or, la résistance au feu d'un plancher traditionnel en bois sans protection ne dépasse généralement pas les 30 minutes.

Des simulations numériques sont réalisées afin d'évaluer les performances du plancher en bois-béton. Le logiciel utilisé permet de prendre en compte la collaboration entre le bois et le béton en intégrant des connecteurs possédant des propriétés géométriques et mécaniques identiques à celles des connecteurs réellement mis en œuvre. La figure 17 illustre les paramètres géométriques du modèle. Il s'agit d'une demi-poutre mixte.

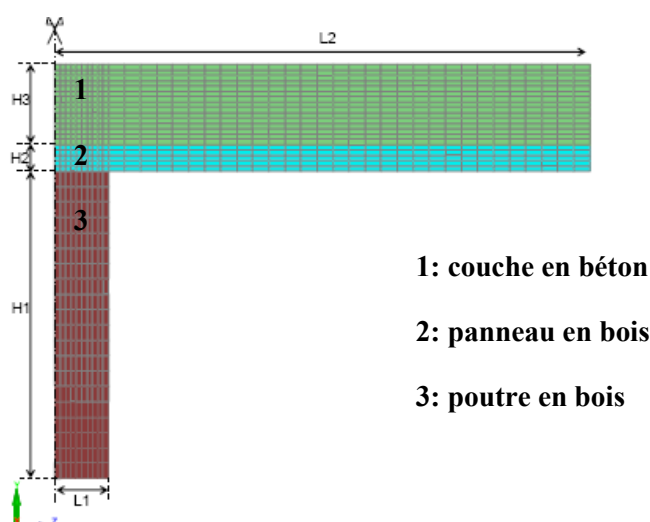


Figure 17 Paramètres géométriques du modèle (logiciel SAFI® - Université de Liège).

Le résultat des simulations montre que la mise en œuvre d'un plancher en bois-béton permet de satisfaire au critère d'isolation thermique (I) respectivement pendant 60 et 120 minutes pour une épaisseur de béton de 4 et 7 cm (voir figure 18). Autrement dit, durant cette période, l'augmentation de température sur les faces non exposées n'a pas dépassé la température moyenne initiale de plus de 140 °C en moyenne et $\Delta 180$ °C ponctuellement.

Pour le critère d'isolation thermique, le paramètre déterminant est essentiellement l'épaisseur du béton. Le type de béton, le type et la section des poutres et des panneaux en bois ont par contre une influence limitée.

Épaisseur de béton 70 mm
 Température de la face non exposée :

- après 60 min : 55 °C
- après 120 min : 135 °C

Épaisseur de béton 40 mm
 Température de la face non exposée :

- après 60 min : 110 °C
- après 120 min : 260 °C

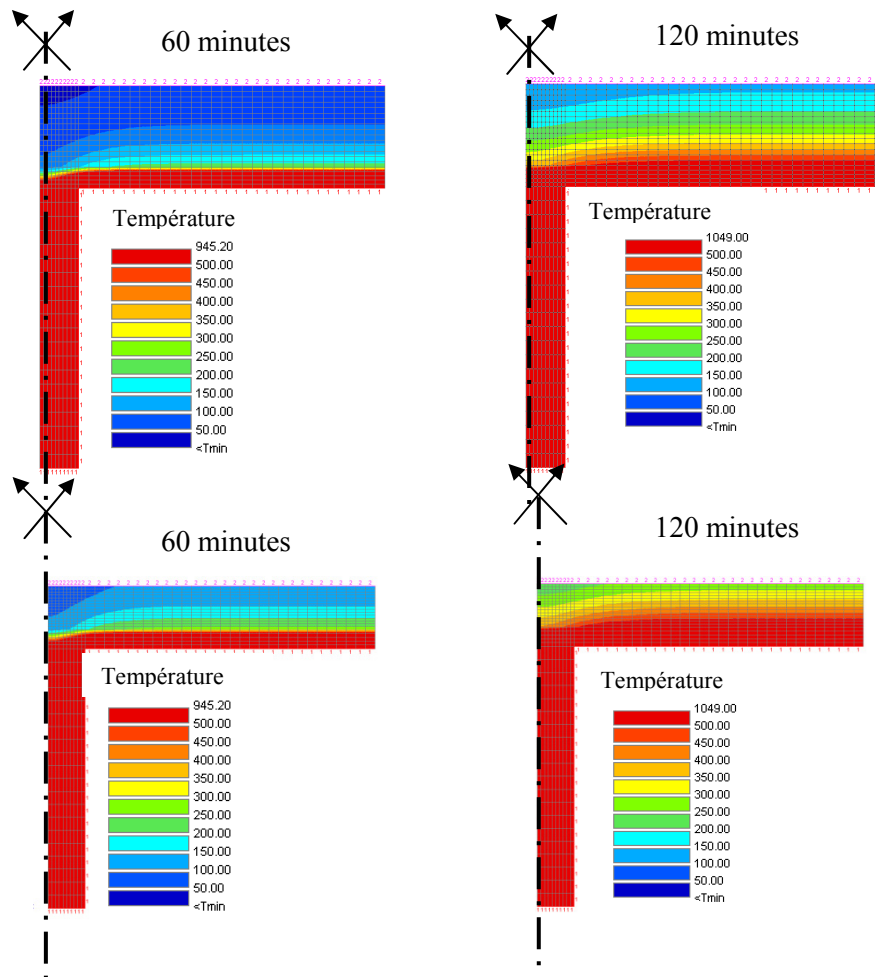


Figure 18 Isothermes dans une demi-section de plancher mixte en bois-béton (logiciel SAFI® - Université de Liège).

Contrairement au critère d'isolation thermique, la stabilité au feu (R) n'est que très faiblement influencée par la présence de la couche de béton; les exigences requises considérant en effet un feu provenant du dessous du plancher. Les paramètres déterminants sont le type et la section des poutres en bois et l'espacement des connecteurs. Ce critère, vérifié à l'aide des simulations numériques sur la base d'une vitesse de déformation, n'est satisfait que pour certaines configurations durant les 60 premières minutes. Au-delà, une protection en sous-face, comme par exemple un plafond suspendu, est nécessaire.

7. Performances vibratoires des planchers mixtes en bois-béton

Les actions agissant sur un bâtiment engendrent des vibrations qui peuvent affecter son intégrité structurale et provoquer une situation d'inconfort chez les utilisateurs.

Les causes d'inconfort peuvent résider dans des sources internes propres à l'utilisation normale des locaux par les occupants (figure 19, à gauche), mais également dans des sources externes engendrées par des activités de chantier, le trafic routier, ferroviaire ou métropolitain (figure 19, à droite).

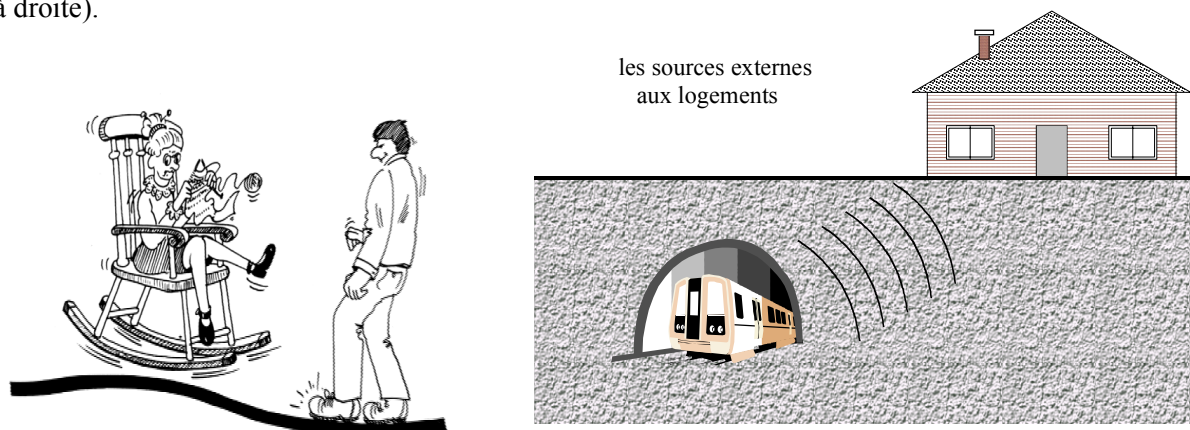


Figure 19 Sources de vibration internes et externes.

Les planchers en bois traditionnels sont, en règle générale, particulièrement sensibles aux vibrations pour deux raisons principales :

- leur fréquence de résonance est basse : ces planchers présentent des résonances vibratoires demandant peu d'énergie pour générer des vibrations bien perceptibles et dérangeantes pour les occupants
- leur faible masse : les planchers en bois sont légers par rapport aux fondations généralement en béton, ce qui engendre des amplitudes beaucoup plus grandes.

Afin d'évaluer les performances vibratoires des planchers en bois-béton vis-à-vis des sources internes, il convient de vérifier, soit par calcul soit par essai (*in situ* ou en laboratoire), trois critères imposés par l'Eurocode 5 :

- la fréquence de résonance : celle-ci doit être supérieure à 8 Hz afin d'éviter au maximum que le premier mode du domaine des fréquences de vibrations générées par la marche d'une personne n'approche cette fréquence de résonance
- le critère statique : la déformée d'un plancher résidentiel sous une charge ponctuelle de 1 kN doit être limitée à 1,5 mm
- le critère dynamique : la vitesse vibratoire verticale v (mm/s) du plancher sous une impulsion unitaire de 1 Ns doit être limitée à :

$$v \leq b^{(f_1 \cdot \zeta - 1)} \text{ m/Ns}^2$$

où

- b est pris égal à 100 pour les planchers résidentiels
- ζ vaut 0,01 pour les planchers en bois
- f_1 est la fréquence fondamentale du plancher.

Les sources externes, quant à elles, peuvent être évaluées par impact indirect des planchers. L'évaluation permet de déterminer le premier mode (critère de fréquence de résonance) et le nombre de modes de résonance dans la plage de fréquences principales (0 à 40 Hz).

Différentes configurations de planchers ont été évaluées, d'une part, par voie expérimentale dans la cellule 'vibrations'⁽⁸⁾ du CSTC et, d'autre part, par voie analytique en partant du plancher traditionnel en bois reposant sur des murs en maçonnerie et en testant successivement l'influence de l'ajout d'une dalle en béton libre, puis d'une dalle en béton connectée mécaniquement aux poutres en bois (plancher mixte en bois-béton).

Le tableau 6 présente la synthèse des performances vibratoires des planchers testés tant vis-à-vis des sources internes qu'externes.

Tableau 6 Récapitulatif des performances vibratoires des planchers testés selon l'Eurocode 5-1-1.

Critère de l'EC5	Exigence	Type de plancher			
		Plancher en bois	Plancher en béton	Plancher en bois-béton sans connexion	Plancher en bois-béton avec connexion
Fréquence fondamentale 1 ^{er} mode propre	> 8Hz	± 20 Hz	40 Hz	17 Hz	23 Hz
Comportement modal : nombre de modes	-	6 modes	1 mode	5 modes	2 modes
Critère statique	Flèche < 1,5 mm sous F = 1 kN	1,33 mm (<i>in situ</i>) (*)	<< 0,1 mm	0,26 mm	0,16 mm
Critère dynamique	$v \leq b^{(f_1 \cdot \zeta^{-1})}$	Voir figure 20			

(*) 0,76 mm (par calcul).

Les essais ont permis de constater que l'ajout de masse seule sans connexion n'améliore pas significativement le comportement vibratoire des planchers. Elle doit être combinée aux connecteurs pour avoir un effet bénéfique et permettre au plancher de satisfaire à l'ensemble des critères vibratoires. Plus particulièrement, on constate à la figure 20 que seul le plancher mixte en bois-béton répond au critère dynamique imposé par l'Eurocode 5. Le plancher travaille en fait comme une structure quasi-isotrope et permet d'atteindre un confort vibratoire comparable à celui d'une dalle en béton armé de hauteur utile équivalente.

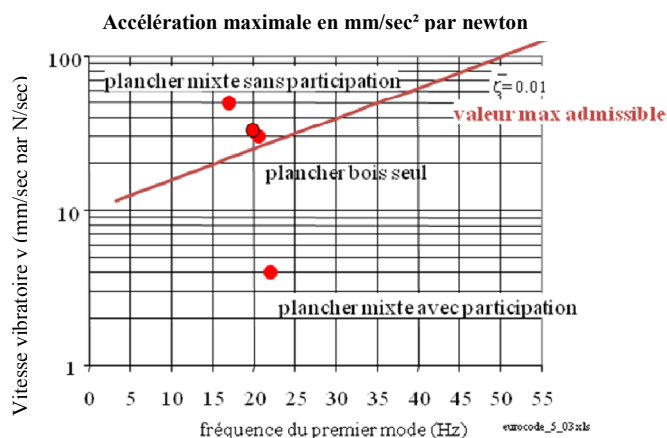


Figure 20 Evaluation du critère dynamique.

(⁸) La superficie du plancher mis en œuvre dans cette cellule est de 4,64 m x 4,64 m.

8. Performances thermiques des planchers mixtes en bois-béton

Le confort thermique suppose que le climat intérieur soit maintenu dans des limites acceptables durant l'année entière (température stable entre le jour et la nuit, entre l'été et l'hiver). L'obtention d'un tel confort est importante en période estivale (pour éviter la surchauffe), plus particulièrement dans les bâtiments à structure légère. En effet, les maisons à structure légère (ossature en bois, par exemple) présentent une faible inertie thermique, de sorte que le confort d'été peut poser problème.

Pour assurer la bonne qualité thermique des locaux, on peut intervenir notamment sur quatre paramètres :

- les apports solaires
- la ventilation naturelle
- l'isolation thermique de l'enveloppe du bâtiment
- l'inertie thermique du bâtiment.

Cette dernière est directement liée à la gestion des apports solaires et de la ventilation. Elle permet de réguler l'ambiance thermique à l'intérieur du bâtiment (en s'opposant aux variations de température) et, de ce fait, d'améliorer le confort. C'est sur cet aspect que se concentre la dernière partie de ce Rapport. Cette propriété est en effet généralement le point faible des planchers traditionnels en bois que l'évolution vers le concept de plancher en bois-béton permet de pallier.

Pour déterminer l'inertie thermique d'un élément constructif, on utilise le critère de massivité. Un élément est dit massif lorsque sa masse surfacique est d'au moins 100 kg/m², si l'on ne considère que les couches situées entre l'intérieur et une lame d'air ou une couche de conductivité thermique $\lambda < 0,20$ W/mK.

Selon les méthodes PEB (performance énergétique des bâtiments), une approche simplifiée distingue quatre classes de masse thermique pour un bâtiment dans son ensemble : lourd, mi-lourd, peu lourd et léger. La caractérisation d'un bâtiment dans une de ces classes se fait de la manière illustrée à la figure 21 compte tenu du pourcentage d'éléments massifs dans les parois horizontales et verticales.

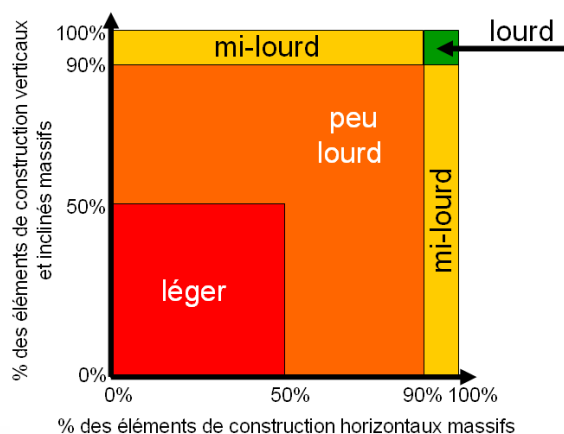
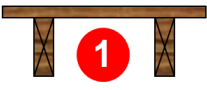





Figure 21 Caractérisation d'un bâtiment dans son ensemble en termes de masse thermique [CSTC].

La classe d'inertie du bâtiment a une influence directe sur le niveau E (critère reflétant la consommation énergétique du bâtiment) pour lequel la réglementation PEB impose des limites à ne pas dépasser.

L'exercice a été réalisé pour une construction à ossature bois comportant successivement quatre types de planchers différents (voir tableau 7).

Tableau 7 Evaluation de la classe d'inertie thermique de quatre configurations de planchers selon leur masse surfacique.

Configuration du plancher		Masse surfacique totale	Type d'élément pour la classe d'inertie thermique
 1	Poutres en bois résineux (section 68/175 mm) Panneaux OSB/3 (18 mm – 650 kg/m ³)	11,7 kg/m ²	Élément horizontal non massif
 2 bis	Poutres en bois résineux Panneaux OSB/3 Chape de ciment (40 mm – 1200 kg/m ³)	59,7 kg/m ²	Élément horizontal non massif
 4	Poutres en bois résineux Panneaux OSB/3 Béton C25/30 (40 mm – 2350 kg/m ³)	105,7 kg/m ²	Élément horizontal massif
 5	Poutres en bois résineux Panneaux OSB/3 Béton C25/30 (40 mm – 2350 kg/m ³) Chape flottante (20 mm – 900 kg/m ³)	123,7 kg/m ²	Élément horizontal massif

On constate que les deux planchers traditionnellement utilisés dans les bâtiments à ossature en bois (1 et 2) ne répondent pas au critère d'élément massif. La mise en œuvre d'une chape classique de 8 cm ou d'une chape à l'anhydrite de 5 cm d'épaisseur (et d'une masse volumique de 2000 kg/m³) s'avère dans ce cas nécessaire. Par contre, le plancher mixte en bois-béton (avec une couche de béton d'une épaisseur minimale de 4 cm) peut être considéré comme un élément massif.

Ainsi, dans le cas d'une maison à ossature bois dont les éléments horizontaux sont des planchers mixtes en bois-béton et les éléments verticaux une ossature en bois, le bâtiment appartiendra à la classe d'inertie 'mi-lourd' (voir figure 22).

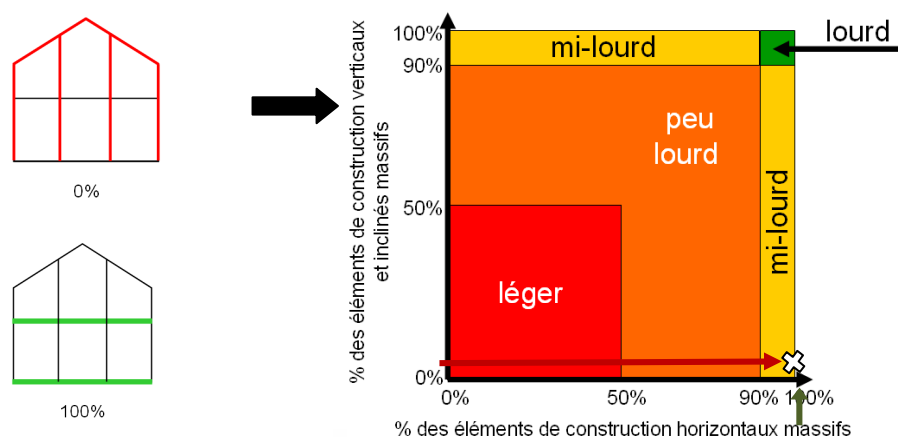


Figure 22 Classe d'inertie d'une habitation selon le pourcentage d'éléments massifs de murs et de planchers.

9. Conclusions

Un plancher mixte en bois-béton se compose d'un plancher en bois (poutres et panneaux OSB) connecté mécaniquement à une dalle en béton armé de 4 à 7 cm d'épaisseur en général. Les organes de connexion permettent une utilisation optimale des matériaux bois et béton, qui participent respectivement à la reprise des efforts de traction et de compression. Les planchers mixtes en bois-béton sont particulièrement indiqués en rénovation, où ils permettent de renforcer les planchers existants sans nécessiter le remplacement des poutres en bois.

Une récente recherche menée au CSTC en partenariat avec le CTIB a permis d'évaluer l'ensemble des performances des planchers mixtes en bois-béton et d'établir, sur la base d'essais de flexion et de cisaillement réalisés en laboratoire, une méthode de calcul simple pour le dimensionnement aux ELS et aux ELU.

Comparativement aux planchers traditionnels en bois, les planchers en bois-béton présentent globalement des performances accrues, non seulement sur le plan mécanique, mais également en ce qui concerne le confort vibratoire et la tenue à l'incendie.

La présence de connecteurs a pour effet majeur d'augmenter la rigidité du plancher, réduisant sensiblement la flèche sous charges d'exploitation. Aux ELU, la charge de rupture par flexion est également améliorée par rapport à celle d'un plancher traditionnel en bois de hauteur équivalente, mais d'une manière moins marquée que le gain de rigidité observé.

En matière de confort acoustique, on a constaté que les connecteurs ne pénalisent pas les performances du plancher. L'ajout de la dalle en béton connectée au plancher ne suffit cependant pas pour atteindre les exigences de confort minimum entre habitations. La mise en place d'un plafond suspendu et d'une chape flottante sous et sur le plancher mixte s'avère dès lors nécessaire.

Contrairement au comportement acoustique, pour lequel la présence de connecteurs n'a pas d'influence significative, le comportement vibratoire est dicté par la connexion, qui procure au plancher un comportement quasi-isotrope, similaire à celui d'une dalle en béton armé de hauteur utile équivalente. Ce comportement est idéal pour assurer un confort suffisant face aux sources internes et externes de vibrations courantes.

Concernant le comportement à l'incendie, c'est l'épaisseur de la dalle en béton qui prime pour assurer une isolation au feu suffisante; le critère de stabilité au feu est, quant à lui, tributaire de la section des poutres en bois et des connecteurs.

En conclusion, les planchers mixtes en bois-béton peuvent être mis en œuvre aussi bien en rénovation qu'en construction neuve. Les connecteurs jouent un rôle essentiel dans le comportement du plancher, conduisant à des performances plus intéressantes pour l'ouvrage et notamment à des portées plus importantes que dans le cas de planchers traditionnels en bois de hauteur équivalente.

Une recherche future pourrait permettre de prendre en considération plusieurs hypothèses qui n'ont pu être étudiées précédemment, telles que, par exemple :

- le comportement plastique des matériaux et connecteurs dans la méthode de calcul exposée au § 4.5
- l'optimisation de la simulation numérique du comportement à l'incendie pour tenir compte de la variation de température des connecteurs.

Bibliographie

- [1] Andriamitantoa L., Biger J., Racher P., Rouger F., Sagot G., Teyssandier H., Trinh J. et Vidon G.
Structures en bois aux états limites. Introduction à l'Eurocode 5. STEP 1 : matériaux et base de calculs. Volume 1 et 2, SEDIBOIS / Union nationale française de charpente, menuiserie, parquets (FRA), 1996.
- [2] Benoît Y. et Paradis T.
Construction de maisons à ossature bois. Eyrolles/CTBA (FRA), 2007.
- [3] Bureau de normalisation
NBN B 03-003:2002 Déformation des structures. Valeurs limites de déformation. Bâtiments.
- [4] Bureau de normalisation
NBN EN 1994-1-1:2004 Eurocode 4. Conception et dimensionnement des structures mixtes acier-béton. Partie 1-1 Règles générales et règles pour le bâtiment.
- [5] Bureau de normalisation
NBN ENV 1995-1-1:1993 Eurocode 5. Design of timber structures. Part 1-1 : general rules and rules for buildings + DAN (1999/02), 109 p.
- [6] Bureau de normalisation
NBN EN 1995-1-1:2008+ANB Eurocode 5. Design of timber structures. Part 1-1 : general rules and rules for buildings.
- [7] Bureau de normalisation
NBN EN 1995-1-2:2008+ANB Eurocode 5. Design of timber structures. Part 1-2 : fire resistance.
- [8] Del Pedro M. et Gmür T.
Éléments de mécanique des structures. Presses polytechniques et universitaires romandes (CH), septembre 2001, 262 p.
- [9] Dias A.M.P.G.
Mechanical behaviour of timber-concrete joints. Technische Universiteit Delft (NDL), 2005, 293.
- [10] ...
Evaluation des prestations des planchers mixtes bois-béton. Rapport final de la première biennale, CSTC-CTIB, Convention CC-CIF-965, février 2006.
- [11] Institut national de statistiques
Statistiques des permis de bâtir et des bâtiments commencés, 2009.
- [12] Kenel A.
Zur Berechnung von Holz/Beton-Verbundkonstruktionen : Entwicklung und Vergleich verschiedener Berechnungsmethoden. Forschungs- und Arbeitsberichtbericht 115/42, EMPA Abteilung Holz (CH), mars 2000, 93 p.

- [13] Kenel A. et Meierhofer U.A.
Holz/Beton-Verbund unter langfristiger Beanspruchung. Forschungs- und Arbeitsberichtbericht 115/39, EMPA Abteilung Holz (CH), mars 1998, 75 p.
- [14] Martin Y., F. Dobbels et P. Van den Bossche
Prestaties van hout-betonvloeren : een multidisciplinaire benadering. Revue Cement (NDL), 2004-6, p. 108 à 111.
- [15] Natterer J., Sandoz J.L. et Rey M.
Traité de Génie Civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Volume 13. Construction en bois : Matériau, technologie et dimensionnement, Presses polytechniques et universitaires romandes (CH), 2004.
- [16] Parmentier B. et Delincé D.
Conception et dimensionnement des structures selon l'Eurocode 0 (EN 1990). CSTC-Magazine, n° 4, p. 33-44, décembre 2003.
- [17] Schaerlaekens S. et Dobbels F.
Les planchers portants des bâtiments résidentiels et tertiaires. CSTC, NIT 223, 2002.
- [18] Timmermann K. et Meierhofer U.A.
Holz/Beton-Verbundkonstruktionen : Untersuchungen und Entwicklungen zum mechanischen Verbund von Holz und Beton. Forschungs- und Arbeitsberichtbericht 115/30, EMPA Abteilung Holz (CH), octobre 1993, 87 p.
- [19] Van der Linden M.L.R.
Timber-Concrete Composite Floor Systems. Technische Universiteit Delft (NDL), décembre 1999, 364 p.

Annexe

Exemple pratique : dimensionnement d'un plancher mixte en bois-béton

Considérons un plancher mixte en bois-béton composé de solives en bois de type Parallam 68 mm x 241 mm, de panneaux de type OSB de 18 mm d'épaisseur et d'une couche en béton armé C25/30 de 4 cm connectée mécaniquement aux poutres à l'aide de connecteurs métalliques. Le plancher est soumis aux charges permanentes et variables suivantes :

- ✓ poids propre du béton, des poutres en bois et des panneaux OSB (voir calcul au § I)
- ✓ surcharge permanente correspondant à la chape et au revêtement de sol de type carrelage : 0,5 kN/m²
- ✓ charges d'exploitation sur les planchers, à raison de 2 kN/m², catégorie A pour habitation (Eurocode 1, partie 1-1).

Les caractéristiques des éléments composant le plancher, supposé être utilisé en classe de service 1 suivant l'Eurocode 5-1-1, sont précisées dans le tableau ci-après.

	Propriétés des matériaux	Symboles	Valeurs	Sources
Densité des poutres en bois	Largeur	b_2	68 mm	Fiche technique producteur
	Hauteur	h_2	241 mm	Fiche technique producteur
	Portée	l	5 m	–
	Entraxe	b_1	500 mm	–
	Largeur efficace ⁽¹⁾	$b_{eff} = \min(b_1; \frac{L}{8})$	500 mm	–
	Densité	ρ	767 kg/m ³	Fiche technique producteur
	Valeur caractéristique de la résistance à la flexion	$f_{m,k}$	40 N/mm ²	Fiche technique producteur
	Valeur caractéristique de la résistance à la traction axiale	$f_{t,0,k}$	24 N/mm ²	Fiche technique producteur
	Valeur caractéristique de la résistance au cisaillement	$f_{v,k}$	2,4 N/mm ²	Fiche technique producteur
	Coefficient partiel de sécurité du bois massif	$\gamma_{M,b}$	1,3 [-]	EN 1995-1-1, tableau 2.3
	Coefficient partiel de sécurité de l'assemblage	$\gamma_{M,a}$	1,3 [-]	EN 1995-1-1, tableau 2.3
	Coefficient de déformation en classe de service 1	k_{def}	0,6 [-]	EN 1995-1-1, tableau 3.2
	Coefficient de modification en classe de service 1 - Action à moyen terme	k_{mod}	0,8 [-]	EN 1995-1-1, tableau 3.1
	Module d'élasticité en flexion	$E_{0,mean}$	14000 N/mm ²	Fiche technique producteur
Panneaux OSB	Épaisseur	t_{OSB}	18 mm	–
	Densité	ρ_{OSB}	600 kg/m ³	Fiche technique producteur
Dalle en béton	Épaisseur	h_1	40 mm	–
	Résistance caractéristique en compression sur cylindre	$f_{c,k}$	25 N/mm ²	EN 1992-1-1, tableau 3.1
	Coefficient de sécurité partiel du béton	γ_c	1,5 [-]	EN 1992-1-1, tableau 2.1N
	Coefficient de fluage du béton ⁽²⁾	–	2 [-]	EN 1992-1-1, § 3.1.4
	Masse volumique du béton légèrement armé	ρ_c	2500 kg/m ³	EN 1991-1-1, Annexe B
	Module d'élasticité en flexion	E_{cm}	31000 N/mm ²	EN 1992-1-1, tableau 3.1
Connecteurs (armature $\Phi 12$ enchâssée)	Distance entre connecteurs	s	100 mm	–
	Module de glissement aux ELS	K_{ser}	6000 N/mm	Résultats expérimentaux : § 4
	Module de glissement aux ELU	$K_u = 2/3 K_{ser}$	4000 N/mm	Résultats expérimentaux : § 4
	Résistance caractéristique	P_{Rk}	10.000 N	Résultats expérimentaux : § 4

(1) La largeur efficace de la couche de béton est déterminée selon l'Eurocode 4-1-1 (§ 6.2.1.5) : b_{eff} est prise égale à la portée $L/8$, sans toutefois dépasser la largeur géométrique b_1 (distance entre poutres en bois).

(2) Les hypothèses adoptées pour déterminer le coefficient de fluage sont les suivantes : $t_0 = 30$ jours; ciment de type N; béton C25/30.

I. Charges

Les charges à considérer sur le système de plancher sont par conséquent :

- ✓ le poids propre des poutres et des panneaux par mètre de plancher, soit :

$$g_t = A_t \cdot \rho_t + t_{OSB} \cdot b_{eff} \cdot \rho_{OSB} = (68 \cdot 241 \cdot 767 + 18 \cdot 500 \cdot 600) \cdot 10^{-5} = 179,7 \text{ N/m}$$

- ✓ le poids propre de la dalle en béton, soit :

$$g_c = A_c \cdot b_{eff} \cdot \rho_c = (40 \cdot 500 \cdot 2500) \cdot 10^{-5} = 500 \text{ N/m}$$

la charge permanente due au poids propre vaut donc :

$$G_{k1} = g_t + g_c = 179,7 + 500 = 679,7 \text{ N/m}$$

- ✓ la surcharge permanente comprenant une chape de 4 cm en mortier de ciment de 20 kN/m³ et un revêtement de sol de type carrelage de 0,5 kN/m², soit :

$$G_{k2} = 0,5 \cdot (0,04 \cdot 20000 + 500) = 650 \text{ N/m}$$

- ✓ la charge variable d'exploitation (pour un bâtiment résidentiel, classe 1 selon l'EN 1991-1-1) :

$$Q_{k,1} = b_{eff} \cdot Q_{k,classeA} = 0,5 \cdot 2000 = 1000 \text{ N/m}$$

II. Combinaisons de charges

- ✓ Combinaison d'actions en situation de projet durable et transitoire (ELU) :

$$F_{ELU} = 1,35 \cdot (G_{k,1} + G_{k,2}) + 1,5 \cdot Q_{k,1} = 3295 \text{ N/m}$$

- ✓ Combinaison d'actions quasi-permanentes (ELS - QP) :

$$F_{ELS} = \cdot G_{k,1} + G_{k,2} + \psi_{2,1} Q_{k,1} = 679,7 + 650 + 0,3 \cdot 1000 = 1630 \text{ N/m}$$

- ✓ Combinaison d'actions caractéristiques (ELS - C) :

$$F_{ELS} = \cdot G_{k,1} + G_{k,2} + Q_{k,1} = 2330 \text{ N/m}$$

III. Etats limites ultimes (ELU)

a. Calcul du moment sollicitant maximum

En supposant que les poutres soient isostatiques, le moment de flexion maximum (à mi-travée) à l'ELU

M_{Ed}^+ vaut :

$$M_{Ed}^+ = \frac{F_{ELU} \cdot l^2}{8} = \frac{3295 \cdot 5^2}{8} = 10,3 \text{ kNm}$$

b. Calcul de la rigidité équivalente en flexion à court terme ⁽⁹⁾

La rigidité équivalente se calcule selon le point B.2 de l'annexe B de l'Eurocode 5-1-1 et vaut :

$$(EI)_{\text{eff}} = E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2 + E_2 I_2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2 \quad [\text{Nmm}^2]$$

où

$$\gamma_1 = \left(1 + \frac{\pi^2 E_1 A_1 s}{K_u L^2} \right)^{-1} = \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot 31000 \cdot (40 \cdot 500) \cdot 100}{4000 \cdot 5000^2} \right)^{-1} = 0,14$$

$$\gamma_2 = 1$$

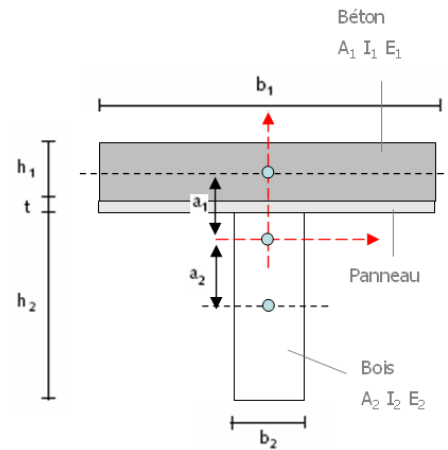
$$a_2 = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 \cdot \left(\frac{h_1}{2} + t + \frac{h_2}{2} \right)}{\gamma_1 E_1 A_1 + \gamma_2 E_2 A_2} = \frac{0,14 \cdot 31000 \cdot (40 \cdot 500) \cdot \left(\frac{40}{2} + 18 + \frac{241}{2} \right)}{0,14 \cdot 31000 \cdot (40 \cdot 500) + 1 \cdot 14000 \cdot (68 \cdot 241)} = 44 \text{mm}$$

$$a_1 = \frac{h_1}{2} + t + \frac{h_2}{2} - a_2 = \frac{40}{2} + 18 + \frac{241}{2} - 44 = 115 \text{mm}$$

Donc,

$$(EI)_{\text{eff}} = 31000 \cdot \frac{500 \cdot 40^3}{12} + 0,14 \cdot 31000 \cdot (40 \cdot 500) \cdot 115^2 + 14000 \cdot \frac{68 \cdot 241^3}{12} + 1 \cdot 14000 \cdot (68 \cdot 241) \cdot 44^2$$

$$(EI)_{\text{eff}} = 2,79 \cdot 10^{12} \text{ Nmm}^2$$



c. Calcul des contraintes de flexion à court terme

Les contraintes de flexion se calculent selon le point B.2 de l'annexe B de l'Eurocode 5-1-1 en se basant sur l'équation de Navier :

$$\sigma = \frac{My}{I}$$

Ces contraintes sont déterminées en additionnant, d'une part, les contraintes normales de flexion sans collaboration dans le béton ($\sigma_{1,M}$) et dans le bois ($\sigma_{2,M}$) – en utilisant la rigidité efficace de la section – et, d'autre part, les contraintes normales de flexion introduites par la collaboration ($\sigma_{1,N}$, $\sigma_{2,N}$). Les deux composantes sont illustrées à la figure 23.

⁽⁹⁾ L'utilisation de facteurs gamma dans la formule permettant de calculer la rigidité équivalente prend en compte l'efficacité de la collaboration entre le béton (1) et le bois (2). La rigidité équivalente est en fait calculée en considérant l'inertie propre de chaque élément, à laquelle sont ajoutés les termes de 'transport', modérés par les coefficients γ . Pour une collaboration parfaite ($K_u \gg \gg$), les coefficients γ valent 1 et la formule se réduit à celle applicable pour une section 'homogène'.

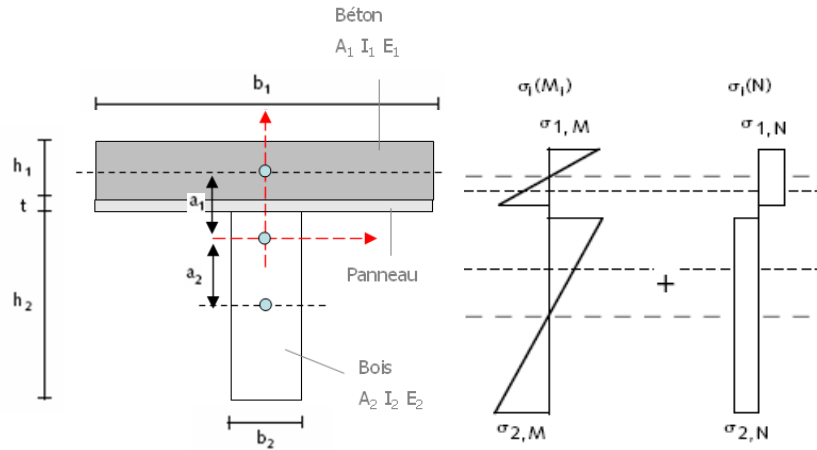


Figure 23 Distribution schématique des contraintes dans un plancher mixte en bois-béton.

Dans le béton :

$$\sigma_{1,M} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_1 h_1 \cdot M_{Ed}^+}{(EI)_{eff}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{31000 \cdot 40 \cdot 10,3 \cdot 10^6}{2,79 \cdot 10^{12}} = 2,30 \text{ N / mm}^2$$

$$\sigma_{1,N} = \frac{\gamma_1 E_1 a_1 \cdot M_{Ed}^+}{(EI)_{eff}} = \frac{0,14 \cdot 31000 \cdot 115 \cdot 10,3 \cdot 10^6}{2,79 \cdot 10^{12}} = 1,85 \text{ N / mm}^2$$

Dans le bois :

$$\sigma_{2,M} = \frac{1}{2} \cdot \frac{E_2 h_2 \cdot M_{Ed}^+}{(EI)_{eff}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{14000 \cdot 241 \cdot 10,3 \cdot 10^6}{2,79 \cdot 10^{12}} = 6,25 \text{ N / mm}^2$$

$$\sigma_{2,N} = \frac{\gamma_2 E_2 a_2 \cdot M_{Ed}^+}{(EI)_{eff}} = \frac{1 \cdot 14000 \cdot 44 \cdot 10,3 \cdot 10^6}{2,79 \cdot 10^{12}} = 2,26 \text{ N / mm}^2$$

d. Vérification du taux de contrainte dans les matériaux béton et bois sous flexion positive à court terme

Le principe de calcul consiste à additionner respectivement, dans les deux fibres extrêmes de la section du plancher, les contraintes normales de flexion calculées précédemment. La vérification des contraintes normales dans le bois et dans le béton peut alors être réalisée comme ci-après.

- *Compression maximale dans le béton (fibre supérieure) :* $\sigma_{c,d} = \sigma_{1,M} + \sigma_{1,N} \leq f_{c,d}$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{c,d} = 2,3 + 1,85 = 4,15 \text{ N / mm}^2 \\ f_{c,d} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{25}{1,5} = 16,6 \text{ N / mm}^2 \end{array} \right\} \rightarrow 4,15 \leq 16,6 \Rightarrow \text{critère OK}$$

- *Traction maximale dans le béton (fibre inférieure du béton) :* $\sigma_{t,d} = \sigma_{1,M} - \sigma_{1,N} \leq f_{t,d}$

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_{t,d} = 2,30 - 1,85 = 0,44 \text{ N / mm}^2 \\ f_{c,d} = \frac{f_{ctm}}{\gamma_c} = \frac{2,6}{1,5} = 1,73 \text{ N / mm}^2 \end{array} \right\} \rightarrow 0,44 \leq 1,73 \Rightarrow \text{critère OK}$$

➤ *Flexion composée dans le bois :* $\frac{\sigma_{2,N}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{2,M}}{f_{m,d}} \leq 1$

$$\left. \begin{aligned} f_{t,0,d} &= k_{\text{mod}} \frac{f_{t,0,k}}{\gamma_{M,b}} = 0,8 \cdot \frac{24}{1,3} = 14,79 \text{ N/mm}^2 \\ f_{m,d} &= k_{\text{mod}} \frac{f_{m,k}}{\gamma_{M,b}} = 0,8 \cdot \frac{40}{1,3} = 24,62 \text{ N/mm}^2 \end{aligned} \right\} \rightarrow 0,30 \leq 1 \Rightarrow \text{critère OK}$$

e. Vérification du taux de contrainte dans les matériaux béton et bois sous flexion positive à long terme

Le calcul est le même que pour la vérification à court terme, à cette différence près que l'on remplace les modules d'élasticité du bois et du béton par des modules d'élasticité finaux prenant en compte le fluage des deux matériaux dans le temps, et que l'on adapte le module de glissement (voir Eurocode 5-1-1, § 2.3.2.2), soit :

$$\begin{aligned} E_{1,\text{final}} &= \frac{E_1}{1 + \varphi_{\infty,t0}} = \frac{31000}{1+2} = 10333 \text{ N/mm}^2 \quad \text{béton} \\ E_{2,\text{final}} &= \frac{E_2}{1 + \psi_2 k_{\text{def}}} = \frac{14000}{1+0,3 \cdot 0,6} = 11864 \text{ N/mm}^2 \quad \text{bois} \\ K_{u,\text{final}} &= \frac{K_u}{1 + \psi_2 \cdot k_{\text{def,connexion}}} = \frac{4000}{1+0,3 \cdot 0,3} = 3670 \text{ N/mm} \quad \text{connecteur} \end{aligned}$$

Remarque : le coefficient ψ_2 est un coefficient pondérateur qui permet de calculer la valeur quasi-permanente de l'action générant la plus grande contrainte eu égard à la résistance (si cette action est une action permanente, il convient de remplacer ψ_2 par 1) – voir Eurocode 5-1-1 (2004) - § 2.3.2.2. Les valeurs de ce coefficient sont données dans l'Eurocode 0 (2002).

La valeur du coefficient γ_1 se calcule comme suit :

$$\gamma_1 = \left(1 + \frac{\pi^2 E_{1,\text{fin}} A_1 s}{K_{\text{ser,fin}} L^2} \right)^{-1} = \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot 10333 \cdot (40 \cdot 500) \cdot 100}{3670 \cdot 5000^2} \right)^{-1} = 0,310$$

La valeur de la rigidité équivalente vaut donc :

$$(EI)_{\text{eff}} = E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2 + E_2 I_2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2 = 1,72 \cdot 10^{12} \text{ N/mm}^2$$

Après avoir calculé les contraintes de flexion et de cisaillement à long terme dans le bois et le béton, les contraintes dans le bois et dans le béton peuvent être vérifiées comme suit.

➤ *Compression maximale dans le béton (fibre supérieure) :* $\sigma_{c,d} = \sigma_{1,M} + \sigma_{1,N} \leq f_{c,d}$

$$\sigma_{c,d} = 1,24 + 2,29 = 3,52 \text{ N/mm}^2 \rightarrow 3,52 \leq 16,6 \Rightarrow \text{critère OK}$$

➤ *Traction maximale dans le béton (fibre inférieure du béton) :* $\sigma_{t,d} = \sigma_{1,M} - \sigma_{1,N} \leq f_{t,d}$

$$\sigma_{t,d} = 1,24 - 2,29 = -1,05 \text{ N/mm}^2 \rightarrow -1,05 \leq 1,73 \Rightarrow \text{critère OK}$$

➤ Flexion composée dans le bois :
$$\frac{\sigma_{2,N}}{f_{t,0,d}} + \frac{\sigma_{2,M}}{f_{m,d}} \leq 1$$

 $0,39 \leq 1 \Rightarrow$ critère OK

f. Vérification de l'effort tranchant dans le bois à court et à long terme

On considère que la totalité de l'effort tranchant est reprise par le matériau bois (voir hypothèse du modèle, § 4.5). Il convient de vérifier que la contrainte de cisaillement vertical de calcul $\tau_{z,d}$ ne dépasse pas la résistance de calcul au cisaillement du bois $f_{v,d}$, soit :

$$\tau_{z,d} = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_d}{A_2} \leq f_{v,d}$$

où

$$V_d = F_{ELU} \cdot \frac{1}{2} = 3295 \cdot \frac{5}{2} = 8237,5 \text{ N}$$

$$A_2 = b_2 \cdot h_2 = 68 \cdot 241 = 16388 \text{ mm}^2$$

$$f_{v,d} = k_{\text{mod}} \frac{f_{v,0,k}}{\gamma_{M,b}} = 0,8 \cdot \frac{2,4}{1,3} = 1,48 \text{ N/mm}$$

Donc

$$\tau_{z,d} = \frac{3}{2} \cdot \frac{8237,5}{16388} \rightarrow 0,75 \leq 1,48 \Rightarrow$$
 critère OK

Etant donné que l'on suppose que le bois reprend seul l'effort de cisaillement, il n'est pas nécessaire de vérifier le critère de cisaillement dans le bois à long terme (pas de modification par rapport au court terme).

g. Vérification du taux de chargement dans les connecteurs à court terme ⁽¹⁰⁾

La charge de calcul F_d agissant sur un connecteur doit être inférieure à la valeur de calcul de la capacité résistante P_{Rd} du connecteur, soit :

$$F_d = \frac{\gamma_1 \cdot E_1 \cdot A_1 \cdot a_1 \cdot s}{(EI)_{\text{ef}}} \cdot V_d \leq P_{Rd}$$

où

$$F_d = \frac{0,14 \cdot 31000 \cdot 20000 \cdot 114,89 \cdot 100}{2,78 \cdot 10^{12}} = 2966 \text{ N}$$

$$P_{Rd} = P_{Rk} / \gamma_M = 10000 / 1,3 = 7692 \text{ N}$$

$$R_d = P_{Rd} / F_{v,Rd}$$

⁽¹⁰⁾ Les étapes de calcul ne sont explicitées que pour la vérification à court terme. Il est bien entendu que la vérification à long terme doit également être effectuée de manière identique, mais en adaptant la valeur des modules des matériaux.

On constate donc que la charge sollicitante est bien inférieure à la résistance de calcul :

$$F_d \leq P_{Rd} \Leftrightarrow 2966 < 7692 \Rightarrow \text{critère OK}$$

IV. Etats limites de service (ELS)

a. Calcul de la rigidité équivalente en flexion à court terme

La rigidité équivalente en flexion aux ELS se calcule de la même manière qu'aux ELU, en prenant en compte le coefficient de glissement de service (K_{ser}) et non plus celui de rupture (K_u).

Seule la valeur du coefficient γ_1 varie :

$$\gamma_1 = \left(1 + \frac{\pi^2 E_1 A_{1s}}{K_{ser} L^2} \right)^{-1} = \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot 31000 \cdot (40 \cdot 500) \cdot 100}{6000 \cdot 5000^2} \right)^{-1} = 0,197$$

La rigidité équivalente en flexion vaut donc :

$$(EI)_{eff} = E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2 + E_2 I_2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2 = 3,24 \cdot 10^{12} \text{ N} / \text{mm}^2$$

b. Vérification de la flèche à court terme

La flèche maximale à mi-travée se calcule en prenant en compte la rigidité effective calculée au point précédent.

Etant donné que, dans le cas qui nous préoccupe, les poutres isostatiques sont chargées uniformément, la flèche se vérifie selon la formule suivante :

$$f_{max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{F_{ELS,caract} \cdot l^4}{(EI)_{eff}} \leq L/150 \text{ à } L/500^{11}$$
$$f_{max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{2330 \cdot 5000^4}{3,24 \cdot 10^{12}} = 5,9 \text{mm} \leq 33 \text{ à } 100 \text{mm} \Rightarrow \text{critère OK}$$

Tous les revêtements de sol peuvent donc être utilisés.

(11) Conformément à la norme NBN B 03-003 (2003) 'Déformation des structures. Valeurs limites de déformation. Bâtiments', les limites de flèche varient de L/150 à L/500 en fonction de la finition du plancher.

c. Vérification de la flèche à long terme

Pour la vérification des états limites de service à l'état final (long terme), il convient de remplacer les modules d'élasticité du bois et du béton par des modules finaux :

$$E_{1,fin} = \frac{E_1}{1 + \phi_{\infty,t0}} = 1033 \text{ MPa}$$

$$E_{2,fin} = \frac{E_2}{1 + k_{def}} = 8750 \text{ MPa}$$

$$K_{ser,final} = \frac{K_{ser}}{1 + k_{def,connexion}} = 4615 \text{ connecteur}$$

La valeur du coefficient γ_1 varie :

$$\gamma_1 = \left(1 + \frac{\pi^2 E_{1,fin} A_1 s}{K_{ser,fin} L^2} \right)^{-1} = \left(1 + \frac{\pi^2 \cdot 1033 \cdot (40 \cdot 500) \cdot 100}{\frac{6000}{1,3} \cdot 5000^2} \right)^{-1} = 0,361$$

La rigidité équivalente vaut donc :

$$(EI)_{eff} = E_1 I_1 + \gamma_1 E_1 A_1 a_1^2 + E_2 I_2 + \gamma_2 E_2 A_2 a_2^2 = 1,98 \cdot 10^{12} \text{ N} / \text{mm}^2$$

La flèche maximale à long terme s'élève dès lors à :




$$f_{max} = \frac{5}{384} \cdot \frac{2330 \cdot 5000^4}{2,15 \cdot 10^{12}} = 9,6 \text{ mm} \leq 33 \text{ à } 100 \text{ mm} \Rightarrow \text{critère OK}$$

Remarque : le coefficient k_{def} est un facteur qui permet d'évaluer la déformation de fluage et qui tient compte de la classe de service adéquate (voir Eurocode 5-1-1, § 2.3.2.2 et tableau 3.2). Pour le bois massif et le bois lamellé-collé, la valeur du coefficient k_{def} est égale à 0,6 en classe de service 1 (intérieur).






B R U X E L L E S

Siège social



 Rue du Lombard 42
B-1000 Bruxelles
e-mail : info@bbri.be
Direction générale
 02/502 66 90
 02/502 81 80

Z A V E N T E M

Bureaux

 Lozenberg n° 7
B-1932 Sint-Stevens-Woluwe
(Zaventem)
 02/716 42 11
 02/725 32 12

Avis techniques - Interface et Consultance
Communication
Gestion - Qualité - Techniques de l'information
Développement - Valorisation
Agréments techniques
Normalisation

Publications
 02/529 81 00
 02/529 81 10

L I M E L E T T E

Station expérimentale

 Avenue Pierre Holoffe 21
B-1342 Limelette
 02/655 77 11
 02/653 07 29

Recherche et Innovation
Laboratoires
Formation
Documentation
Bibliothèque

H E U S D E N - Z O L D E R

Centre de démonstration et d'information

 Marktplein 7 bus 1
B-3550 Heusden-Zolder
 011/22 50 65
 02/725 32 12

Centre de compétence TIC pour les
professionnels de la construction (ViBo)