

Les planchers mixtes bois-béton : Etat de l'art, méthodologie et outil de calcul, domaines d'application

Ing C. Vanderroost
Ing Y. Gobert
ECAM Bruxelles

Cet article traite de l'étude des planchers mixtes constitués de bois et de béton trouvant leur place dans le domaine de la construction. Le sujet a été traité en collaboration avec le bureau d'étude « Ney & Partners WOW ». S'agissant d'une technologie peu utilisée à l'heure actuelle, le travail a pour but de déterminer les différents systèmes de plancher existants, d'en établir le schéma de dimensionnement et d'en trouver un domaine d'application intéressant.

Mots-clefs : Plancher mixte, Bois, Béton, Etat de l'art, Dimensionnement, Application

This article deals with the study of timber-concrete composite floor systems which are used in construction. The subject has been covered in collaboration with the structural engineering office « Ney & Partners WOW ». Given that this system remains less known and less used than the common ones, the purpose of this work consists of highlighting the existing floor systems, defining a design method and finding interesting applications of the system.

Keywords : Composite floor system, Timber, Wood, Concrete, State of the art, Application, Design

Symboles

a_1 : distance du centre de gravité du béton à l'axe neutre de la section
 a_2 : distance du centre de gravité du bois à l'axe neutre de la section
 A_1 : aire de la section de béton
 A_2 : aire de la section de bois
 b_1 : largeur de la section de béton
 b_2 : largeur de la section de bois
 e : entraxe entre les solives
 E_1 : module d'élasticité du béton
 E_2 : module d'élasticité du bois
 $(EI)_{ef}$: rigidité effective de la section composite
 $F_{v,rk}$: résistance caractéristique au cisaillement du connecteur
 h_1 : hauteur de la section de béton
 h_2 : hauteur de la section de bois
 I_1 : inertie de la section de béton
 I_2 : inertie de la section de bois
 k : rigidité de la connexion ($k=K/s$)
 K : module de glissement du connecteur
 K_{ser} : module de glissement du connecteur à l'ELS
 K_u : module de glissement du connecteur à l'ELU
 L : portée de la poutre
 M_{Ed} : moment sollicitant en valeur de calcul (ELU)
 s : espacement entre les connecteurs
 V_{Ed} : effort de cisaillement sollicitant en valeur de calcul (ELU)
 γ : coefficient de glissement de la connexion
 σ_i : contrainte normale dans l'élément i due à l'effort normal créé par la liaison de la section composite
 $\sigma_{m,i}$: contrainte normale dans l'élément i due au moment sollicitant
 τ_2 : contraintes tangentielles dans l'élément bois

Abréviations

ELS : Etats limites de service
 ELU : Etats limites ultimes
 CLT : Cross laminated timber (bois lamellé croisé)

1. Introduction

Depuis quelques années, l'utilisation des systèmes composites faisant travailler conjointement le bois et le béton au niveau des planchers et des tabliers de pont se répand de plus en plus de par le monde. Les deux matériaux ont des caractéristiques différentes et peuvent dès lors devenir complémentaires.

En effet, si les deux matériaux sont bien liaisonnés, ils forment une section composite unique. Etant donné que le plancher reçoit des charges descendantes verticales, il est sollicité en flexion. Dès lors, le béton se trouvant au-dessus du bois travaille principalement en compression tandis que le bois travaille principalement en traction (figure 1b). Cette application fait donc travailler les matériaux en sollicitant leur aptitude préférentielle propre.

La section composite se retrouve avec une rigidité accrue par rapport à un plancher uniquement en bois de même épaisseur et permet donc de reprendre plus de charge ou d'augmenter la portée. Par ailleurs, le plancher mixte se retrouve avec un poids moindre par rapport à un plancher de même performance uniquement en béton, car il permet d'éviter la présence du béton en traction qui constitue un poids mort.

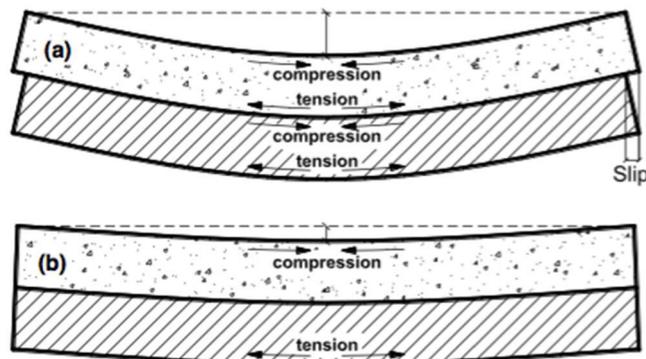


Figure 1 : Poutre bi-appuyée sous chargement

1a- Action composite nulle

1b- Action composite complète [1]

En dehors de leurs caractéristiques mécaniques, ces deux matériaux peuvent être complémentaires sur d'autres aspects. Le béton peut pallier les performances limitées du bois dans les domaines acoustique, vibratoire et d'inertie thermique. Le bois quant à lui est un matériau qui permet une construction plus durable.

De nombreux produits et services adaptés à cette technologie ont vu le jour, cependant elle n'est pas encore couramment exploitée et cela pour plusieurs raisons. Contrairement aux planchers composites en acier-béton, il n'existe pas d'Eurocode spécifique à la vérification de ces structures. De plus, le domaine d'application prouvant le réel bénéfice des planchers composites en bois et béton n'est pas encore défini, de sorte que ceux-ci sont laissés pour compte à côté des planchers classiquement utilisés dans la construction.

Ce travail a pour but de recenser les différentes technologies existantes, de proposer un schéma de dimensionnement regroupant les vérifications adéquates à ce type de plancher et d'en définir le domaine d'application propre.

2. Les planchers mixtes en pratique

Le principe de construction consiste en une dalle de béton, d'épaisseur allant de 5 à 12 cm, qui est liée à un plancher constitué de solives en bois recouvert ou non d'un panneau (OSB, panneau de particules, contreplaqué) faisant office de coffrage perdu, ou, moins fréquemment, à un plancher plein (figure 2). Le plancher peut être en bois massif, lamellé-collé ou en CLT.



Figure 2 : Plancher mixte connecté par des connecteurs vis [2]

Les étapes de mise en œuvre seront relativement identiques quel que soit le connecteur métallique considéré, elle consiste en [3] :

- La mise en place des poutres.
- La pose des coffrages sur les poutres.
- La pose d'une couche intercalaire sur le coffrage (pour éviter que le bois n'absorbe trop d'humidité émise lors de la prise du béton). Cette couche est un film en polypropylène imperméable au passage de l'eau mais perméable à la vapeur. D'épaisseur négligeable, elle n'affecte pas les performances du plancher mixte et reste incorporée à celui-ci durant sa durée de vie.
- La pose des connecteurs.
- La pose des armatures de la dalle en béton.
- La pose d'étais (selon le besoin mais plus généralement à 1/3 tiers et 2/3 de la portée).
- Le bétonnage de la dalle. Le connecteur fait prise dans celle-ci.
- Le retrait des étais.

Seule l'étape de la pose des connecteurs va différer en fonction de leurs types.

En rénovation, on ajoutera le contrôle des poutres et des appuis existants et le retrait du revêtement de sol existant jusqu'à la couche de planches pouvant être utilisée comme coffrage. [3]

Différents types de connecteurs métalliques existent sur le marché. On retrouve des vis, des connecteurs tubulaires, des tirefonds, des plaques métalliques, des connecteurs plus spécifiques tels qu'un goujon associé à des vis par l'intermédiaire d'une plaque de base, etc (figure 3).



*Figure 3 : Différents types de connecteurs.
Haut : Vis [4]. Bas (de gauche à droite) : Connecteurs tubulaires [5],
Tirefonds [6], Plaque métallique [7], Goujon et vis [8]*

3. Méthodologie de calcul

3.1. Principe Général

Cela a été évoqué précédemment, si les deux matériaux sont bien liaisonnés, ils forment une section composite unique, et le béton se trouvant au-dessus du bois travaille principalement en compression tandis que le bois travaille principalement en traction. Au contraire, si la liaison n'est pas effective, le transfert d'effort rasant qui assure une action mixte en flexion est nul, et les deux matériaux fonctionnent indépendamment. La figure 1 montre deux situations opposées à l'extrême avec, au-dessus (1a) une action composite nulle sans connexion entre les matériaux et en-dessous (1b) une action composite complète avec connexion. [1]

La rigidité flexionnelle de la figure 1a) est la somme des rigidités de chaque élément. Celle de la figure 1b) sera plus haute que la première, et donc la flèche de l'élément composite sera beaucoup moins élevée. [9] Ainsi pour une section en bois-béton, qui comporte des connecteurs et qui appartient donc à une situation intermédiaire, la distribution des contraintes se fait comme sur la figure 4b).

Sur le profil des déformations sans connecteurs de la figure 1a), la présence d'un glissement entre les deux matériaux est également visible. Etant donné qu'une connexion parfaite n'existe pas, pour une situation intermédiaire ($0 < \gamma < 1$), un glissement sera créé par la déformation du système de connexion. La conception des structures mixtes bois-béton doit prendre en considération cette déformation.

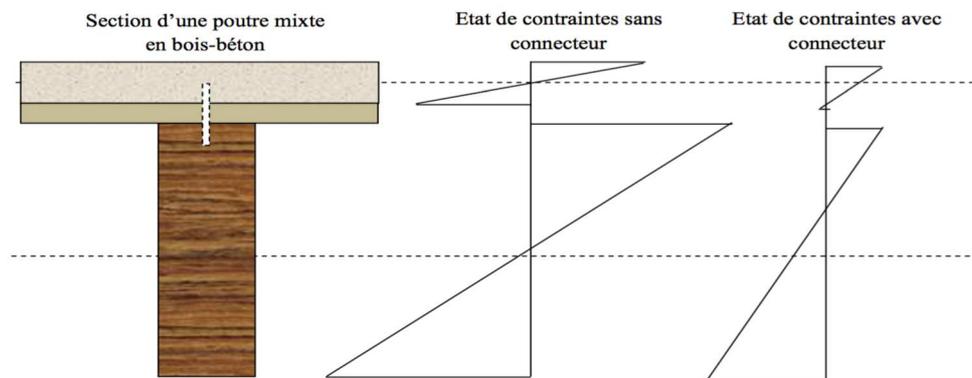


Figure 4 : Distribution des contraintes dans la section mixte a) sans connecteurs b) avec connecteurs [9]

Les connexions étant sollicitées par un effort de cisaillement, les déformations d'un système de connexion et donc les performances d'un connecteur, vont être évaluées par un essai de cisaillement.[1] Cet essai va permettre de déterminer deux paramètres caractérisant les performances du connecteur : sa résistance au cisaillement $F_{v,rk}$ [N] et son module de glissement K [N/mm].

La rigidité d'un système de connexion est donnée par son module de glissement K [N/mm] (K_{ser} à l'ELS et K_u à l'ELU). Le module de glissement est le coefficient de proportionnalité entre la charge appliquée au connecteur et le glissement.

$$K = \frac{\text{charge [N]}}{\text{glissement[mm]}}$$

Ce module de glissement K va, entre autre, différencier les performances d'un connecteur par rapport à un autre car il influence le niveau de l'action composite et donc la valeur de γ . Le paramètre γ est appelé le coefficient de glissement.

La valeur du module de glissement est donc propre à chaque connecteur et est évaluée par un essai de cisaillement. Cet essai permet aussi de connaître la résistance au cisaillement $F_{v,rk}$ [N] du connecteur qui correspond à la charge de rupture du connecteur.

3.2. La méthode γ

Origine de la méthode

La méthode gamma est décrite dans l'annexe B de l'Eurocode 5 [10]. Elle a pour but de calculer les caractéristiques mécaniques d'une section composite jointe mécaniquement. Elle est donc adaptée à des connecteurs mécaniques.

La liaison mécanique, qui se déforme et qui est soumise à du cisaillement, a une influence sur les contraintes et les déformations de la section (figure 5). La relation est posée entre la rigidité k [N/mm²] de la connexion, le déplacement relatif u [mm] des sections au droit des assemblages et l'effort rasant par unité de longueur v [N/mm]. Avec $k=K/s$ où s représente l'espacement entre les connecteurs. [11]

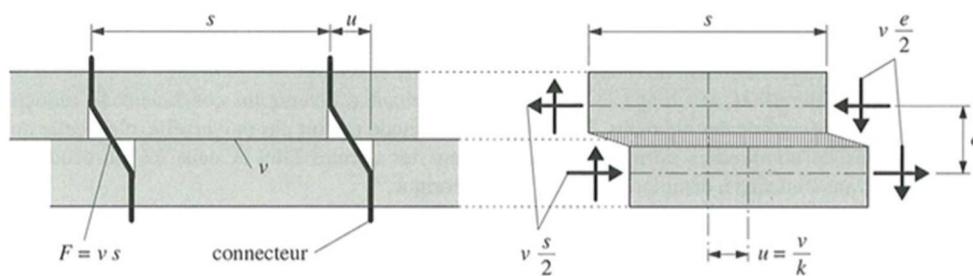


Figure 5 : Déplacement u et effort de cisaillement v entre les éléments [11]

Ensuite, l'équilibre d'une poutre connectée reprenant un chargement sinusoïdal est fait en étudiant l'équilibre d'un petit tronçon dx sur lequel agissent tous les efforts (figure 6). Les solutions de la méthode gamma résultent de l'intégration des équations différentielles relatives à l'équilibre de la poutre. Ces solutions permettent de calculer la rigidité flexionnelle de la section composite et de calculer les efforts qui agissent sur chacun des éléments. [11]

Validité de la méthode

C'est une méthode linéaire. Elle suppose que les matériaux bois, béton et acier aient un comportement linéaire jusqu'à la rupture. Pour des structures portant des charges de faible intensité, faire l'hypothèse que tous les matériaux ont des comportements linéaires élastiques jusqu'à la rupture, et donc employer des méthodes linéaires élastiques telle que la méthode γ , va donner des résultats concluants. [1] [12]

En effet les résultats expérimentaux, provenant d'essais, concordent avec les résultats théoriques évalués via la méthode γ basée sur un modèle élastique

linéaire. Ceci est dû au fait que le système composite est souvent conçu pour que la rupture de la section se fasse avant que le béton ou les connecteurs n'atteignent la plasticité. La rupture apparaît alors dans le bois sous flexion et traction combinées. Or le bois possède un comportement linéaire élastique en flexion et en traction.

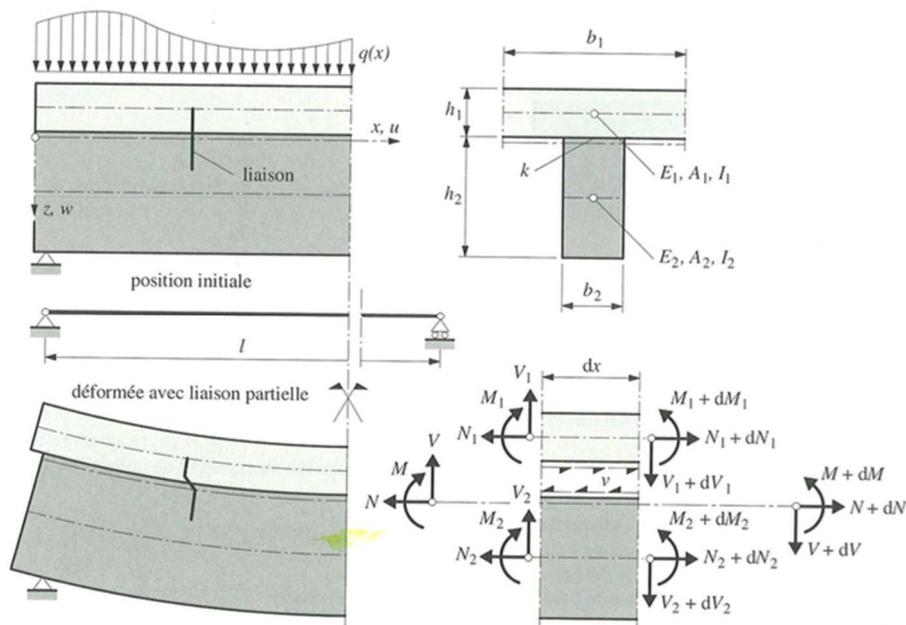


Figure 6 : Haut : Coupe et section d'une poutre connectée par une liaison mécanique et chargée d'une charge sinusoïdale¹ $q(x)$.

Bas : Equilibre d'un élément de longueur infinitésimal dx appartenant à une poutre composite. [11]

Il a cependant été observé sur certains essais que, suivant la configuration de la poutre et suivant le comportement des connecteurs, la poutre composite pouvait montrer un comportement plastique causé par le fait que les connecteurs les plus sollicités² aient plastifié. Ce phénomène n'entraînait cependant jamais la rupture de la poutre.

C'est sur des poutres en bois de classe de résistance élevée que ce phénomène a été observé. En effet si on utilise un bois de classe de résistance plus élevée, les efforts

¹ Le coefficient de glissement γ n'est constant que pour des charges réparties et sinusoïdales. Cette approximation constitue une des limites de la méthode. Elle est cependant acceptée car elle oriente le calcul vers la sécurité.

² Les connecteurs les plus sollicités se trouvent sur les extrémités de la poutre là où l'effort tranchant est maximal.

repris par les connecteurs avant d'atteindre la ruine sont plus importants, ce qui peut potentiellement conduire à une plastification des connecteurs. Ceci n'est pas observé pour du bois de moindre résistance car la ruine y apparaît pour des charges plus faibles n'entraînant pas la plastification de ceux-ci. [12]

Le modèle linéaire est valable pour des planchers ou des dalles de toit car ceux-ci portent des charges de faible intensité qui sont réparties sur leur surface. [1] Il sera néanmoins moins représentatif de la réalité si le bois utilisé appartient à une classe de résistance très haute. [12]

Résultat de la méthode : rigidité flexionnelle effective et contraintes dans les éléments

L'indice 1 représente l'élément en béton et l'indice 2 représente l'élément en bois.

Pour prendre en compte l'action composite, la méthode gamma consiste en l'utilisation d'une rigidité flexionnelle effective $(EI)_{ef}$ qui est fonction du coefficient de glissement γ (correspond au degré de l'action composite), compris entre 0 et 1, lui-même fonction de la rigidité du connecteur K . Si bien que $\gamma=0$ correspond à une action composite nulle et $\gamma=1$ correspond à une action composite complète.

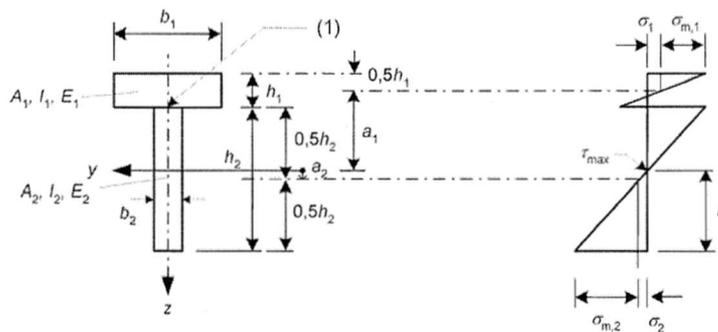


Figure 7 : Définition des éléments de la section, de leur dimension et des contraintes s'y rapportant [10].³

La rigidité flexionnelle effective de la section composite est évaluée telle que:

$$(EI)_{ef} = \sum_{i=1}^2 (E_i I_i + \gamma_i E_i A_i a_i^2)$$

³ Veuillez noter que l'axe neutre y ne passe pas par le centre de la solive. En effet, le terme a_2 n'est pas nul mais minimisé sur ce schéma pour mettre en évidence que les proportions d'une section mixte auront tendance à induire que l'axe neutre de la section mixte sera très proche de celui de la solive

L'élément en bois est considéré comme la référence par rapport à laquelle est calculé le glissement si bien que γ_2 est toujours égal à 1. Le paramètre γ_1 , relatif au béton, est calculé comme suit :

$$\gamma_1 = \left[1 + \frac{\pi^2 E_1 A_1 s}{K_1 L^2} \right]^{-1}$$

Le paramètre s [mm] étant l'espace entre les connecteurs le long de la solive de bois.

Enfin, la méthode permet de calculer directement les contraintes et efforts dans les éléments.

Les contraintes normales dans le bois et le béton :

$$\sigma_i = \frac{\gamma_i E_i a_i M_{Ed}}{(EI)_{ef}}$$

$$\sigma_{m,i} = \frac{0,5 E_i h_i M_{Ed}}{(EI)_{ef}}$$

La contrainte tangentielle dans la membrure en bois :

$$\tau_{2,max} = \frac{0,5 E_2 h_2^2}{(EI)_{ef}} V_{Ed}$$

L'effort de cisaillement agissant sur un connecteur:

$$F = \frac{\gamma_1 E_1 A_1 a_1 s}{(EI)_{ef}} V_{Ed} [N]$$

NB : Les formules exposées proviennent de l'annexe B de l'Eurocode 5 [10].

4. Dimensionnement de la section composite

Le dimensionnement doit se faire pour plusieurs cas de figures :

- Une phase provisoire et une phase définitive
- Une situation à court terme et à long terme

Le béton, pendant sa prise, constitue un poids mort, que le bois et le panneau de coffrage s'il y en a un, doivent pouvoir reprendre. Il faut également prendre en compte le poids des hommes qui travaillent. Cela constitue la phase provisoire dont le schéma statique ne sera pas forcément similaire à celui de la phase définitive si des étais sont présents pendant cette phase. Les étais vont permettre de diminuer la flèche des solives en bois lors du bétonnage.

La phase définitive comprend la résistance de la pleine section qui doit reprendre toutes les charges permanentes et les charges variables.

Les vérifications devront également se faire sur le court terme et le long terme. Les vérifications à long terme ont pour but de prendre en compte les comportements des matériaux qui évoluent avec le temps (retrait, fluage).

Généralement le béton est liaisonné au bois alors qu'il est encore frais. Or la plus grande partie du retrait se produit pendant sa prise. Des contraintes se manifestent à cause de la différence de retrait entre les deux matériaux. En effet, le bois, lui, ne subit pas de retrait⁴. La déformation du béton n'étant pas libre, cela crée des contraintes supplémentaires dans la structure mixte.

Le fluage, quant à lui, est un phénomène que connaissent le bois, le béton et les connecteurs mécaniques quand ils sont soumis à des charges de longue durée. Le fluage induit une diminution des performances qu'on traduit par une réduction du module d'élasticité pour le bois et le béton, et par une réduction du module de glissement pour les connecteurs. De ces diminutions va apparaître un réarrangement de la section composite (nouvelle valeur de γ , nouveau centre de gravité de la section,..). Ce nouvel état de la section doit donc lui aussi être vérifié.

Les figures 8 et 9 reprennent les différentes vérifications à effectuer pour dimensionner la section.

⁴ Le bois a un coefficient spécifique de gonflement et de retrait très faible dans le sens longitudinal et ce sens est également le sens porteur du plancher mixte.

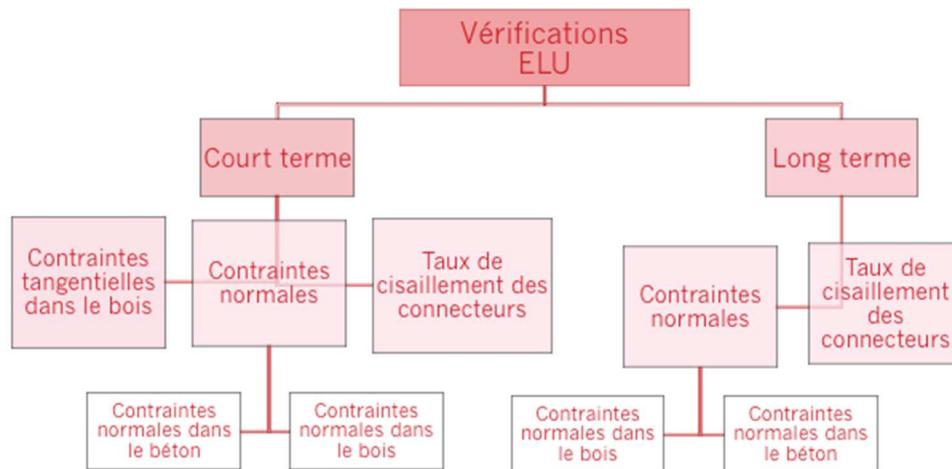


Figure 8 : Schéma de dimensionnement aux ELU

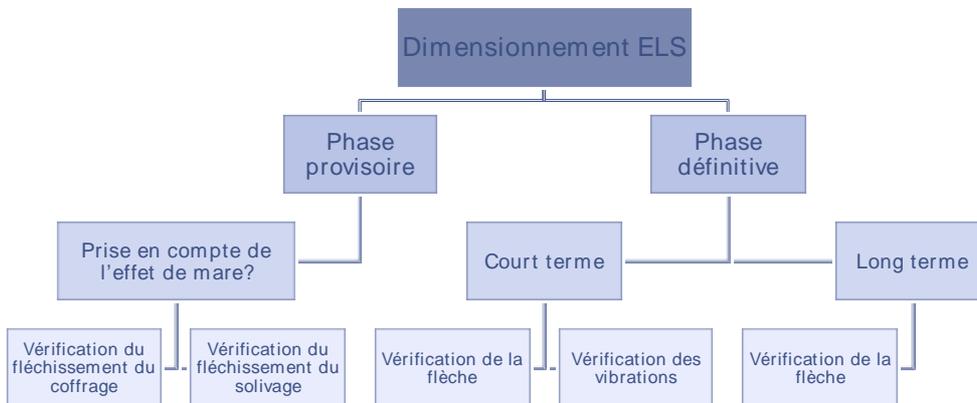


Figure 9 : Schéma de dimensionnement aux ELS

5. Influence des paramètres sur la rigidité flexionnelle effective (EI_{ef})

L'étude consiste à déterminer quels paramètres ont le plus d'impact sur la valeur de la rigidité flexionnelle de la section composite. En effet, celle-ci intervient dans toutes les vérifications à l'ELS et à l'ELU, où sa valeur a lieu d'être maximisée. Cette étude se concentre sur deux connecteurs relativement différents : les vis de la marque SFS et les plaques métalliques de la marque HBV.

Il a été choisi de travailler avec les vis SFS (figure 3 haut) car le produit est bien implanté sur le marché. Le connecteur plaque métallique HBV (figure 3 bas) quant à lui a été choisi car il se démarque des autres connecteurs par son mode de pose et par son caractère surfacique. Mais aussi parce que c'est le connecteur qui possède le plus haut module de rigidité K.

L'influence des paramètres sur la variation de $(EI)_{ef}$ d'une section connectée avec les vis SFS est d'abord analysée (figure 10).

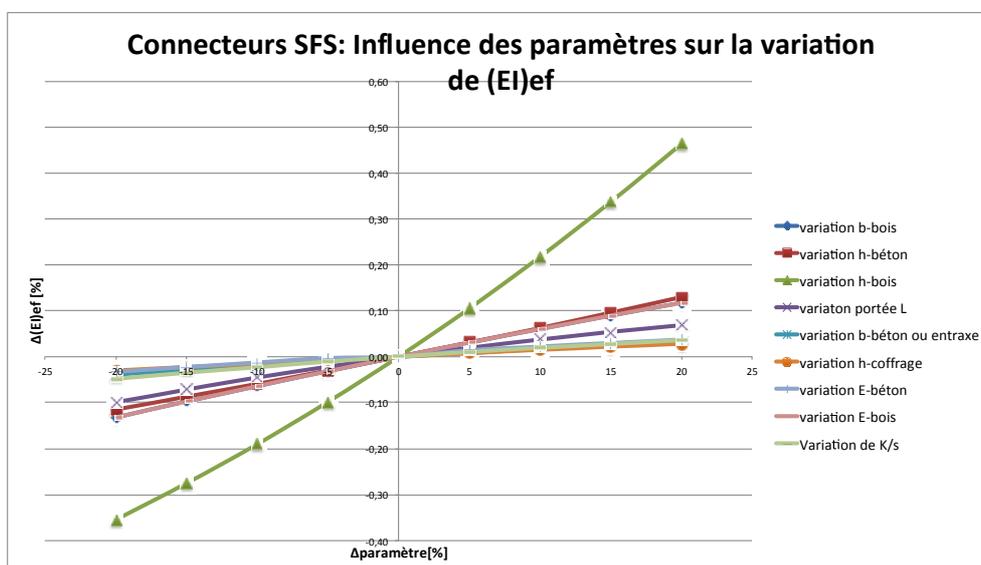


Figure 10 : Influence des paramètres sur la variation de $(EI)_{ef}$ d'une section connectée avec les connecteurs vis SFS. Résultats obtenus sur base de la méthode γ .

Le paramètre le plus influent est la hauteur de la solive en bois. En effet, la hauteur de bois joue un grand rôle dans l'inertie de la section composite. De même que l'épaisseur de béton qui montre une influence plus faible mais qui reste malgré tout un des paramètres les plus influents.

Les paramètres suivants qui influencent le plus la rigidité de la section sont : la largeur de la solive et le type de bois utilisé. De nouveau ce sont les éléments de bois qui prennent le pas sur le béton. Cela est dû au fait que la partie de bois qui travaille est beaucoup plus présente sur la hauteur de la section.

L'entraxe, et donc la largeur de béton, et la portée de la poutre ne jouent pas un rôle prépondérant.

En dernier lieu, on retrouve les paramètres de l'épaisseur de coffrage, de rigidité de la connexion et de type de béton. La rigidité de la connexion $k=K/s$ [N/mm²] (avec pour rappel K : le module de glissement et s : l'espacement entre les connecteurs) se trouve donc dans le bas du classement.

L'augmentation de l'épaisseur de coffrage a un impact néfaste sur la rigidité de la connexion car il réduit la longueur de connecteur se trouvant dans la solive en bois et donc le transfert de l'effort tranchant.

Si la même étude est effectuée avec le connecteur plaque métallique HBV cette fois, les mêmes constatations sont observées. A une différence près qu'il est constaté que la rigidité de la connexion ($k=K/s$) a encore moins d'impact sur la valeur de $(EI)_{ef}$ comme illustré à la figure 11.

Avec l'augmentation de k et donc du niveau d'action composite, la rigidité flexionnelle $(EI)_{ef}$ de la section mixte augmente également. Il a toutefois été démontré via des expérimentations que la rigidité flexionnelle $(EI)_{ef}$ atteint un seuil maximal même si k continue d'augmenter. [1]

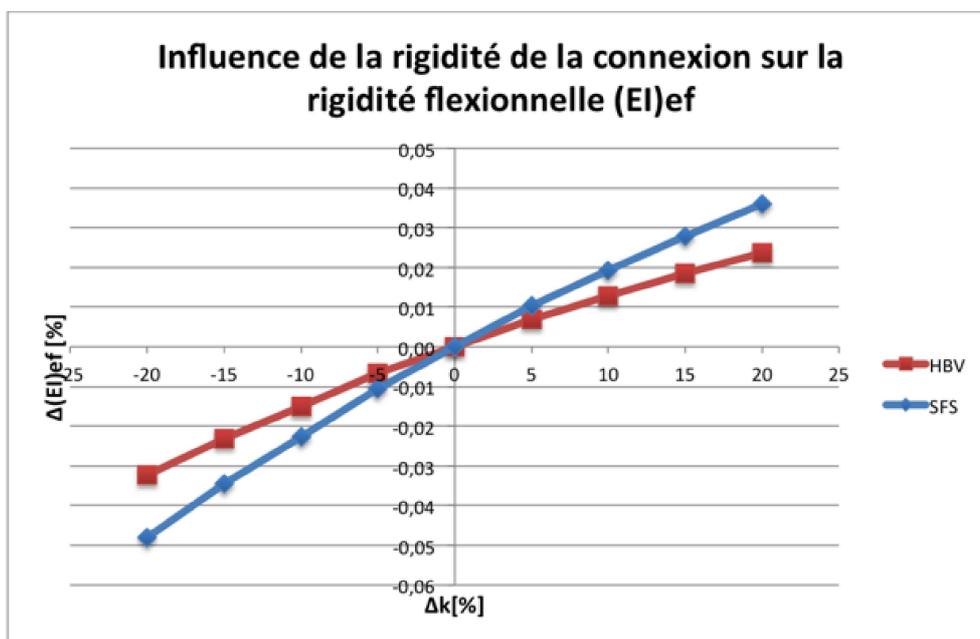


Figure 11 : Comparaison entre l'évolution de l'influence de la rigidité de la connexion SFS face à la rigidité de la connexion HBV

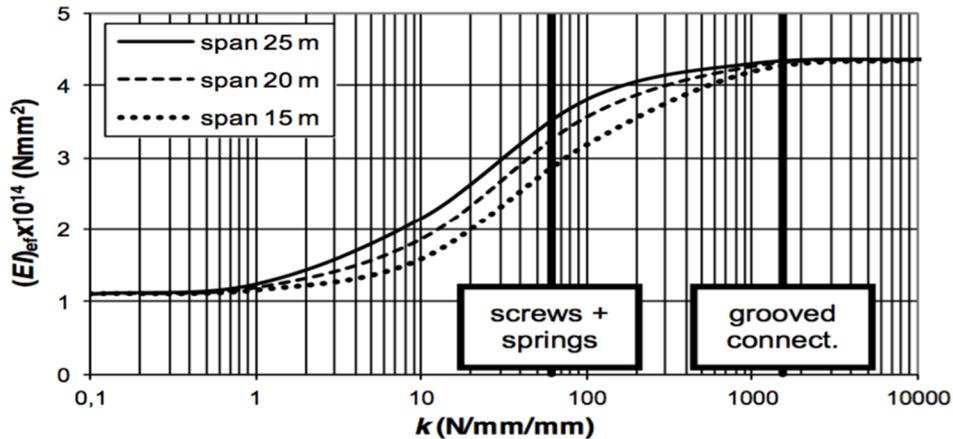


Figure 12 : Relation entre la rigidité flexionnelle de la section mixte et la rigidité de la connexion $k=K/s$ (N/mm^2) [1]

Plus la rigidité de la connexion k est élevée, plus cette valeur se trouve sur une partie de la courbe qui croît moins vite. Ce qui veut dire que la rigidité de connexion la plus faible utilisée dans cette étude paramétrique (relative au connecteur vis), assure déjà une action composite suffisante.

Attention de ne pas confondre le fait d'assurer une action composite (relatif à K) et le fait de reprendre un effort de cisaillement (relatif à $F_{v,rk}$). La quantité de connecteurs assurant l'action composite, ne sera pas forcément égale à la quantité de connecteurs nécessaire pour reprendre le cisaillement à l'interface des deux matériaux.

En pratique, c'est d'ailleurs la reprise du cisaillement qui conditionne l'espacement à prévoir entre les connecteurs et donc le nombre de connecteurs à placer sur la solive en bois. Il peut dès lors être conclu que, (sans prendre en compte les aspects pratiques de mise en œuvre) le choix d'un connecteur pourrait se faire d'abord sur sa capacité à reprendre le cisaillement et donc sur sa résistance $F_{v,rk}$, et puis sur la valeur de son module de rigidité K , de façon à diminuer le nombre de connecteurs à placer.

On peut également conclure que pour optimiser l'utilisation des matériaux associés, c'est-à-dire faire en sorte que la ruine y soit le plus possible simultanée, il est préférable de privilégier une classe de résistance élevée dans le choix du bois, là où une classe de résistance faible est suffisante pour le béton.

6. Performances du plancher mixte

Les portées atteignables par le système mixte bois-béton sont de l'ordre de 9-11 m pour des utilisations de bâtiments de type habitation et bureau. Lorsque les charges d'exploitation augmentent, comme pour des commerces ou des bâtiments industriels, les portées sont limitées à 8-9 m. L'utilisation du plancher mixte ne se fait pas en-dessous de 5 m. En pratique le bois massif est utilisé pour des portées allant de 5 à 7 m. Au-delà, du lamellé-collé est utilisé.

Les hauteurs du complexe d'un plancher mixte sont de l'ordre de 25 à 45 cm. La densité de connecteurs sera spécifique au projet et au type de connecteurs utilisés.

Au niveau des performances vibratoires, le plancher mixte montre des performances bien meilleures que les planchers en bois. La raison en est que le plancher mixte travaille comme une structure quasi-isotrope et a donc une bonne rigidité dans le sens transversal et longitudinal. Il a également une fréquence de résonance et une masse accrues, ce qui améliore son caractère vibratoire. Atteindre les performances requises en matière de vibration ne constitue donc pas un enjeu pour le plancher mixte. [9]

Pour ce qui concerne ses performances acoustiques, La couche de béton améliore assez bien l'isolation aux bruits aériens de la paroi et va permettre d'atteindre les performances les moins exigeantes des normes : les performances au sein d'une habitation et certaines performances dans les bureaux. Selon son épaisseur, la couche de béton va permettre d'augmenter l'isolation aux bruits aériens de 17 à 29 dB. Le niveau de bruit de choc est également amélioré, mais pas de manière significative. L'amélioration que permet la couche de béton se situe entre 4 et 7 dB. Cette amélioration ne permet pas d'atteindre les performances même les plus faibles des normes.

Lorsqu'on analyse le comportement du plancher mixte au feu, il faudra considérer que, dans tous les cas, le feu attaque le plancher par le bas. En effet, c'est cette situation qui est la plus critique, car ce sont les solives qui sont attaquées en premier. [9]

Au niveau de la résistance au feu, on peut considérer que la couche de béton, selon son épaisseur, sera suffisante pour satisfaire les exigences EI du plancher. Cette couche constitue dans tous les cas une bonne fonction de compartimentage. Le plancher mixte atteindra facilement EI30 à EI60.

Le critère R, par contre, nécessite d'être plus profondément évalué selon chaque cas.

Deux options sont envisageables :

- Considérer le plancher comme déconnecté. Seules les solives résistent aux charges accidentelles pour la durée fixée.
- Considérer que le plancher est connecté mais par des connecteurs qui montrent des performances diminuées. Tout le plancher résiste aux charges accidentelles. Cette deuxième option nécessite de travailler avec des sections larges.

On peut finalement considérer que les résistances REI30 et REI60 sont facilement atteignables par le plancher mixte. La résistance REI90 sera plus difficile à atteindre. [9]

7. Domaine d'application

Il apparaît comme une évidence que la technique du plancher mixte trouve sa meilleure place dans la rénovation des planchers en bois, quand un plancher existant montre des faiblesses ou que le changement d'usage du bâtiment nécessite un renforcement de celui-ci.

- Cette technique permet une intervention rapide puisque la surface de travail est déjà construite.
- Elle permet aussi de ne pas amener un trop grand poids sur les fondations qui devront supporter la surcharge.
- La surépaisseur amenée par la dalle de béton n'est pas pénalisante puisque les anciennes constructions sont réalisées avec de grandes hauteurs sous plafond.
- Le coût de l'intervention est raisonnable.

La place du plancher mixte en construction neuve reste plus floue.

Il est clair que le choix du plancher mixte ne se fera qu'à partir de portées de l'ordre de 5 m. En-dessous, les planchers moins chers ou plus légers feront l'affaire. Pour cela, il rencontre un usage certain dans le secteur tertiaire pour la construction d'écoles, de bureaux et de commerces.

Ses aptitudes acoustiques et au feu dans son état brut lui vouent également un usage des plus intéressants en habitation, si toutefois la portée dépasse 5 m, ce qui est moins courant.

Il apparaît que le plancher mixte est une bonne alternative aux panneaux CLT en construction légère et pour de grandes portées grâce à son coût plus intéressant.

Le plancher mixte trouve particulièrement sa place en construction neuve légère en zone sismique. Le plancher a toujours un poids raisonnable. De plus, un effet diaphragme est apporté par la dalle en béton moyennant des dispositions spécifiques (chaînage, ferrailage, etc.). Il sera également intéressant lorsqu'une exigence vibratoire est demandée.

Les fabricants de planchers mixtes ont été contactés pour évaluer le coût de mise en œuvre de cette technique. Il s'est avéré que son coût pouvait s'estimer en moyenne à 120€/m² en construction neuve et à 60€/m² en rénovation.

Les fabricants maintiennent que si auparavant leurs techniques étaient principalement utilisées en rénovation, la tendance pousse de plus en plus celle-ci en construction neuve. Cela prouve que ceux-ci ont leur place sur le marché.

8. Conclusion

Ce travail visait à approfondir le sujet concernant les planchers mixtes en bois et béton. Etant donné que cette technologie n'est pas encore couramment utilisée, des questions subsistaient quant à la manière de dimensionner ces planchers et quant à leur valeur ajoutée.

Le travail a commencé par un tour d'horizon des différents produits de connexion présents sur le marché. Il a permis de constater l'essor de cette technique à travers les nombreux produits proposés.

La recherche d'une méthode de calcul a été entreprise et a permis de définir la méthode gamma comme base de dimensionnement. La méthode gamma est une méthode qui considère que tous les matériaux ont un comportement linéaire jusqu'à la rupture. Elle permet de trouver les efforts que reprend chacun des matériaux et de trouver la rigidité flexionnelle de la section composite.

Ces résultats ont ensuite permis de proposer un schéma de dimensionnement de la section composite.

Une étude paramétrique permettant de mettre en évidence le comportement de la section a été réalisée. Il en est ressorti plusieurs choses :

- Les paramètres influençant le plus les performances résistance de la section. Parmi ceux-ci, on retrouve : les dimensions de la solive, la classe de résistance du bois et la hauteur de béton.
- La rigidité de la connexion ne fait pas partie des paramètres les plus influents. En effet, une connexion « minimale » permet déjà de faire travailler les matériaux ensemble et d'allouer une bonne rigidité effective à la section mixte.
- Le paramètre crucial dans le choix d'un connecteur est donc sa capacité à reprendre le cisaillement à l'interface du bois et du béton. Celle-ci va conditionner l'espacement à prévoir entre les connecteurs.

L'impact de la dalle de béton sur les performances vibratoires, acoustiques et au feu du plancher en bois a été évalué. Il apparaît que :

- Les performances vibratoires sont fortement améliorées et sont capables de satisfaire un niveau élevé d'exigences des usagers là où un plancher bois montre généralement des difficultés à y parvenir.
- L'isolation aux bruits aériens est fortement améliorée par la dalle. Le niveau de bruits de chocs est cependant faiblement diminué par sa présence.
- La dalle confère au plancher mixte une bonne isolation et une bonne étanchéité au feu. La résistance au feu n'est quant à elle pas améliorée par sa présence. Les performances au feu du plancher sans revêtement particulier peuvent atteindre REI30 et REI60.

Enfin il a été tenté de déterminer si les planchers mixtes ont une place à prendre sur le marché. L'utilisation préférentielle du système mixte en renforcement de planchers existants en bois apparaît comme une évidence.

En construction neuve, le domaine d'utilisation qui s'accorde le mieux à la technique est moins évident à entrevoir. Cela est dû au fait que le plancher montre des performances moyennes dans tous les aspects sans que l'un d'entre eux ne se distingue. Il a tout de même été établi que :

- Le plancher mixte sera utilisé pour des portées supérieures à 5 m. Les portées pouvant être atteinte vont jusqu'à environ 11 m. En pratique, le bois massif est utilisé pour des portées de 5-8 m et le bois lamellé-collé pour des portées de 8-10m.
- L'utilisation du plancher dans le domaine du tertiaire semble donc adéquate.
- L'utilisation des planchers mixtes sera intéressante lorsqu'un poids léger est recherché. Un bâtiment fondé sur un sol de mauvaise portance peut donc bénéficier de cette technique.

- Même s'il est un peu plus lourd qu'un plancher CLT, son coût plus attrayant peut le substituer à cette technique sur les bâtiments en construction légère.

La technique du plancher mixte réservée à la rénovation pendant un temps, tend aujourd'hui à gagner du terrain sur la construction neuve. La construction mixte joignant une dalle en CLT à une dalle en béton commence également à se profiler, des agréments techniques verront donc le jour dans un avenir proche. Les planchers mixtes ont donc une place à prendre au sein des planchers classiquement utilisés dans la construction.

9. Sources

- [1] RODRIGES ET AL. (2013). *Timber-Concrete Composite Bridges: State-of-the-Art Review* [en ligne]. BioResources. Disponible sur : <https://ojs.cnr.ncsu.edu/index.php/BioRes/article/view/BioRes_08_4_663_0_Review_Rodrigues_Timber_Concrete_Composite_Bridge/2443>. (Consulté en Janvier 2017)
- [2] Société SFS intec. *Système mixte bois-béton VB* [en ligne]. (Mise à jour le 20 mai 2014). Disponible sur : <http://www.sfsintec.biz/mo/fr/fr/web/industrial_solutions/batiment_1/construction_bois/syst_me_mixte_bois_b_teon_vb_1/systeme_mixte_bois_beton_vb_1.htm>. (Consulté en Décembre 2016)
- [3] SFS intec. (8 avril 2011). *Système mixte bois-béton VB : Document technique* [en ligne]. SFS intec. Disponible sur : <https://sfs.biz/sfs_download/media/fr/general_media/downloadcenter/sfs_unimarket_1/befestigungstechnik/konstruktiver_holzbau/vb_technische_dokumentation.pdf> (Consulté en Février 2017)
- [4] SFS intec. (26 mai 2016). *Système mixte bois-béton VB : Une solution simple, économique et sûre pour la construction et la rénovation rationnelles de plancher* [en ligne]. SFS intec. Disponible sur : <https://sfs.biz/sfs_download/media/general_media/downloadcenter/sfs_intec_mo_fr/syst_me_de_fixations_pour_la_construction_bois/vb_1/Brochure_VB_A4.pdf> (Consulté en Janvier 2017)
- [5] CBS-CBT. *Systèmes structurels CBS-CBT* [en ligne]. (Mise à jour le 19 janvier 2015). Disponible sur : <<http://www.cbs-cbt.com/fr/structure/systemes-structurels-4-9-0>> (Consulté en Décembre 2016)

- [6] Bois Béton. *SBB système Bois-Béton [en ligne]*. (Mise à jour le 7 février 2014). Disponible sur:< <http://www.bois-beton.fr>> (Consulté en Décembre 2016)
- [7] BAHMER R. ET HOCK S. *Wood-concrete (HBV) : Comparision of current connectors*. Hailbach : Igngenieurbüro Rainer Bahmer, 2005.
- [8] Société TECNARIA SpA. *Tecnaria : systèmes de connexion pour le renforcement des planchers [en ligne]*. (Mise à jour le 22/09/2016). Disponible sur: < <https://tecnaria.com/fr/>>. (Consulté en Décembre 2016)
- [9] SKOWRON A., MARTIN Y., PARMENTIER B. ET VAN DEN BOSSCHE P. *Comportement physique et mécanique des planchers mixtes en bois-béton*. Rapport n°13. CSTC, 2010,41 p.
- [10] European Committee for Standardization. *Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1 : general rules and rules for buildings*. EN 1995-1-1:2004+A1 2008 (E). 2004,121p.
- [11] NATTERER J., SANDOZ J.L. ET REY M. (2014).. *Construction en bois : Matériau, technologie et dimensionnement*, Traité de Génie Civil de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. (Volume 13).Presses polytechniques et universitaires romandes (CH), Lausanne.
- [12] VAN DER LINDEN M. *Timber-concrete composite beams*. Delft University of Technology / TNO Building & Construction Research. HERON. Vol. 44. No.3, 1999. (ISSN0046-7316).