

# Le monitoring de l'extension de l'ESB à Nantes, retour d'expérience

Francesca Lanata  
Ecole Supérieure du Bois - LIMBHA  
Nantes, France



## 1. Le monitoring des bâtiments bois

Au cours des dernières décennies, les structures bois se sont répandues grâce aux importants progrès techniques et aux développements apportés sur les nouveaux matériaux bois-composite, ainsi que sur les règles de calcul du comportement des structures. Le bois est devenu un matériau de construction couramment utilisé, notamment en raison de son coût, de sa facilité d'utilisation, de son design élégant et d'une bonne durabilité s'il est correctement protégé contre l'humidité et les insectes. C'est pourquoi, les architectes l'ont parfois utilisé pour des structures complexes et audacieuses, avec notamment une utilisation mixée à d'autres matériaux de construction (béton...) pour améliorer les performances. En effet, la tendance architecturale favorise aujourd'hui les grands espaces modulables et évolutifs.

L'expansion de ces structures dans le milieu de la construction a entraîné un intérêt prononcé pour l'évaluation de leur comportement et de leurs performances globales. Ainsi, ce concept comprend d'un côté le bâtiment en lui-même (mécanique, thermique, énergétique par exemple), mais aussi le niveau de confort des usagers (vibrations, acoustique, santé entre autres). Les performances doivent être assurées et garanties non uniquement au moment de la conception et de la livraison du bâtiment, mais aussi tout au long de la durée de vie de l'ouvrage.

Comme pour tout matériau, la conception des bâtiments en bois se base sur l'analyse des résultats d'essais en laboratoire, souvent à l'échelle du matériau, des éléments constructifs isolés ou des assemblages, qui se traduisent par l'application de coefficients dans les calculs ( $\gamma_M$ ,  $k_h$ ,  $k_{mod}$ ,  $k_{def}$ ,  $K_{ser}$ ,  $K_u$  les plus significatifs pour le bois). Le suivi du comportement et des performances à travers des mesures in-situ sur quelques bâtiments représentatifs en service reste aujourd'hui la solution la plus pertinente pour faire avancer la connaissance et avoir un retour d'expérience fiable à valoriser pour les projets à venir. L'instrumentation de bâtiments existants ou en construction, comme les prochains bâtiments grande-hauteur, a comme objectif de collecter des données qui puissent permettre d'optimiser l'utilisation du matériau bois dans la construction. Le suivi des performances, périodique ou tout au long de la durée de vie d'un bâtiment, peut ainsi permettre de rassurer les maîtres d'ouvrage et les assureurs et favoriser l'acceptation de l'utilisation du bois dans les immeubles grande hauteur de la part du marché.

## 2. L'extension de l'ESB

### 2.1. Objectifs du monitoring

En 2012, un nouveau bâtiment est venu étendre l'École Supérieure du Bois (ESB), à Nantes. Structure d'environ 1 500 m<sup>2</sup>, de trois étages, elle est principalement construite en bois (ferrures métalliques au niveau des assemblages et planchers collaborant bois-béton). Son squelette, composé de deux poutres treillis porteuses, ainsi que son porte-à-faux de neuf mètres sont les deux principales particularités qui font que cette extension est unique.

Par conséquent, l'ESB a décidé de suivre le comportement de ce bâtiment à court et long terme. La réponse de la structure est mesurée d'un point de vue :

- statique, par le biais de jauges de déformation et de capteurs de température et humidité (32 points de mesure) ;
- dynamique, grâce à des accéléromètres ;
- thermodynamique, grâce à l'équipement de 8 sections de parois avec des capteurs de température/hygrométrie et à la mesure du niveau de confort des usagers dans chaque salle.

Avec une telle quantité de données, l'analyse et l'interprétation des mesures se révèle fondamentale pour la compréhension du comportement globale de la structure. Ce projet s'inscrit dans une démarche globale d'amélioration de la connaissance du comportement en phase d'exploitation et de l'évolution des performances des structures bois dans le temps. L'objectif final est de rendre les systèmes constructifs bois les plus compétitifs et

les plus fiables possibles, selon un procédé d'optimisation des ressources, y compris celles économiques. Le retour d'expérience via le monitoring des structures bois s'avère donc essentiel pour atteindre ces objectifs.

Dans la suite, quelques résultats de l'étude sur le plancher mixte bois/béton et de son comportement dynamique seront présentés. D'autres informations sur l'instrumentation et sur le comportement mécanique du bâtiment sont disponibles in [1, 2].

## 2.2. Géométrie du bâtiment

L'extension de l'ESB, constituée de trois étages, a été réalisée avec deux treillis parallèles en bois lamellé-collé liés entre eux à travers de planchers mixtes bois/béton. Les deux treillis ont la même conception architecturale, mais des sections transversales différentes, car ils supportent chacun des charges différentes. Ils ont une longueur d'environ 45 m sur trois étages (13 m de haut) avec un porte-à-faux d'environ 8 à 9 m (Illustration 1). Par ailleurs, la structure est maintenue au sol seulement par six points de fixation. Une partie du bâtiment est reliée à celui existant par le biais d'un bloc rigide en béton et un sous-sol pour le stationnement, pendant que la seconde partie est plus flexible latéralement et verticalement en raison de l'absence d'un rez-de-chaussée fermé et la présence du porte-à-faux. Une ossature bois avec isolation par l'intérieur est utilisée pour les parois du bâtiment.



Illustration 1 : Représentation 3D de l'extension de l'ESB. Sur la droite le porte-à-faux

Le plancher repose sur les membrures du treillis en bois lamellé-collé (BLC) de section 200x360 d'environ 45m de long et a un porte-à-faux qui forme une coursive d'accès tout au long du bâtiment (Illustration 2). La composition du complexe de plancher est représentée en Illustration 3.

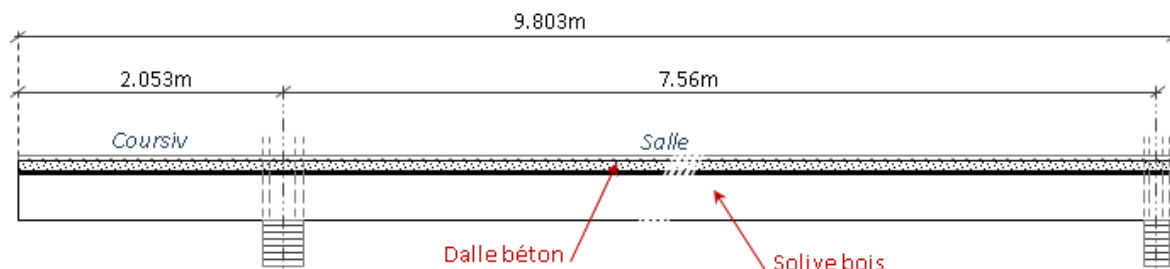


Illustration 2 : Coupe transversale du plancher

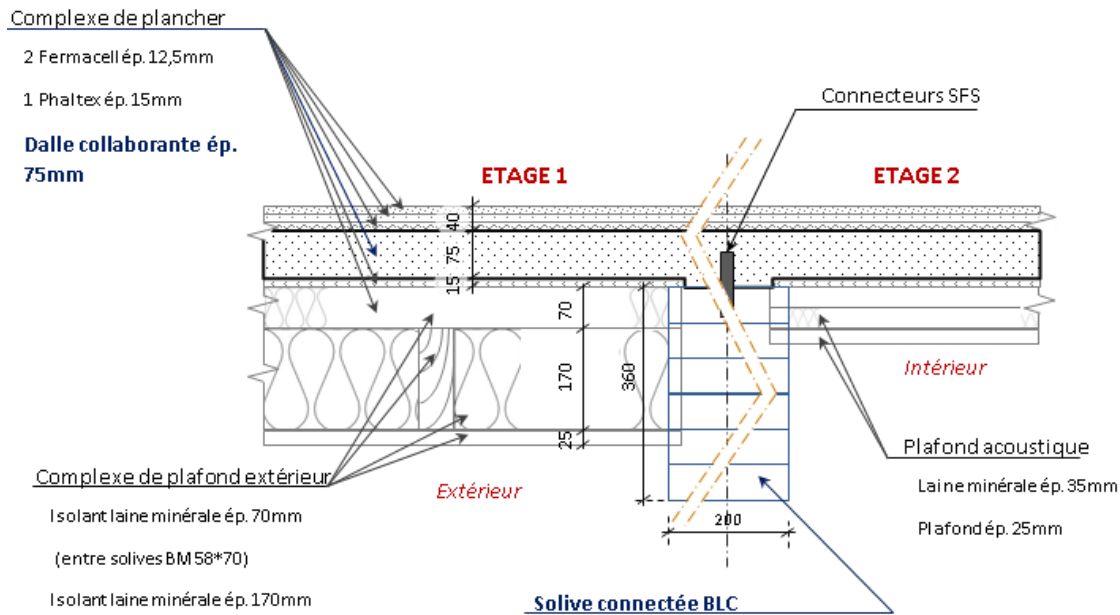


Illustration 3 : Vue en coupe du plancher mixte de l'extension de l'ESB (selon les plans d'Arborescence S.A.R.L.)

### 3. Analyse de la réponse dynamique du plancher mixte

#### 3.1. Critères de dimensionnement

Avec la réintégration du matériau bois sur le marché (grâce aux considérations environnementales) et l'évolution des systèmes constructifs ainsi que pour la tendance architecturale à ouvrir les espaces, les portées des planchers ont significativement augmenté. Aujourd'hui, le développement des matériaux à base de bois, tel que le lamellé-collé ou le lamelle-croisé, permet des réalisations légères dont le comportement dynamique est très différent des planchers traditionnels [3]. En effet, un plancher dit léger est plus sensible aux vibrations, et nécessite une isolation phonique de par sa faible densité, sa petite épaisseur et son amortissement limité.

L'idée de l'action combinée bois/béton est d'augmenter la rigidité et la densité du plancher ainsi que de limiter les difficultés vis-à-vis des vibrations. Cependant, malgré les connaissances actuelles sur le bois et le béton, la combinaison de ces deux matériaux fait l'objet de nombreuses études afin de déterminer le comportement dynamique de planchers mixtes. En effet, la vibration joue un rôle significatif dans les justifications aux ELS concernant le confort des usagers [4].

Afin d'évaluer les performances vibratoires des planchers en bois/béton vis-à-vis des conditions d'utilisation, il faut vérifier soit par le calcul, soit par des essais (in-situ ou en laboratoire), trois critères prescrits par l'Eurocode 5 [4, 5] :

- Fréquence de résonance : supérieure à 8Hz pour des bâtiments résidentiels, aucun critère pour les ERP. L'objectif est d'éviter au maximum que le premier mode du domaine des fréquences vibratoires générées par la marche d'une personne n'approche cette fréquence de résonance. Ceci n'est pas vraiment un critère de dimensionnement : la limite à 8Hz n'est pas imposée mais fortement recommandée pour le confort des usagers.
- Critère statique : la déformée d'un plancher résidentiel sous une charge ponctuelle de 1kN doit être limitée à 1.5mm.
- Critère dynamique : la vitesse vibratoire verticale  $v$  (mm/s) du plancher sous impulsion unitaire de 1Ns 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
- $f_1$  est la fréquence fondamentale du plancher

- $\zeta$  vaut 0.01 pour les planchers en bois

Pour un plancher rectangulaire dont les dimensions globales sont  $L \times b$ , simplement appuyé sur les quatre côtés et dont les solives en bois ont une portée  $L$ , il est possible d'approximer la fréquence fondamentale  $f_1$  selon :

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

Où :

- $m$  est la masse par unité de surface en  $\text{kg/m}^2$  (poids propre et charges permanentes)
- $L$  est la portée du plancher en m
- $(EI)_L$  est la rigidité équivalente en flexion de la plaque du plancher selon un axe perpendiculaire à la direction des solives en  $\text{Nm}^2/\text{m}$ .

La rigidité équivalente se calcule selon la méthode gamma décrite au point B.2 de l'annexe B de l'Eurocode 5-1-1 [4].

### 3.2. Réalisation des mesures

Les essais ont été réalisés au premier et deuxième étage de l'extension de l'ESB dans la partie située au-dessus de la terrasse (Illustration 4). Sur chaque niveau, trois séries de mesures ont été effectuées : entre les appuis, sur les appuis en V et sur le porte-à-faux. Pour chacune des séries, trois accéléromètres sont disposés entre deux solives. Deux sont placés entre les appuis et un sur le porte-à-faux de la coursive (Illustration 5). La fixation est réalisée à l'aide de ruban adhésif double-face. Les mesures ont été faites à vide et avec une personne qui marche ou court (différents parcours ont été testés).

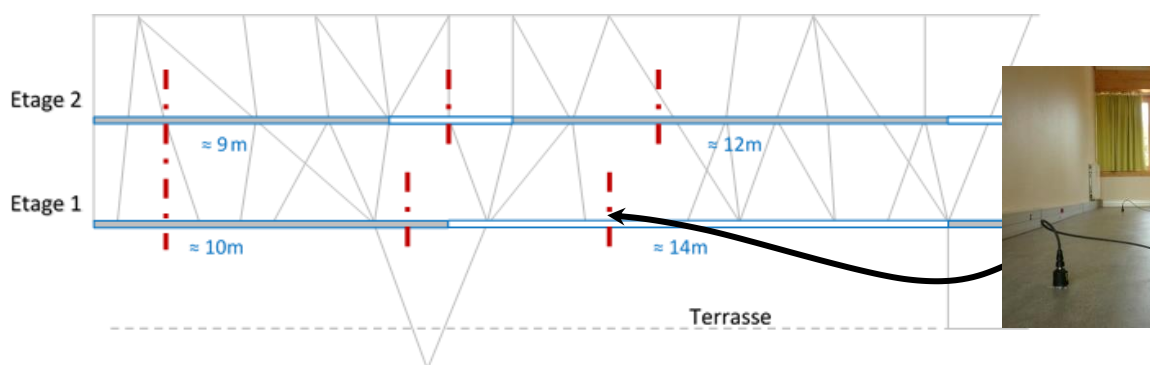


Illustration 4 : Coupe longitudinale et zones d'essais (en rouge) avec détail d'un accéléromètre

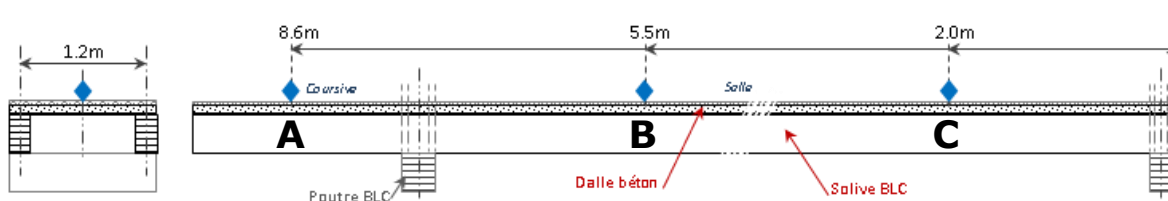


Illustration 5 : Position des accéléromètres le long d'une travée (vues en coupe)

### 3.3. Résultats préliminaires

D'après les mesures des différents capteurs (Illustration 5), l'amplitude des vibrations mesurées sur la coursive (zone A) est plus importante que sur le plancher des salles adjacentes. De même, la partie B proche de la coursive mais de l'autre côté de l'appui, est plus sensible aux vibrations que la zone C. Les valeurs moyennes des fréquences de résonance obtenue lors des essais sont résumées dans le Tableau 1. Les résultats sur les deux étages sont semblables pour des essais localisés de manière similaire. Comme précédemment souligné, les planchers mixtes de l'extension sont composés de deux porte-à-faux, l'un de dix mètres dans la longueur, l'autre de deux mètres dans la largeur. D'après les résultats obtenus, le porte-à-faux dans la largeur a peu d'impact sur la vibration du plancher. En revanche, le porte-à-faux de dix mètres a une influence importante sur la

fréquence de résonance avec un écart de près de 40% par rapport au plancher situé entre les appuis.

Tableau 1 : Valeurs moyennes des premières fréquences 1 propres issues des différentes campagnes de mesure (marche à vide, marche, course)

résultats en Hz	ETAGE 1			ETAGE 2		
	Zone A	Zone B	Zone C	Zone A	Zone B	Zone C
<b>solives</b>						
<b>13-14 (14-15)</b>	7.02 ±0.5	7.06 ±0.5	7.04 ±0.5	7.03 ±0.5	7.0 ±0.5	7.05 ±0.5
<b>8-9 (9-10)</b>	6.89 ±0.5	6.93 ±0.5	-	6.93 ±0.5	6.90 ±0.5	-
<b>3-4</b>	4.37 ±0.5	4.35 ±0.5	4.4 ±0.5	4.33 ±0.5	4.4 ±0.5	4.37 ±0.5

Afin de vérifier la correspondance entre réalité et prévision, les résultats ont été comparés avec la note de calcul fournie par Arborescence S.A.R.L., le bureau d'études en charge du projet de construction (cette note de calcul a été réalisée en janvier 2010, en dehors de la période d'application de l'Eurocode 5 concernant la sismicité, en vigueur depuis mars 2011). Le calcul est effectué en considérant une travée isostatique sans porte-à-faux de masse surfacique de 344 kg/m<sup>2</sup>. La largeur du plancher utilisée pour le calcul influe peu sur la fréquence de résonance, elle est donc établie à 14 m, ce qui est le cas le plus défavorable dans la situation présente. En effet, même si la dalle est connectée aux membrures des treillis, elle est interrompue au niveau des murs de refend. La largeur maximale de plancher continue (en R+1) est donc de 14m. Une valeur d'amortissement de 0.010 a été utilisée pour le calcul. La fréquence propre obtenue selon la méthode présentée au paragraphe 3.1 est de 5.27Hz.

La comparaison avec les mesures effectuées sur le plancher montre que le dimensionnement est relativement pessimiste pour le plancher situé hors porte-à-faux, un écart de près de 25% est relevé. A contrario, le phénomène de porte-à-faux n'est pas pris en compte et présente plus de 20% de différence entre l'expérience et la note de calcul.

De plus, le comportement vibratoire du plancher à usages de bureau ou d'habitation est influencé par beaucoup de facteurs, parmi eux, emplacement des cloisons, constitution du plafond, charges d'exploitation, etc. Ces facteurs, rarement pris en compte dans le dimensionnement du bâtiment et plus particulièrement des planchers, affectent non seulement les déformées et les fréquences modales du plancher mais aussi l'amortissement de la structure [6]. Autre source potentielle d'écart entre les mesures et le calcul théorique est le fait que le plancher s'appuie sur des éléments (les membrures du treillis) qui ont-elles-mêmes un comportement dynamique impacté par la présence du porte-à-faux.

### 3.4. Modélisation numérique et perspectives

Parallèlement, une modélisation numérique aux éléments finis a été réalisée sur Cast3m. Le modèle développé a été validé à travers les résultats d'une publication, puis adapté à la géométrie du plancher de l'ESB. Pour cette première modélisation, la présence des treillis et l'effet des connecteurs n'ont pas été pris en compte. Le système modélisé est une composition de plusieurs travées de plancher mixte bois/béton, sur des appuis parfaitement rigides et avec le porte-à-faux de la courive (Illustration 6). Différentes simulations sont effectuées pour un plancher avec ou sans porte-à-faux, et un nombre croissant de travées. Les résultats sont indépendants, ou presque, du nombre de travées à partir de 5 travées (Illustration 7). L'écart entre les premières fréquences obtenues pour deux nombres successifs de travées ( $n$  et  $n+1$ ) est inférieur à 5%.

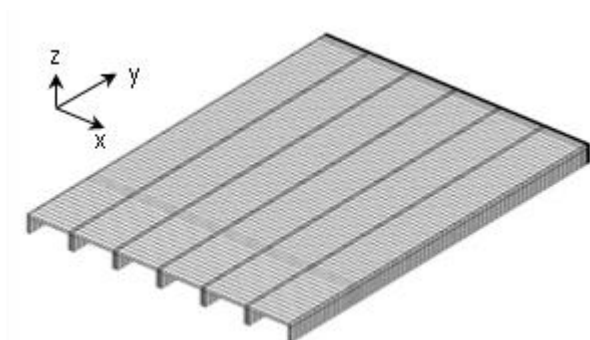


Illustration 6 : Maillage du plancher mixte étudié

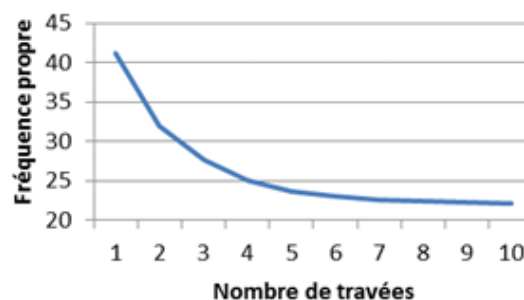


Illustration 7 : Influence du nombre de travées sur un plancher sans porte-à-faux

Afin de compléter et corrélérer le modèle aux mesures expérimentales, une simulation numérique du plancher dans son environnement est à envisager. Différentes pistes de réflexion sont à considérer : la prise en compte du glissement entre les solives et la dalle ou encore l'intégration des éléments de soutien du plancher tels que les poteaux et les membrures du treillis pour simuler des appuis flexibles.

## 4. Références

- [1] Lanata F (2015) The analysis of the long-term behaviour of a timber truss structure: the case of the ESB building. In *Structural Health Assessment of Timber Structures* ; Proc. Int. Conf. SHATIS15, Wroclaw, Poland, September 2015, vol. 2, 681-693.
- [2] Sorin E, Lanata F, Boudaud C (2016) Behaviour of timber structures under variable environment through long-term monitoring. In *World Conference on Timber Engineering* ; Proc. World Conf. WCTE 2016, Wien, Austria, August 2016, GS2-01A:3 (CD-ROM).
- [3] Allen DE, Pernica G (1998) Control of floor vibration. *NRC-CNRC (National Research Council of Canada)*. [En ligne] December 1998.
- [4] AFNOR (2005) Norme NF EN 1995-1-1. Eurocode 5 - Conception et calcul des structures bois. ISSN 0335-3931.
- [5] Slowron A, et al. (2010) Rapport n°13 : Comportement physique et mécanique des planchers mixtes bois-béton. CSTC. [En ligne] 2010.
- [6] Liu, Hengxi (2006) Corrélation entre perception au confort vibratoire et comportement dynamique de planchers bois : apport pour le dimensionnement. INSA-Lyon. [En ligne] 2006.