

## Planchers traditionnels en bois : étude bibliographique du diaphragme horizontal

*Dans les zones de vent et/ou de séisme, la stabilité des ouvrages est assurée par les éléments de contreventement tels que les voiles de murs à ossature bois. Le bon fonctionnement mécanique de ces éléments suppose que l'ensemble de ces derniers est correctement et uniformément sollicité. Dans le cas contraire, il y a un risque d' :*

- endommagement par déformations excessives hors plan des murs
- instabilité structurale par mise en torsion de l'ouvrage

*Pour contrer cela, on a recours à la présence d'un diaphragme rigide horizontal qui assure la bonne répartition des efforts sur l'ensemble des éléments de contreventement. Ce rôle de diaphragme est souvent attribué au plancher.*

*Dans ce cas, le plancher joue le double rôle de structure porteuse horizontale et de diaphragme. Si le premier est aisément justifiable par calcul (normalisé), la justification de la fonction diaphragme est quant à elle plus délicate et il n'existe pas de règles normalisées en vigueur en France.*

*Seules quelques règles de bonne conception sont appliquées et limitées à des formes simples de planchers sans trémies autres que pour les escaliers. Or, les professionnels sont de plus en plus confrontés à la nécessité d'une telle justification et ont besoin de règles de conception et de calcul. Il est donc nécessaire de proposer des solutions sur le sujet*

*FCBA a réalisé une étude bibliographique et un l'état de l'art via l'« étude PLANDIA ». L'objectif est de capitaliser l'existant et proposer un programme de recherche complémentaire dont la valorisation attendue est une proposition de règles de justification à destination de la future version de l'Eurocode 5.*

### Contexte

Actuellement, pour les ouvrages de forme simple (rectangulaire), aucune justification particulière n'est faite, excepté le respect de quelques règles de bonne conception.

Cependant, les conditions d'application de ces règles sont très limitées :

- Forme simple du plancher (rectangulaire)
- Pas de trémies autres que celles destinées aux escaliers
- ...

Il n'existe pas de règles de calcul (normalisée ou professionnelles) permettant de dimensionner la fonction diaphragme des planchers tenant compte de sa géométrie, des trémies, des singularités géométriques, ... Or les professionnels sont de plus en plus confrontés à la nécessité d'une telle justification (architecture variée, zones sismiques, ...).

Les professionnels se trouvent alors dans l'impossibilité de justifier facilement et simplement la stabilité de ces ouvrages et ont besoin de règles de conception et de calcul ainsi que leur domaine d'emploi associé.

## Fonction diaphragme horizontal

La majeure partie des structures en ossature bois est basée sur le principe constructif dit de type plateforme ou sur des évolutions techniques qui s'en approchent en termes de fonctionnement mécanique.

Au-dessus de chaque niveau de la construction, un ensemble d'éléments constituant un « diaphragme » est interposé.

Ces différents diaphragmes permettent tout d'abord de lier la construction. Au niveau des étages, ils jouent également le rôle de plancher. Cet ensemble est souvent considéré comme ayant une rigidité importante dans son plan. Le plancher raidit transversalement chacun des systèmes de murs qui constituent l'enveloppe de la structure. Ils permettent de limiter les déformations des parois en dehors de leur plan. La présence de trémie en bord de dalle oblige nécessairement à compenser ce rôle en ajoutant généralement une poutre à plat en partie haute des murs. Ces diaphragmes participent ensuite de manière active au contreventement de la structure en assurant la distribution des sollicitations horizontales en tête de chacune des parois de l'enveloppe et des refends.

Lorsque dans le rôle du diaphragme, la reprise de charges verticales n'existe pas (comble non habitable par exemple), c'est la structure complète de la toiture et de son contreventement qui assure ce rôle. La rigidité de cette partie de structure s'avérant souvent insuffisante, elle est généralement complétée par des poutres au vent de type treillis placées dans la toiture au niveau de la lisse supérieure de chacune des parois. Ces poutres doivent être rigidement fixées aux parois transversales adjacentes pour que leur rôle soit effectif. Une solution alternative consiste généralement à couvrir la charpente par des panneaux. Une structure analogue aux diaphragmes servant de plancher au niveau des étages mais globalement plus légère se retrouve alors en toiture.

Les Figures 2 et 3 permettent d'illustrer le rôle général du diaphragme horizontal, en particulier le chargement du diaphragme et son rôle de redistribution des efforts dans les voiles de contreventement :

- Reprise des charges horizontales dues à l'action du vent ou du séisme (figure 2),
- Transfert des efforts sur les voiles de contreventement (figure 3).

Figure 1 : Schéma de principe du type « plateforme »

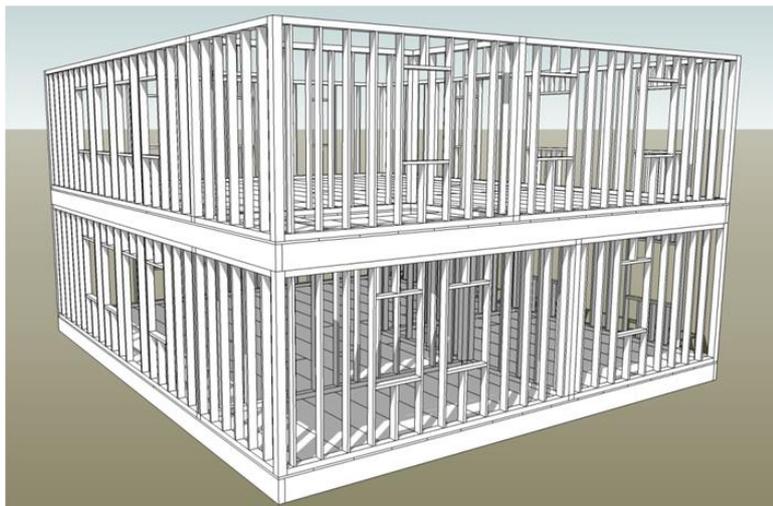
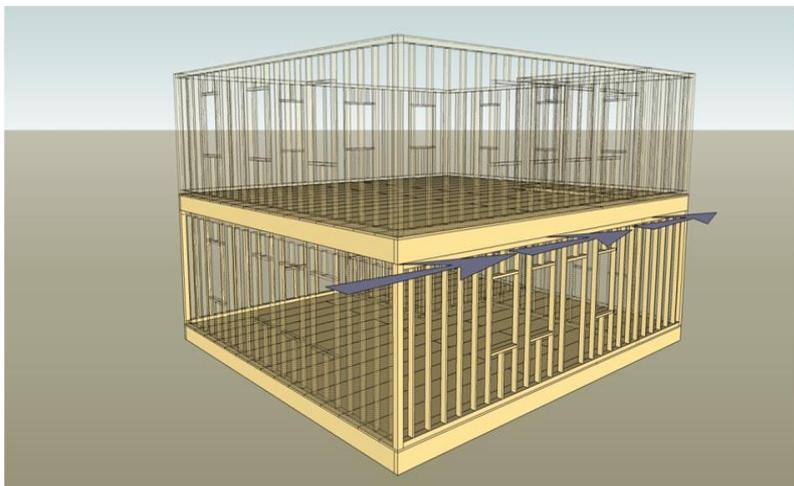


Figure 2 : Reprise du vent en façade ou charge due au séisme



Figure 3 : Transfert des efforts en tête des voiles de contreventement



## Objectifs de l'étude

Le premier objectif de cette étude bibliographique est de présenter un tour d'horizon des moyens de justification de la fonction diaphragme que l'on peut rencontrer. On peut les regrouper en deux principales catégories :

- Les règles faisant l'objet d'une reconnaissance normative ou d'un document de référence professionnel
- Les études scientifiques et techniques non valorisées en normalisation

Ce rapport présente les principales approches rencontrées. Une liste bibliographique plus complète est donnée en annexe.

Le deuxième objectif est de comparer ces outils de calcul avec le besoin des concepteurs et le domaine d'emploi auquel ceux-ci sont confrontés (géométrie des planchers, grandes ouvertures, ...). Le but est d'évaluer ce qui pourrait être directement exploitable et quels compléments sont éventuellement nécessaires.

Enfin, le troisième objectif est de proposer, le cas échéant, une étude adaptée permettant de caractériser la fonction diaphragme des planchers dont la configuration n'est pas suffisamment couverte par les outils existants. Le but de cette étude complémentaire est d'avoir suffisamment de matière scientifique et technique pour une proposition de méthode de dimensionnement à destination des règles de calcul Eurocodes.

### Approches normatives ou « référencées »

Ce chapitre présente de manière synthétique des approches retenues dans différents textes au caractère normatif ou assimilé (règles professionnelles par exemple). On y retrouve des textes français, européens et nord-américains.

*NOTE : des textes japonais n'ont pas été exploités faute de traduction trouvée.*

### DTU 51.3 « Planchers en bois ou en panneaux à base de bois »

Le DTU 51.3 ne traite pas directement de la conception des planchers formant diaphragme horizontal, mais distingue cependant les ouvrages de planchers remplissant cette fonction de diaphragme horizontal des planchers simplement porteurs vis-à-vis des charges verticales.

Ces règles simples se limitent à des règles de moyens permettant d'assurer le fonctionnement mécanique du plancher en diaphragme horizontal mais pour autant, elles ne permettent pas une justification de celui-ci vis-à-vis des charges.

De plus, il n'y a pas de règles permettant la gestion des ouvertures dans le plancher.

### Eurocode 5 – NF EN 1995-1-1

Depuis 2010, les règles de calcul d'application tacite en France sont les règles Eurocodes. Avant celles-ci, les règles françaises, dites règles CB71, ne traitaient pas de la justification de la fonction diaphragme horizontal des planchers traditionnels en bois.

Cette approche simplifiée est relativement conservatrice et surtout, elle conduit à un domaine d'emploi limité à des planchers rectangulaires, de faible élancement et sans ouverture importante.

De plus, elle ne permet absolument pas d'évaluer la rigidité du plancher.

### Approche nord-américaine (USA)

Aux États-Unis, plusieurs textes coexistent pour la conception et la justification des ouvrages. Ceci est entre autre dû à leur système normatif et administratif. À côté des textes « fédéraux » coexiste ce qui serait analogue à une règle professionnelle.

Enfin, cette méthode ne traite pas de la prise en compte des ouvertures dans le diaphragme.

### Approche de l'APA – The Engineered Wood Association (USA)

L'association des fabricants de panneaux (APA) a produit un document donnant une méthode de justification des diaphragmes horizontaux basée uniquement sur des valeurs tabulées.

Tout comme la méthode dont ce guide est issu, on y retrouve les mêmes limitations en termes de domaine d'application, notamment le ratio longueur/largeur et l'absence de la gestion des ouvertures dans le plancher.

### Approche de l'Applied Technology Council

L'ATC propose un guide nommé « Guidelines for the design of Wood Sheathed diaphragms » dans lequel une méthode d'analyse analytique est proposée pour déterminer les efforts dans le diaphragme avec prise en compte des ouvertures dans celui-ci.

Contrairement aux précédentes approches, celle-ci trouve un intérêt certain du fait de la prise en compte d'ouverture dans le diaphragme. Cependant, il s'agit d'une approche purement théorique dont les contours du domaine d'application ne sont pas clairement établis.

### Approche du Conseil Canadien du Bois

Le Conseil Canadien du Bois a édité un document nommé « Design example: Designing for openings in wood diaphragm ». Il s'agit en fait d'un exemple pratique qui s'appuie sur la méthode d'analyse du « Guidelines for the design of Wood Sheathed diaphragms » de l'ATC.

On note que, par rapport au même diaphragme sans ouverture, cette méthode d'analyse conduit à une majoration des efforts de cisaillement à reprendre dans les fixations des panneaux de 1,14 à 1,5.

### Conclusion

D'une manière générale, la majorité des méthodes proposées dans ces différents documents présentent un domaine d'application limité à des planchers sans ouverture significative et aux dimensions (élanement) limitées.

La méthode du guide de l'ATC permet d'aller plus loin avec la prise en compte des ouvertures. Cependant, son défaut réside dans sa complexité d'application. D'ailleurs, c'est l'une des raisons de son absence de textes normatifs. Elle est difficilement intégrable dans un texte normatif en l'état.

## Principaux thèmes d'études

### Généralités

Dans la littérature scientifique, on peut trouver un nombre relativement important de publications traitant du sujet des diaphragmes en général et des diaphragmes horizontaux en particulier. Une liste bibliographique (non exhaustive) avec les résumés des articles est donnée en annexe.

On peut cependant dégager deux principales approches : les études expérimentales et les études par simulations numériques.

Compte tenu des grandes dimensions qui constituent les diaphragmes de planchers en bois, un nombre limité de campagnes expérimentales ont été réalisées afin de caractériser leur comportement dans le plan. Ces campagnes ont été conduites principalement en Amérique du Nord et au Japon.

Comme vu précédemment, les résultats des études expérimentales ont montré que les planchers en bois peuvent être considérés comme une poutre courte dont la raideur dans le plan est extrêmement liée à la connexion panneaux-éléments porteurs.

Beaucoup d'entre elles se recoupent, aussi dans ce rapport il est fait le choix de ne présenter qu'un nombre limité d'études qui sont représentatives de ce que l'on peut retrouver.

### Etude expérimentale sur diaphragme sans ouverture

Une étude française réalisée à l'université Blaise Pascal est représentative des études traitant du comportement des diaphragmes de planchers. Cette étude « Caractérisation de la raideur dans le plan des planchers diaphragme en bois - Approche Expérimentale », de Fuentes S., Fournely E. et Bouchair A., présente une campagne expérimentale conduite sur deux planchers traditionnels en bois entretoisés ou non. La configuration d'essai, l'instrumentation et des résultats en termes de comportement mécanique global ou local sont présentés.

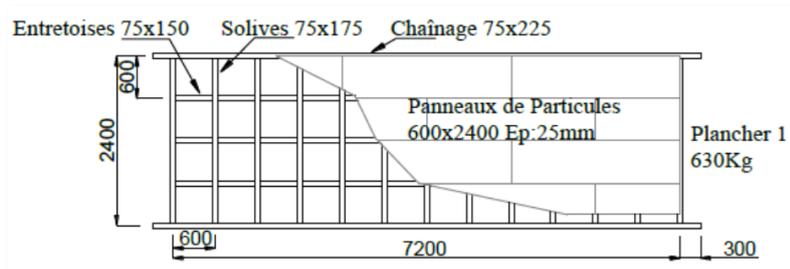
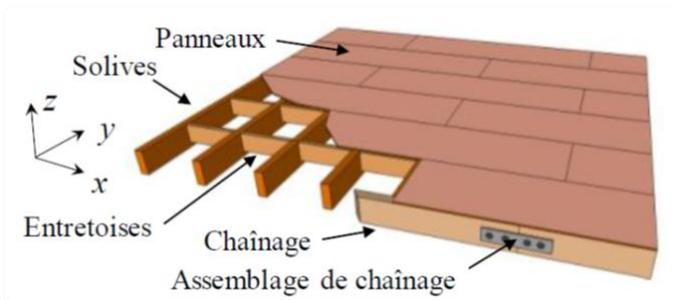


Figure 4 : le plancher avec entretoise

Les conclusions de cette étude sont :

- Le comportement mécanique global des planchers diaphragme est non linéaire avec une limite élastique relativement faible. Ce comportement est lié principalement à la connexion panneau-solivage.
- Les deux planchers étudiés possèdent une très forte capacité de déformation sans

présenter une ruine globale de la structure. Cependant, des ruptures par flexion ont été observées sur les panneaux.

- La rupture des panneaux modifie la configuration du calepinage en quinconce du plancher. Ceci se traduit par une perte de résistance sur les deux planchers.
- Le transfert des efforts par contact entre panneaux favorise la raideur de la structure. Cependant lorsque la résistance en compression des panneaux est dépassée, des ruptures par écrasement local ont été observées.
- La direction de la sollicitation des pointes est variable en fonction de leur position dans le plancher. La raideur de connexion est affectée par cette direction et par les conditions locales des pointes.

À noter que cette étude expérimentale a été utilisée pour le développement de modèles éléments finis.

### Etude expérimentale sur diaphragme avec ouverture

Une étude purement expérimentale a fait l'objet d'une thèse intitulée « Horizontal stiffness of wood diaphragms » soutenue à Virginia Polytechnic Institute and State University.

On note que les paramètres les plus influents sont :

- Le montage des panneaux bloqués ou non bloqués
- La rigidité de la connexion panneaux / solives
- L'ouverture

On note également que pour la configuration avec ouverture, son influence sur la partie « non ouverte » est relativement faible (4%).



Figure 6 : Plancher de 5 x 6 m avec ouverture centrale

### Etude par modélisation numérique

L'étude présentée ici est une étude reposant sur une approche par modélisation par éléments finis. Elle a fait notamment l'objet d'un article intitulé « Évaluation de la semi-rigidité de diaphragmes en bois – Modélisation numérique » proposé pour le Symposium International sur la Construction en Zone Sismique à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie). Cette étude a été menée par Fuentes S., Vu T.K., Fournely E. et Bouchaïr A. à l'Université Blaise Pascal.

On note une différence peu marquée du comportement en rigidité du diaphragme en fonction du calepinage des panneaux. Les auteurs précisent cependant que la configuration des panneaux peut avoir un effet plus important sur des planchers plus élancés.

### Conclusion

Cette étude bibliographique permet de confirmer que l'on retrouve soit des règles extrêmement simplifiées encore limitées aux ouvrages à géométries très simples et/ou sans ouverture, soit des publications scientifiques qui n'ont pas fait l'objet de valorisation « normative » et/ou qui restent limitées aux planchers sans ouverture.

Les diaphragmes peuvent présenter des comportements flexibles ou rigides dont la semi-rigidité influence le transfert des efforts de flexion et de torsion vers les systèmes de contreventement.

Or, pour pouvoir prendre la meilleure hypothèse de rigidité du diaphragme, il convient de pouvoir prendre en compte tous les facteurs significatifs qui y contribuent. Cependant, ceci est difficile à réaliser avec des moyens analytiques simples actuellement.

Des méthodes analytiques simplifiées prennent en compte quelques-uns de ces paramètres, mais elles

Figure 5 : Plancher de 5 x 6 m avec ouverture

sont applicables à un nombre réduit de configurations de planchers avec des paramètres pas toujours connus. Les méthodes existantes, non normalisées en France, ont toutes une approche simplifiée et un domaine d'application limité. Leur mise en application est peu courante, voire inexistante, en France.

De plus, Le principale défaut vient de la non prise en compte en général des ouvertures. Des méthodes, dans certains codes de calcul, comme le guide de calcul américain, vont un peu plus loin mais lorsqu'elles sont prises en compte, les approches sont très complexes.

Pour le reste, on retrouve quelques publications scientifiques internationales et françaises, mais qui n'ont pas fait l'objet de valorisation « normative » et qui restent quasi-exclusivement limitées aux planchers sans ouvertures.

Cette étude bibliographique souligne ainsi la lacune dans le domaine du calcul et de la justification de la fonction diaphragme des planchers. Cet état de fait vient également d'être souligné par la commission de normalisation CEN/TC250/SC5 en charge de la révision et de l'élaboration de la prochaine génération de l'Eurocode 5.

## Proposition d'étude complémentaire

Un programme d'étude complémentaire doit être mené afin de répondre aux questions encore en attente et d'être moteur au niveau européen pour enrichir le futur code eurocode 5.

Une telle étude peut être envisagée en quatre étapes principales :

- Étude expérimentale de diaphragme de planchers à géométries variables avec ou sans ouvertures
- Modélisation numérique et validation du modèle
- Exploitation du modèle numérique pour étendre les configurations
- Développement d'une méthode analytique simplifiée

Le déroulement des différentes étapes proposées est :

### Etude expérimentale de diaphragme de planchers à géométries variables avec ou sans ouverture

L'objectif de cette étape est de compléter les études expérimentales existantes en couvrant des configurations de planchers plus complexes qu'un plancher rectangulaire sans ouverture. Il conviendra de couvrir à minima les configurations :

- de planchers en « L » afin d'évaluer l'impact de la géométrie du plancher,
- les planchers avec ouvertures de plusieurs dimensions afin d'évaluer l'impact du ratio de surfaces entre le plancher et l'ouverture.

### Modélisation numérique et validation du modèle

L'ensemble des configurations testées à l'étape 1 doit faire l'objet de la mise au point d'un modèle aux éléments finis prenant en compte les différents paramètres identifiés comme influents dans le comportement du diaphragme.

Pour cela, il sera intéressant de partir d'un modèle numérique existant (voir étude présentée dans ce rapport) afin de l'enrichir. L'objectif est alors de valider ce modèle avec l'ensemble des résultats de l'étape 1.

### Exploitation du modèle numérique pour étendre les configurations

L'objectif de cette étape est de réaliser une série « d'essais virtuels » afin d'étendre les résultats expérimentaux à des configurations non retenues par les essais pour des raisons de complexité de réalisation et/ou de dimensions.

### Développement d'une méthode analytique simplifiée

Pour valoriser au mieux ce travail, il convient de produire une méthode de calcul simplifiée. L'ensemble des résultats expérimentaux (réels et virtuels) doit être traité et exploité afin de faire le tri entre les paramètres réellement influents et ceux pouvant être négligés. L'objectif est de proposer une méthode simple pouvant trouver sa place dans un code de calcul normalisé. L'utilisation de « coefficients correcteurs » appliqués à un diaphragme de référence en fonction de la configuration réelle du plancher est par exemple une voie possible.

Les résultats de cette étude pourront alors être portés et défendus au sein du groupe de travail dédié de la commission européenne de normalisation CEN/TC250/SC5 en charge de la révision de l'Eurocode 5.

Contact :

**Laurent Le Magorou**  
Ingénieur Construction Charpente  
Tél. 05 56 43 63 20  
[laurent.lemagorou@fcba.fr](mailto:laurent.lemagorou@fcba.fr)

FCBA – Pôle Industries Bois Construction  
Section CIAT  
Allée de Boutaut – BP227 – 33028 Bordeaux Cedex



INSTITUT TECHNOLOGIQUE

*Etude réalisée avec le soutien de*

