

# Proposition d'une méthode de justification des diaphragmes horizontaux de plancher bois

Laurent LE MAGOROU

décembre 2020

**Siège social**

10, rue Galilée  
77420 Champs-sur-Marne  
Tél +33 (0)1 72 84 97 84  
[www.fcba.fr](http://www.fcba.fr)

Siret 775 680 903 00132  
APE 7219Z  
Code TVA CEE : FR 14 775 680 903

**Institut technologique FCBA :**

Forêt, Cellulose, Bois – Construction,  
Ameublement

---

Avec le soutien du

**CODIFAB**



# SOMMAIRE

<b>1. Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Synthèse de l'état de l'art existant .....</b>	<b>4</b>
2.1 Le DTU 51.3 « Planchers en bois ou en panneaux à base de bois » .....	4
2.2 L'Eurocode 5 – NF EN 1995-1-1.....	4
2.3 L'approche nord-américaine (USA) .....	6
2.4 Approche de l'APA – The Engineered Wood Association (USA).....	10
2.5 Approche de l'Applied Technology Council.....	10
2.6 Approche du Conseil Canadien du Bois .....	11
2.7 Conclusion .....	13
<b>3. Présentation de l'approche proposée .....</b>	<b>14</b>
3.1 Hypothèses .....	14
3.2 Evaluation de la déformation .....	14
3.2.1 Approche analytique .....	14
3.2.2 Simplification.....	19
3.2.3 Diaphragme non bloqué .....	21
3.2.4 Prise en compte d'une ouverture.....	22
3.3 Evaluation de la résistance.....	23
3.3.1 Rappel du modèle simplifié retenu .....	23
3.3.2 Vérification du moment.....	24
3.3.3 Vérification du cisaillement .....	24
3.3.4 Prise en compte d'une ouverture.....	26
<b>4. Exemple de calcul .....</b>	<b>27</b>
4.1 Hypothèses .....	27
4.2 Détermination de la déformation.....	28
4.3 Vérification de la résistance .....	30
4.3.1 Vérification du moment.....	30
4.3.2 Vérification du cisaillement, Diaphragme sans ouverture .....	31
4.3.3 Vérification du cisaillement, Diaphragme avec ouverture .....	32

## 1. INTRODUCTION

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
- Instabilité structurale

La présence d'un diaphragme horizontal, de préférence rigide, assure les fonctions de :

- répartition des efforts sur l'ensemble des éléments de contreventement
- raidisseur pour limiter les déformations en plan de l'ouvrage
- raidisseur pour limiter les déformations hors plan des murs

Lorsque le plancher reprend ce rôle, il joue le double rôle de structure porteuse horizontale et de diaphragme. Si le premier est aisément justifiable par calcul, la justification de la fonction diaphragme est quant à elle plus délicate et il n'existe pas de règles ou méthodes explicitées dans les règles de calcul Eurocode 5.

Seules quelques règles de bonne conception sont appliquées et limitées à des formes simples de plancher sans trémies autres que les escaliers.

Une première étude bibliographique (étude PLANDIA, 2015) a permis de poser ce constat et de recueillir l'état de l'art.

En se basant sur cette première étude, l'objectif de ce rapport est d'exploiter la bibliographie recueillie afin de proposer des règles de justification des diaphragmes de planchers bois.

En complément, ces propositions seront versées au travail de révision de l'Eurocode 5 actuellement en cours.

## 2. SYNTHÈSE DE L'ÉTAT DE L'ART EXISTANT

### 2.1 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.

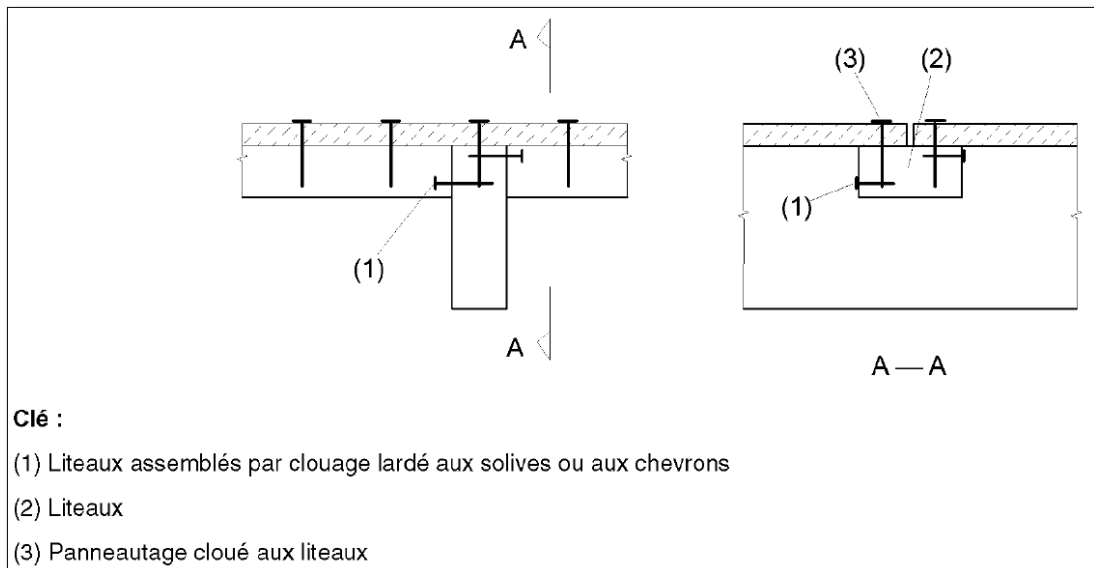
Ces règles simples se limitent à des règles de moyens permettant d'assurer le fonctionnement mécanique du plancher en diaphragme horizontal mais pour autant, elles ne permettent pas une justification de celui-ci vis-à-vis des charges.

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

### 2.2 L'Eurocode 5 – NF EN 1995-1-1

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 des exigences de mise en œuvre.

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/langue.



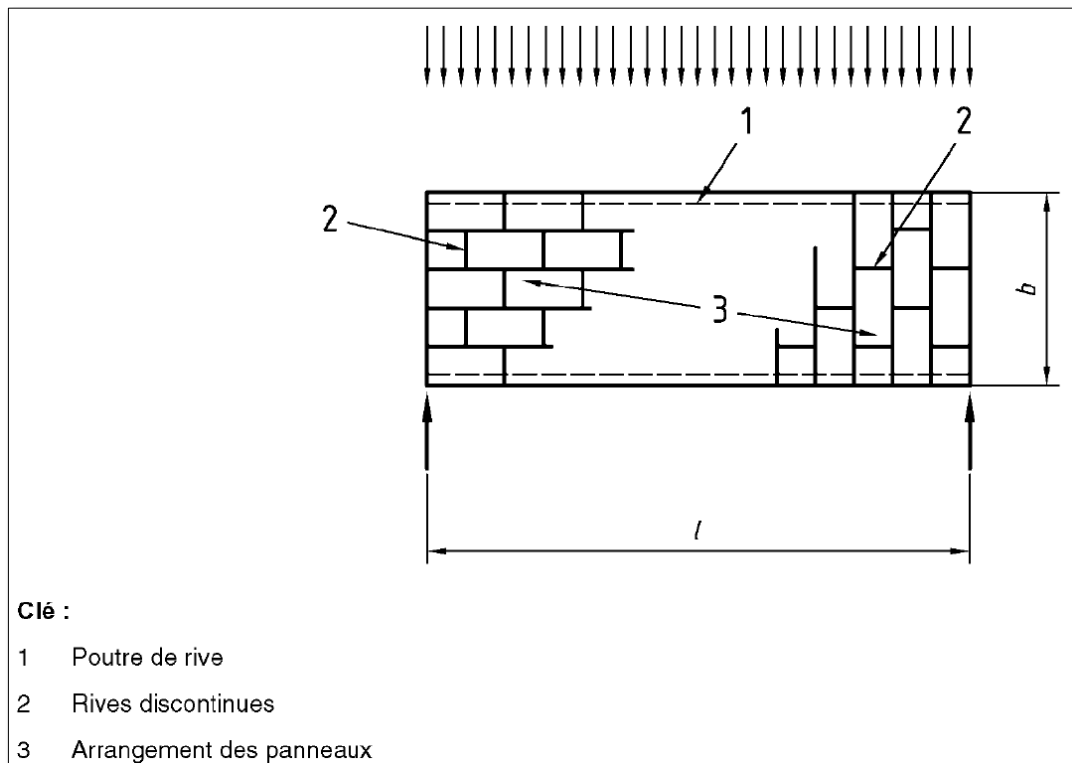
*Figure 1 : Exemple d'assemblage de joints de panneaux non supportés*

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 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.

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

### 2.3 L'approche nord-américaine (USA)

Aux États-Unis, plusieurs textes coexistent pour la conception et la justification des ouvrages. Ceci est entre autres 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 :

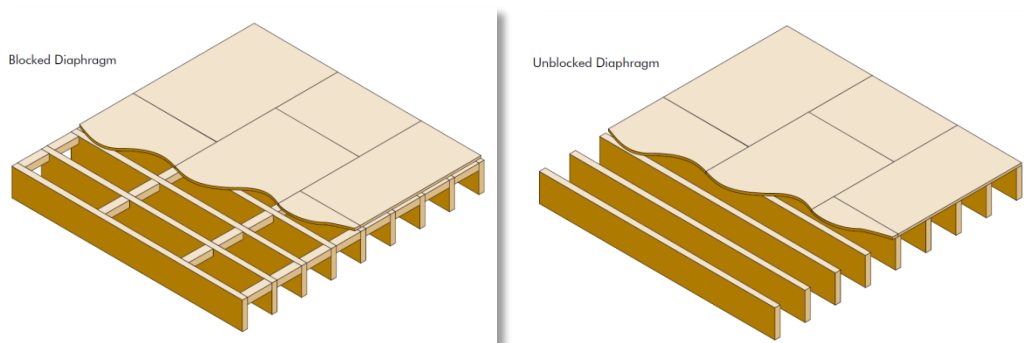
- l'International Building Code (IBC)

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

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 : 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  $\delta_{\text{dia}}$ , tient compte du cumul des déformations dues à la flexion de la « poutre en I équivalente », au cisaillement des panneaux et au glissement des connexions.



$$\delta_{dia} = \frac{5vL^3}{8EAW} + \frac{vL}{4G_v t_v} + 0.188L e_n + \frac{\sum(x\Delta_c)}{2W}$$

*(bending, chord deformation excluding slip)*   
 *(shear, panel deformation)*   
 *(shear, panel nail slip)*   
 *(bending, chord splice slip)*

Cette expression (en unités US) est simplifiée par l'expression dite « à 3 termes » :

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

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

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 (seuls les cas 1 et 3 sont conformes au DTU 51.3) :

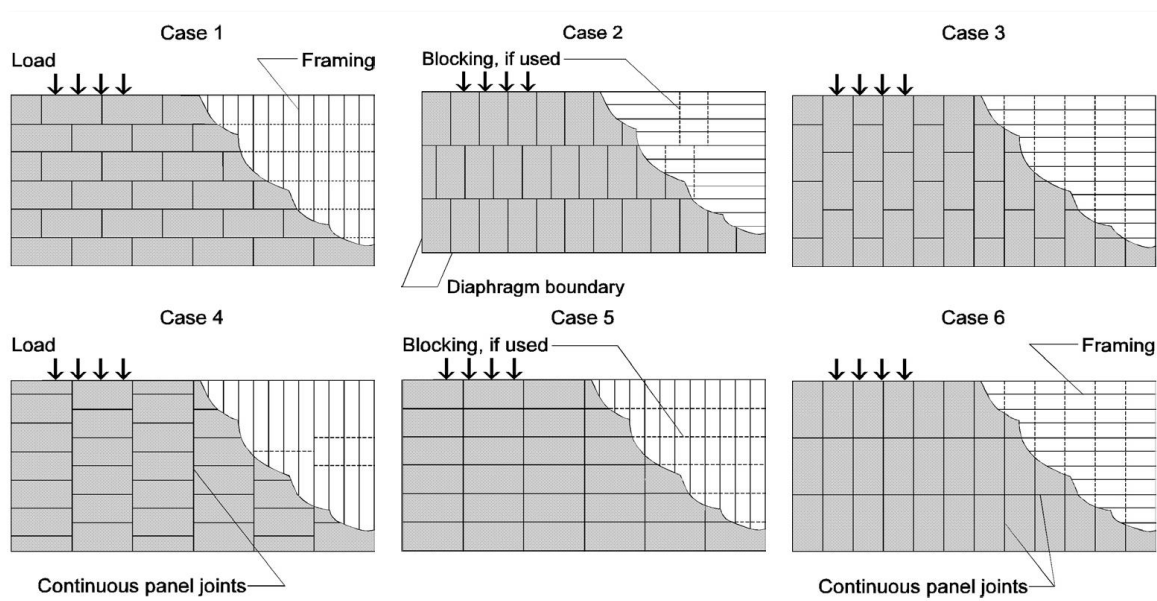


Figure 4 : 6 cas de poses retenus

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.

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 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 5) ou utilisant un diaphragme en porte-à-faux (Figure 6).

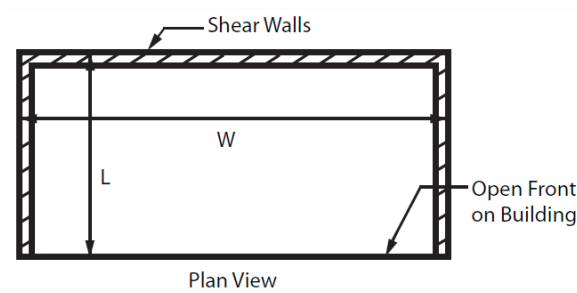


Figure 5 : Structure avec un mur ouvert

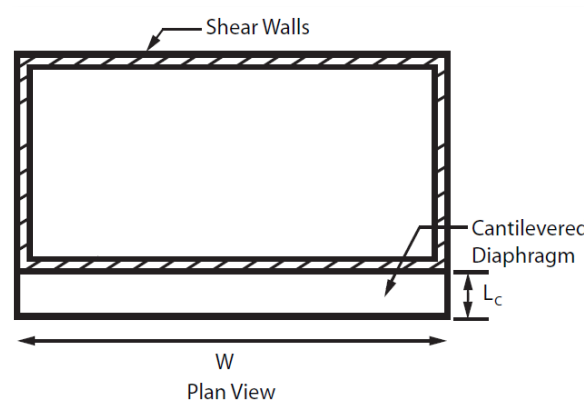


Figure 6 : Diaphragme en porte-à-faux

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

## 2.4 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.

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.

## 2.5 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,
3. la résultante des efforts dans le diaphragme est calculée par superposition des efforts obtenus aux étapes 1 et 2.

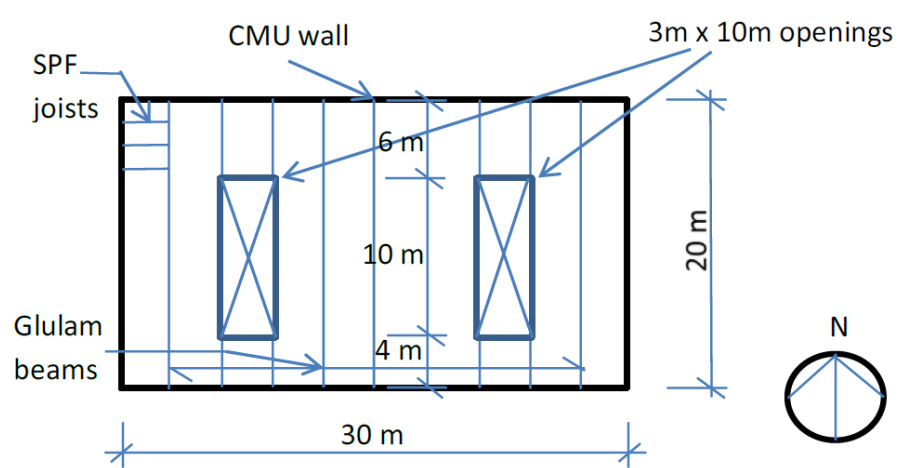


Figure 7 : Exemple d'un cas pouvant être traité

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.

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 Vierendeel.

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.

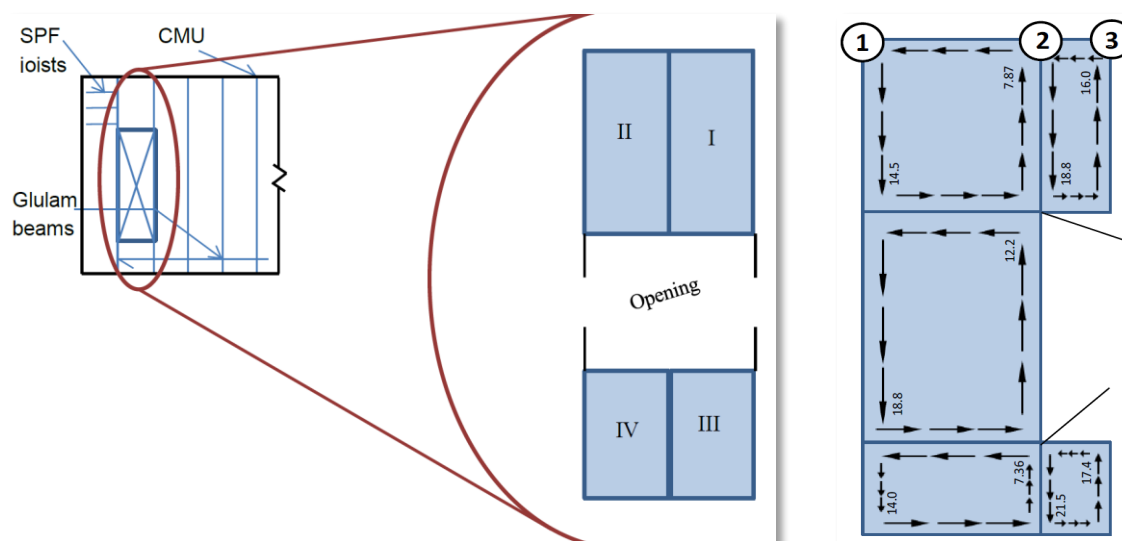


Figure 8 : Découpage en segments autour des ouvertures

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. 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.

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.

## 2.6 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.

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 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.

## 2.7 Conclusion

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

### 3. PRESENTATION DE L'APPROCHE PROPOSEE

#### 3.1 Hypothèses

La mise en œuvre du plancher (ou diaphragme) doit être conforme aux règles du DTU 51.3.

Pour assurer le bon fonctionnement du diaphragme, les éléments bois supportant les panneaux devront avoir une largeur minimale de 36mm.

Les fixations ne doivent être mise en œuvre à une distance de rive de moins de 10mm. L'entraxe des fixations de rive de chaque panneau doit être limité à 150mm. L'entraxe des fixations des panneaux sur les éléments porteurs intermédiaires ne doit pas être supérieur à 300mm.

Une ouverture peut être négligée si les conditions suivantes sont respectées :

- La largeur de l'ouverture ne dépasse pas 15% de la largeur du diaphragme ;
- La longueur de l'ouverture ne dépasse pas 15% de la longueur du diaphragme ;
- La distance entre le bord du diaphragme et l'ouverture est au minimum de 3 fois la plus grande dimension de l'ouverture ;
- Les parties sans ouverture du diaphragme (entre l'ouverture et le bord du diaphragme) ont un ratio de dimensions maximal de 4.

Le ratio longueur/largeur du plancher est limité à 4.

Dans le cas des diaphragmes non bloqués, l'utilisation des coefficients de correction suppose que les panneaux ont une dimension minimale de 1200 x 2400 mm (prise en compte du nombre de rives non liaisonnées) sauf en périphérie du diaphragme ou d'une ouverture. Si les panneaux utilisés ont des dimensions inférieures, ils devront être posés afin d'obtenir un diaphragme bloqué (liaison mécanique des quatre rives des panneaux).

#### 3.2 Evaluation de la déformation

L'une des approches les plus intéressantes est l'approche nord-américaine. Cependant, la détermination de la déformée basée sur l'équation dite « à 3 termes » n'est pas directement applicable en France pour les raisons suivantes :

- Elle s'appuie sur les unités US (lbs, ft, inches, ...)
- Le module de cisaillement apparent  $G_a$  est dérivé du module de cisaillement des panneaux contre-plaqué et de modules de glissement des fixations estimés à partir d'assemblages boulonnés
- Elle ne tient pas compte de l'Eurocode 5

Il est donc proposé de repartir de l'expression d'origine, dite « à 4 termes », pour en reprendre l'approche analytique et de l'exploiter, notamment pour y injecter les modules de cisaillement des panneaux à base de bois, les modules de glissement des fixations et l'Eurocode 5 d'une manière générale.

##### 3.2.1 Approche analytique

Le diaphragme de plancher est traité comme une poutre en I dont les panneaux de plancher constituent l'âme et les lisses de chaînage agissent en membrures.

L'âme est supposée « continue », c'est-à-dire que les panneaux sont liaisonnés entre eux sur les quatre cotés via les solives et des entretoises. Cette configuration est dite « plancher bloqué ». Cette poutre est chargée uniformément sur 2 appuis.

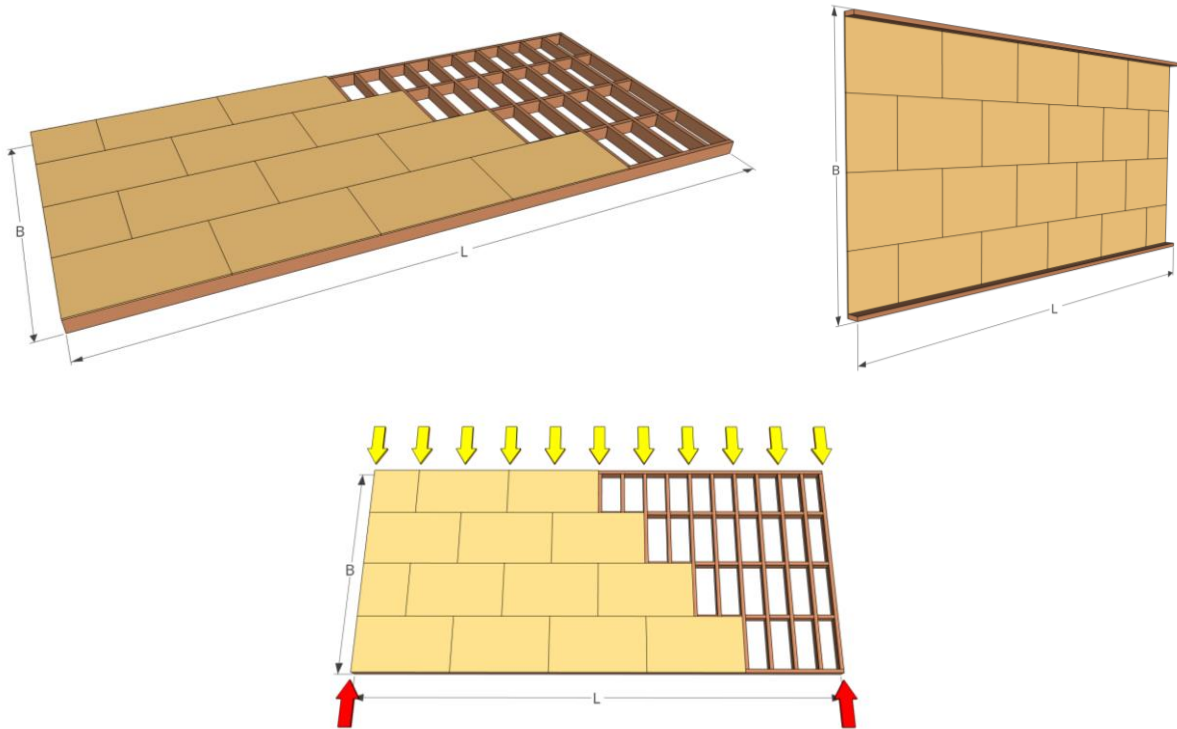


Figure 9 : Plancher et poutre en I équivalente

La déformée du plancher  $u_{\text{plancher}}$  est alors la somme des déformées respectives dues à :

- La flexion :  $u_{\text{poutre}}$
- Le cisaillement des panneaux :  $u_{\text{panneaux}}$
- Le glissement des fixations des panneaux :  $u_{\text{fixations}}$
- L'allongement des membrures (discontinues) :  $u_{\text{membrures}}$

### Déformation en flexion $u_{\text{poutres}}$

Dans ce diaphragme, la contribution de l'âme au moment d'inertie est négligée de façon conservatrice. De même, l'inertie des membrures sur leurs propres axes, peu impactant compte tenu de la « hauteur » de la poutre en I équivalente, est négligée.

L'inertie de la poutre peut alors s'écrire :  $I = 2 \cdot S \cdot d^2 = \frac{S \cdot B^2}{2}$

Où

$S$  section d'une lisse de chaînage (mm<sup>2</sup>)

$d$  distance entre une membrure et la « fibre neutre », soit donc  $B/2$  (mm)



Pour une poutre sur 2 appuis et uniformément chargée par une force linéique  $p$ , la déformation maximale à mi-portée en flexion est :

$$u_{flexion} = \frac{5 \cdot p \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

Soit :

$$u_{flexion} = \frac{10 \cdot p \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot S \cdot B^2}$$

Afin d'homogénéiser les différents termes de l'expression de la déformation totale en fonction du cisaillement max par unité de largeur du plancher (« hauteur » de l'âme)  $v$ , on remplace  $p = \frac{2 \cdot V}{L}$  et  $\frac{V}{B} = v$ .

On obtient alors :

$$u_{flexion} = \frac{20 \cdot v \cdot L^3}{384 \cdot E \cdot S \cdot B}$$

Avec

- $v$  Cisaillement max (aux appuis) par unité de largeur de plancher en N/mm
- $L$  Longueur du plancher (mm)
- $E$  module d'élasticité des lisses de chaînage (N/mm<sup>2</sup>)
- $S$  section d'une lisse de chaînage (mm<sup>2</sup>)
- $B$  largeur du plancher (mm)

NOTE :

En convertissant en unités US (in, lbs, lbs/ft, ...), on obtient l'expression nord-américaine :

$$u_{flexion} = \frac{5 \cdot v \cdot L^3}{8 \cdot E \cdot S \cdot B}$$

### **Déformation de cisaillement des panneaux $u_{panneaux}$**

Avec les mêmes hypothèses de conditions limites et en considérant que dans une poutre en I la participation des membrures est négligeable dans la déformation due à l'effort tranchant, la déformation  $u_{panneaux}$  peut s'écrire :

$$u_{panneaux} = \frac{p \cdot L^2}{8 \cdot G_v \cdot B \cdot t}$$

Avec  $p = \frac{2 \cdot V}{L}$  et  $v = \frac{V}{B}$  on a alors :

$$u_{panneaux} = \frac{v \cdot L}{4 \cdot G_v \cdot t}$$

Où

- $v$  Cisaillement max (aux appuis) par unité de largeur de plancher en N/mm

- $L$  Longueur du plancher (mm)  
 $G_v$  module de cisaillement des panneaux (N/mm<sup>2</sup>)  
 $t$  épaisseur des panneaux de plancher (mm)

### Déformation due au glissement des fixations des panneaux $u_{fixations}$

La prise en compte du glissement de la connexion panneaux-solives est introduite en considérant que le rapport entre la déflexion maximale du plancher  $u_{fixations}$  et l'allongement de la diagonale du cadre du panneau (solives)  $e_{fixations}$  due au glissement des fixations, est égal au rapport entre la déflexion maximale du plancher  $u_{cisaillement}$  et l'allongement de la longueur de la diagonale d'un panneau  $e_{cisaillement}$  dus à l'effort de cisaillement :

$$\frac{u_{fixations}}{e_{fixations}} = \frac{u_{cisaillement}}{e_{cisaillement}}$$

Ceci suppose que les fixations sont uniformément réparties en périphérie du panneau sur leurs quatre côtés.

Si l'on appelle  $e_n$  le glissement des fixations dû au cisaillement dans les fixations, ce postulat conduit à l'expression (non démontrée ici, une démonstration détaillée est donnée dans [7]) :

$$u_{fixations} = \beta \cdot L \cdot e_n$$

Où

$$\beta = \frac{\sqrt{2} \cdot \cos\left(45^\circ - \arctan\left(\frac{a_{pan}}{h_{pan}}\right)\right)}{\sqrt{a_{pan}^2 + h_{pan}^2} \cdot \cos\left(90^\circ - 2 \cdot \arctan\left(\frac{a_{pan}}{h_{pan}}\right)\right)} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{a_{pan}} + \frac{1}{h_{pan}}\right)$$

Avec

- $a_{pan}$  largeur d'un panneau (mm)  
 $h_{pan}$  longueur d'un panneau (mm)  
 $L$  Longueur du plancher (mm)  
 $e_n$  glissement des fixations pour l'effort de cisaillement appliqué (mm)

#### NOTE :

Pour des unités métriques, on a alors pour un panneau de 1200 x 2400 mm<sup>2</sup> :  $\beta = 0,00061$   
 Pour un panneau « standard » US de 4x8 pieds<sup>2</sup>, on retrouve bien l'expression nord-américaine avec  $\beta = 0,1875 \approx 0,188$ .

L'eurocode 5 nous donne les modules de glissement  $K_{ser}$  d'une connexion bois/panneau. On peut alors écrire :

$$e_n = \frac{v \cdot s}{K_{ser}}$$

Où

- $v$  Cisaillement par unité de largeur de plancher en N/mm  
 $s$  espacement des fixations en périphérie des panneaux (mm)

$K_{ser}$  module de glissement d'une fixation (N/mm)

Soit finalement :

$$u_{fixations} = \frac{\beta \cdot L \cdot v \cdot s}{K_{ser}}$$

avec

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_{pan}} + \frac{1}{h_{pan}} \right)$$

Où

- $L$  Longueur du plancher (mm)
- $v$  Cisaillement par unité de largeur de plancher en N/mm
- $s$  espacement des fixations en périphérie des panneaux (mm)
- $K_{ser}$  module de glissement d'une fixation (N/mm)
- $a_{pan}$  largeur d'un panneau (mm)
- $h_{pan}$  longueur d'un panneau (mm)

### Déformation due à l'allongement des lisses de chaînage $u_{membrures}$

Les lisses de chaînage, qui constituent les membrures de la poutre en I équivalente, ne sont généralement pas réalisées en une seule pièce continue mais en plusieurs pièces assemblées. Ces membrures sont soumises à des efforts axiaux de traction/compression et leur allongement est principalement piloté par le glissement des assemblages de continuité (les barres sont considérées comme rigides).

A partir de ces hypothèses, la flèche  $u_{membrures}$  de la poutre en I due aux allongements  $\delta_i$  des membrures induit par le glissement de  $n$  assemblages de continuité est (non démontrée ici, une démonstration détaillée est donnée dans [7]) :

$$u_{membrures} = \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i \cdot x_i}{2 \cdot B}$$

Où

- $\delta_i$  glissement de l'assemblage  $i$  situé à une distance  $x_i$  de l'appui le plus proche (mm)
- $B$  largeur du plancher (mm)

### Déformation totale $u_{plancher}$

Il vient alors que la déformation totale du plancher à « mi-portée » est :

$$u_{plancher} = \frac{20 \cdot v \cdot L^3}{384 \cdot E \cdot S \cdot B} + \frac{v \cdot L}{4 \cdot G_v \cdot t} + \frac{\beta \cdot L \cdot v \cdot s}{K_{ser}} + \frac{\sum_{i=1}^n \delta_i \cdot x_i}{2 \cdot B}$$

Avec

$$\beta = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{1}{a_{pan}} + \frac{1}{h_{pan}} \right)$$

où

$v$	Cisaillement max (aux appuis) par unité de largeur de plancher en N/mm
$L$	Longueur du plancher (mm)
$E$	module d'élasticité des lisses de chaînage (N/mm <sup>2</sup> )
$S$	section d'une lisse de chaînage (mm <sup>2</sup> )
$B$	largeur du plancher (mm)
$G_v$	module de cisaillement des panneaux (N/mm <sup>2</sup> )
$t$	épaisseur des panneaux de plancher (mm)
$s$	espacement des fixations en périphérie des panneaux (mm)
$K_{ser}$	module de glissement d'une fixation (N/mm)
$x_i$	distance du joint de continuité $i$ par rapport à l'appui le plus proche (mm)
$\delta_i$	glissement de l'assemblage $i$ situé à une distance $x_i$ de l'appui le plus proche (mm)
$a_{pan}$	largeur d'un panneau (mm)
$h_{pan}$	longueur d'un panneau (mm)

### 3.2.2 Simplification

Une première simplification concerne les deux termes de déformations dues aux panneaux et à leurs fixations que l'on peut regrouper sous le terme générique  $u_{cisaillement}$  :

$$u_{cisaillement} = v \cdot L \cdot \left( \frac{1}{4 \cdot G_v \cdot t} + \frac{\beta \cdot s}{K_{ser}} \right)$$

On peut introduire une raideur de glissement apparente  $G_a$  qui dépend de :

- La géométrie des panneaux (dimensions et épaisseur)
- Le type de panneaux (OSB, particules, contreplaqué)
- Les fixations en périphérie de chaque panneau (diamètre et espacement)

On a alors :

$$u_{cisaillement} = \frac{v \cdot L}{G_a}$$

Avec

$$G_a = \frac{1}{\frac{1}{4 \cdot G_v \cdot t} + \frac{\beta \cdot s}{K_{ser}}}$$

Le tableau suivant donne le paramètre  $\beta$  pour des dimensions standards de panneaux de plancher :

Largeur x Longueur [mm x mm]	$\beta$
1250 x 2500	$6,00 \cdot 10^{-4}$
1220 x 2440	$6,15 \cdot 10^{-4}$
900 x 2000	$8,06 \cdot 10^{-4}$
675 x 2500	$9,41 \cdot 10^{-4}$
675 x 2000	$9,91 \cdot 10^{-4}$
610 x 2500	$10,20 \cdot 10^{-4}$
610 x 2050	$10,64 \cdot 10^{-4}$

De plus, pour la prise en compte des allongements des lisses de chaînage, il est proposé de considérer un glissement forfaitaire de 2 mm. En effet, la liaison de continuité se comporte comme deux assemblages bois/bois en série et la charge « admissible » est proche de la valeur du module de glissement. Ceci conduit généralement à un glissement total de l'ordre de 2mm.

On a alors :

$$u_{membrares} = \frac{\sum_{i=1}^n 2 \cdot x_i}{2 \cdot B} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{B}$$

L'expression simplifiée de la déformation totale du plancher à mi-longueur est alors :

$$u_{plancher} = \frac{20 \cdot v \cdot L^3}{384 \cdot E \cdot S \cdot B} + \frac{v \cdot L}{G_a} + \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{B}$$

où

- $v$  Cisaillement max (aux appuis) par unité de largeur de plancher en N/mm
- $L$  Longueur du plancher (mm)
- $E$  module d'élasticité des lisses de chaînage (N/mm<sup>2</sup>)
- $S$  section d'une lisse de chaînage (mm<sup>2</sup>)
- $B$  largeur du plancher (mm)
- $G_a$  raideur apparente en cisaillement des panneaux et fixations (N/mm)
- $x_i$  distance du joint de continuité  $i$  par rapport à l'appui le plus proche (mm)

Les tableaux suivants donnent la raideur apparente  $G_a$  pour de configurations courantes conformes au DTU 51.3 et aux propriétés données dans les normes EN 12369, EN 338 (solives en bois massif C24) et EN 1995-1-1 :

Panneaux OSB Raideur $G_a$ [N/mm]		Fixations Diamètre [mm] et espacement [mm]					
		Diamètre 3 mm		Diamètre 4 mm		Diamètre 5 mm	
Dimensions [mm x mm]	Epaisseur [mm]	150	100	150	100	150	100
1250x2500	18 à 25	8890	12600	10860	15230	12640	17540
1220x2440		8700	12350	10640	14940	12390	17210
900x2000		6800	9800	8390	11940	9820	13860
675x2500		5900	8540	7300	10460	8570	12180
675x2000		5600	8150	6960	10000	8180	11660
NOTE : Ces valeurs sont valables pour des panneaux OSB avec : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Une masse volumique moyenne <math>\geq 600 \text{ kg/m}^3</math></li> <li>• Un module de cisaillement de voile <math>G_v \geq 1080 \text{ N/mm}^2</math></li> </ul> et mis en œuvre sur des solives en bois massif C24 minimum (masse volumique moyenne $\geq 420 \text{ kg/m}^3$ )							

Panneaux P4 / P5 Raideur $G_a$ [N/mm]		Fixations Diamètre [mm] et espacement [mm]					
		Diamètre 3 mm		Diamètre 4 mm		Diamètre 5 mm	
Dimensions [mm x mm]	Epaisseur [mm]	150	100	150	100	150	100
1250x2500	19 à 25	8560	11970	10390	14310	12000	16330
910x2050		6720	9530	8210	11510	9550	13250
610x2050		5160	7410	6350	9040	7430	10480
NOTE : Ces valeurs sont valables pour des panneaux de particules P4 ou P5 avec : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Une masse volumique moyenne <math>\geq 600 \text{ kg/m}^3</math></li> <li>• Un module de cisaillement de voile <math>G_v \geq 770 \text{ N/mm}^2</math></li> </ul> et mis en œuvre sur des solives en bois massif C24 minimum (masse volumique moyenne $\geq 420 \text{ kg/m}^3$ )							

Panneaux CTP Raideur $G_a$ [N/mm]		Fixations Diamètre [mm] et espacement [mm]					
		Diamètre 3 mm		Diamètre 4 mm		Diamètre 5 mm	
Dimensions [mm x mm]	Epaisseur [mm]	150	100	150	100	150	100
1250x2500	15 à 25	6750	8880	7920	10200	8900	11260
610x2500		4490	6160	5400	7280	6180	8210
NOTE : Ces valeurs sont valables pour des panneaux de contreplaqué avec : <ul style="list-style-type: none"> <li>• Une masse volumique moyenne <math>\geq 550 \text{ kg/m}^3</math></li> <li>• Un module de cisaillement de voile <math>G_v \geq 400 \text{ N/mm}^2</math></li> </ul> et mis en œuvre sur des solives en bois massif C24 minimum (masse volumique moyenne $\geq 420 \text{ kg/m}^3$ )							

### 3.2.3 Diaphragme non bloqué

Selon l'approche de poutre en I équivalente (également hypothèse actuelle de l'Eurocode 5), la continuité mécanique doit être assurée sur les quatre rives des panneaux. Les panneaux sont liaisonnés entre eux sur toute leur périphérie. Ceci peut être assuré conformément à l'Eurocode 5 chapitre 9 et 10. On parle alors de diaphragme « bloqué ».

On entend par diaphragme « non bloqué », un diaphragme dont on n'assure que partiellement la continuité mécanique des panneaux. Seules les rives des panneaux au droit des éléments porteurs (solives d'un plancher) sont liaisonnées entre elles. Les rives non supportées (perpendiculaires aux éléments porteurs) sont libres de glisser entre elles.

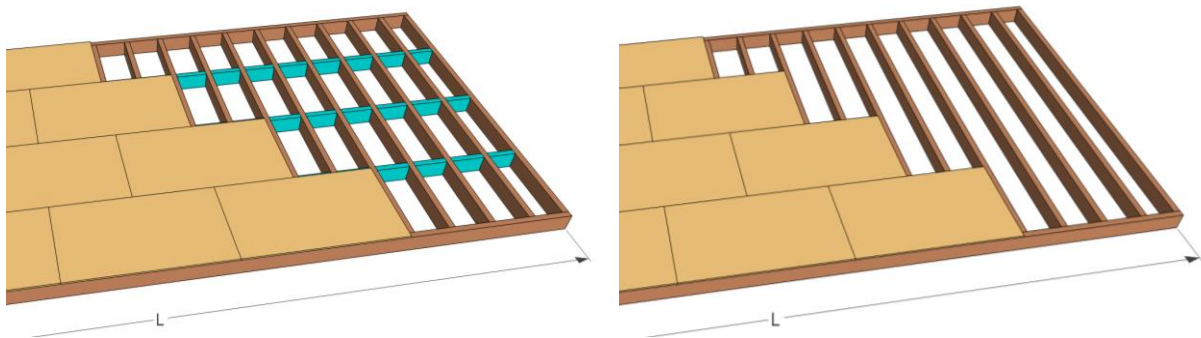


Figure 10 : Diaphragme bloqué (gauche) ou non bloqué (droite)

Dans ce cas, la littérature nous montre que cela induit une diminution de la raideur apparente  $G_a$  d'un facteur 2,5. Ceci n'est applicable que pour des panneaux de grande dimension (1200x2400mm).

Pour un diaphragme « non bloqué » réalisé avec des panneaux de 1200x2400 mm minimum, on a alors :

$$G_{a,non\ bloqué} = \frac{G_a}{2,5}$$

**NOTE :**

Il n'a pas été trouvé de résultats d'essais permettant de proposer un coefficient pour des diaphragmes non bloqué réalisés avec des panneaux de plus petites dimensions.

### 3.2.4 Prise en compte d'une ouverture

Une ouverture peut être négligée si les conditions suivantes sont respectées :

- La largeur de l'ouverture ne dépasse pas 15% de la largeur du diaphragme ;
- La longueur de l'ouverture ne dépasse pas 15% de la longueur du diaphragme ;
- La distance entre le bord du diaphragme et l'ouverture est au minimum de 3 fois la plus grande dimension de l'ouverture ;
- Les parties sans ouverture du diaphragme (entre l'ouverture et le bord du diaphragme) ont un ratio de dimensions maximal de 4.

Dans ce cas, les vérifications sont menées en supposant un diaphragme sans ouverture selon l'approche présentée dans les paragraphes 3.3.13.2.1 à 3.2.3.

Dans le cas contraire, la prise en compte d'une ouverture présente dans le diaphragme de plancher est obtenue selon la même approche présentée dans le rapport CODIFAB « Justification des murs à ossature bois en contreventement - Proposition d'une méthode alternative ». En effet, le fonctionnement mécanique est similaire.

Elle consiste à calculer un ratio d'ouverture  $r$  comme suit :

- ✓ le ratio entre l'aire totale de l'ouverture et l'aire du diaphragme de plancher, noté  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{\sum A_{ouverture}}{A_{diaphragme}}$$

- ✓ Dans le sens de la largeur  $B$  du diaphragme de plancher, le ratio entre la largeur cumulée sans ouverture  $B_{so}$  et la largeur totale  $B$ , noté  $\beta$  :

$$\beta = \frac{\sum B_{so,i}}{B}$$

Le ratio d'ouverture  $r$  est alors déduit de ces deux paramètres par la relation :

$$r = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\beta}}$$

La raideur apparente avec ouvertures  $G_{a,ouvert}$  est alors déterminée en corrigeant la raideur apparente sans ouverture  $G_a$  :

$$G_{a,ouvert} = r \cdot G_a$$

### 3.3 Evaluation de la résistance

#### 3.3.1 Rappel du modèle simplifié retenu

En reprenant le modèle de poutre en I équivalente décrit au paragraphe 3.2.1, on suppose donc que le moment est repris par les lisses sablières en traction/compression, et l'effort tranchant par cisaillement du plancher (panneaux).

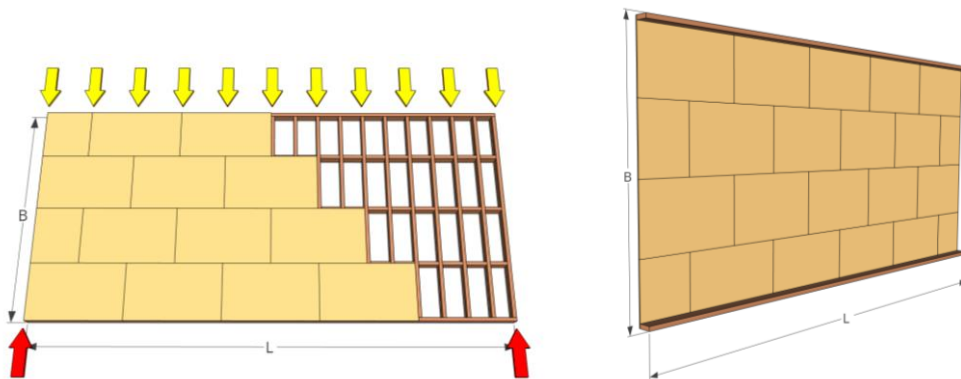


Figure 11 : Rappel du modèle de poutre en I équivalente



### 3.3.2 Vérification du moment

Les efforts axiaux de traction/compression  $N_{0,d}$  dans les lisses périphériques (membrures hautes et basses de la poutre en I équivalente) sont (en N) :

$$N_{0,d} = \frac{M_d}{B}$$

où

$M_d$  Moment max ELU (N.mm)

$B$  Largeur du plancher (mm)

On vérifie alors que :

$$N_{c,0,Rd} \geq N_{0,d} \quad \text{et} \quad N_{t,0,Rd} \geq N_{0,d}$$

Où

$N_{t,0,Rd}$  Résistance de calcul des lisses en traction axiale (N)

$N_{c,0,Rd}$  Résistance de calcul des lisses en compression axiale (N)

Les assemblages de continuité des lisses doivent également être vérifiés vis-à-vis de ces efforts axiaux de traction/compression  $N_{0,d}$  dans les lisses.

### 3.3.3 Vérification du cisaillement

L'approche proposée ici consiste à réaliser l'analyse du flux de cisaillement dans le diaphragme sans ouverture et à appliquer un coefficient de majoration des efforts pour prendre en compte de manière simplifiée le type de pose (bloqué ou non bloqué) et l'orientation de l'effort.

Le cisaillement max par unité de largeur du plancher (« hauteur » de l'âme) est :

$$v = \frac{V}{B}$$

où

$V$  Effort tranchant max ELU (N)

$B$  Largeur du plancher (mm)

Le flux de cisaillement maximum  $s_{v,Ed}$  (N/mm) à vérifier est défini par :

$$s_{v,Ed} = k_p \cdot v$$

Le coefficient  $k_p$ , fonction du type de pose, est pris selon le tableau suivant :

Pose	Type	$k_p$
Bloqué	-	1
Non bloqué	Cas 1	1,15
	Cas 2	1,5

Tableau 3 : coefficient de majoration  $k_p$

Dans le cas des diaphragmes non bloqués, on distingue les 2 cas d'orientation suivants :

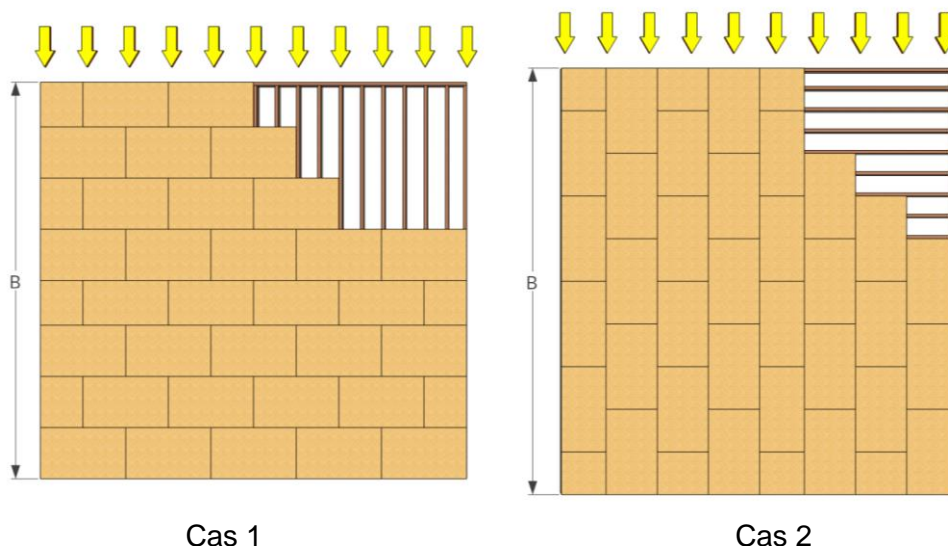


Figure 12 : 2 orientations de l'effort avec une pose « diaphragme non bloqué »

**NOTE :**

Les valeurs de ce coefficient de majoration  $k_p$  proposé (issu du coefficient de réduction de la résistance donné dans le CSA O86) sont conformes aux résultats expérimentaux trouvés dans la littérature (voir rapport CODIFAB Projet « Plandia », 2015). Ils ont été arrondis au 0,05 supérieur à titre conservateur.

La résistance caractéristique au flux de cisaillement  $s_{v,Rk}$  (N/mm) du diaphragme est définie par :

$$s_{v,Rk} = \frac{F_{v,Rk}}{s}$$

Où

$F_{v,Rk}$  Résistance caractéristique en cisaillement d'une fixation de panneau (N)  
 $s$  Entraxe des fixations (mm)

**NOTE :**

Cette approche suppose donc que dans le cas d'une pose en quinconce, la résistance en cisaillement des panneaux est au moins égale à la résistance des coutures en périphéries des panneaux. Cette hypothèse est conservatrice.

On vérifie alors que :

$$S_{v,Rd} \geq S_{v,Ed}$$

Avec

$$S_{v,Rd} = \frac{k_{mod} \cdot S_{v,Rk}}{\gamma_M}$$

Où

$k_{mod}$  Coefficient de modification des assemblages selon l'EN 1995-1-1

$\gamma_M$  Coefficient partiel sur les matériaux selon l'EN 1995-1-1 (1,3 pour les assemblages)

### 3.3.4 Prise en compte d'une ouverture

Une ouverture peut être négligée si les conditions suivantes sont respectées :

- La largeur de l'ouverture ne dépasse pas 15% de la largeur du diaphragme ;
- La longueur de l'ouverture ne dépasse pas 15% de la longueur du diaphragme ;
- La distance entre le bord du diaphragme et l'ouverture est au minimum de 3 fois la plus grande dimension de l'ouverture ;
- Les parties sans ouverture du diaphragme (entre l'ouverture et le bord du diaphragme) ont un ratio de dimensions maximal de 4.

Dans ce cas, les vérifications sont menées en supposant un diaphragme sans ouverture selon l'approche présentée dans les paragraphes 3.3.1 à 3.3.3.

Dans le cas contraire, la vérification du diaphragme de plancher nécessite de déterminer les flux de cisaillement dans les différentes parties du diaphragme qui entourent l'ouverture. Ceci nécessite une procédure d'analyse en quatre étapes :

- Etape 1 : Calcul des efforts dans le diaphragme sans considérer l'ouverture
- Etape 2 : En supposant que le diaphragme avec ouverture se comporte comme une poutre échelle (poutre de Vierendeel), on détermine les efforts de cisaillement et des efforts normaux autour de l'ouverture
- Etape 3 : On détermine la différence entre ces efforts locaux du diaphragme sans ouverture et de ce diaphragme avec ouverture
- Etape 4 : On calcule les résultantes des efforts à reprendre en additionnant les résultats des étapes 1 et 3

Pour sa compréhension et son application, un exemple complet est donné au chapitre suivant.

#### NOTE :

Cette approche est basée sur la méthode développée par l'Applied Technology Council dans « Guidelines for the design of Wood Sheathed diaphragms » et reprise par le Conseil Canadien du Bois et FPIInnovations.

## 4. EXEMPLE DE CALCUL

### 4.1 Hypothèses

Dans cet exemple d'application, les hypothèses du plancher sont les suivantes :



Figure 1 : Plancher avec ouverture et pose « diaphragme non bloqué »

Le plancher est constitué de panneaux OSB 1220x2440 mm<sup>2</sup> de 22 mm d'épaisseur fixés en rives par des vis de 5 mm de diamètre avec un entraxe de 150 mm (hypothèse pour une fixation :  $K_{ser} = 1360$  N/mm et  $F_{v,Rk} = 1200$  N).

Ce diaphragme est le plancher intermédiaire d'une maison R+1+combles dont chaque niveau à une hauteur de 2,8 m pour une hauteur totale au faitage de 6,7 m.

Situé en région de vent 2, sur un terrain plat en catégorie de rugosité IIIb, un calcul selon les règles de l'EN 1991-1-4+NA conduit à une pression dynamique de pointe  $q_p = 0,475$  kN/m<sup>2</sup>.

Sur les long-pans (Longueur 9 m), on considère les coefficients de pression suivant :

- Au vent  $C_{pe,10} = +0,8$
- Sous le vent  $C_{pe,10} = -0,5$
- Intérieur  $C_{pi} = -0,3$

Les efforts de vent sur les murs long-pans sont alors :

- Au vent :  $W_d = 0,523$  kN/m<sup>2</sup>
- Sous le vent :  $W_d = 0,095$  kN/m<sup>2</sup>

La géométrie du bâtiment permet l'utilisation du coefficient de corrélation  $(D/E) = 0,85$ .

Pour une bande de chargement d'une hauteur de 2,8m, l'effort linéique total est donc (cumul des efforts au vent et sous le vent, corrigé du coefficient de corrélation) :

$$p = 1,47 \text{ kN/ml}$$

Pour la suite de cet exemple, on retiendra :

- Pour l'ELS :  $p_{ELS} = 1,47 \text{ kN/ml}$
- Pour l'ELU :  $p_{ELU} = 2,21 \text{ kN/ml}$

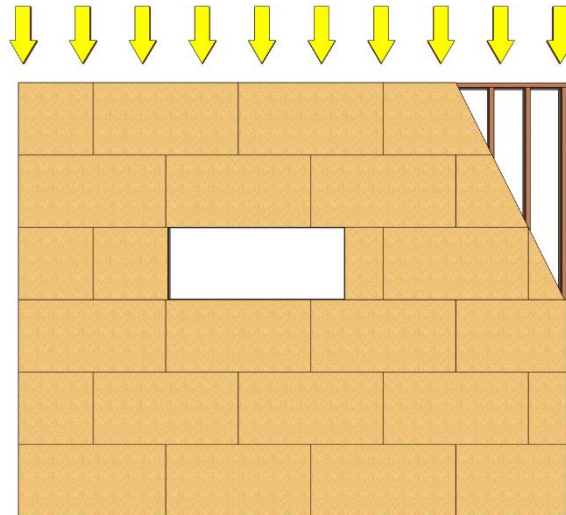


Figure 2 : Chargement du diaphragme

#### 4.2 Détermination de la déformation

Pour le diaphragme **sans ouverture et bloqué**, en reprenant l'expression simplifiée de la déformation totale du plancher à mi-longueur, on a :

$$u_{\text{plancher}} = \frac{20 \cdot v \cdot L^3}{384 \cdot E \cdot S \cdot B} + \frac{v \cdot L}{G_a} + \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{B}$$

Avec

$$v = \frac{p_{ELS} \cdot L}{2 \cdot B} = 0,92 \text{ N/mm}$$

$$G_a = \frac{1}{\frac{1}{4 \cdot G_v \cdot t} + \frac{\beta \cdot s}{K_{ser}}} = 11\,994 \text{ N/mm}$$

où

$p_{ELS}$	Chargement linéique : 1,47 kN/ml = 1,47 N/mm
$L$	Longueur du diaphragme : 9000 mm
$E$	Module d'élasticité des lisses de chaînage : 11000 N/mm <sup>2</sup> (C24)
$S$	Section d'une lisse de chaînage : 75x225 mm <sup>2</sup>
$B$	Largeur du diaphragme : 7200 mm
$G_v$	Module de cisaillement de voile des panneaux : 1080 N/mm <sup>2</sup> (EN 12369-1)
$t$	Epaisseur des panneaux : 22 mm
$\beta$	Coefficient de forme : 0,000615 pour des panneaux de 1220x2440 mm <sup>2</sup>
$s$	Espacement des fixations en périphérie des panneaux : 150 mm
$K_{ser}$	Module de glissement d'une fixation : 1360 N/mm (EN 1995-1-1)
$x_i$	Distance des 2 joints de continuité : 4500 mm (mi-portée de chaque lisse)

Le déplacement à mi-portée, pour un diaphragme bloqué et sans ouverture, est alors :

$$u_{plancher} = 0,03 + 0,65 + 2 \cdot 0,63$$

$$u_{plancher} = 1,94 \text{ mm} \text{ soit } L/4640$$

### Prise en compte de l'ouverture

Elle consiste à calculer un ratio d'ouverture  $r$  comme suit :

- le ratio entre l'aire totale de l'ouverture et l'aire du diaphragme de plancher :

$$\alpha = \frac{\sum A_{ouverture}}{A_{diaphragme}} = \frac{3,48}{64,8} = 0,0537$$

- Dans le sens de la largeur  $B$  du diaphragme de plancher, le ratio entre la largeur cumulée sans ouverture  $B_{so}$  et la largeur totale  $B$ , noté  $\beta$  :

$$\beta = \frac{\sum B_{so,i}}{B} = \frac{2,4 + 3,6}{7,2} = 0,833$$

Le ratio d'ouverture  $r$  est alors :

$$r = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{\beta}} = 0,94$$

La raideur apparente avec ouvertures  $G_{a,ouvert}$  est alors déterminé en corrigeant la raideur apparente sans ouverture  $G_a$  :

$$G_{a,ouvert} = 0,94 \cdot G_a$$

Le déplacement à mi-portée du diaphragme bloqué et avec ouverture est alors :

$$u_{plancher} = 0,03 + 0,69 + 2 \cdot 0,63$$

$$u_{plancher} = 1,98 \text{ mm} \text{ soit } L/4545$$

NOTE :  
Une petite trémie a donc une influence limitée.

### Prise en compte d'un diaphragme « non bloqué »

Si les rives non supportées des panneaux ne sont pas liaisonnées par l'ajout d'entretoises, alors on doit considérer que le diaphragme est non bloqué. Dans ce cas, la raideur apparente  $G_a$  doit être réduit d'un coefficient 2,5.

En cumulant cet effet avec la prise en compte de l'ouverture, elle devient :

$$G_{a,ouvert,non\ bloqué} = 0,94 \cdot \frac{G_a}{2,5}$$

Le déplacement à mi-portée du diaphragme non bloqué et avec ouverture est alors :

$$u_{plancher} = 0,03 + 1,72 + 2 \cdot 0,63$$

$$u_{plancher} = 3,01 \text{ mm} \text{ soit } L/2990$$

NOTE :  
Un diaphragme non bloqué a un impact très important sur la rigidité du diaphragme.

## 4.3 Vérification de la résistance

### 4.3.1 Vérification du moment

Les efforts axiaux de traction/compression  $N_{o,d}$  dans les lisses périphériques sont :

$$N_{0,d} = \frac{M_d}{B} = \frac{p_{ELU} \cdot L^2}{8 \cdot B} = 3,10 \text{ kN}$$

La résistance de calcul d'une lisse en bois massif C24 de section 75x225mm<sup>2</sup> en classe de service 2 et classe de durée de chargement instantané est :

$$N_{t,0,Rd} = \frac{k_{mod} \cdot f_{t,0,k}}{\gamma_M} \cdot S = \frac{1,1 \cdot 14,5}{1,3} \cdot 75225 = 207 \text{ kN}$$

On vérifie bien :

$$N_{t,0,Rd} \geq N_{0,d}$$

Les assemblages de continuité des lisses doivent également être vérifiés vis-à-vis de ces efforts axiaux de traction/compression  $N_{0,d}$  dans les lisses.

#### 4.3.2 Vérification du cisaillement, Diaphragme sans ouverture

Le cisaillement max par unité de largeur du diaphragme est :

$$v = \frac{V_{max}}{B} = \frac{p_{ELU} \cdot L}{2 \cdot B} = \frac{2,21,9}{2,7,2} = 1,38 \text{ kN/ml} = 1,38 \text{ N/mm}$$

Le chargement sur les murs long-pans conduit au cas 1 non bloqué, soit le coefficient  $k_p$  de 1,15.

Le flux de cisaillement maximum  $s_{v,max,Ed}$  est :

$$s_{v,max,Ed} = k_p \cdot v = 1,15 \cdot 1,38 = 1,59 \text{ N/mm} = 1,59 \text{ kN/ml}$$

La résistance de calcul en simple cisaillement bois/panneau d'une fixation est :

$$F_{v,Rd} = \frac{k_{mod} \cdot F_{v,Rk}}{\gamma_M} = \frac{1,1 \cdot 1200}{1,3} = 1015 \text{ N}$$

Conformément à l'EN 1995-1-1, la résistance de calcul au flux de cisaillement  $s_{v,Rd}$  du diaphragme est donc :

$$s_{v,Rd} = \frac{1,2 \cdot F_{v,Rd}}{s} = \frac{1,2 \cdot 1015}{100} = 12,2 \text{ N/mm} = 12,2 \text{ kN/ml}$$

On vérifie bien :

$$s_{v,Rd} \geq s_{v,max,Ed}$$



### 4.3.3 Vérification du cisaillement, Diaphragme avec ouverture

Pour la prise en compte de l'ouverture, la vérification du diaphragme nécessite de déterminer les efforts dans les différentes parties du diaphragme qui entourent l'ouverture.

Pour l'analyse, on définit :

- Les files 1, 2, 3, 4 et 5
- Les files a, b, c et d

Les files 2, 4, b et c délimitent l'ouverture. La file 3 est au centre de l'ouverture.

Les files 2, 3, 4, a, b, c et d délimitent les segments de diaphragme I, II, III et IV.

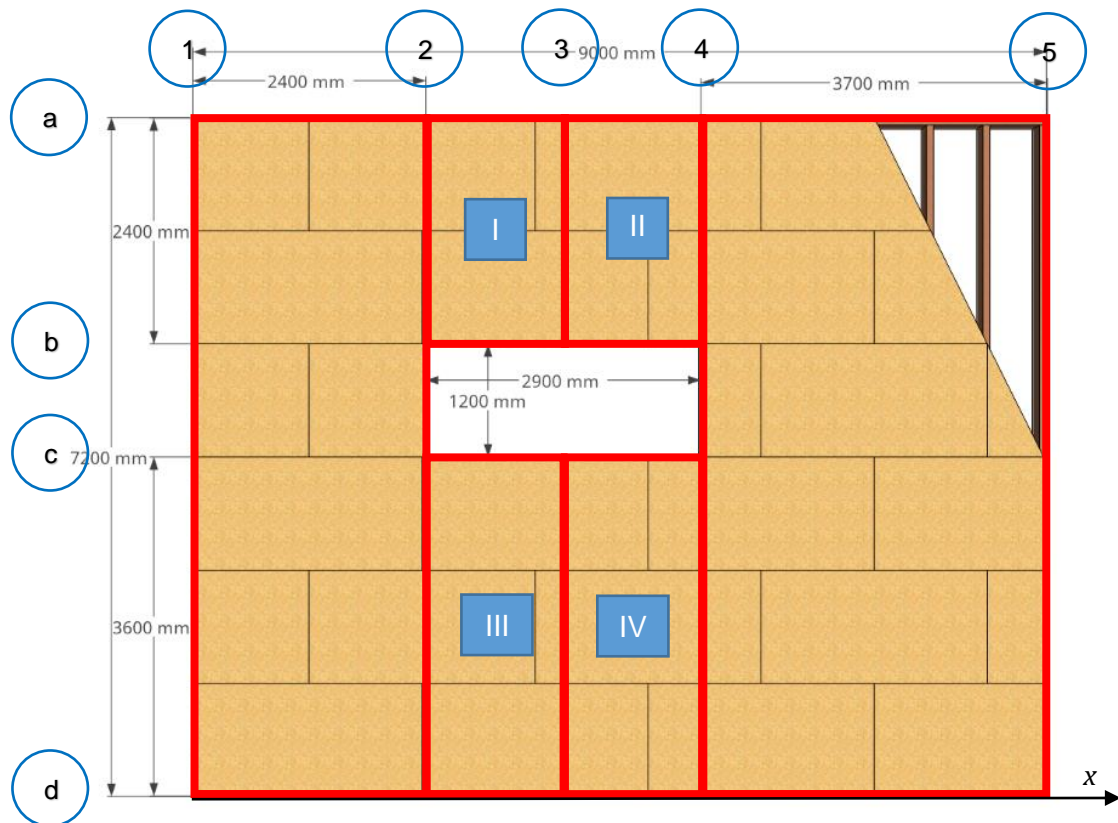


Figure 3 : Découpage des parties du diaphragme pour l'analyse

#### Etape 1 : Calcul des efforts dans le diaphragme sans considérer l'ouverture

Le long de l'axe  $x$ , l'effort tranchant  $V(x)$ , le moment  $M(x)$  et les efforts de normaux de traction  $T(x)$  et de compression  $C(x)$  dans les lisses valent :

$$V(x) = p_{ELU} \cdot \left(\frac{L}{2} - x\right) \quad M(x) = \frac{p_{ELU}}{2} \cdot x \cdot (L - x) \quad T(x) = -\frac{M(x)}{B} \quad C(x) = \frac{M(x)}{B}$$

Pour chaque file 1 à 5, on a donc :

$$\text{File 1 : } V_1 = 2,21 \cdot \left(\frac{9}{2} - 0\right) = 9,95 \text{ kN} \quad M_1 = \frac{2,21}{2} \cdot 0 \cdot (9 - 0) = 0 \text{ kN.m}$$

$$\text{File 2 : } V_2 = 2,21 \cdot \left(\frac{9}{2} - 2,4\right) = 4,64 \text{ kN} \quad M_2 = \frac{2,21}{2} \cdot 2,4 \cdot (9 - 2,4) = 17,5 \text{ kN.m}$$

$$\text{File 3 : } V_3 = 2,21 \cdot \left(\frac{9}{2} - 3,85\right) = 1,44 \text{ kN} \quad M_3 = \frac{2,21}{2} \cdot 3,85 \cdot (9 - 3,85) = 21,9 \text{ kN.m}$$

$$\text{File 4 : } V_4 = 2,21 \cdot \left(\frac{9}{2} - 5,3\right) = -1,77 \text{ kN} \quad M_4 = \frac{2,21}{2} \cdot 5,3 \cdot (9 - 5,3) = 21,7 \text{ kN.m}$$

$$\text{File 5 : } V_5 = 2,21 \cdot \left(\frac{9}{2} - 9\right) = -9,95 \text{ kN} \quad M_5 = \frac{2,21}{2} \cdot 9 \cdot (9 - 9) = 0 \text{ kN.m}$$

$$\text{File 1 : } T_1 = C_1 = 0 \text{ kN}$$

$$\text{File 2 : } T_2 = -\frac{17,5}{7,2} = -2,43 \text{ kN} \quad C_2 = \frac{17,5}{7,2} = 2,43 \text{ kN}$$

$$\text{File 3 : } T_3 = -\frac{21,9}{7,2} = -3,04 \text{ kN} \quad C_3 = \frac{21,9}{7,2} = 3,04 \text{ kN}$$

$$\text{File 4 : } T_4 = -\frac{21,7}{7,2} = -3,01 \text{ kN} \quad C_4 = \frac{21,7}{7,2} = 3,01 \text{ kN}$$

$$\text{File 5 : } T_5 = C_5 = 0 \text{ kN}$$

## **Etape 2 : Détermination des efforts autour de l'ouverture**

Dans une poutre échelle (poutre de Vierendeel) en flexion, on suppose qu'il y a des points de contraflexion à mi-longueur de l'ouverture. Ceci implique que les efforts normaux à mi-longueur de l'ouverture aux points 3-b et 3-c, respectivement  $F_{3,b}$  et  $F_{3,c}$ , sont nuls.

De plus, par simplification, on suppose que :

- autour de l'ouverture (files 2 et 4), les efforts tranchants se répartissent uniformément sur les parties de diaphragme effectives au prorata de leur longueur
- l'effort linéique  $p$  se répartit à parts égales de chaque côté du diaphragme

Ces hypothèses permettent d'écrire les efforts agissant autour des files a, 2, 4 et d.

En isolant chaque segment, le schéma statique est le suivant suivant :

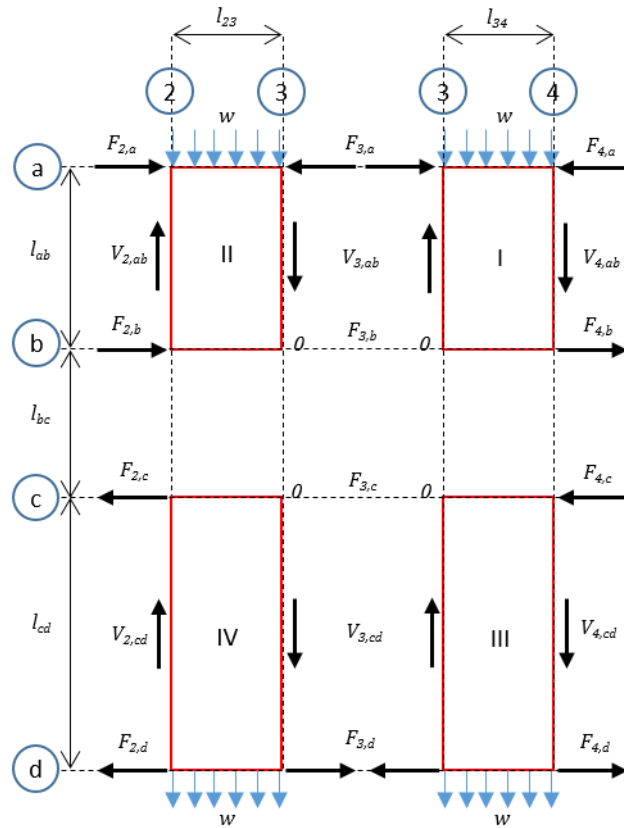


Figure 4 : Schéma statique des efforts autour des segments I, II, III et IV

### Segment I

$$F_{3,a} = C_3 = 3,04 \text{ kN} \quad F_{3,b} = 0 \text{ kN} \quad V_{4,ab} = V_4 \cdot \frac{l_{ab}}{l_{ab} + l_{cd}} = -0,71 \text{ kN} \quad w = \frac{p_{ELU}}{2} = 1,105 \text{ kN/ml}$$

Equilibre des forces et des moments

$$\text{En } 3,b : F_{4,a} \cdot l_{ab} - F_{3,a} \cdot l_{ab} - \frac{w \cdot l_{34}^2}{2} - V_{4,ab} \cdot l_{34} = 0 \Rightarrow F_{4,a} = \frac{\left( F_{3,a} \cdot l_{ab} + \frac{w \cdot l_{34}^2}{2} + V_{4,ab} \cdot l_{34} \right)}{l_{ab}} = 3,10 \text{ kN}$$

$$\text{Sens } y : V_{3,ab} - V_{4,ab} - w \cdot l_{34} = 0 \Rightarrow V_{3,ab} = V_{4,ab} + w \cdot l_{34} = 0,90 \text{ kN}$$

$$\text{Sens } x : F_{3,a} - F_{4,a} + F_{4,b} = 0 \Rightarrow F_{4,b} = F_{4,a} - F_{3,a} = -0,06 \text{ kN}$$

### Segment II

$$F_{3,a} = C_3 = 3,04 \text{ kN} \quad F_{3,b} = 0 \text{ kN} \quad V_{3,ab} = 0,90 \text{ kN}$$

### Equilibre des forces et des moments

$$\text{Sens } y : V_{2,ab} - V_{3,ab} - w \cdot l_{23} = 0 \Rightarrow V_{2,ab} = V_{3,ab} + w \cdot l_{23} = 2,50 \text{ kN}$$

$$\text{En } 3,b : F_{3,a} \cdot l_{ab} + \frac{w \cdot l_{23}^2}{2} - V_{2,ab} \cdot l_{23} - F_{2,a} \cdot l_{ab} = 0 \Rightarrow F_{2,a} = \frac{(F_{3,a} \cdot l_{ab} + \frac{w \cdot l_{23}^2}{2} - V_{2,ab} \cdot l_{23})}{l_{ab}} = 2,02 \text{ kN}$$

$$\text{Sens } x : F_{2,a} - F_{3,a} + F_{2,b} = 0 \Rightarrow F_{2,b} = F_{3,a} - F_{2,a} = 1,02 \text{ kN}$$

### Segment III

$$F_{3,d} = T_3 = -3,04 \text{ kN} \quad F_{3,c} = 0 \text{ kN} \quad V_{4,cd} = V_4 \cdot \frac{l_{cd}}{l_{ab} + l_{cd}} = -1,06 \text{ kN} \quad w = \frac{p_{ELU}}{2} = 1,105 \text{ kN/ml}$$

### Equilibre des forces et des moments

$$\text{Sens } y : V_{3,cd} - V_{4,cd} - w \cdot l_{34} = 0 \Rightarrow V_{3,cd} = V_{4,cd} + w \cdot l_{34} = 0,54 \text{ kN}$$

$$\text{En } 3,c : F_{4,d} \cdot l_{cd} - \frac{w \cdot l_{34}^2}{2} - V_{4,cd} \cdot l_{34} - F_{3,d} \cdot l_{cd} = 0 \Rightarrow F_{4,d} = \frac{(F_{3,d} \cdot l_{cd} + \frac{w \cdot l_{34}^2}{2} + V_{4,cd} \cdot l_{34})}{l_{cd}} = -2,94 \text{ kN}$$

$$\text{Sens } x : F_{4,d} - F_{3,d} - F_{4,c} = 0 \Rightarrow F_{4,c} = F_{4,d} - F_{3,d} = -0,10 \text{ kN}$$

### Segment IV

$$F_{3,d} = T_3 = -3,04 \text{ kN} \quad F_{3,c} = 0 \text{ kN} \quad V_{3,cd} = 0,54 \text{ kN}$$

### Equilibre des forces et des moments

$$\text{Sens } y : V_{2,cd} - V_{3,cd} - w \cdot l_{23} = 0 \Rightarrow V_{2,cd} = V_{3,cd} + w \cdot l_{23} = 2,14 \text{ kN}$$

$$\text{En } 3,c : F_{3,d} \cdot l_{cd} + \frac{w \cdot l_{23}^2}{2} - V_{2,cd} \cdot l_{23} - F_{2,d} \cdot l_{cd} = 0 \Rightarrow F_{2,d} = \frac{(F_{3,d} \cdot l_{cd} + \frac{w \cdot l_{23}^2}{2} - V_{2,cd} \cdot l_{23})}{l_{cd}} = -2,50 \text{ kN}$$

$$\text{Sens } x : F_{3,d} - F_{2,d} - F_{2,c} = 0 \Rightarrow F_{2,c} = F_{3,d} - F_{2,d} = -0,54 \text{ kN}$$

### **Etape 3 : On détermine aux files 2 et 4 la différence entre les efforts normaux obtenus avec et sans ouverture**

$$\text{En 2,a : } \Delta F_{2,a} = F_{2,a} - C_2 = -0,41 \text{ kN}$$

$$\text{En 2,b : } \Delta F_{2,b} = F_{2,b} = 1,02 \text{ kN}$$

$$\text{En 2,c : } \Delta F_{2,c} = F_{2,c} = -0,54 \text{ kN}$$

$$\text{En 2,d : } \Delta F_{2,d} = F_{2,d} - T_2 = -0,07 \text{ kN}$$

$$\text{En 4,a : } \Delta F_{4,a} = F_{4,a} - C_4 = 0,09 \text{ kN}$$

$$\text{En 4,b : } \Delta F_{4,b} = F_{4,b} = -0,06 \text{ kN}$$

$$\text{En 4,c : } \Delta F_{4,c} = F_{4,c} = -0,10 \text{ kN}$$

$$\text{En 4,d : } \Delta F_{4,d} = F_{4,d} - T_4 = 0,07 \text{ kN}$$

### **Etape 4 : Cisaillement induit dans le diaphragme autour de l'ouverture**

Ces efforts supplémentaires induits par l'ouverture doivent être repris par le diaphragme environnant entre les files 1 et 2 et les files 4 et 5.

$$\text{Autour du diaphragme 1-2-a-b : } s_{v,12ab} = \frac{\Delta F_{2,a}}{l_{12}} = -0,17 \text{ kN/ml}$$

$$\text{Autour du diaphragme 1-2-b-c : } s_{v,12bc} = \frac{\Delta F_{2,a} + \Delta F_{2,b}}{l_{12}} = 0,25 \text{ kN/ml}$$

$$\text{Autour du diaphragme 1-2-c-d : } s_{v,12cd} = \frac{\Delta F_{2,a} + \Delta F_{2,b} + \Delta F_{2,c}}{l_{12}} = 0,03 \text{ kN/ml}$$

$$\text{Autour du diaphragme 4-5-a-b : } s_{v,45ab} = \frac{\Delta F_{4,a}}{l_{45}} = -0,02 \text{ kN/ml}$$

$$\text{Autour du diaphragme 4-5-b-c : } s_{v,45bc} = \frac{\Delta F_{4,a} + \Delta F_{4,b}}{l_{45}} = -0,01 \text{ kN/ml}$$

$$\text{Autour du diaphragme 4-5-c-d : } s_{v,45cd} = \frac{\Delta F_{4,a} + \Delta F_{4,b} + \Delta F_{4,c}}{l_{45}} = 0,02 \text{ kN/ml}$$

### **Etape 5 : Résultantes des cisaillements**

On calcule les résultantes des cisaillements à reprendre le long de chaque file 1, 2, 4 et 5, sur chaque tronçon ab, bc et cd, en additionnant les résultats des étapes 1 et 4.

#### **File 1**

$$s_{v,1,ab} = \frac{V_1}{B} + s_{v,12ab} = 1,21 \text{ kN/ml}$$

$$s_{v,1,bc} = \frac{V_1}{B} + s_{v,12bc} = 1,64 \text{ kN/ml}$$

$$s_{v,1,cd} = \frac{V_1}{B} + s_{v,12cd} = 1,41 \text{ kN/ml}$$

## File 2

$$s_{v,2,ab} = \frac{V_2}{B} + s_{v,12ab} = 0,47 \text{ kN/ml}$$

$$s_{v,2,bc} = \frac{V_2}{B} + s_{v,12bc} = 0,90 \text{ kN/ml}$$

$$s_{v,2,cd} = \frac{V_2}{B} + s_{v,12cd} = 0,67 \text{ kN/ml}$$

## File 4

$$s_{v,4,ab} = \frac{V_4}{B} + s_{v,45ab} = -0,27 \text{ kN/ml}$$

$$s_{v,4,bc} = \frac{V_4}{B} + s_{v,45bc} = -0,25 \text{ kN/ml}$$

$$s_{v,4,cd} = \frac{V_4}{B} + s_{v,45cd} = -0,23 \text{ kN/ml}$$

## File 5

$$s_{v,5,ab} = \frac{V_5}{B} + s_{v,45ab} = -1,41 \text{ kN/ml}$$

$$s_{v,5,bc} = \frac{V_5}{B} + s_{v,45bc} = -1,39 \text{ kN/ml}$$

$$s_{v,5,cd} = \frac{V_5}{B} + s_{v,45cd} = -1,36 \text{ kN/ml}$$

Le flux de cisaillement maximum  $s_{v,max}$  est dans le tronçon bc sur la file 1 :

$$s_{v,max} = 1,64 \text{ kN/ml}$$

Le chargement sur les murs long-pans conduit au cas 1 non bloqué, soit le coefficient  $k_p$  de 1,15.

Le cisaillement max de calcul est donc :

$$s_{v,max,Ed} = k_p \cdot s_{v,max} = 1,15 \cdot 1,64 = 1,89 \text{ N/mm} = 1,89 \text{ kN/ml}$$

Conformément à l'EN 1995-1-1, la résistance de calcul au flux de cisaillement  $s_{v,Rd}$  du diaphragme est donc :

$$s_{v,Rd} = \frac{1,2 \cdot F_{v,Rd}}{s} = \frac{1,2 \cdot 1015}{100} = 12,2 \text{ N/mm} = 12,2 \text{ kN/ml}$$

On vérifie bien :

$$s_{v,Rd} \geq s_{v,max,Ed}$$

**NOTE :**

Il serait intéressant de pouvoir réaliser une étude paramétrique de l'influence des dimensions et de la position de l'ouverture. Ceci permettrait d'évaluer la possibilité d'extraire une loi paramétrique à appliquer sur les flux de cisaillement afin de les estimer sans passer par le calcul RdM.

# ANNEXE



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] *Diaphragms and shear walls*, APA, 2007
- [2] *Plywood diaphragms*, Report 138, APA, 2004
- [3] *Roof diaphragms for manufactured homes*, report 146, APA, 1993
- [4] *Wind and seismic – Special design provisions for wind and seismic*, AFPA, 2005
- [5] *Deflection of light frame wood diaphragms*, Report, E. Curtis, 2009
- [6] *Caractérisation de la raideur dans le plan des planchers diaphragme en bois – Approche expérimentale*, S. Fuentes, E. Fournely, A. Bouchair, 2013
- [7] *Comportement mécanique de planchers diaphragmes en bois*, Thèse, S. Fuentes, 2013
- [8] *Justification des murs à ossature bois en contreventement - Proposition d'une méthode alternative*, Rapport CODIFAB, 2018
- [9] *Etude bibliographique sur la justification de la fonction diaphragme horizontal des planchers traditionnels en bois*, Rapport CODIFAB, 2015
- [10] *Design example: Designing for openings in wood diaphragm*, FPIinnovations, 2014