



INSTITUT TECHNOLOGIQUE

# ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE SUR LA JUSTIFICATION DE LA FONCTION DIAPHRAGME HORIZONTAL DES PLANCHERS TRADITIONNELS EN BOIS

Laurent Le Magorou

11 juin 2015

**Siège social**

10, rue Galilée  
77420 Champs-sur-Marne  
Tél +33 (0)1 72 84 97 84

**IBC Recherche**

Allée de Boutaut – BP 227  
33028 Bordeaux Cedex  
Tél +33 (0)5 56 43 63 00  
Fax +33 (0)5 56 43 64 80

[www.fcba.fr](http://www.fcba.fr)

Siret 775 680 903 00132

Code TVA CEE : FR 14 775 680 903

Avec le soutien de :

CODIFAB

# SOMMAIRE

<b>1.</b>	<b>Le contexte</b> .....	<b>5</b>
<b>2.</b>	<b>Le besoin et les objectifs</b> .....	<b>6</b>
	2.1 Rappel de la fonction diaphragme horizontal .....	6
	2.2 Besoin du concepteur .....	8
	2.3 Objectifs de l'étude bibliographique .....	9
<b>3.</b>	<b>Les approches normatives ou « référencées »</b> .....	<b>10</b>
	3.1 Le DTU 51.3 « Planchers en bois ou en panneaux à base de bois » .....	10
	3.2 L'Eurocode 5 – NF EN 1995-1-1.....	11
	3.3 L'approche nord-américaine (USA).....	13
	3.4 Approche de l'APA – The Engineered Wood Association (USA) .....	18
	3.5 Approche de l'Applied Technology Council.....	19
	3.6 Approche du Conseil Canadien du Bois .....	23
	3.7 Conclusion .....	25
<b>4.</b>	<b>Les principaux thèmes d'études</b> .....	<b>26</b>
	4.1 Généralités .....	26
	4.2 Étude expérimentale sur diaphragme sans ouverture.....	26
	4.3 Étude expérimentale sur diaphragme avec ouverture.....	29
	4.4 Étude par modélisation numérique .....	32
<b>5.</b>	<b>Conclusion</b> .....	<b>37</b>
	5.1 Synthèse.....	37
	5.2 Proposition d'étude complémentaire.....	37

# TABLE DES FIGURES

Figure 2-1 : Schéma de principe du type « plateforme » .....	6
Figure 2-2 : Reprise du vent en façade ou charge due au séisme .....	7
Figure 2-3 : Transfert des efforts en tête des voiles de contreventement.....	7
Figure 3-1 : Exemple d'assemblage de joints de panneaux non supportés.....	11
Figure 3-2 : Modèle de chargement d'un diaphragme .....	12
Figure 3-3 : Quelques codes américains .....	13
Figure 3-4 : Diaphragme bloqué (gauche) ou non bloqué (droite) .....	14
Figure 3-5 : 6 cas de poses retenus .....	16
Figure 3-6 : Exemple d'un tableau donnant la résistance et $G_a$ .....	16
Figure 3-7 : Structure avec un mur ouvert .....	17
Figure 3-8 : Diaphragme en porte-à-faux.....	17
Figure 3-9 : Le guide de l'APA.....	18
Figure 3-10 : Exemple d'un tableau du guide APA .....	19
Figure 3-11 : Exemple d'un cas pouvant être traité .....	20
Figure 3-12 : Méthode simplifiée de chargement du diaphragme sans ouverture ....	20
Figure 3-13 : Découpage en segments autour des ouvertures.....	21
Figure 3-14 : Analyse du diaphragme avec ouverture .....	22
Figure 3-15 : Cisaillements induits.....	22
Figure 3-16 : Superposition des cisaillements .....	23
Figure 3-17 : Guide du Conseil Canadien du Bois.....	23
Figure 4-1 : le plancher avec entretoise.....	27
Figure 4-2 : Essais réalisés .....	27
Figure 4-3 : Résultats expérimentaux avec entretoise (gauche) et sans entretoise (droite) .....	28
Figure 4-4 : le bâti d'essai.....	29
Figure 4-5 : Les planchers de 5 x 6 m sans ouverture.....	30
Figure 4-6 : Plancher de 5 x 6 m avec ouverture .....	30
Figure 4-7 : Plancher de 5 x 6 m avec ouverture centrale .....	30
Figure 4-8 : le plancher de 3 x 12 m .....	31
Figure 4-9 : Plancher modélisé.....	33
Figure 4-10 : Comparaison Modélisation « simple » / calcul analytique .....	34
Figure 4-11 : Modélisation des connexions panneaux / solives.....	34
Figure 4-12 : Comparaison modèle avec « connexions semi-rigides » / calcul analytique .....	35
Figure 4-13 : Comparaison modèle avec « contact panneaux » / calcul analytique .	35
Figure 4-14 : 3 calepinages modélisés .....	36
Figure 4-15 : comparaison des 3 calepinages de panneaux .....	36

# TABLE DES TABLEAUX

Tableau 3-1 : Ratio limite de dimensions des diaphragmes .....	17
Tableau 3-2 : Influence de l'ouverture sur le cisaillement dans le diaphragme.....	24
Tableau 4-1 : Synthèse des résultats .....	31

## 1. Le contexte

Dans les zones de vent et/ou de séisme, le bon fonctionnement mécanique du système de stabilité des ouvrages est conditionné à la bonne transmission des efforts dus à ces sollicitations vers les éléments de stabilité.

Dans le cas contraire, il y a un risque de :

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

Pour 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.

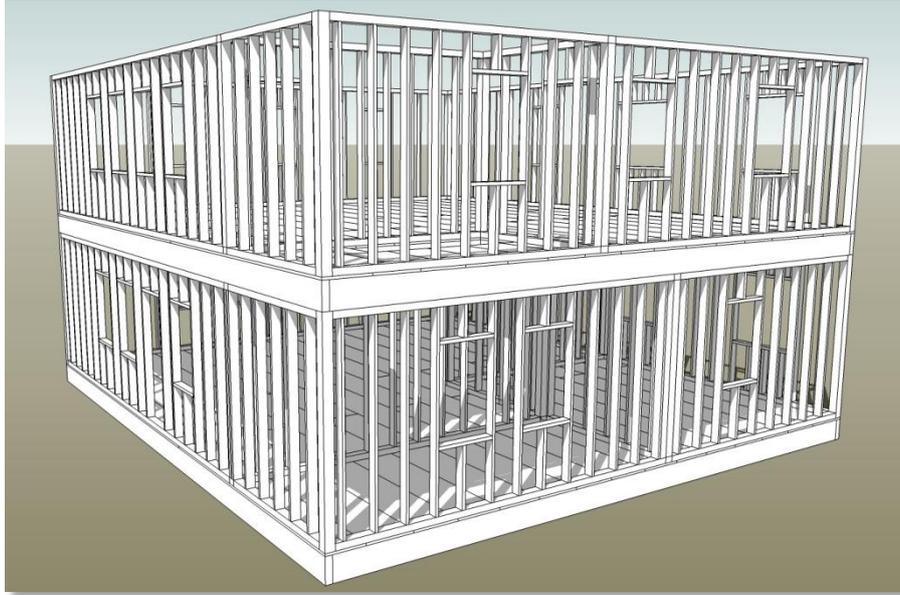
Seules quelques règles de bonne conception sont appliquées et limitées à des formes simples de plancher sans trémies autres que les escaliers. Or, les professionnels sont de plus en plus confrontés à la nécessité d'une telle justification et ont besoin de règles de conception et de calcul.

L'étude PLANDIA est une étude bibliographique et de l'état de l'art. 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.

## 2. Le besoin et les objectifs

### 2.1 Rappel de la fonction diaphragme horizontal

La majeure partie des structures en ossature bois sont basées sur le principe constructif dit de type plate-forme ou sur des évolutions techniques qui s'en approchent en terme de fonctionnement mécanique.



*Figure 2-1 : Schéma de principe du type « plateforme »*

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

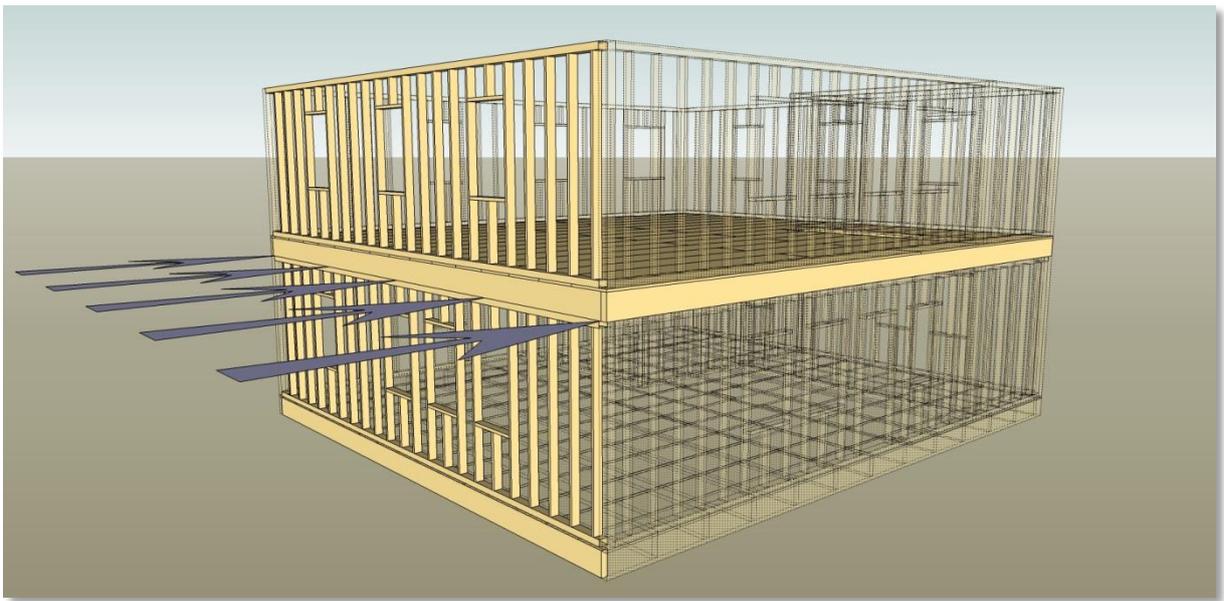
Ces différents diaphragmes permettent tout d'abord de lier la construction. Au niveau des étages, ils jouent également le rôle de plancher. Cet ensemble est souvent considéré comme ayant une rigidité importante dans son plan. Le plancher raidit transversalement chacun des systèmes de murs qui constituent 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

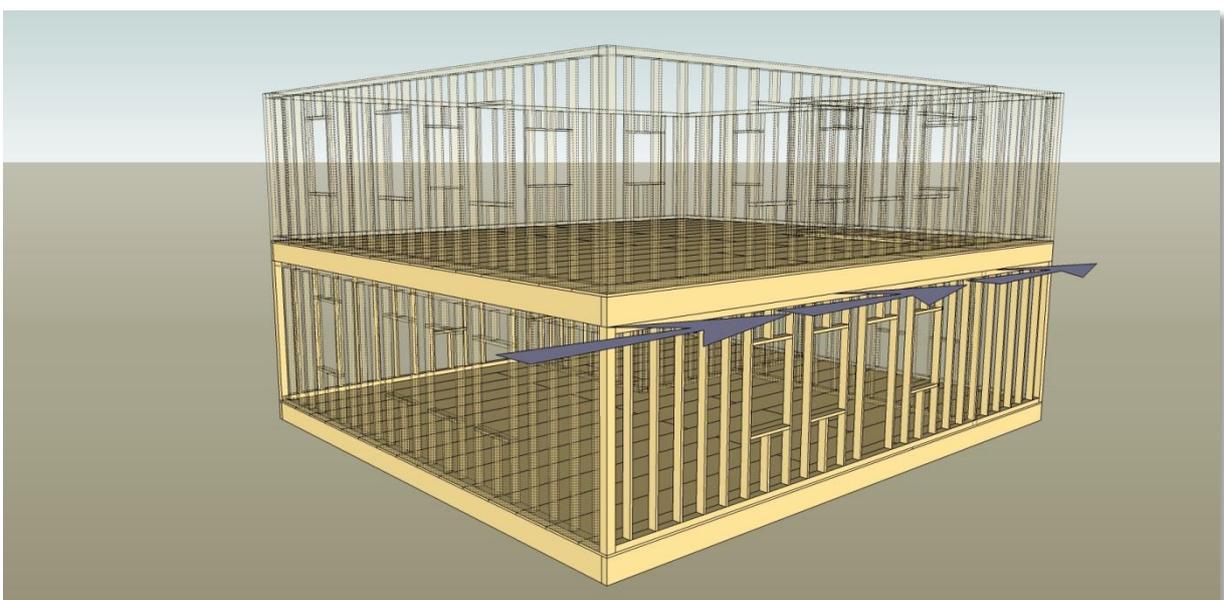
consiste généralement à couvrir la charpente par des panneaux. Une structure analogue aux diaphragmes servant de plancher au niveau des étages mais globalement plus légère se retrouve alors en toiture.

Les Figure 2-2 et Figure 2-3 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 2-2),
- Transfert des efforts sur les voiles de contreventement (Figure 2-3).



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



*Figure 2-3 : Transfert des efforts en tête des voiles de contreventement*

## 2.2 Besoin du concepteur

Les différents composants structuraux doivent s'intégrer dans l'ouvrage au sein duquel ils joueront un rôle structural. De fait, le concepteur se doit de justifier ces composants structuraux vis-à-vis d'un certain nombre d'exigences en termes notamment de résistance mécanique et de rigidité.

La détermination de ces charges suit les règles de calcul des structures données dans les textes normatifs en vigueur en France, à savoir les règles Eurocodes. On doit alors justifier les éléments structuraux pour leur résistance (dit « États Limites Ultimes », ELU) et leur déformation (dit « États Limites de Service », ELS).

La vérification des États Limites Ultimes consiste à s'assurer du non dépassement d'un certain taux de charge des éléments structuraux sous les différents scénarii de combinaisons des charges (neige, vent, exploitation selon EN 1991-1-1 à -4, ainsi que séisme selon l'EN 1998-1) construits selon l'EN 1990 (Eurocode 0). Ce taux de charge s'exprime par rapport à la résistance caractéristique de l'élément de structure vis-à-vis de la sollicitation considérée.

La vérification des États Limites de Service consiste à s'assurer du non dépassement de limites de déformations des éléments structuraux sous les différents scénarii de combinaisons des charges (neige, vent, exploitation selon EN 1991-1-1 à -4, ainsi que séisme selon l'EN 1998-1) construits selon l'EN 1990 (Eurocode 0). Ces limites sont différentes selon les matériaux conformément aux Eurocodes spécifiques à chacun (EN 1995-1-1 pour les structures en bois). À titre d'exemple, sous l'action du vent perpendiculaire à la façade, un mur à ossature bois ne doit pas se déformer de plus de  $h/200$  ( $h/300$  conseillé) où  $h$  est la hauteur du niveau considéré. De même, sous l'action du transfert des efforts sur les voiles de contreventement qui en résulte, la tête d'un mur à ossature bois ne doit pas se déplacer de plus de  $h/500$  pour assurer la bonne stabilité de l'ouvrage.

Dans le cas de systèmes constructifs traditionnels, un certain nombre d'outils de calcul permettent d'évaluer les résistances caractéristiques et les raideurs et sont explicités dans les règles normatives. Ces notamment le cas pour la justification des éléments fléchis, comprimés, ..., les assemblages, les voiles de contreventement.

En référence à la Figure 2-2, le concepteur pourra ainsi justifier les éléments structuraux du mur. Pour le cas de la Figure 2-3, il pourra justifier les voiles de contreventement.

Par contre, pour l'élément intermédiaire que représente le diaphragme horizontal, il ne dispose pas actuellement d'un outil normalisé.

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 les escaliers, ...

Il n'existe pas de règles « françaises » de calcul (normalisées 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 ne peuvent pas 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.

### 2.3 Objectifs de l'étude bibliographique

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.

### 3. Les 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.*

#### 3.1 Le 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.

Pour les planchers qui participent à la résistance mécanique et à la rigidité globale de la paroi horizontale, ce voile travaillant horizontal peut être réalisé en lames de bois massif, en lamibois, en contreplaqué, en OSB ou en panneaux de particules.

Les lames à planchers, planches ou panneaux doivent reposer sur 3 appuis au moins. L'entraxe des solives doit être un sous-multiple de la longueur des panneaux retenus et éventuellement de celle des lames pour que les petits côtés de ceux-ci soient supportés.

Les lames et planches sont mises en œuvre bord à bord (pose dite jointive) et à joints décalés.

Les panneaux sont posés à joints décalés (pose dite à coupe de pierre). Selon la nature du revêtement de sol, ils sont posés :

- à bord jointif, cas des chants rainurés, dans ce cas, les dalles constituant le plancher d'une même pièce sont disposées de telle manière qu'un espace de 10 mm soit prévu sur toute la périphérie de la pièce et éventuellement aux zones de fractionnement.
- avec un jeu entre chaque panneau, cas des chants droits, dans ce cas un joint de l'ordre de 1 à 1,5 mm par mètre dans les deux sens est prévu à la périphérie de chaque panneau.

Dans tous les cas, les rives des panneaux parallèles aux appuis doivent reposer sur un support continu. Les rives perpendiculaires doivent être soit supportées, soit usinées et assemblées, afin que la jonction entre les panneaux permette la transmission des charges et satisfasse aux conditions de résistance prévues en partie courante.

Concernant les fixations, dans le cas d'une fixation par clouage ou agrafage, l'espacement maximal des pointes est de 150 mm sur les appuis périphériques et de 300 mm en partie courante et à une distance minimale de 8 mm des rives, 10 mm étant conseillé. Ce clouage est complété par un vissage aux 4 angles du panneau et

à mi longueur, sauf dispositions particulières (pointes spéciales ou nature des bois des solivages). Dans le cas d'une fixation par vissage, les mêmes espacements sont respectés.

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.

### 3.2 L'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.

Les règles Eurocode 5, NF EN 1995-1-1, introduisent une approche simplifiée pour la justification des planchers traditionnels en bois formant diaphragme horizontal. Cette approche simplifiée est associée à quelques exigences de mise en œuvre données dans le chapitre 10 de l'EN 1995-1-1.

En effet, cette méthode simplifiée d'analyse suppose que les panneaux qui ne sont pas supportés par des solives ou des chevrons sont assemblés entre eux par exemple au moyen de liteaux. Cet assemblage doit utiliser des pointes non lisses ou des vis, avec un espacement maximum sur la périphérie des panneaux de 150 mm. Pour les autres éléments, l'espacement maximal est porté à 300 mm. On peut également envisager le collage lorsque les panneaux utilisés sont à rainure/languette.

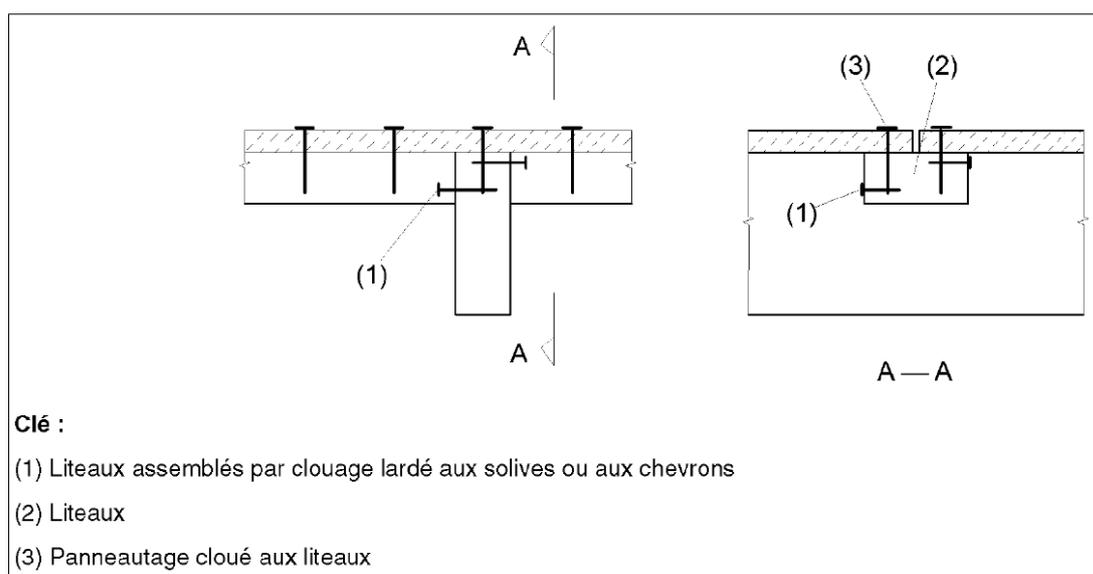


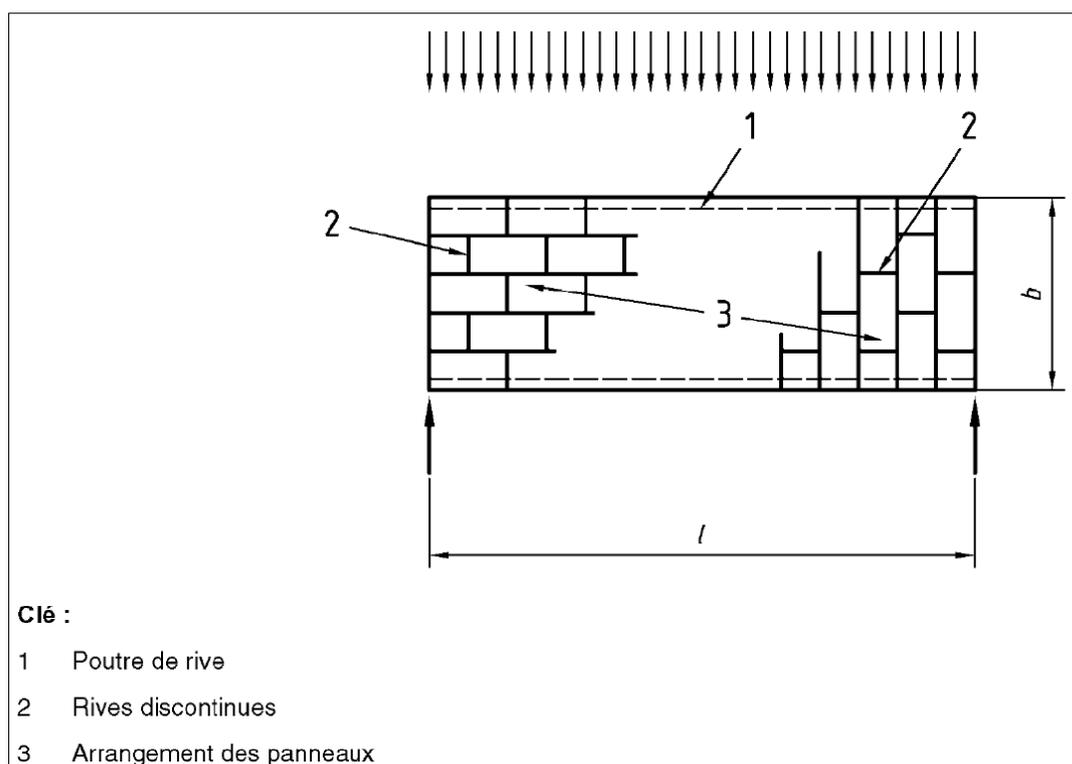
Figure 3-1 : Exemple d'assemblage de joints de panneaux non supportés

Ces exigences de mise œuvre sont destinées à reconstituer une plaque continue et rigide capable de transmettre un cisaillement de voile et permettant l'application de la méthode d'analyse simplifiée proposée.

Cette méthode simplifiée est basée sur les hypothèses et le domaine d'application suivants :

- Les diaphragmes ont un chargement uniformément réparti,
- la portée  $l$  est comprise entre  $2b$  et  $6b$ , où  $b$  est la largeur du diaphragme,
- la condition critique en état limite ultime est la rupture dans les organes d'assemblage (et non dans les panneaux),
- les panneaux sont fixés conformément aux règles de détails structuraux données précédemment.

Ces hypothèses étant satisfaites, la méthode simplifiée d'analyse consiste à considérer le diaphragme comme une poutre en I géante sur deux appuis et supportant un chargement uniformément réparti.



*Figure 3-2 : Modèle de chargement d'un diaphragme*

On vérifie alors :

- que les « poutres de rive » sont conçues pour résister au moment de flexion maximum dans le diaphragme ;

- que les joints entre panneaux sont conçus pour résister aux efforts tranchants dans le diaphragme qui sont supposés uniformément répartis selon la largeur du diaphragme.

À noter que lorsque les panneaux sont en quinconce, les espacements entre pointes le long des rives de panneaux discontinus peuvent être augmentés d'un facteur de 1,5 (jusqu'à un maximum de 150 mm) sans réduction de la capacité résistante.

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.

### 3.3 L'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.

Dans le domaine de la construction bois et traitant des diaphragmes horizontaux, on peut citer les textes suivants :

- l'International Building Code (IBC)
- les National Design Specifications (NDS) for Wood Construction
- les Special Design Provisions for Wind and Seismic (SDPWS)
- le California Building Code (CBC)



Figure 3-3 : Quelques codes américains

l'International Building Code (IBC, 2012) est développé par l'International Code Council qui regroupe les principales associations. Il est adopté à travers tous les États-Unis suite à l'harmonisation et la mise en commun de différents codes initialement utilisés selon les régions. Il couvre la détermination des charges et actions sur les bâtiments, la justification des structures pour l'ensemble des matériaux. C'est en quelque sorte l'équivalent de nos Eurocodes.

Les National Design Specifications (NDS, 2012) for Wood Construction sont spécifiques aux constructions bois. Ce document est produit par l'American Wood Council. Il relève plus de règles professionnelles et/ou règles de moyens pour les ouvrages courants en bois. Il est cependant « accrédité » par le comité américain de normalisation ANSI. Pour la conception des contreventements et des diaphragmes, il renvoie aux « Special Design Provisions for Wind and Seismic ».

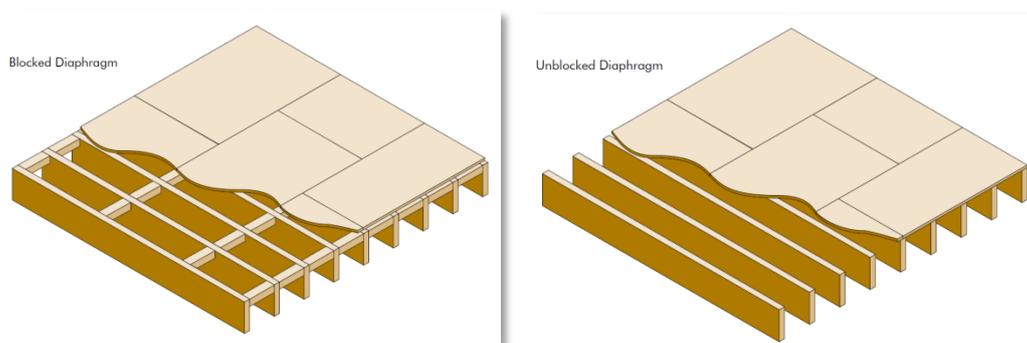
Les Special Design Provisions for Wind and Seismic (SDPWS, 2015) accompagnent les NDS dans un document séparé. Elles traitent en particulier de la conception et de la construction des voiles de contreventement et des diaphragmes vis-à-vis des charges dues au vent et au séisme.

Enfin, le California Building Code (CBC) de la California Building Standards Commission est l'un des codes qui a été intégré dans l'IBC mais qui reste très utilisé dans l'ouest des États-Unis.

Malgré l'existence de tous ces codes, les approches proposées pour la conception et la justification des diaphragmes horizontaux sont basées sur la même méthode.

L'un des intérêts de la méthode proposée est qu'elle fait notamment la distinction entre les diaphragmes dits « bloqués » ou « non bloqués » dont les définitions sont :

- Diaphragme bloqué : diaphragme dont les panneaux sont liaisonnés sur toute leur périphérie
- Diaphragme non bloqué : diaphragme dont les panneaux ne sont liaisonnés qu'au droit des éléments structuraux supports et en périphérie du diaphragme. Les joints non supportés entre panneaux ne sont pas liaisonnés.



*Figure 3-4 : Diaphragme bloqué (gauche) ou non bloqué (droite)*

Pour le schéma de distribution des efforts dans les contreventements, la méthode définit également les notions de diaphragme flexible ou rigide. Un diaphragme sera considéré comme rigide s'il est au moins deux fois plus raide que les contreventements (déformation maxi deux fois plus faible sous le même effort). Sinon, il est considéré flexible.

La méthode proposée s'appuie à la fois sur des calculs analytiques et sur des paramètres dont les valeurs sont tabulées en fonction de la conception du diaphragme choisi. Elle permet de déterminer la déformation du diaphragme (et donc l'hypothèse de diaphragme flexible ou rigide) et sa résistance.

Le calcul de la déformation, notée  $\delta_{dia}$ , tient compte du cumul des déformations dues à la flexion du solivage, au cisaillement des panneaux et au glissement des connexions.

$$\delta_{dia} = \frac{\overset{\text{(bending, chord}}{\underset{\text{deformation}}{\underset{\text{excluding slip)}}{5vL^3}}}}{8EAW} + \frac{\overset{\text{(shear; panel}}{\underset{\text{deformation)}}{vL}}}{4G_v t_v} + 0.188Le_n \overset{\text{(shear; panel}}{\underset{\text{naïl slip)}}{+}} \frac{\overset{\text{(bending, chord}}{\underset{\text{splice slip)}}{\sum(x\Delta_c)}}}{2W}$$

Cette expression est simplifiée par :

$$\delta_{dia} = \frac{5vL^3}{8EAW} + \frac{0.25vL}{1000G_a} + \frac{\sum(x\Delta_c)}{2W}$$

Dans cette expression, le module  $G_a$  est le module de cisaillement apparent du diaphragme. Ce paramètre est donné directement par des valeurs tabulées.

De même, la résistance du diaphragme est directement donnée sous forme de valeurs dans ces tableaux.

Les tableaux de valeurs font référence à différentes mises en œuvre :

- Type de panneaux (OSB ou contreplaqué)
- Type de fixations (pointes seulement)
- Épaisseur des panneaux
- Mode de pose des panneaux (6 cas)
- Diaphragme bloqué ou non bloqué

Les 6 cas de pose sont les suivants :

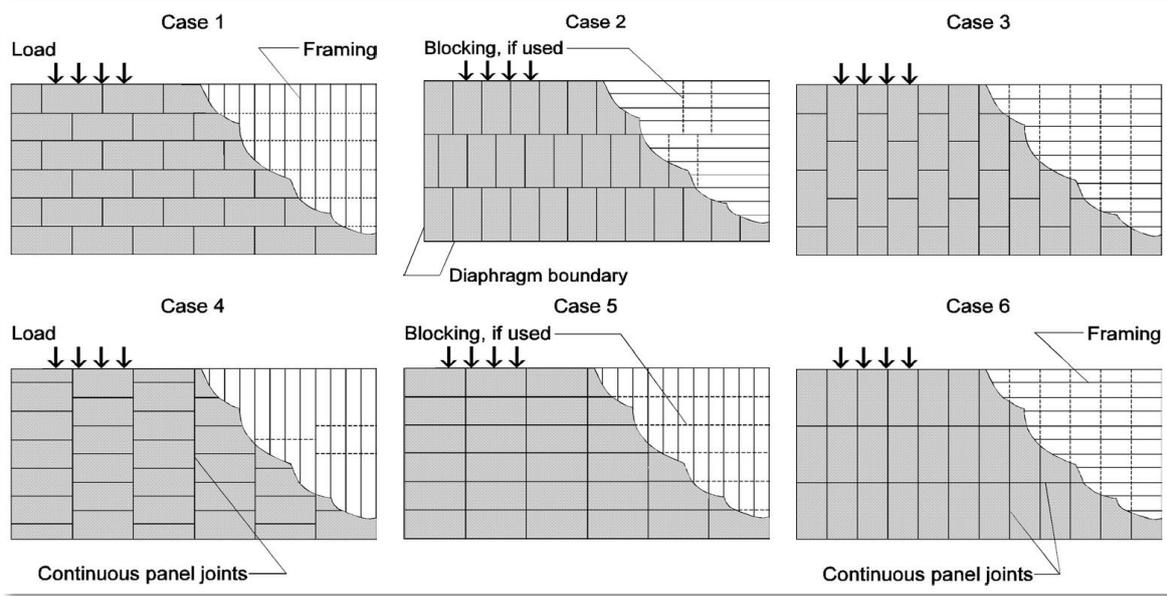


Figure 3-5 : 6 cas de poses retenus

Un tableau de valeurs est également donné pour traiter le cas d'un plancher mis en œuvre avec des lames en bois massif en lieu et place des panneaux.

**Blocked Wood Structural Panel Diaphragms<sup>1,2,3,4</sup>**

Sheathing Grade	Common Nail Size	Minimum Fastener Penetration in Framing Member or Blocking (in.)	Minimum Nominal Panel Thickness (in.)	Minimum Nominal Width of Nailed Face at Adjoining Panel Edges and Boundaries (in.)	A SEISMIC								B WIND								
					Nail Spacing (in.) at diaphragm boundaries (all cases), at continuous panel edges parallel to load (Cases 3 & 4), and at all panel edges (Cases 5 & 6)								Nail Spacing (in.) at diaphragm boundaries (all cases), at continuous panel edges parallel to load (Cases 3 & 4), and at all panel edges (Cases 5 & 6)								
					6		4		2-1/2		2		6		4		2-1/2		2		
					Nail Spacing (in.) at other panel edges (Cases 1, 2, 3, & 4)								Nail Spacing (in.) at other panel edges (Cases 1, 2, 3, & 4)								
					6	6	6	6	3	6	6	4	3	6	6	4	3	6	6	4	3
$v_n$ (plf)	$G_n$ (kips/in.)	$v_n$ (plf)	$G_n$ (kips/in.)	$v_n$ (plf)	$G_n$ (kips/in.)	$v_n$ (plf)	$G_n$ (kips/in.)	$v_n$ (plf)	$G_n$ (kips/in.)	$v_n$ (plf)	$G_n$ (kips/in.)	$v_n$ (plf)	$G_n$ (kips/in.)	$v_n$ (plf)	$G_n$ (kips/in.)	$v_n$ (plf)	$G_n$ (kips/in.)				
Structural I	6d	1-1/4	5/16	3	OSB		PLY		OSB		PLY		OSB		PLY		520	700	1050	1175	
					370	15	12	500	8.5	7.5	750	12	10	840	20	15	590	785	1175	1330	
		420	12	9.5	560	7.0	6.0	840	9.5	8.5	950	17	13	755	1010	1485	1680				
		540	14	11	720	9.0	7.5	1060	13	10	1200	21	15	840	1120	1680	1890				
		600	12	10	800	7.5	6.5	1200	10	9.0	1350	18	13	895	1190	1790	2045				
		720	20	15	960	15	12	1440	16	13	1640	26	18	1010	1345	2015	2295				
	8d	1-3/8	3/8	2	3	OSB		PLY		OSB		PLY		OSB		PLY		475	630	940	1065
						340	15	10	450	9.0	7.0	670	13	9.5	760	21	13	530	700	1065	1205
		380	12	9.0	500	7.0	6.0	760	10	8.0	860	17	12	520	700	1050	1175				
		370	13	9.5	500	7.0	6.0	750	10	8.0	840	18	12	590	785	1175	1330				
		420	10	8.0	560	5.5	5.0	840	8.5	7.0	950	14	10	670	895	1345	1525				
		540	12	9.5	720	7.5	6.0	1080	11	8.5	1220	18	12	755	1010	1510	1710				
Sheathing and Single-Floor	6d	1-1/4	5/16	2	OSB		PLY		OSB		PLY		OSB		PLY		715	950	1415	1610	
					510	14	10	680	8.5	7.0	1010	12	9.5	1150	20	13	800	1065	1585	1805	
		570	11	9.0	760	7.0	6.0	1140	10	8.0	1290	17	12	755	1010	1485	1680				
		540	13	9.5	720	7.5	6.5	1060	11	8.5	1200	19	13	840	1120	1680	1890				
		600	10	8.5	800	6.0	5.5	1200	9.0	7.5	1350	15	11	810	1080	1610	1835				
		580	25	15	770	15	11	1150	21	14	1310	33	18	910	1205	1820	2060				
	8d	1-3/8	3/8	2	3	OSB		PLY		OSB		PLY		OSB		PLY		895	1190	1790	2045
						640	21	14	850	13	9.5	1280	18	12	1460	28	17	1010	1345	2015	2295
		540	12	9.5	720	7.5	6.0	1080	11	8.5	1220	18	12	755	1010	1510	1710				
		510	14	10	680	8.5	7.0	1010	12	9.5	1150	20	13	715	950	1415	1610				
		570	11	9.0	760	7.0	6.0	1140	10	8.0	1290	17	12	800	1065	1585	1805				
		540	13	9.5	720	7.5	6.5	1060	11	8.5	1200	19	13	755	1010	1485	1680				
10d	1-1/2	19/32	3	OSB		PLY		OSB		PLY		OSB		PLY		895	1190	1790	2045		
				640	21	14	850	13	9.5	1280	18	12	1460	28	17	1010	1345	2015	2295		
	600	12	9.5	720	7.5	6.0	1080	11	8.5	1220	18	12	755	1010	1510	1710					
	510	14	10	680	8.5	7.0	1010	12	9.5	1150	20	13	715	950	1415	1610					
	570	11	9.0	760	7.0	6.0	1140	10	8.0	1290	17	12	800	1065	1585	1805					
	540	13	9.5	720	7.5	6.5	1060	11	8.5	1200	19	13	755	1010	1485	1680					

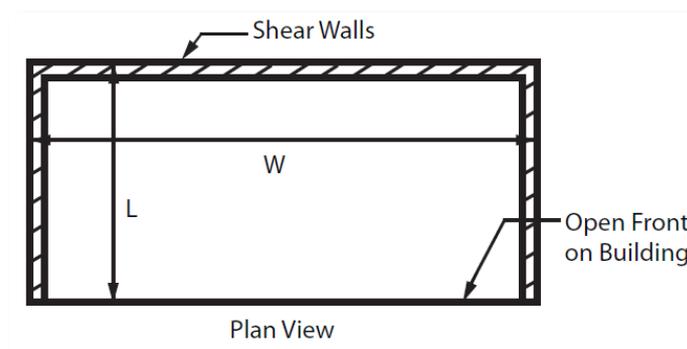
Figure 3-6 : Exemple d'un tableau donnant la résistance et  $G_n$

Il s'agit donc d'une méthode simple d'utilisation mais dont le domaine d'emploi est limité en particulier par un ratio longueur/largeur maximum variant de 2 à 4 selon les types de diaphragmes.

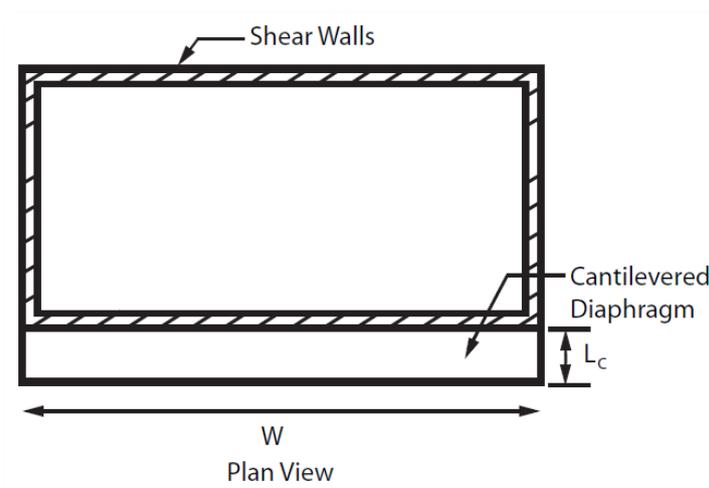
Type de diaphragme	Ratio Longueur/Largeur maxi
Panneaux non bloqués	3
Panneaux bloqués	4
Lames de plancher, pose droite	2
Lames de plancher, pose diagonale	3
Lames de plancher, pose diagonale double couche	4

*Tableau 3-1 : Ratio limite de dimensions des diaphragmes*

De plus, sous réserve de limiter la longueur du diaphragme et son ratio longueur/largeur, il est possible d'étendre la méthode avec l'hypothèse de diaphragme rigide aux d'ouvrages ayant un mur avec une grande ouverture (Figure 3-7) ou utilisant un diaphragme en porte-à-faux (Figure 3-8).



*Figure 3-7 : Structure avec un mur ouvert*

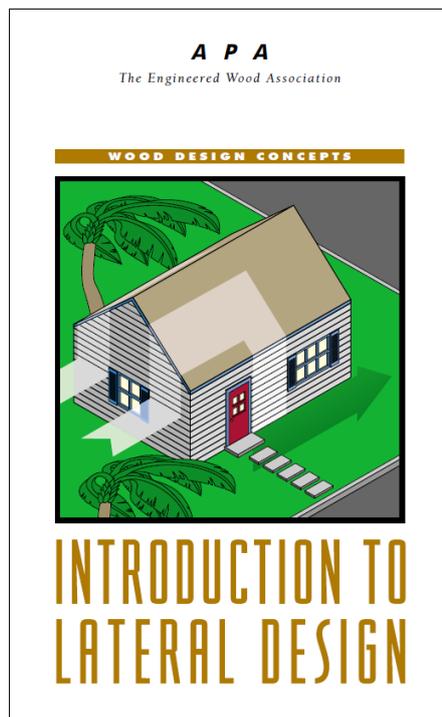


*Figure 3-8 : Diaphragme en porte-à-faux*

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

### 3.4 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.



*Figure 3-9 : Le guide de l'APA*

Il s'agit en fait de la méthode donnée dans les Special Design Provisions for Wind and Seismic (SDPWS) des NDS qui a été exploitée pour produire des tableaux synthétiques regroupant les configurations usuelles.

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.

TABLE 1

DIAPHRAGMS: RECOMMENDED SHEAR (POUNDS PER FOOT) FOR HORIZONTAL APA PANEL DIAPHRAGMS WITH FRAMING OF DOUGLAS-FIR, LARCH OR SOUTHERN PINE<sup>(a)</sup> FOR WIND OR SEISMIC LOADING

Panel Grade	Common Nail Size	Minimum Nail Penetration in Framing <sup>(f)</sup> (inches)	Minimum Nominal Panel Thickness (inch)	Minimum Nominal Width of Framing Member (inches)	Blocked Diaphragms				Unblocked Diaphragms		
					Nail Spacing (in.) at diaphragm boundaries (all cases), at continuous panel edges parallel to load (Cases 3 & 4), and at all panel edges (Cases 5 & 6) <sup>(b)</sup>				Nails Spaced 6" max. at Supported Edges <sup>(b)</sup>		
					6	4	2-1/2 <sup>(c)</sup>	2 <sup>(c)</sup>	Case 1 (No unblocked edges or continuous joints parallel to load)		All other configurations (Cases 2, 3, 4, 5 & 6)
					Nail Spacing (in.) at other panel edges (Cases 1, 2, 3 & 4)				6	3	
APA STRUCTURAL I grades	6d	1-1/4	5/16	2 3	185 210	250 280	375 420	420 475	165 185	125 140	
	8d	1-1/2	3/8	2 3	270 300	360 400	530 600	600 675	240 265	180 200	
	10d <sup>(d)</sup>	1-5/8	15/32	2 3	320 360	425 480	640 720	730 820	285 320	215 240	
APA RATED SHEATHING, APA RATED STURD-I-FLOOR and other APA grades except Species Group 5	6d <sup>(e)</sup>	1-1/4	5/16	2 3	170 190	225 250	335 380	380 430	150 170	110 125	
			3/8	2 3	185 210	250 280	375 420	420 475	165 185	125 140	
	8d	1-1/2	3/8	2 3	240 270	320 360	480 540	545 610	215 240	160 180	
			7/16	2 3	255 285	340 380	505 570	575 645	230 255	170 190	
	10d <sup>(d)</sup>	1-5/8	15/32	2 3	270 300	360 400	530 600	600 675	240 265	180 200	
			19/32	2 3	290 325	385 430	575 650	655 735	255 290	190 215	

(a) For framing of other species: (1) Find specific gravity for species of lumber in AFPA National Design Specification. (2) Find shear value from table above for nail size for Structural I panels (regardless of actual grade). (3) Multiply value by 0.82 for species with specific gravity of 0.42 or greater, or 0.65 for all other species. See footnote (f).

(b) Space nails maximum 12 in. o.c. along intermediate framing members (6 in. o.c. when supports are spaced 48 in. o.c.).

(c) Framing at adjoining panel edges shall be 3-in. nominal or wider, and nails shall be staggered where nails are spaced 2 inches o.c. or 2-1/2 inches o.c.

(d) Framing at adjoining panel edges shall be 3-in. nominal or wider, and nails shall be staggered where 10d nails having penetration into framing of more than 1-5/8 inches are spaced 3 inches o.c.

(e) 8d is recommended minimum for roofs due to negative pressures of high winds.

(f) Contact APA for engineered alternative.

**Notes:** Design for diaphragm stresses depends on direction of continuous panel joints with reference to load, not on direction of long dimension of sheet. Continuous framing may be in either direction for blocked diaphragms.

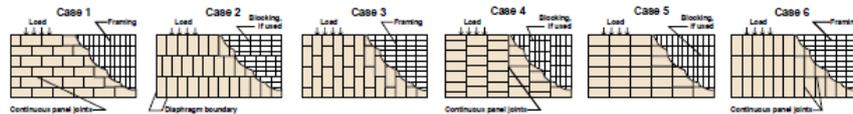


Figure 3-10 : Exemple d'un tableau du guide APA

### 3.5 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.

Cette méthode analytique se déroule en trois étapes :

1. les efforts dans le diaphragme sont calculés selon une méthode simplifiée pour l'étude des diaphragmes sans ouverture,
2. le diaphragme avec ouverture est analysé, en supposant que celui-ci se comporte comme une poutre de Vierendeel, pour déterminer la variation des

- efforts de cisaillement et des efforts normaux entre un diaphragme sans ouverture et un diaphragme avec ouverture,
- la résultante des efforts dans le diaphragme est calculée par superposition des efforts obtenus aux étapes 1 et 2.

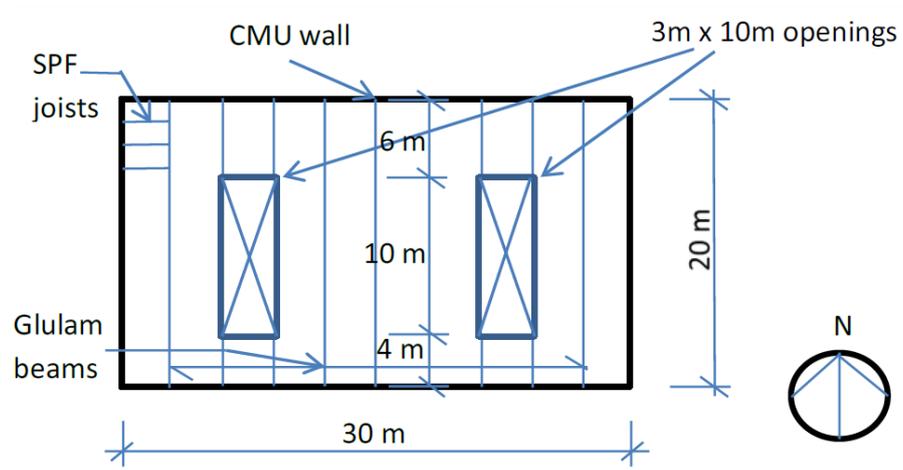


Figure 3-11 : Exemple d'un cas pouvant être traité

La méthode simplifiée pour déterminer les efforts dans le diaphragme sans ouverture consiste, comme dans l'Eurocode 5, à considérer le diaphragme comme une poutre géante sur deux appuis et supportant un chargement uniformément réparti.

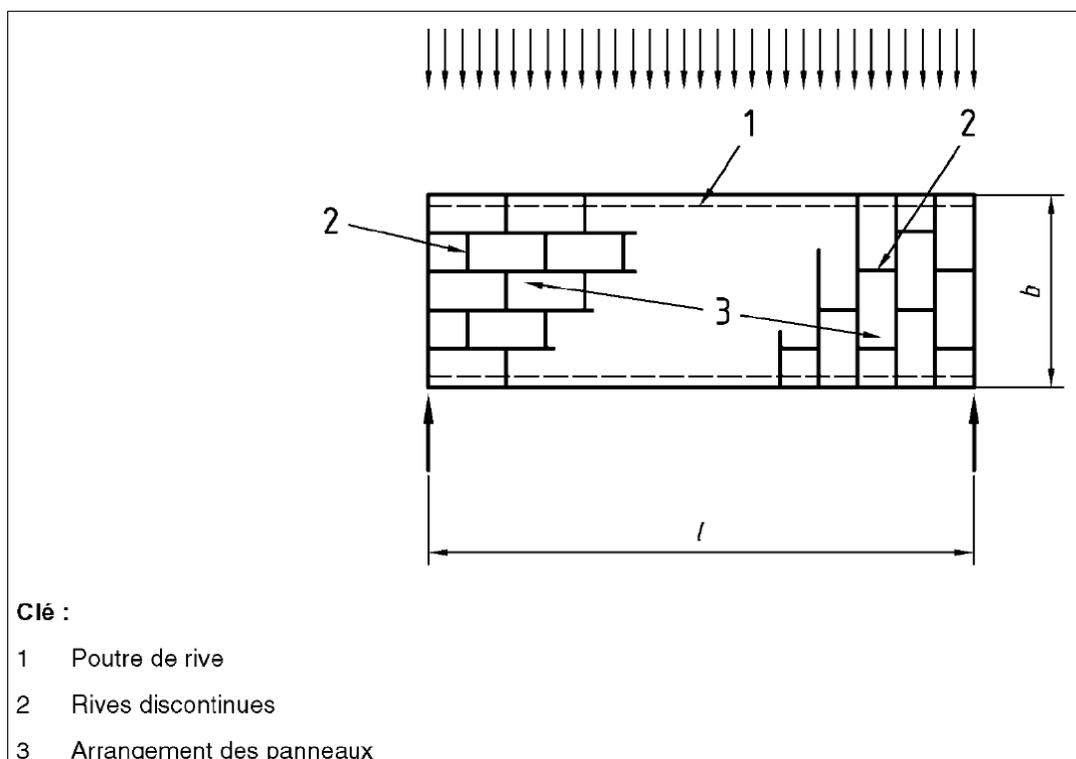
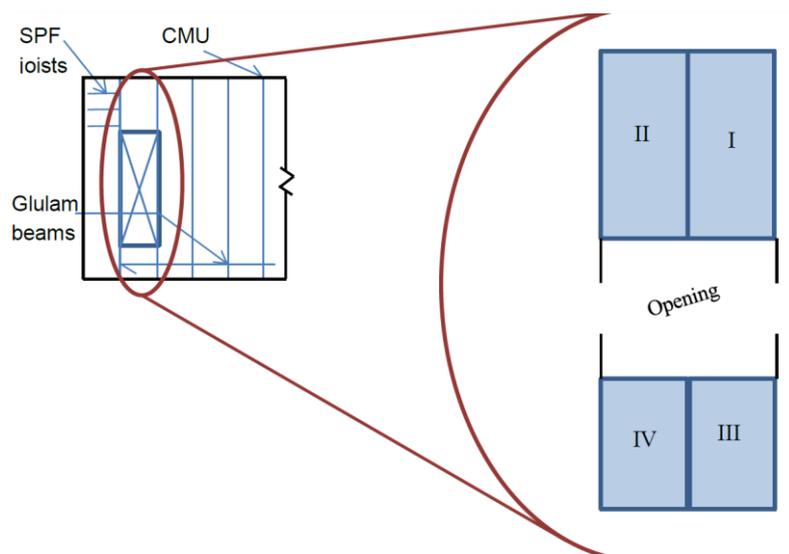


Figure 3-12 : Méthode simplifiée de chargement du diaphragme sans ouverture

On réalise ensuite l'analyse statique du diaphragme avec ouverture en le découpant en segment sans ouverture en supposant l'existence d'un point de moment nul au milieu des éléments situés dans l'âme du treillis de Viereendeel.

De plus, on suppose que la raideur des différents segments est proportionnelle à la dimension de cet élément dans la direction de chargement. On fait ainsi l'hypothèse que l'effort de cisaillement se répartit sur les différents segments en fonction de leur raideur respective.



*Figure 3-13 : Découpage en segments autour des ouvertures*

Au droit des ouvertures, cette analyse conduit à des variations d'efforts de traction/compression dans le diaphragme. Cette variation d'efforts normaux induit des efforts de cisaillement supplémentaires qui doivent être transmis aux panneaux formant le diaphragme par l'intermédiaire des fixations (Figure 3-14 et Figure 3-15).

Par superposition des efforts de cisaillement obtenus par la méthode simplifiée d'analyse du diaphragme sans ouverture et par l'analyse avec ouverture, on détermine la résultante de cisaillement unitaire à reprendre par les connexions (Figure 3-16 Figure 3-16 : Superposition des cisaillements).

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.

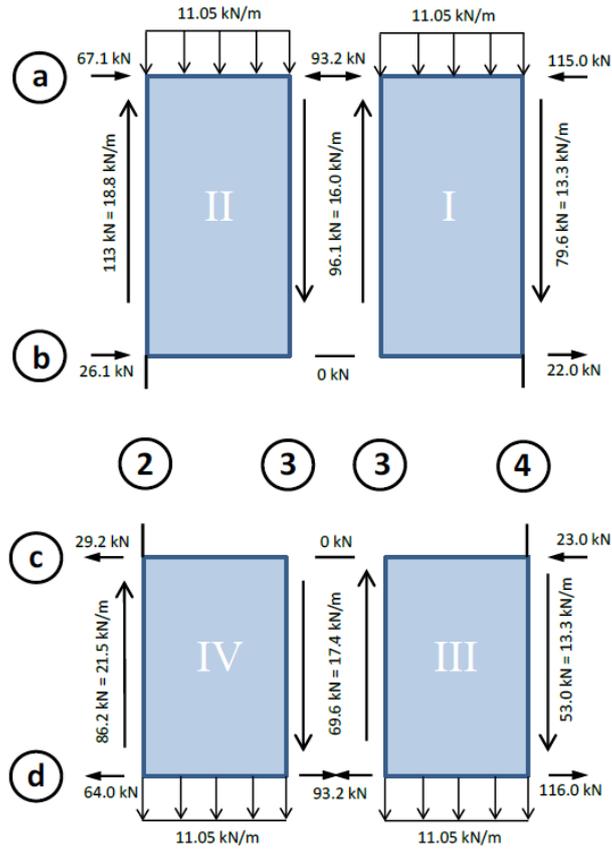


Figure 3-14 : Analyse du diaphragme avec ouverture

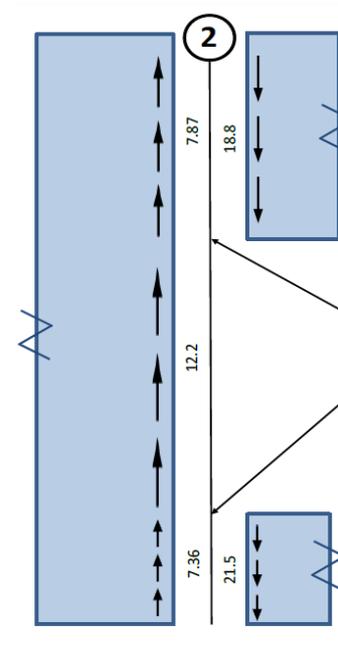


Figure 3-15 : Cisaillements induits

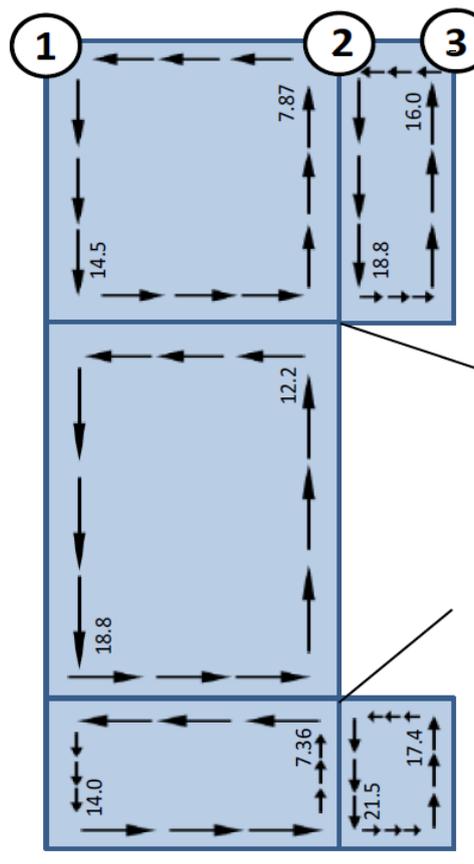


Figure 3-16 : Superposition des cisaillements

### 3.6 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.

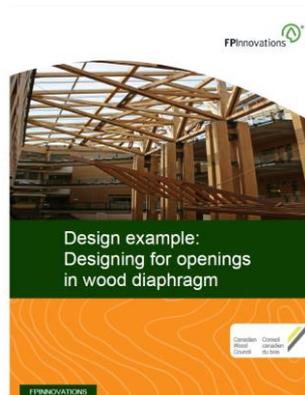


Figure 3-17 : Guide du Conseil Canadien du Bois

En complément de la méthode d'analyse, il propose une aide à la décision concernant la nécessité (ou pas) de prendre en compte les ouvertures dans le diaphragme.

Les principaux points sont :

- l'introduction d'ouvertures augmente le cisaillement dans le diaphragme. Cette augmentation peut être réduite de façon significative en augmentant la distance entre l'ouverture et le bord du diaphragme.
- Des efforts de tension se développent dans les angles des ouvertures, pouvant nécessiter la mise en œuvre de renforts pour distribuer ces efforts dans les panneaux où les éléments supports sont discontinus.
- Il est fortement recommandé de réaliser l'analyse du diaphragme avec ouverture, sauf si les conditions suivantes sont satisfaites :
- Chaque dimension de l'ouverture ne dépasse pas 15% de la dimension associée du diaphragme ;
- La distance entre le bord du diaphragme et l'ouverture la plus proche est au minimum de 3 fois la dimension de la plus grande ouverture ;
- Les segments sans ouverture du diaphragme (entre l'ouverture et le bord du diaphragme) satisfont à l'exigence maximale de ratio longueur/largeur des SDPWS.

De plus, une annexe présente un tableau synthétique montrant l'impact d'une ouverture sur les efforts de cisaillement induit dans le diaphragme.

		Depth ratio of opening							
		0.05	0.10	0.15	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60
Chord forces (ratio to maximum at mid-span)	F2 (@ A & D)	0.65	0.64	0.63	0.63	0.61	0.58	0.54	0.48
	F4 (@ A & D)	0.86	0.86	0.87	0.88	0.89	0.91	0.94	0.98
Forces in the framing members bordering the opening (kN)	F2 - perp	19.79	20.37	21.02	21.75	23.53	25.90	29.21	34.19
	F4 - perp	13.58	14.16	14.81	15.54	17.31	19.68	23.00	27.97
	F2 - para	25.36	27.30	29.47	31.91	37.83	52.07	65.47	73.34
	F4 - para	5.51	12.06	18.39	24.45	35.52	44.61	50.55	50.97
Max. shear in diaphragm (ratio to w/o opening)		1.14	1.14	1.14	1.14	1.14	1.17	1.30	1.50

*Tableau 3-2 : Influence de l'ouverture sur le cisaillement dans le diaphragme*

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.

### 3.7 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 des textes normatifs. Elle est difficilement intégrable dans un texte normatif en l'état.

## 4. Les principaux thèmes d'études

### 4.1 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 présentent les diaphragmes de planchers en bois, un nombre limité des campagnes expérimentales ont été réalisés afin 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.

### 4.2 Étude 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.

Les deux planchers testés ont des dimensions de 2,4 x 7,2 m<sup>2</sup> chacun. Les matériaux utilisés ainsi que la technique de construction considérée, correspondent à ce qui est couramment utilisé dans les constructions en bois. La conception des planchers respecte les prescriptions de la NF EN 1995-1-1. Cependant, pour l'un des planchers, l'exigence d'entretoises en limite de panneaux n'est pas respectée.

Les entretoises sont connectées aux solives par l'intermédiaire de clous lardés et la connexion panneaux-solives est réalisée avec des pointes de 80mm de longueur tous les 100 mm.

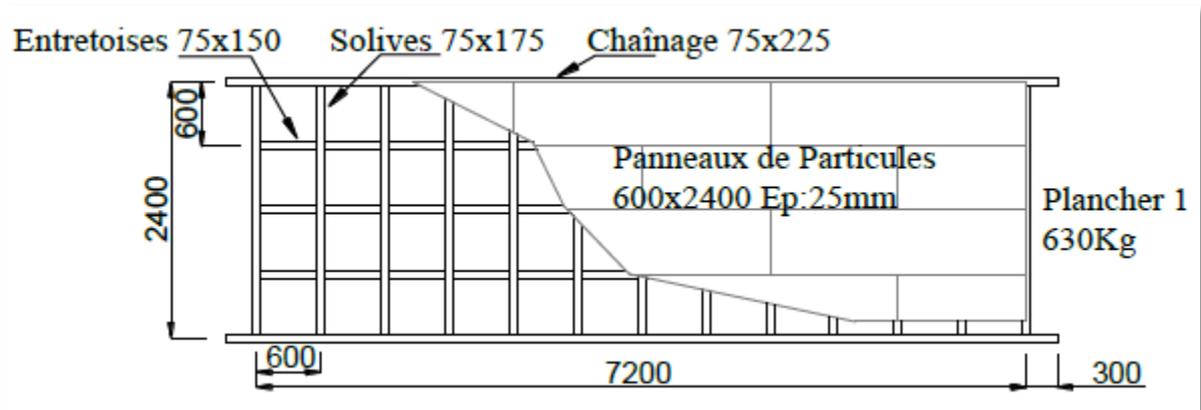
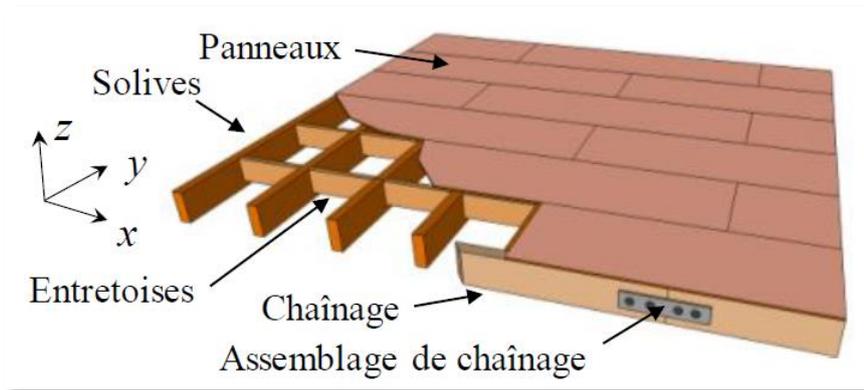


Figure 4-1 : le plancher avec entretoise

Pour cette étude, les expériences conduites sur les planchers ont consisté en des essais de flexion « quatre points » avec un chargement cyclique sur la base de la norme NF EN 12512. La charge est appliquée en deux points placés à 0,6 m de la mi-portée du plancher. L'instrumentation a permis de mesurer la charge appliquée au plancher, les déplacements dans et hors plan de ce plancher.

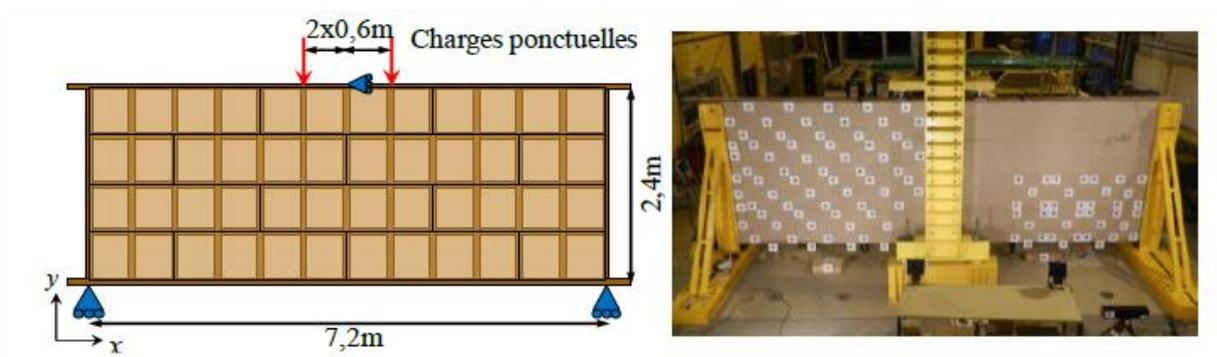


Figure 4-2 : Essais réalisés

Il en ressort que le plancher avec entretoises présente une raideur initiale 2,3 fois plus élevée que celle du plancher sans entretoises. La limite élastique du plancher avec entretoises est 4,7 fois plus importante que celle du plancher sans entretoise.

Une comparaison avec l'approche analytique utilisée en Amérique du Nord (précédemment présentée au paragraphe 3.3) est également proposée.

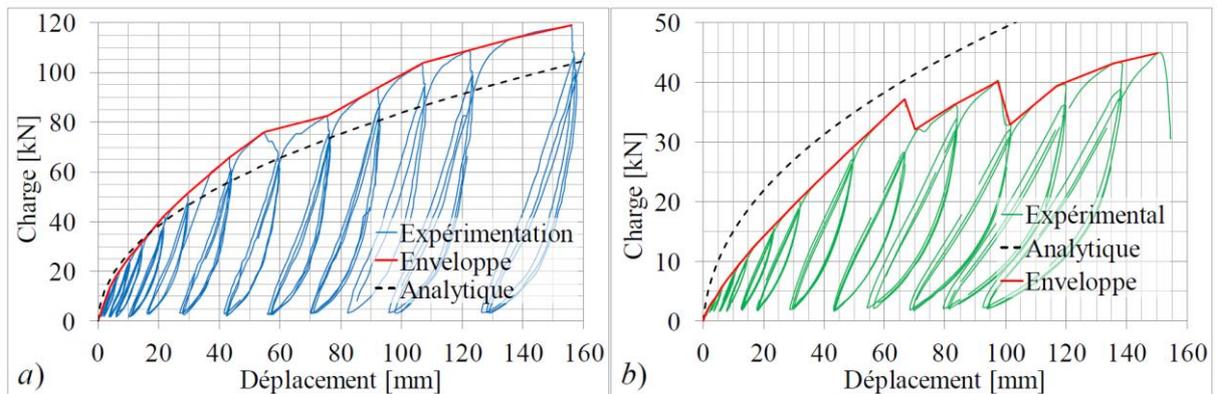


Figure 4-3 : Résultats expérimentaux avec entretoise (gauche) et sans entretoise (droite)

Dans le cas du plancher avec entretoises, l'application de l'approche analytique montre une importante différence par rapport aux valeurs expérimentales. Lors des faibles chargements, cette approche sous-estime le déplacement du plancher. Puis, au contraire, lors des forts chargements, les déplacements calculés sont plus importants. Ainsi, en termes de rigidité sécante, cette méthode montre une différence que varie entre +100% et -16%.

Dans le cas du plancher sans entretoise, le calcul analytique surestime la résistance par un facteur qui varie entre 2,6 et 1,2. Ces résultats mettent en évidence la difficulté de cette méthode pour traduire le comportement non-linéaire des planchers.

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.

### 4.3 Étude expérimentale sur diaphragme avec ouverture

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

L'objectif de cette étude est d'évaluer les effets des différents paramètres de construction du diaphragme sur sa rigidité. En effet, il n'existe quasiment aucune étude expérimentale traitant de l'influence des irrégularités du plancher telles que la géométrie asymétrique et les ouvertures ou les différences de position du centre de rigidité.

Plusieurs configurations de planchers en échelle réelle ont été testées en flexion « 3 points ».

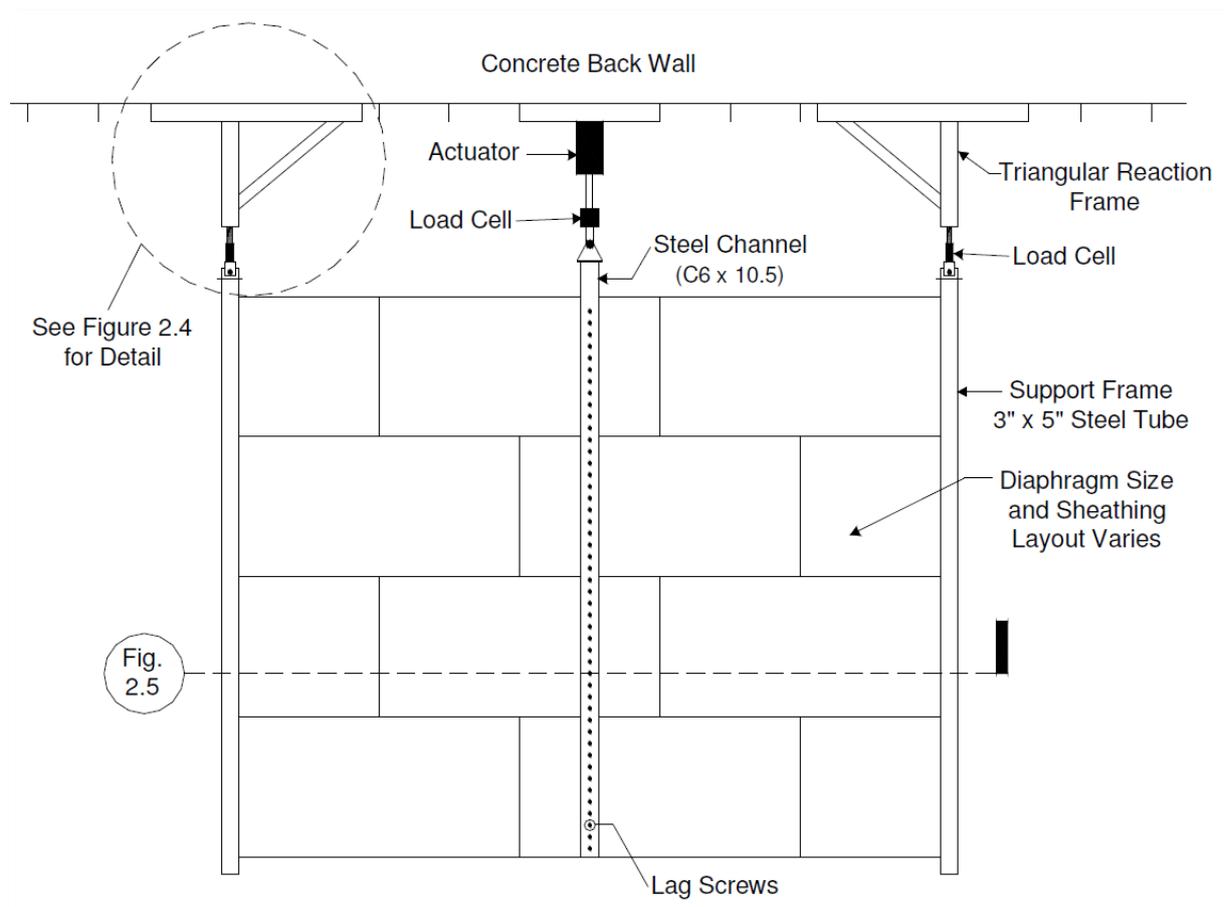
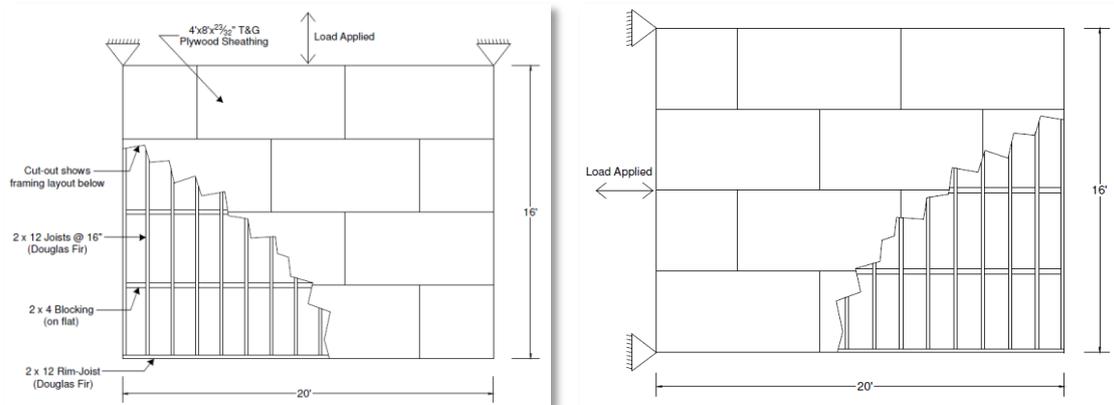


Figure 4-4 : le bâti d'essai

Deux dimensions de planchers ont été retenues. Des planchers de 5 x 6 m environ, avec et sans ouverture, ont été testés dans les deux directions (sens des solives et perpendiculairement aux solives), ainsi que des planchers à fort élancement de 3 x 12 m.



*Figure 4-5 : Les planchers de 5 x 6 m sans ouverture*



*Figure 4-6 : Plancher de 5 x 6 m avec ouverture*



*Figure 4-7 : Plancher de 5 x 6 m avec ouverture centrale*

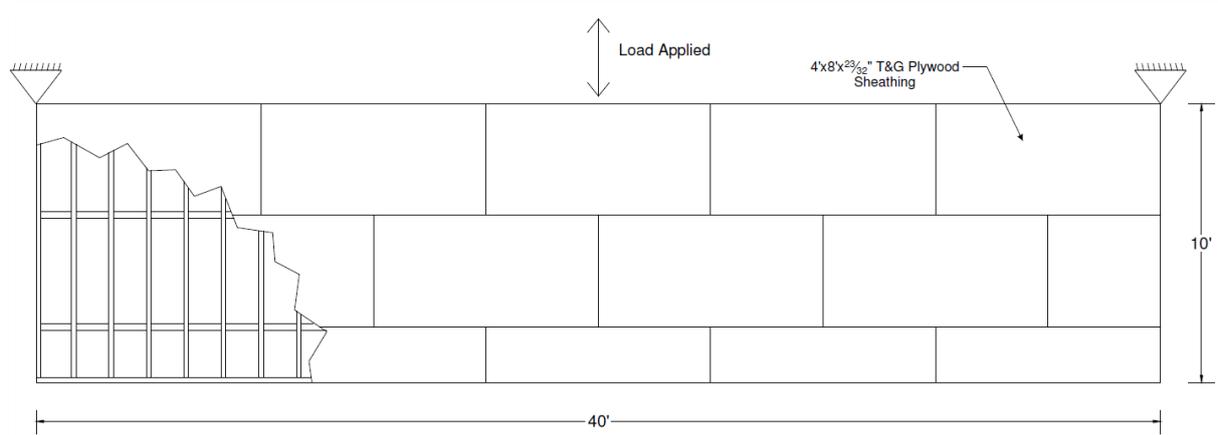


Figure 4-8 : le plancher de 3 x 12 m

Les paramètres variant entre 2 (ou 3) états sont :

- Ouverture : sans, dans le coin ou centrale
- Solives périphériques avec ou sans joint de continuité
- Panneaux montés « bloqués » ou « non bloqués » (entretoises)
- Panneaux collés aux solives ou pas
- Espacement des pointes : 150 mm ou 75 mm

Le tableau suivant présente une synthèse des effets de chacun des paramètres. Les pourcentages expriment la différence observée entre 2 « états » d'un paramètre. Par exemple, le paramètre « panneaux bloqués ou non bloqués » conduit à une différence de 135% sur la rigidité du diaphragme en cisaillement.

Construction Parameter	Average Percent Difference			
	Equivalent Viscous Damping	Cyclic Stiffness	Shear Stiffness	Flexural Stiffness
Blocking	-49%	72%	135%	12%
Adhesive	-41%	47%	89%	10%
Blocking & Adhesive	-67%	106%	259%	5%
3-12 Nail Pattern	-16%	25%	37%	7%
Chords	-5%	40%	8%	154%
Walls	0%	19%	5%	54%
Center Opening	19%	-30%	-37%	-12%
Corner Opening	5%	-21%	Full Side	Opening Side
			4%	-48%

Tableau 4-1 : Synthèse des résultats

On note que les paramètres les plus influents sont :

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

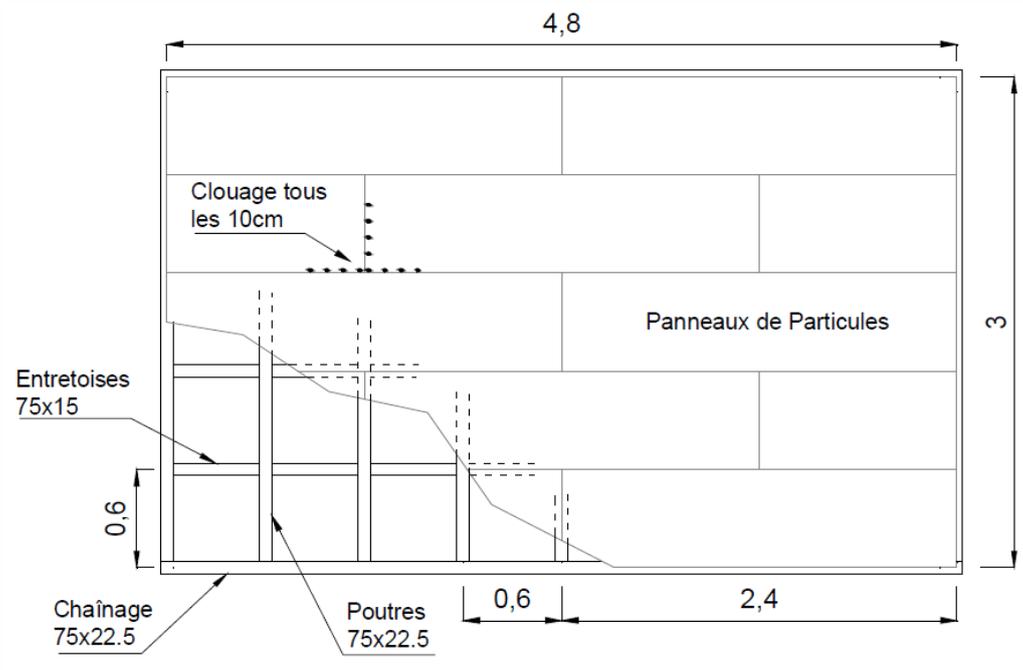
On note également que pour la configuration avec ouverture, son influence sur la partie « non ouverte » est relativement faible (4%).

#### 4.4 Étude 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.

Les diaphragmes peuvent présenter des comportements flexibles ou rigides ; le transfert des efforts de flexion et de torsion est largement influencé par l'éventuelle semi-rigidité des diaphragmes. Pour pouvoir classer le diaphragme en rigide ou flexible, il convient de pouvoir prendre en compte tous les facteurs qui contribuent à la déformation du diaphragme, comme les sollicitations de flexion et cisaillement dans le plan, la semi-rigidité de connexion, la discontinuité des composants et les trémies. Une simulation numérique par éléments finis permet de considérer les différents comportements élémentaires des composants d'un plancher-diaphragme avec un grand nombre de configurations géométriques et constitutives. Dans ce travail, le concept de modélisation des diaphragmes est présenté avec des éléments de validation et quelques exemples d'application. Les modèles présentés permettent de prendre en compte des phénomènes complexes comme le comportement non-linéaire des liaisons et le transfert d'effort par contact entre composants.

Le plancher type qui a été modélisé est le suivant :



*Figure 4-9 : Plancher modélisé*

Dans le but de déterminer l'influence des facteurs qui ne sont pas pris en compte dans les modèles analytiques pour le calcul de la rigidité des planchers-diaphragmes, des modèles numériques (éléments finis) de plus en plus complexes ont été développés.

Lors que seules les déformations élastiques par moment fléchissant et par effort tranchant sont considérées, la comparaison des résultats analytiques (calcul selon la méthode US présentée précédemment) et numériques en considérant l'évolution de la flèche à mi-portée montrent une très bonne corrélation.

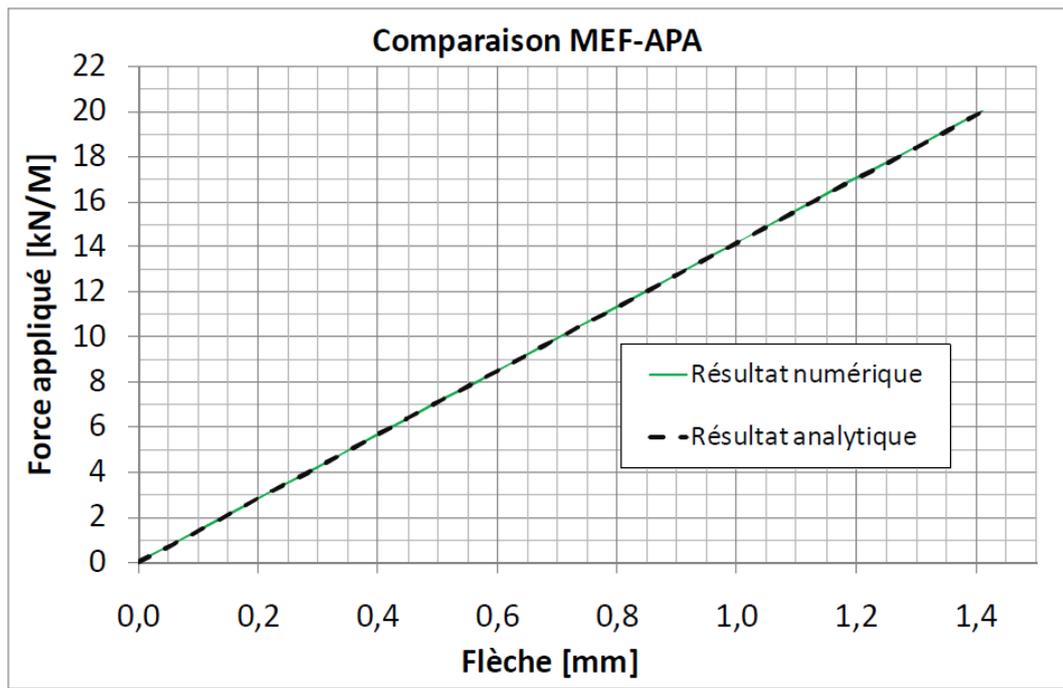


Figure 4-10 : Comparaison Modélisation « simple » / calcul analytique

Puis, l'effet de la semi-rigidité et de la non-linéarité de la connexion entre les panneaux et les solives a été intégré. Pour cela, un modèle élémentaire de connexion représentée par un clou en cisaillement est calé sur des résultats expérimentaux.

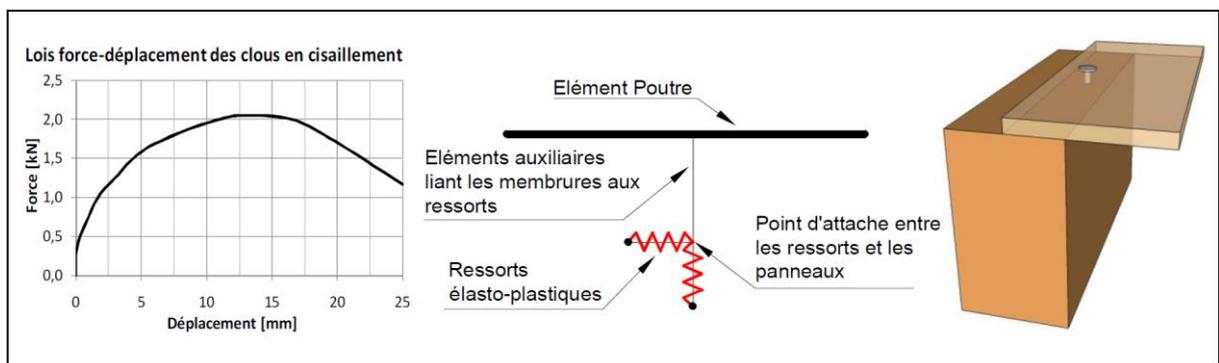


Figure 4-11 : Modélisation des connexions panneaux / solives

Une nouvelle comparaison est réalisée. On observe alors que la méthode analytique surestime la rigidité du diaphragme.

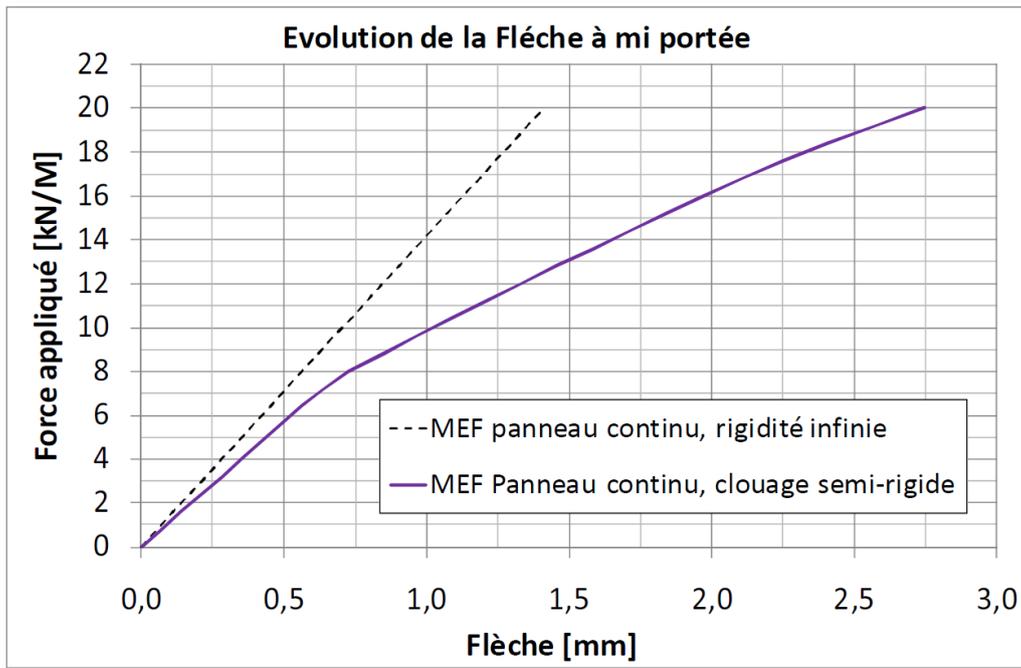


Figure 4-12 : Comparaison modèle avec « connexions semi-rigides » / calcul analytique

Enfin, un troisième modèle numérique a été développé afin de prendre en compte également l'effet des discontinuités des panneaux. Pour cela, il a été considéré en plus plusieurs panneaux disposés en quinconce dont le contact entre extrémités a été intégré dans le modèle.

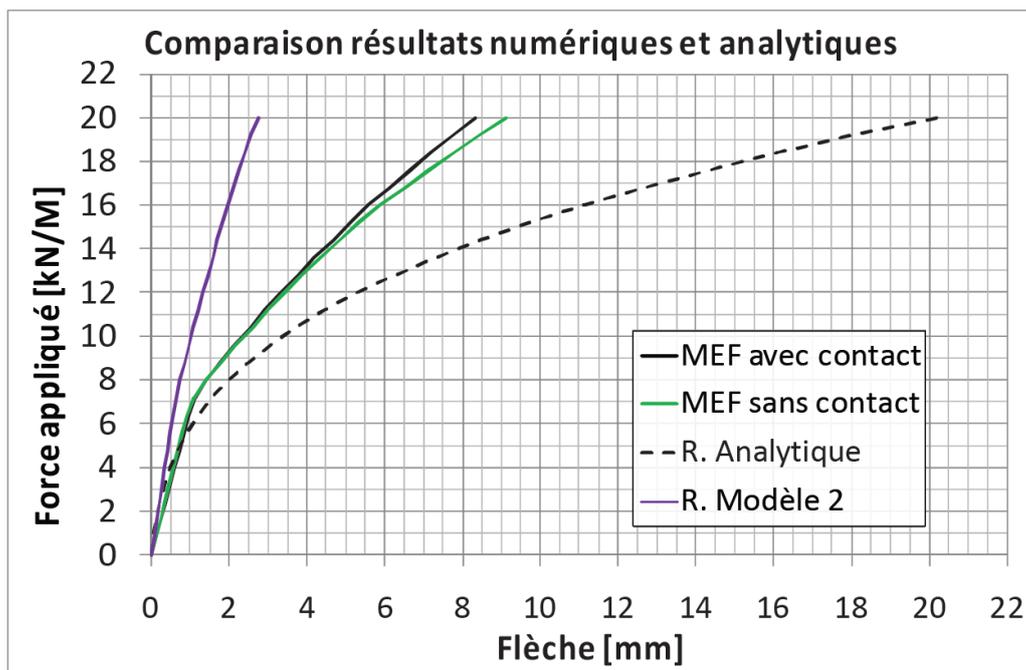


Figure 4-13 : Comparaison modèle avec « contact panneaux » / calcul analytique

On observe que la prise en compte des discontinuités des panneaux se traduit par une diminution de la rigidité d'environ 40% à 70%.

Enfin, à partir du dernier modèle, plusieurs planchers ont été modélisés dont la différence résidait dans le calepinage des panneaux.

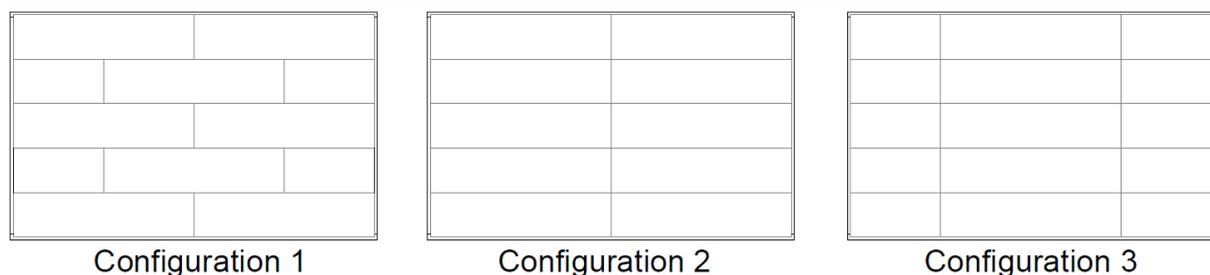


Figure 4-14 : 3 calepinages modélisés

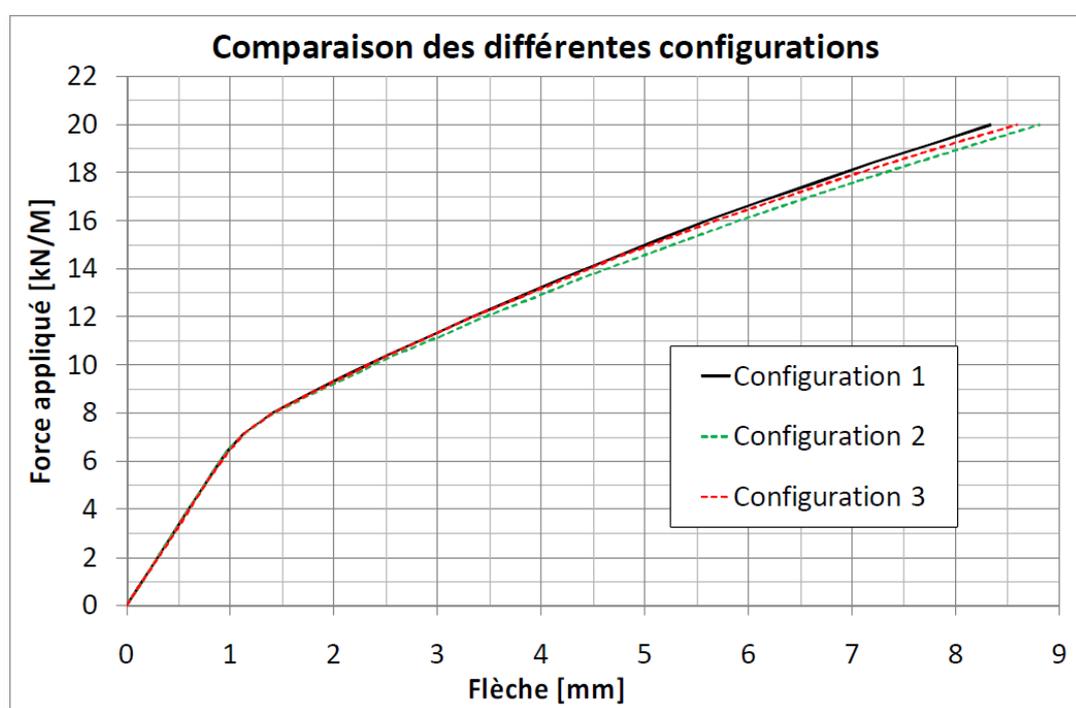


Figure 4-15 : comparaison des 3 calepinages de panneaux

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.

## 5. Conclusion

### 5.1 Synthèse

Cette étude bibliographique permet de confirmer que l'on retrouve soit des règles extrêmement simplifiées encore limitée 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 ouvertures.

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 difficile à réaliser avec des moyens analytiques simples actuellement.

Des méthodes analytiques simplifiées prennent en compte quelques-uns de ces paramètres, mais elles sont applicables à un nombre réduit de configurations de planchers avec des paramètres pas toujours connus ; Les méthodes existantes, non normalisés 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, l'approche est très complexe.

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.

### 5.2 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 géométrie variable et avec ou sans ouverture
- 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 :

### **Étude expérimentale de diaphragme de planchers à géométrie variable et 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 ouverture 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.

# ANNEXE

---

## Liste bibliographique avec résumés

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

## **NF EN 1995-1-1 – Eurocode 5 – Conception et calcul des structures en bois – Partie 1-1 : Généralités – Règles communes et règles pour les bâtiments**

### **International Building Code (IBC)**

*International Code Council, Inc., USA*

### **National Design Specifications (NDS) for Wood Construction**

*American Wood Council, USA*

### **Special Design Provisions for Wind and Seismic (SDPWS)**

*American Wood Council, USA*

### **California Building Code (CBC)**

*California Building Standards Commission, USA*

### **Design example: Designing for openings in wood diaphragm**

*Conseil Canadien du Bois, Canada*

### **Corotational model for cyclic analysis of light-frame wood shear walls and diaphragms**

This paper presents a new two-dimensional shear-wall and diaphragm model developed as part of a Network for Earthquake Engineering Simulation (NEES) Project entitled NEES-Soft: Seismic Risk Reduction for Soft-Story Woodframe Buildings. A large portion of the older multistory buildings in the California region were constructed with a deficiency that makes them vulnerable to collapse in the first story during earthquakes. This deficiency is referred to as soft-story. The new model presented in this paper was developed using a corotational formulation, which makes it suitable for modeling the side-sway collapse of wood shear walls under large displacement as well as estimating the in-plane stiffness of floor diaphragms. To achieve high computational efficiency, a nodal condensation technique is used to eliminate the degrees of freedom (DOFs) associated with the nail connections from the global DOFs of the model. To verify the validity of the new model, the model was coded into a computer program and was used to analyze selected shear walls and diaphragms tested by various institutions and research programs. Good agreement was observed between the test and model-predicted backbone and cyclic curves for shear walls with various gravity loads and different anchorage conditions. The model is highly flexible and has been shown to be able to model older shear wall construction with horizontal sheathing boards and diagonal bracings.

*Pang W., Shirazi S.M.H.*

*Glenn Dept. of Civil Engineering, Clemson Univ., Clemson, SC 29634-0911, United States*

*Journal of Structural Engineering (United States), vol. 139, N°8, 2013, pp.1303-1317, Pang W., Shirazi S.M.H.*

### **Experimental analysis of timber diaphragm's capacity on transferring horizontal loads in timber-steel hybrid structure**

Timber-steel hybrid structure with steel moment resisting frame and timber floor is a good and novel type of construction in seismic zone because of its light weight. In seismic analysis, timber diaphragm is classified as either flexible or rigid diaphragm for purpose of horizontal shear force distribution depending on its in-plane stiffness, which influences structural load bearing capacity and deformation and the method by which lateral load is transferred from diaphragm to steel frame. The diaphragm shear forces shall be distributed to the vertical resisting elements based on tributary area when it is defined as flexible and on lateral stiffness of the vertical resisting elements of the bottom frame when it is rigid. Aiming to understand in-plane stiffness of timber diaphragm and its capacity on distributing horizontal loads to single frame in timber-steel hybrid structures, an pseudo-static experiment about a one-story two-span steel frame with light frame wood diaphragm under lateral force was conducted . This paper presents the test details and analysis results, which would be beneficial to studying seismic performance of timber-steel hybrid structure.

*Ma Z., He M.*

*Department of Building Engineering, Tongji University, Siping Road 1239, Shanghai, China*

*World Conference on Timber Engineering 2012, WCTE 2012, vol. 5, N°, 2012, pp.424-429, Ma Z., He M.*

### **Experimental study on shear behavior of thick structural plywood sheeted floor framing with opening**

A horizontal framing in a timber structure must keep a vertical load, but also have in-plane stiffness and strength in order to let a horizontal resistance element such as the bearing wall works effectively. In this study, it's intended that we grasp and evaluate the shear property of a thick structural plywood floor with/without floor opening. The thick plywood is used without joist for floor that is effective for the security of stiffness and strength. At first we carried out shear experiments on floor with/without floor opening, and grasped a shear property of them. In addition, we executed tension and bending test of beam-beam joint, shear test of plywood nail, shear test of structural plywood unit wall and grasped a property of those mechanical properties. Furthermore, we suggested evaluation method for shear stiffness and strength of floor with/without floor opening and showed the validity of it.

*Sakata H., Nakano S., Suzuki K., Itoh H., Fujishiro A., Ohguchi H.*

*Struct. Eng. Res. Center, Tokyo Institute of Technology, Japan; Building Design Division, Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd., Japan; Graduate Tokyo Institute of Technology, Japan; Technological Development Division, NCN Co., Ltd., Japan*  
*Journal of Structural and Construction Engineering, vol. 77, N°672, 2012, pp.231-238, Sakata H., Nakano S., Suzuki K., Itoh H., Fujishiro A., Ohguchi H.*

### **The seismic performance in diaphragm plane of multi-storey timber and concrete hybrid structure**

The timber and concrete hybrid structure is constructed by concrete frame and light frame wood diaphragm and roof system, which is suitable for multi-storey buildings. In this paper, based on the deformation characteristic of wood diaphragm under lateral load, diagonal elastic springs were used to simulate the in-plane stiffness of wood diaphragm in order to simplify the structural modeling. Sap2000 was used to set up three different numerical structural models for a 6-storey hybrid building, including simplified wood diaphragm model, rigid floor model and flexible floor model. These models were analyzed with response spectrum model analysis method under frequent earthquake and time history method under rare earthquake. At last, two design plans for a 6-storey building, one with wood diaphragm, the other with concrete floor, were compared. Results showed that, the lateral forces and the displacement of the concrete frame with the wood diaphragm model lay between rigid floor model and flexible model; using wood diaphragm could maximally lower down the load of seismic and the foundation cost.

*He M., Li S., Guo S., Ni C.*

*Department of Building Engineering, Tongji University, China; China Architecture Design and Research Group, China; FPIInnovations, Canada*

*Procedia Engineering, vol. 14, N° 2011, pp.1606-1612, He M., Li S., Guo S., Ni C.*

### **Experimental study on lateral stiffness of wood shear walls and diaphragms**

14 wood shear walls and 2 diaphragms were tested. The specimens were made according to common light frame wood engineering practices in China. All the specimens were tested under monotonic load protocol. Finite element analysis was executed to extend study of the shear walls. Furthermore, a method for calculating lateral stiffness based on displacements was provided. The studies verified that the lateral stiffness and strengths of shear walls were proportion to the lengths. The lateral stiffness and strengths of perforated and gypsum board sheathed shear walls were studied, and the methods to improve stiffness and strengths of the walls were compared. The stiffness and strengths of unblocking floor diaphragm were studied. It is found that sheathings of diaphragm transfer shear loads and most moment loads, while the maximum slips of sheathing-to-framing joints of diaphragm were found in unblocking edges of sheathings in corner areas. Some other useful conclusions were also obtained in the study.

*Chen S., Fan C., Wang H.*

*School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China*

*Zhongshan Daxue Xuebao/Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, vol. 50, N°4, 2011, pp.42-49, Chen S., Fan C., Wang H.*

### **Experimental study on full scale light frame wood house under repeated lateral load**

In order to obtain a deeper understanding of the behavior of the structure under high wind load, this paper conducted an experimental study on a full-scale L-shaped single story light frame wood house under the uniform lateral load simulated using a gasbag. The investigation involved the performance of light frame wood structure after it experienced the repeated cyclic lateral wind load as well as the performance

of the structure under the ultimate lateral load. Then, the study verified that light frame wood structure can resist repeated cyclic wind loads without observable degradation in stiffness during the anticipated service life, and recommended shear wall percent drift restriction for lateral wind load design of wood structure in serviceability limit states is 1/400 drift, and in ultimate limit states is 1/80 drift. The conclusions of this paper can be benefit for the engineering practice of the light frame wood structures in high wind load regions.

*Chen S.-L., Wang H.-D., Fan C.-M., Pan J.-L.*

*School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China*

*Journal of Harbin Institute of Technology (New Series), vol. 18, N°3, 2011, pp.125-130, Chen S.-L., Wang H.-D., Fan C.-M., Pan J.-L.*

### **A beam-spring analog model for seismic analysis of semi-rigid wood diaphragms**

This paper presents a beam-spring analog model for use in seismic analysis of wood diaphragms in North American style light-frame wood construction. A roof or floor diaphragm in a wood building generally spans across multiple lateral force resisting elements (shear walls). The diaphragm serves as a horizontal beam that distributes forces to the shear walls. In seismic design, the wood diaphragm is commonly assumed to be either completely flexible or completely rigid. Strictly speaking, the behavior of a wood diaphragm is neither flexible nor fully rigid. Full-scale shake table tests of a two-story woodframe structure have confirmed that roof and floor diaphragms are semi-rigid. This paper examines the effect of diaphragm flexibility on shear wall deflections by considering the in-plane stiffness of the diaphragm to be semi-rigid. A beam-spring analog model is used to represent the diaphragm-shear wall system where the shear walls are modeled as springs and the diaphragm is modeled as an analog beam which acts as a load distribution mechanism. The resulting load sharing among the shear walls is examined and possible application of the beam-spring model to seismic design of wood-frame structures is discussed.

*Pang W.C., Rosowsky D.*

*Department of Civil Engineering, Clemson University, 100 Lowry Hall, Clemson, SC 29634-0911, United States; Department of Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, 110 8th St., Troy, NY 12180, United States*

*11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010, vol. 4, N°, 2010, pp.3377-3384, Pang W.C., Rosowsky D.*

### **Calculation method for rigidity and strength of roof diaphragm and experimental verification**

This report shows calculation method for rigidity and strength of roof with plywood in Japanese post and beam construction. Roof structure deformation mechanism was modelled based on force resistance action of structure members and its joints. Equations for rigidity, yield point and ultimate deformation angle were proposed. In order to verify the equations, shear roof test were examined. Test parameter were kind of roof angle, with or without blocking. Though roof rigidity and strength value per the roof length are set in the housing quality assurance act in Japan, it was confirmed tested specimens have enough values for those. From joint element test, joint of floor joist and beam, load-deformation curves were obtained. These curves were used for proposed calculation for rigidity and strength of roof structure.

Calculated result comparing with tested one, both of them had a good coincidence. The calculation method for rigidity and strength of horizontal diaphragm with plywood was valid.

*Soma T., Inayama M., Ando N.*

*Dept.of Agricultural and Life Sciences., Univ.of Tokyo, Yayoi 1-1-1, Bunkyo-ku, Tokyo, Japan*

*11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010, vol. 3, N°, 2010, pp.2221-2224, Soma T., Inayama M., Ando N.*

### **Experimental seismic response of a full-scale seven-story mixed-use steel/wood apartment building**

On June 30, 2009 a seven-story building was subjected to two earthquakes at the worlds largest shake table in Miki, Japan. Configured to represent a mixed-use retail and residential structure, the first floor was an innovative steel framing system providing the openness needed for the retail area, which then supported six stories of wood light-frame construction used for the apartment areas above. The objectives of the test program were to (1) demonstrate that the performance-based design procedure developed as part of the NEESWood project worked for this mixed-use structure; (2) validate the new steel moment frame connection system specifically developed to work with wood floor diaphragms while providing high ductility; and (3) obtain better understanding of how to combine wood and steel to provide more building options in areas of high seismicity. The building had 220 Square meters of retail space with 1350 Square meters of living space above which consisted of twenty-three apartment units; approximately half one-bedroom units and half two-bedroom units. Constructed over a 16 week period, the steel first story was also configured with removeable elements to create a three-dimensional lifting truss which was used to lift the entire structure onto the shake table where it was subjected to two earthquakes corresponding to the 72 year and the 675 year event for Los Angeles, CA. To prevent overturning in the wood shear walls and allow them to develop their full shear capacity, an anchor tie-down system consisting of steel rods, bearing plates and shrinkage compensating devices, was used at each end of all shear walls and ran from the top of the steel beams to the top of the shear wall Stacks. The building, known as the NEESWood Capstone building, was instrumented with over 300 sensors and 50 LED optical tracking points to measure the component and global responses, respectively. This paper will focus on the design and construction of the steel frame optimised for use with wood light-frame construction, and the resulting Performance of the building during the test. A companion paper will focus on subsequent testing of the upper six story structure that was achieved when the steel moment frame was reconfigured as a highly rigid braced frame, thus functioning as an extension of the table. The building performed very well under the 675 year earthquake. Only minor damage occurred, with global roof drift at approximately 1% and maximum interstory drifts less than 2%.

*Pryor S.E., Van De Lindt J.W., Pei S.*

*Simpson Strong-Tie Company, Pleasanton, CA, United States; Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, CO, United States*

*11th World Conference on Timber Engineering 2010, WCTE 2010, vol. 4, N°, 2010, pp.3170-3177, Pryor S.E., Van De Lindt J.W., Pei S.*

### **Beam-spring model for timber diaphragm and shear walls**

A roof or floor diaphragm in a wood building generally spans across multiple lateral force-resisting elements (shear walls). The diaphragm serves as a horizontal beam that distributes forces to the shear walls. For design purposes, it is common to assume the wood diaphragm is either completely flexible or completely rigid. In North American low-rise light-frame wood construction, wood diaphragms are almost always designed as flexible diaphragms and are modelled as simple beams spanning across two adjacent shear walls. Strictly speaking, neither the flexible nor the rigid assumption is accurate for modelling the behaviour of a wood diaphragm. Full-scale shake table tests of a two-storey wood-frame structure, conducted as part of the NEESWood project, have confirmed that roof and floor diaphragms are semi-rigid. This paper examines the effect of diaphragm flexibility on shear wall deflections by considering the in-plane stiffness of the diaphragm to be semi-rigid. A beam-spring analogue model is used to represent the diaphragm-shear wall system where the shear walls are modelled as springs and the diaphragm is modelled as an analogue beam that acts as a load distribution mechanism. The resulting load sharing among the shear walls is examined and possible application of the beam-spring model to seismic design of wood-frame structures is discussed.

*Pang W.C., Rosowsky D.V.*

*Department of Civil Engineering, Clemson University, Clemson, SC, United States;  
Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY, United States*

*Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings, vol. 163,  
N°4, 2010, pp.227-244, Pang W.C., Rosowsky D.V.*

### **Experimental study on full-scale light frame wood house under lateral load**

This paper explains an experimental study on a full-scale L-shape single story light frame wood house under the uniform lateral load simulated using a gasbag. The study verifies that shear walls are staggered to each other and the 1.0-m offset between them behave as a continuous shear wall, floor diaphragm with a reentrant corner up to 1.0 m that does not need a continuous end chord. Degradation in racking stiffness of light frame wood construction after continuously repeated cyclic lateral loads is not observable, while intermittent and larger amplitude cycling can cause observable settling of residual deformation and degradation in racking stiffness. The rigidity performance and high racking resistance of the floor diaphragm enables the light frame wood building to remain intact under ultimate lateral load, and recommends interstory percent drift restrictions for the lateral wind load design of the structures and the way to properly calculate racking capacity of gypsum sheathings. The conclusion of this paper can benefit the engineering practice of the light frame wood structures in hazard lateral load regions

*Songlai C., Chengmou F., Jinglong P.*

*School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China*

*Journal of Structural Engineering, vol. 136, N°7, 2010, pp.805-812, Songlai C.,  
Chengmou F., Jinglong P.*

### **Three-dimensional seismic response of a full-scale light-frame wood building: Numerical study**

The experimental seismic responses of a full-scale two-story light-frame wood townhouse building, designed to modern U.S. engineered seismic design requirements, were compared against the predictions of a new software package entitled seismic analysis package for woodframe structures (SAPWood) developed recently within the NEESWood Project. The main objective of this paper was to verify the accuracy of the predictions from the SAPWood model, which incorporates shear deformations of shear walls as well as cumulative floor displacements caused by the out-of-plane rotations of the floor and ceiling diaphragms. A comparison was conducted on interstory drifts and shear wall deformations for various structural configurations (construction phases) of the test building and excitation levels. Good agreement was found between the numerical predictions and test results for the four different construction phases. The SAPWood model was shown to be a promising numerical tool for predicting the seismic response of light-frame wood structures.

*Van De Lindt J.W., Pei S., Liu H., Filiatrault A.*

*Colorado State Univ., Dept. of Civil and Environmental Engineering, Fort Collins, CO 80523-1372, United States; Univ. at Buffalo, State Univ. of New York, Dept. of Civil, Structural and Environmental Engineering, Buffalo, NY 14260, United States*

*Journal of Structural Engineering, vol. 136, N°1, 2010, pp.56-65, Van De Lindt J.W., Pei S., Liu H., Filiatrault A.*

### **Analysis of fully anchored light-frame timber shear walls-elastic model**

In order to stabilize light-framed timber buildings against lateral loads, the diaphragm action of roofs, floors and walls is often used. This paper deals with an elastic analysis model for fully anchored sheathed wood frame shear walls. The model is based on the assumption of a linear elastic load-slip relation for the sheathing-to-framing joints. Only static loads are considered. The basic structural behaviour and assumptions for the elastic model are elucidated. Formulas for the load-bearing capacity and the deformation of the shear walls in the ultimate and serviceability limit states, respectively, are derived. Both a discrete point description and a continuous flow per unit length modelling of the fasteners are discussed. Also, the forces and displacements of the fasteners and sheathing are derived. The effect of different patterns and spacing of the fasteners on the capacity and displacement of the wall is illustrated. The influence of flexible framing members and shear deformations in the sheets, and also the effect of vertical loads on the shear wall, both with respect to tilting and second order effects, on the horizontal load-bearing capacity and displacement are evaluated. The stress distribution and the reaction forces at the ends of the different framing members are derived. The elastic model is experimentally verified and an illustrative example is given.

*Kallsner B., Girhammar U.A.*

*School of Technology and Design, Växjö University, Växjö, Sweden; SP Wood Technology, Technical Research Institute of Sweden, Box 5609, Stockholm 11486, Sweden; Department of TFE - Civil Engineering, Faculty of Science and Technology, Umeå University, Umeå 90187, Sweden*

*Materials and Structures/Materiaux et Constructions, vol. 42, N°3, 2009, pp.301-320, Kallsner B., Girhammar U.A.*

### **In situ experimental study of deformation mechanism under lateral loads for wood frame building**

From an experimental study of a light-frame wood construction building under lateral loads, following conclusions have been drawn: The path of shear forces transfer between two adjacent floor is consistent with the design assumption: shear wall of upper floor → floor → shear wall of lower floor; the shear slips between each shear wall and diaphragm are relatively small, and can be neglected; a whole structural model should be used during the analysis of whole structure, and in order to simplify the analysis, an effective simple analysis model, which take into account the deformation of floor diaphragm, has been proposed in this paper; the non-lateral-resisting members significantly increase the stiffness of building, and should be taken into account if these members are finalized in the design; the gypsum board ceiling provides only a limited stiffness for diaphragm and can be neglected.

*Chen S., Zhang S., Wang H., Fan C.*

*School of Civil Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China; School of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China*

*Tongji Daxue Xuebao/Journal of Tongji University, vol. 36, N°4, 2008, pp.453-459, Chen S., Zhang S., Wang H., Fan C.*

### **The wood-framed with sheathing buildings alternative for housing construction**

Numerical model of the wood-framed with sheathing structure and selected results of experimental tests are presented in the paper. Wall and floor diaphragms as the three-dimensional composite structure are modelled applying plane shell elements representing framing and sheathing and beam element describing the fasteners. Experimental tests were conducted on typically disposed the wood-framed wall and floor diaphragms in residential housing in Poland. Associated tests of materials and connections and their results are also included in the paper. Non-linear behaviour of fasteners is examined in the numerical model. Results obtained from model and experiments are coincident.

*Malesza M., Miedzialowski C.*

*Dept. of Civil Engineering, Białystok University of Technology, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok, Poland; Department of Strength of Materials and Mechanics of Structure, Building Engineering Institute, Technical University of Białystok, Poland; Building Engineering Institute, Technical University of Białystok, Poland*

*Journal of Civil Engineering and Management, vol. 12, N°2, 2006, pp.143-151, Malesza M., Miedzialowski C.*

### **Seismic analysis of woodframe structures. I: Model formulation**

A simple numerical model to predict the dynamic characteristics, quasistatic pushover, and seismic response of woodframe buildings is presented. In this model the building structure is composed of two primary components: rigid horizontal diaphragms and nonlinear lateral load resisting shear wall elements. The actual three-dimensional building is degenerated into a two-dimensional planar model using zero-height shear wall spring elements connected between adjacent diaphragms or the foundation. The degrading strength and stiffness hysteretic behavior of each wood shear wall in the building can be characterized using an associated numerical model that predicts the walls load-displacement response under general quasistatic cyclic loading. In turn, in this model, the hysteretic behavior of each shear wall is

represented by an equivalent nonlinear shear spring element. With this simple approach the response of the building is defined in terms of only three degrees of freedom per floor. This numerical model has been incorporated into the computer program SAWS (seismic analysis of woodframe structures). This paper discusses model formulation. In Part II, the predictive capabilities of this program are compared with recent shake table tests performed on a full-scale two-story woodframe house.

*Folz B., Filiatrault A.*

*Dept. of Civil Engineering, British Columbia Inst. of Technology, 3700 Willingdon Ave., Burnaby, BC V5G-3H2, Canada; Dept. of Civil Engineering, State Univ. of New York at Buffalo, 134 Ketter Hall, Buffalo, NY 14260, United States*

*Journal of Structural Engineering, vol. 130, N°9, 2004, pp.1353-1360, Folz B., Filiatrault A.*

### **Validation of seismic design parameters for wood-frame shearwall systems**

A methodology for assessment of seismic design parameters for a wood-frame shearwall system is developed, consisting of a test program of shearwalls and the application of nonlinear time history analyses to a four-storey wood-frame building that was designed to resist the seismic requirements for Vancouver, British Columbia. Analyses employed 22 selected earthquake accelerograms that were scaled upwards until an ultimate peak ground acceleration ( $A_u$ ) was reached where the shearwall reached a "near-collapse" state. The 22 values of  $A_u$  were found to be greater than the "design" peak ground acceleration, indicating the adequacy of the current design procedures for the particular shearwalls investigated. The influence of gypsum wallboard on the behaviour of the shearwalls was also evaluated, and a new force modification factor "R" for walls composed of a mixture of wood-based and gypsum panels was proposed. The effect of flexibility of floor diaphragms was considered separately for a symmetric building and was found to have 5-30% reduction on the  $A_u$  values obtained for the rigid diaphragm case.

*Ceccotti A., Karacabeyli E.*

*Wood Engineering Department, Forintek Canada Corp., Western Laboratory, Vancouver, BC V6T 1W5, Canada*

*Canadian Journal of Civil Engineering, vol. 29, N°3, 2002, pp.484-498, Ceccotti A., Karacabeyli E.*

### **Design of Wood Diaphragms with Openings**

The existence of openings in diaphragms causes concentration of shear forces around the openings and the generation of axial forces in the framing. In 1981, the Applied Technology Council developed the only guidelines for designing diaphragms with openings. The procedure for determining the shear around the opening, however, is complicated and has not been experimentally verified. Accordingly, simplified equations for determining the shear forces in diaphragms with openings are derived in this paper. The application of the membraneto-brace replacement method to diaphragms is also discussed. Horizontal loading tests are conducted on three floor diaphragms designed to the same load. The ultimate loads are almost the same, regardless of the existence of the opening. The observed unit shear around the opening is close to the calculated value. The observed deflection is smaller than the value calculated on the basis of the nominal stiffness for the materials and the

fasteners by 14-28%. It can be said from these results that all the methods perform well as a practical design tool.

*Kamiya F., Itani R.Y.*

*Timber Struct., Forest./F.P.R.I., P.O. Box 16, Ibaraki 305, Japan; Dept. of Civ. and Envir. Engrg., Washington State Univ., Pullman, WA 99164-2910, United States*  
*Journal of Structural Engineering, vol. 124, N°7, 1998, pp.839-848, Kamiya F., Itani R.Y.*

### **Enhancement of system performance by component interaction in wood framing subassemblies**

Wood frame subassemblies, such as joist floors, stud walls, roof diaphragms and shear walls, include many components incompletely connected by fasteners and/or elastomeric glues. Their performance differs greatly from that of a single member. Although conceptual simple and easy to construct, these subassemblies are difficult to analyze even when component variabilities are not considered. The current state of analysis techniques for these partially composite subassemblies and the limited ways their systems behaviors are included in design are reviewed. Component variabilities and other conditions of realistic wood frame subassemblies are noted, followed by some simulation results, observations on system strength, and research needs.

*Criswell M.E.*

*Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, CO 80523, United States*

*Structural Safety, vol. 7, N°2-4, 1990, pp.281-290, Criswell M.E.*

### **Finite element modeling of wood diaphragms**

This report describes a two-dimensional finite element model for analyzing vertical and horizontal wood diaphragms. Central to the development of the model is the formulation of a nonlinear finite element that accounts for the distribution and stiffness of fasteners connecting the sheathing to the framing. Linked with conventional beam and plane stress elements, which represent diaphragm framing and sheathing, respectively, the resulting model can be used to analyze a variety of wood diaphragms (walls, floors, ceilings, etc.). Load-displacement results from experimentally tested diaphragms and model predictions were found to be in good agreement.

*Falk Robert H., Itani Rafik Y.*

*USDA, United States*

*Journal of structural engineering New York, N.Y., vol. 115, N°3, 1989, pp.543-559, Falk Robert H., Itani Rafik Y.*

### **HORIZONTAL TIMBER DIAPHRAGMS FOR WIND AND EARTHQUAKE RESISTANCE**

This paper discusses the principles of horizontal timber diaphragm behaviour under in-plane loading, gives guidance on analysis, design and details, and reviews relevant research. Plywood, particle board and solid timber boarding are all relevant sheathing materials for wind and earthquake resistance, provided that appropriate stiffness is provided and the design provisions ensure that brittle failure modes are suppressed.

*P. C. Smith, D. J. Dowrick and J. A. Dean  
Spencer, Holmes-Miller Partners Ltd, Wellington  
Physics and Engineering Laboratory, DSIR, Lower Hutt  
University of Canterbury  
BULLETIN OF THE NEW ZEALAND NATIONAL SOCIETY FOR EARTHQUAKE  
ENGINEERING, Vol. 19, No. 2, June 1986*

### **Caractérisation de la raideur dans le plan des planchers diaphragme en bois - Approche Expérimentale**

Le comportement des diaphragmes de planchers interfèrent largement sur le comportement d'ensemble des structures soumises à des actions sismiques. Ces planchers correspondent à des structures complexes pour les constructions en bois. Ce travail 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. Une comparaison est proposée avec une approche analytique utilisée en Amérique du Nord. Des essais élémentaires sont également rapportés pour instruire les paramètres d'un modèle par éléments finis

*Fuentes S., Fournely E., Bouchaïr A.*

*Clermont Université, Université Blaise Pascal, Institut Pascal, BP 10448, F-63000  
Clermont-Ferrand, France*

*CNRS, UMR 6602, Institut Pascal, F-63171 Aubière, France  
31èmes Rencontres de l'AUGC, E.N.S. Cachan, mai 2013*

### **Evaluation de la semi-rigidité de diaphragmes en bois – Modélisation numérique**

Habituellement, les structures à ossature bois utilise un ensemble de contreventements verticaux et de diaphragmes horizontaux. Face aux sollicitations latérales générés par le séisme, les diaphragmes reprennent les forces horizontales pour les transmettre vers le système de contreventement et celui-ci aux fondations. Ceci met en évidence l'importance de la transmission des efforts au sein d'un diaphragme. Cette problématique concerne aussi bien les bâtiments neufs que les opérations de renforcement du bâti ancien. Les diaphragmes peuvent présenter des comportements flexibles ou rigides ; le transfert des efforts de flexion et de torsion est largement influencé par l'éventuelle semi-rigidité des diaphragmes. La rigidité du diaphragme est directement liée à sa déformation dans le plan sous une charge horizontale. Pour pouvoir classer le diaphragme en rigide ou flexible, il est nécessaire d'utiliser une approche permettant d'évaluer cette déformation sous une sollicitation donnée. Cette approche doit être capable de prendre en compte tous les facteurs qui contribuent à la déformation du diaphragme, comme les sollicitations de flexion et cisaillement dans le plan, la semi-rigidité de connexion, la discontinuité des composants et les trémies. Ces facteurs font que le calcul de déformations n'est pas facile à mettre en oeuvre. Actuellement, des méthodes analytiques simplifiées prennent en compte quelques uns des facteurs précités, mais elles sont applicables à un nombre réduit de configurations de planchers avec des paramètres pas toujours connus ; leur mise en application est peu courante en France.

Une simulation numérique par éléments finis permet de considérer les différents comportements élémentaires des composants d'un plancher-diaphragme avec un

grand nombre de configurations géométriques et constitutives. Dans ce travail, le concept de modélisation des diaphragmes est présenté avec des éléments de validation et quelques exemples d'application. Les modèles présentés permettent de prendre en compte des phénomènes complexes comme le comportement non-linéaire des liaisons et le transfert d'effort par contact entre composants. Une analyse de la sensibilité de la rigidité du diaphragme au comportement mécanique de ses composants est conduite et une comparaison critique des résultats obtenus par différentes méthodes d'analyse permet de déterminer les limites et les capacités du modèle proposé. Cette analyse de diaphragme isolé permet de déterminer ses caractéristiques mécaniques (rigidité, résistance, ductilité) qui seront utilisées dans une analyse de comportement sismique de structures bois.

*Fuentes S., Vu T.K., Fournely E., Bouchaïr A.*

*Clermont Université, Université Blaise Pascal, LaMI, BP 206, F-63000 Clermont-Ferrand, France*

*« SICZS\_2010 » Symposium International sur la Construction en Zone Sismique, Université Hassiba Benbouali de Chlef (Algérie), octobre 2010*

### **Horizontal stiffness of wood diaphragms**

An experimental investigation was conducted to study the stiffness of wood diaphragms. Currently there is no method to calculate wood diaphragm stiffness that can reliably account for all of the various framing configurations. Diaphragm stiffness is important in the design of wood framed structures to calculate the predicted deflection and thereby determine if a diaphragm may be classified as rigid or flexible. This classification controls the method by which load is transferred from the diaphragm to the supporting structure below. Multiple nondestructive experimental tests were performed on six full-scale wood diaphragms of varying sizes, aspect ratios, and load-orientations. Each test of each specimen involved a different combination of construction parameters. The construction parameters investigated were blocking, foam adhesive, presence of designated chord members, corner and center sheathing openings, and presence of walls on top of the diaphragm.

The experimental results are analyzed and compared in terms of equivalent viscous damping, global stiffness, shear stiffness, and flexural stiffness in order to evaluate the characteristics of each construction parameter and combinations thereof.

Recommendations are presented at the end of this study as to the next steps toward development of an empirical method for calculating wood diaphragm stiffness.

*James Wescott Bott*

*Virginia Polytechnic Institute and State University, Thesis, 2005*