

# Justification des murs à ossature bois en contreventement

## Proposition d'une méthode alternative

Laurent LE MAGOROU

**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>4</b>
<b>2. Bibliographie .....</b>	<b>5</b>
2.1 Généralités .....	5
2.2 Calcul de la résistance en contreventement .....	5
2.2.1 La méthode A .....	5
2.2.2 La méthode C .....	7
2.2.3 La méthode de Sugiyama et de Yasumura .....	13
2.2.4 La méthode du document PD 6693-1 .....	15
2.2.5 Le document de travail du TC250/SC5/WG3 .....	18
2.3 Calcul de la rigidité d'un diaphragme de mur .....	18
2.3.1 Généralités .....	18
2.3.2 Le modèle de Källsner .....	19
2.3.3 Le modèle de Seim & Hummel .....	20
2.3.4 Le document de travail du TC250/SC5/WG3 .....	21
<b>3. Exploitation des différentes approches .....</b>	<b>23</b>
3.1 Généralités sur les configurations .....	23
3.2 Configurations retenues .....	24
3.3 Résultats sur la configuration #0 de référence .....	27
3.4 Résultats sur la configuration #1 .....	27
3.5 Résultats sur la configuration #2 .....	28
3.6 Résultats sur la configuration #3 .....	29
3.7 Résultats sur la configuration #4 .....	30
<b>4. Analyse .....</b>	<b>31</b>
4.1 Généralités .....	31
4.2 Configurations avec OSB/3 9mm, pointes 2,1x45mm .....	31
4.3 Configurations avec OSB/3 12mm, pointes 2,5x50mm .....	33
4.4 Conclusion .....	34
<b>5. Méthode alternative proposée .....</b>	<b>37</b>
5.1 Hypothèses .....	37
5.2 Calcul de la résistance .....	37

5.3 Analyse comparative .....	40
5.4 Calcul de la raideur.....	42
5.5 Cas des murs partiellement ancrés .....	43
<b>6. Références bibliographiques .....</b>	<b>44</b>

## 1. INTRODUCTION

La justification de la résistance en contreventement des murs à ossature bois doit être menée selon les règles Eurocode 5. Comme l'indique l'Eurocode 5 au paragraphe 9.2.4.1, la méthode retenue doit satisfaire ou permettre les points suivants :

- La résistance au contreventement d'un mur doit être déterminée soit par essai conformément à EN 594, soit par calcul en utilisant les méthodes analytiques ou les modèles de calcul appropriés,
- Le calcul de diaphragmes de mur doit considérer à la fois la construction du matériau et l'arrangement géométrique du mur considéré,
- La réponse de diaphragme de mur aux actions doit être vérifiée afin de s'assurer que la construction reste dans des limites d'aptitude au service appropriées.

Pour atteindre ces objectifs, l'Eurocode 5 n'impose pas une méthode (pas de clauses du type « Principes ») mais propose deux méthodes alternatives. La méthode A (celle recommandée et la plus utilisée) et la méthode B (anglo-saxonne).

L'annexe nationale française recommande également la méthode A, sans l'imposer, et en précisant « dans l'attente de la méthode C ».

L'objectif de ce rapport est de proposer une méthode alternative permettant de satisfaire les exigences de l'Eurocode 5 paragraphe 9.2.4.1 tout en optimisant la résistance des murs, notamment en tenant compte des diaphragmes avec ouvertures.

En effet, la méthode A est une méthode très simple mais conservatrice car elle ne tient absolument pas compte des effets bénéfiques des descentes de charges, effets systèmes (participation des murs perpendiculaires, ...), participation des diaphragmes avec ouverture, ...

Un travail bibliographique a été mené afin de faire tour d'horizon des travaux existants sur le sujet (expérimentaux et théoriques). Les différentes approches ont été analysées afin de ne retenir que les éléments présentant un bon rapport « cout du calcul / performance du mur ». En effet, certaines approches sont intéressantes (notamment les méthodes « plastiques ») mais nécessite une mise en application qui peut être complexe pour en tirer tous les avantages.

À partir de ce travail d'analyse, une méthode alternative relativement aisée à mettre en œuvre est proposée. De plus, une version simplifiée de cette méthode est proposée afin d'en faciliter l'application dans un domaine d'emploi usuel mais limité.

Enfin, la plupart des approches se concentrent sur la résistance uniquement et ne donne pas de méthode pour déterminer la raideur du mur en contreventement. Il est alors difficile de justifier les déformations associées aux actions du vent et/ou du séisme. Pour les petits ouvrages (R+1 max) avec peu d'ouvertures cela n'est pas un problème. Cependant, avec les nouvelles architectures fortement ouvertes et l'augmentation du nombre de niveaux des constructions bois, cela devient indispensable. L'évaluation de la raideur du mur en contreventement est donc également traitée.

## 2. BIBLIOGRAPHIE

### 2.1 Généralités

D'une manière générale, il est possible de classer l'ensemble des approches selon trois grandes catégories :

- ✓ Les approches élastiques sans prises en compte des ouvertures
- ✓ Les approches élastiques avec prises en compte des ouvertures
- ✓ Les approches plastiques

Toutes les méthodes et documents exploités sont listés en annexe.

Les approches plastiques ont été jugées trop complexes à mettre en œuvre dans le cadre de l'objectif de cette étude. Les références bibliographiques sont données mais le travail d'analyse qui a été effectué n'est pas décrit dans ce rapport.

Les méthodes élastiques « classiques » sont donc retenues. Les approches correspondant le plus au besoin de cette étude sont présentées ci-après. Le travail d'analyse des autres méthodes listées mais non retenues n'est pas décrit dans ce rapport.

### 2.2 Calcul de la résistance en contreventement

#### 2.2.1 La méthode A

La méthode A désigne la méthode actuellement recommandée dans l'Eurocode 5.

Cette méthode s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- ✓ Seuls les panneaux sans ouverture et ayant un élancement limité à 4 participent à la résistance du mur
- ✓ les montants d'extrémité de chaque diaphragme sont ancrés rigidement au sol (ou à la structure située en dessous)
- ✓ les panneaux fonctionnent en cantilever et la continuité mécanique doit être assurée en tête

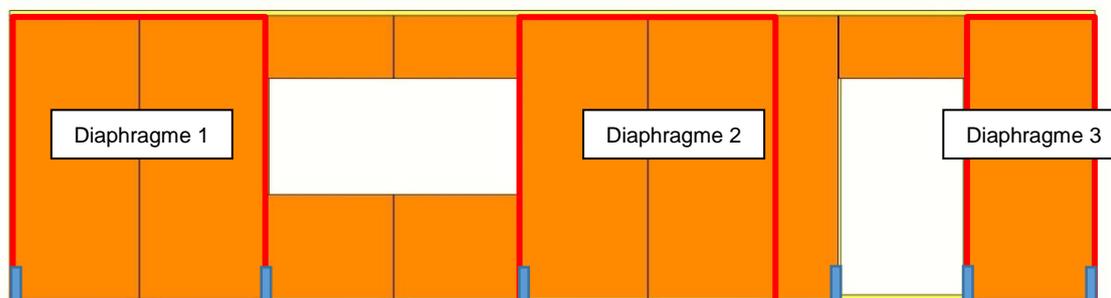


Figure 1 : Mur constitué de 3 diaphragmes au sens de la méthode A (en rouge, les panneaux participants)

Les exigences du DTU 31.2 conduisent aux respects de ces hypothèses.

Cette méthode suppose donc que les panneaux travaillent en cisaillement uniquement et leurs résistances respectives s'ajoutent. Elle suppose aussi que la souplesse des ancrages est négligeable. Cette méthode n'est donc applicable que si la raideur des ancrages conduit à un déplacement en tête faible par rapport à celui induit par la mise en parallélogramme des voiles.

La résistance en contreventement du mur est directement proportionnelle à la résistance des organes de liaison placés aux rives hautes et basses des panneaux. La méthode postule que la distribution des efforts est uniforme sur les rives du panneau et que toutes les fixations sont toutes sollicitées dans la même direction. Ces hypothèses de répartition sont vraies si le panneau n'est pas trop étroit (pas de mise en flexion). Lorsque l'élanement des panneaux est supérieur 2, la résistance diminue.

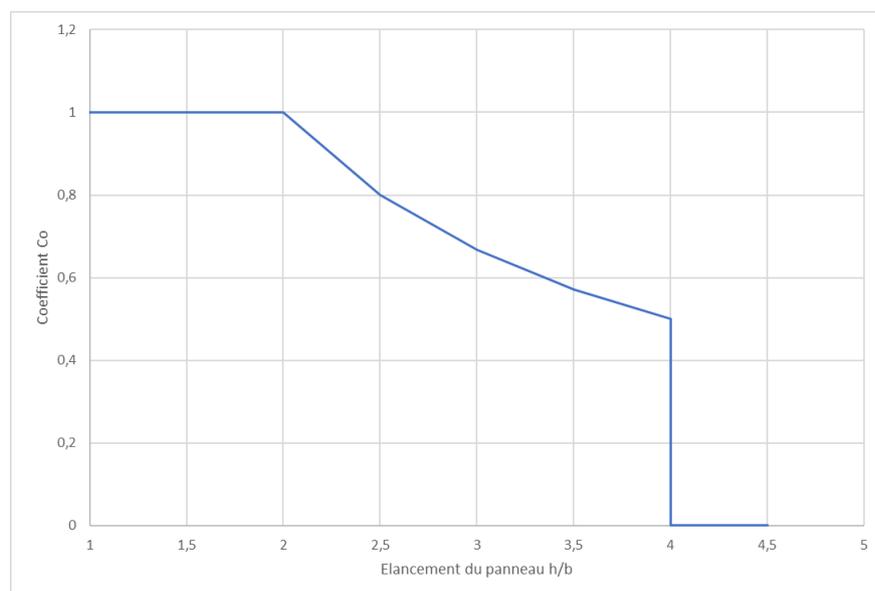


Figure 2 : Coefficient  $c_i$  en fonction de l'élanement du panneau

Le nombre d'organes de petites tailles étant important à la périphérie du panneau pour fixer celui-ci, il existe une redistribution plastique favorable à la résistance. Ainsi, la méthode admet que la résistance des  $n$  fixations est plus proche de  $n$  fois la résistance moyenne d'une fixation (en lieu et place de la résistance caractéristique). Pour prendre en compte cela, la résistance des fixations est majorée d'un facteur 1,2 pour le calcul de la résistance du voile.

Les linteaux et les parties en allèges ne sont pas supposés apporter de résistance supplémentaire aux murs. Ils n'assurent que la continuité de l'effet cantilever. Les murs perpendiculaires et les descentes de charges verticales n'apportent aucun effet bénéfique non plus.

Enfin, lorsque la liaison entre deux panneaux n'est pas assurée par le même montant mais par un assemblage de deux montants, celui-ci doit être justifié pour permettre le transfert de l'effort de cisaillement.

La démarche de calcul pour un mur contreventé par des panneaux à base de bois sur une seule face est la suivante :

1. Calcul de la résistance caractéristique d'une fixation panneau/ossature bois  $F_{f,Rk}$  :

$$F_{f,Rk} = 1,2 \cdot F_{v,fix,Rk}$$

où  $F_{v,fix,Rk}$  est la résistance caractéristique d'un assemblage panneau / bois en simple cisaillement calculée selon l'Eurocode 5.

2. Pour chaque panneau  $i$  participant à la résistance en contreventement, c'est-à-dire d'un élancement inférieur ou égal à 4 et sans ouverture, calcul de la résistance caractéristique en contreventement  $F_{i,v,Rk}$  :

$$F_{i,v,Rk} = \frac{F_{f,Rk} \cdot b_i \cdot c_i}{s}$$

avec

$$c_i = \begin{cases} 1 & \text{pour } b_i \geq h/2 \\ \frac{b_i}{h/2} & \text{pour } b_i < h/2 \end{cases}$$

- $b_i$  largeur du panneau  $i$
- $h$  hauteur du mur
- $s$  espacement des fixations en rives du panneau  $i$

3. Calcul de la résistance totale caractéristique du mur  $F_{v,Rk}$  :

$$F_{v,Rk} = \sum F_{i,v,Rk}$$

### 2.2.2 La méthode C

La méthode C dite « unifiée » a été présentée en 2006 dans le but d'être intégrée dans l'Eurocode 5 en remplacement des deux méthodes alternatives A et B.

Cette méthode s'appuie sur les mêmes hypothèses de base que la méthode A :

- ✓ Seuls les panneaux ayant un élancement limité à 4 participent à la résistance du mur
- ✓ les panneaux fonctionnent en cantilever et la continuité mécanique doit être assurée en tête

La présence d'un percement par diaphragme est autorisée sans perte de résistance sous réserve de respecter des dimensions et conditions limites :

- ✓ si le percement est encadré, les dimensions limites sont 300x300mm
- ✓ si le percement n'est pas encadré, les dimensions limites sont 150x150mm ou 200mm de diamètre
- ✓ la distance entre le percement et tout bord du diaphragme est d'au moins la plus grande dimension du percement

Contrairement à la méthode A, elle prend en compte les descentes de charges verticales en tête du mur et elle intègre plus largement leurs effets en considérant les éléments connexes au mur considéré comme les murs perpendiculaires. De plus, un coefficient est introduit lorsque les montants d'extrémité de chaque diaphragme ne sont pas suffisamment ancrés rigidement au sol (ou à la structure située en dessous).

La méthode considère également que la partie en allège d'une ouverture située du côté sous le vent d'un diaphragme participe à la résistance en contreventement du diaphragme.

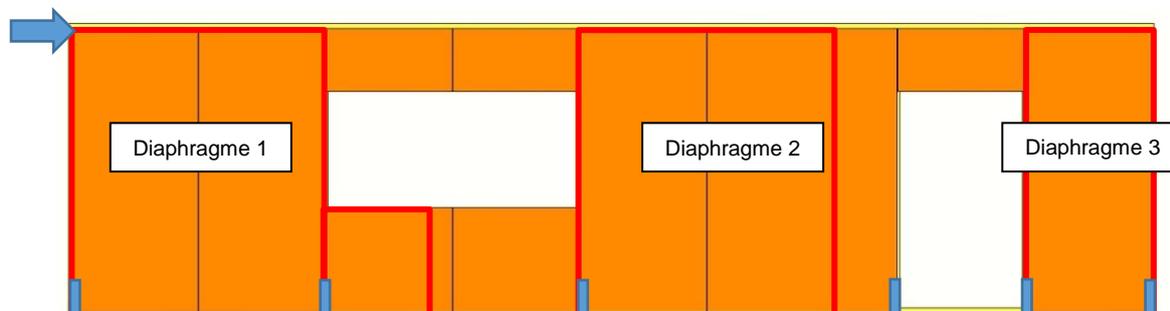


Figure 3 : Mur constitué de 3 diaphragmes au sens de la méthode C (en rouge, les panneaux participants pour un vent venant de la gauche)

De plus, pour des murs,

- ✓ contreventés par panneaux à base de bois sur une seule face,
- ✓ dont l'ossature est assemblée avec au moins 2 pointes de diamètre 3,8mm minimum et une longueur de pénétration de 50mm minimum,
- ✓ avec un espacement maximal des montants de 650mm,

la résistance peut être majorée d'un facteur  $k_j = 1,1$ .

Le calcul de la résistance caractéristique totale d'un mur s'effectue alors en cumulant la résistance de chacun des diaphragmes (effet cantilever).

Cette méthode est donc beaucoup plus complexe et complète que la méthode A. De plus, compte tenu de la prise en compte des conditions limites, elle est « orientée » ; la résistance en contreventement d'un mur sera potentiellement différente selon le sens de sollicitation si la géométrie du mur n'est pas symétrique.

En supposant que les exigences du DTU 31.2 sont respectées, notamment l'ancrage des montants d'extrémités des diaphragmes et les règles constructives de l'ossature et des fixations en rives de panneaux, l'application de la méthode C peut être conduite comme suit :

1. Calcul de la résistance caractéristique d'une fixation panneau/ossature bois  $F_{f,Rk}$  :

$$F_{f,Rk} = 1,2 \cdot F_{v,fix,Rk}$$

où  $F_{v,fix,Rk}$  est la résistance caractéristique d'un assemblage panneau / bois en simple cisaillement calculée selon l'Eurocode 5.

2. Pour chaque diaphragme  $i$ , calcul de sa longueur effective  $l_{i,ef}$  :

$$l_{i,ef} = l_i + \min \begin{cases} h_{w,i} \\ l_{w,i} \end{cases}$$

où

$l_i$  longueur total du diaphragme  $i$  SANS compter les panneaux ayant un élancement supérieur à 4

$h_{w,i}$  hauteur de l'allège contigüe au diaphragme  $i$  et située du côté sous le vent

$l_{w,i}$  longueur de l'allège contigüe au diaphragme  $i$  et située du côté sous le vent SANS compter les éléments de panneaux ayant un élancement supérieur à 4

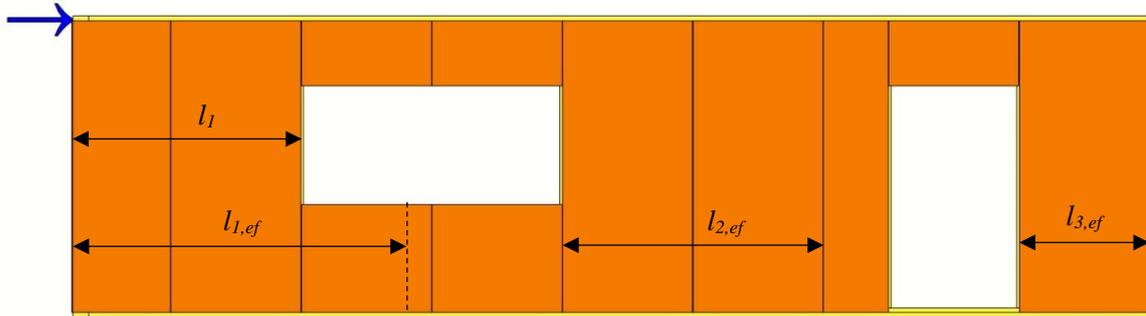


Figure 4 : Exemples de longueurs effectives

3. Pour chaque diaphragme  $i$ , détermination du coefficient de correction  $k_{i,w}$  (prise en compte des conditions d'ancrage et de chargement du montant au vent) selon la procédure suivante :

La résistance totale au soulèvement  $R_{i,v}$  du montant d'extrémité au vent du diaphragme  $i$  est définie par :

$$R_{i,v} = R_{i,anc} + R_{i,cp} + R_{i,mur}$$

avec

$R_{i,anc}$  Résistance à l'arrachement de l'ancrage en pied du montant d'extrémité au vent

$R_{i,cp}$  Charge permanente descendant sur le montant d'extrémité au vent

$R_{i,mur}$  Résistance de la liaison entre le montant d'extrémité au vent et la partie du mur de retour ou en allège

$R_{i,anc}$  peut être par exemple une valeur calculée ou une valeur donnée par le fabricant du système d'ancrage.

$R_{i,cp}$  est déterminé en considérant les charges permanentes descendant sur le diaphragme considéré et :

- ✓ Sur le linteau de l'ouverture contigüe coté au vent
- ✓ Sur le mur en retour (ou refend) sur une longueur limitée à  $h/2$

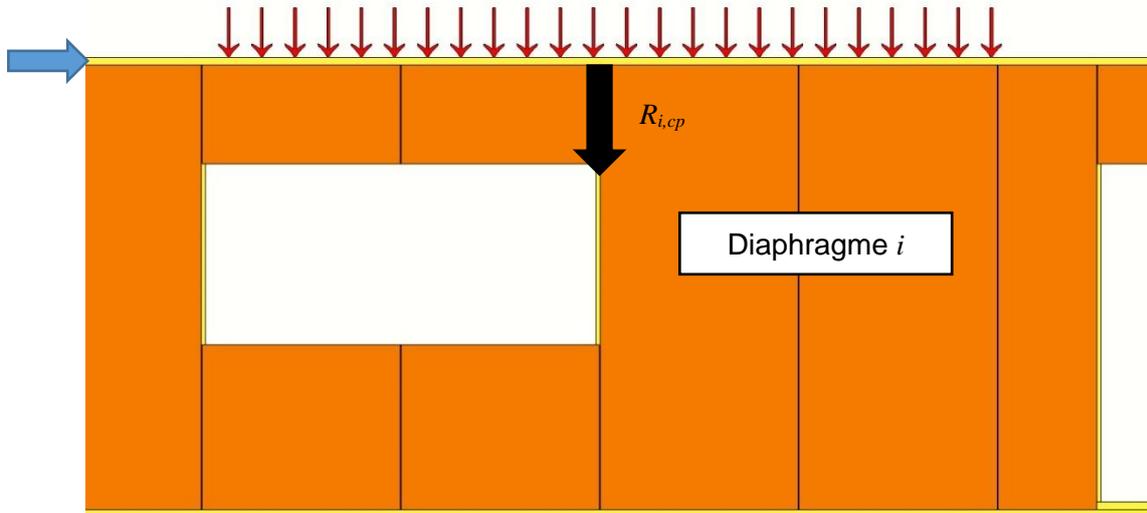


Figure 5 : Charges permanentes à prendre en compte pour déterminer  $R_{i,cp}$  dans le cas d'une ouverture (vent de la gauche)

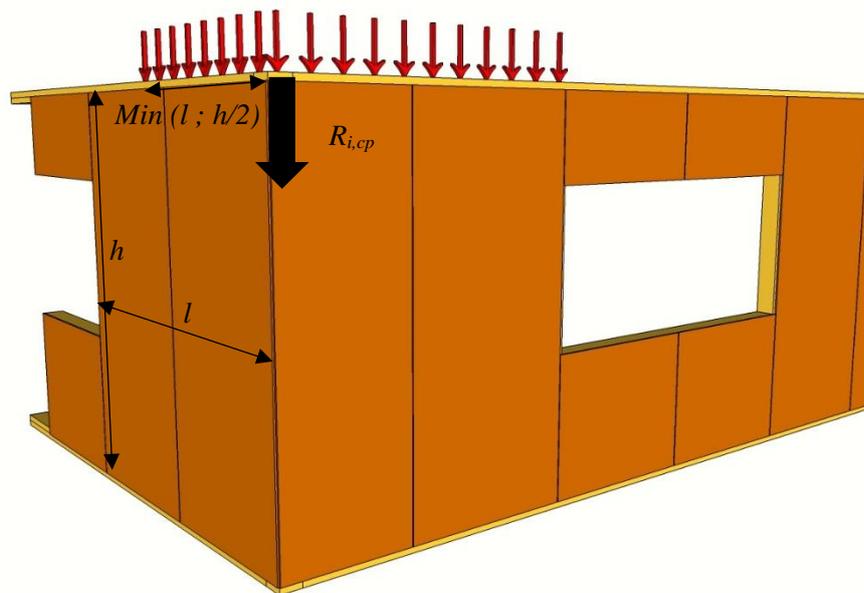


Figure 6 : Charges permanentes à prendre en compte pour déterminer  $R_{i,cp}$  dans le cas d'un retour de mur (vent de la gauche)

$R_{i,mur}$  est déterminé comme suit :

- ✓ Dans le cas d'une ouverture sans allège (porte par exemple),  $R_{i,mur} = 0$

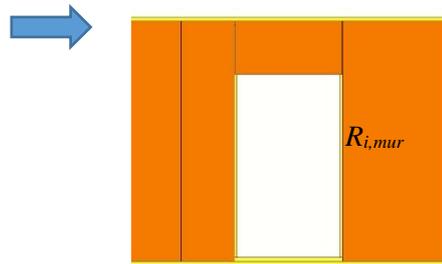


Figure 7 :  $R_{i,mur}$  dans le cas d'une ouverture sans allège

- ✓ Dans le cas d'une ouverture avec allège :

$$R_{i,mur} = \min \left\{ \frac{F_{f,Rd} \cdot h_w}{2 \cdot s} ; R_{liaison,d} \right\}$$

$R_{liaison,d}$  est la résistance de calcul en cisaillement de la liaison entre les deux éléments de mur (donc sans objet si même montant)

$F_{f,Rd}$  est la résistance de calcul en cisaillement des fixations du panneau sur l'ossature

$s$  est l'espacement des fixations en rives des panneaux

$h_w$  est la hauteur de l'allège située coté au vent

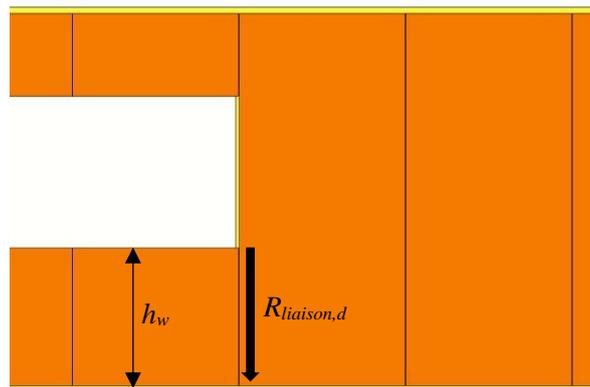


Figure 8 :  $R_{i,mur}$  dans le cas d'une ouverture avec allège

- ✓ Dans le cas d'un mur en retour (ou refend) :

$$R_{i,mur} = \min \left\{ \frac{F_{f,Rd} \cdot h}{2 \cdot s} ; \frac{F_{f,Rd} \cdot l_r}{2 \cdot s} ; R_{liaison,d} \right\}$$

$R_{liaison,d}$  est la résistance de calcul en cisaillement de la liaison entre les deux éléments de mur (donc sans objet si même montant)

$F_{f,Rd}$  est la résistance de calcul en cisaillement des fixations du panneau sur l'ossature

$s$  est l'espacement des fixations en rives des panneaux

$h$  est la hauteur du mur

$l_r$  est la longueur du mur de retour sans ouverture

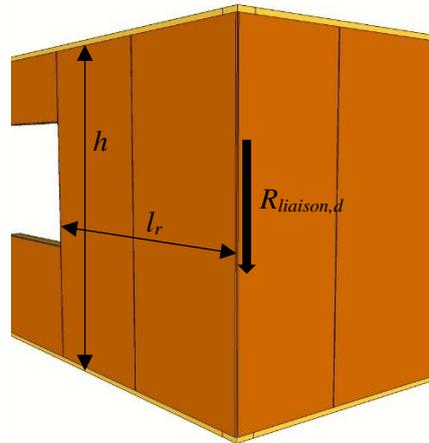


Figure 9 :  $R_{i,mur}$  dans le cas d'un retour de mur

Le coefficient de correction  $k_{i,w}$  est alors calculé par :

$$\begin{aligned} \text{Si } R_{i,v} > \frac{F_{f,Rd} \cdot h}{s} & k_{i,w} = 1 \\ \text{Si } \frac{F_{f,Rd} \cdot h}{s} \geq R_{i,v} \geq \frac{F_{f,Rd} \cdot (h-l_i)}{s} & k_{i,w} = 1 - \frac{(1-\beta)^2}{2\alpha} \\ \text{Si } R_{i,v} < \frac{F_{f,Rd} \cdot (h-l_i)}{s} & k_{i,w} = 0,5 \cdot \alpha + \beta \end{aligned}$$

où  $\alpha = l_i/2$  et  $\beta = \frac{R_{i,v}}{F_{f,Rd}/s} \cdot h$

4. Pour chaque diaphragme  $i$ , calcul de la résistance caractéristique en contreventement  $F_{i,v,Rk}$  :

$$F_{i,v,Rk} = k_j \cdot k_{i,w} \cdot \frac{F_{f,Rk} \cdot l_{i,ef}}{s}$$

- $l_{i,ef}$  longueur effective du diaphragme  $i$   
 $s$  espacement des fixations en rives du panneau  $i$   
 $k_j$  coefficient de majoration dépendant de l'assemblage de l'ossature (1 ou 1,1)  
 $k_{i,w}$  coefficient de correction prenant en compte les conditions limites (voir puce 4)

5. Calcul de la résistance totale caractéristique du mur  $F_{v,Rk}$  :

$$F_{v,Rk} = \sum F_{i,v,Rk}$$

### 2.2.3 La méthode de Sugiyama et de Yasumura

Cette méthode d'estimation de la résistance au contreventement d'un mur à ossature bois comportant des ouvertures a été développée par Sugiyama (et Matsumoto) à partir des années 80. Elle a été reprise dans le code de calcul américain (IBC) en 2000.

Cette approche consiste à considérer que la résistance en contreventement du mur partiellement ancré (uniquement aux extrémités du mur) avec ouvertures peut être directement déduite de celle du mur plein de mêmes dimensions par l'utilisation d'un facteur de réduction lié aux dimensions des ouvertures.

Un premier coefficient d'ouverture, caractérisant le ratio d'ouverture et noté  $r$ , dépend de deux paramètres :

- ✓ le ratio entre l'aire totale des ouvertures et l'aire du mur, noté  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{\sum A_{ouvertures}}{A_{mur}}$$

- ✓ le ratio entre la longueur cumulée de parties de mur sans ouverture et la longueur totale du mur, noté  $\beta$  :

$$\beta = \frac{\sum L_{mur,so}}{L_{mur,tot}}$$

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

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

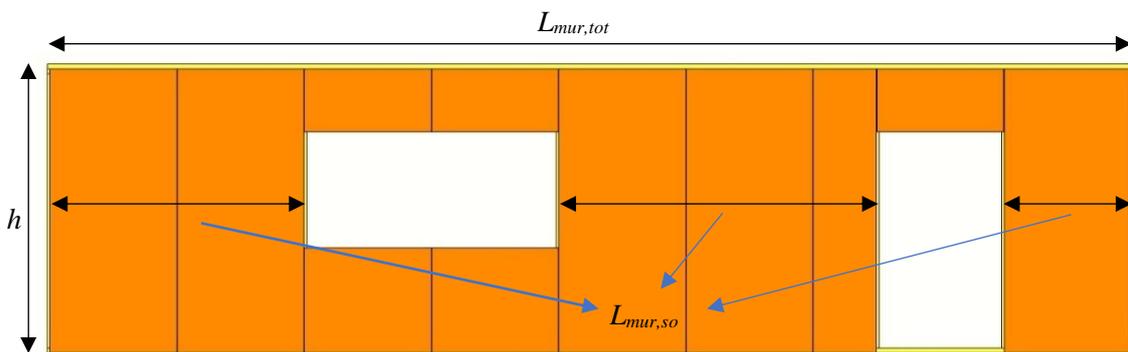


Figure 10 : références utilisées dans la méthode

A partir de ce facteur de réduction lié aux ouvertures, il a été établi des relations empiriques entre la résistance en contreventement du mur partiellement ancré avec ouvertures ( $F_{v,o}$ ) et celle du mur plein de mêmes dimensions ( $F_v$ ), suivant le taux de déformation en cisaillement du mur :

$$F_{v,o} = \frac{r}{3-2r} \cdot F_v \quad \text{à un déplacement en tête de mur de } h/100 \text{ (ELU)}$$

$$F_{v,o} = \frac{3r}{8-5r} \cdot F_v \quad \text{à un déplacement en tête de mur de } h/300 \text{ (ELS)}$$

Le caractère conservatif de cette méthode, calée initialement à partir de résultats d'essais sur des panneaux avec voiles de contreventement en contreplaqué à l'échelle 1/3 a pu être vérifié par différentes campagnes expérimentales en grandeur d'emploi. Celles-ci visaient à étudier plus précisément le comportement des murs avec ouvertures partiellement ancrés, c'est-à-dire ancrés uniquement aux extrémités du mur complet, sans ancrage de part et d'autre des ouvertures (report No.TE-1996-001 de J.D. Dolan soumis à l'American Forest & Paper Association).

Ces travaux ont notamment été repris par l'American Forest & Paper Association pour établir la méthode de dimensionnement dénommée « Perforated Shearwall Design » et incorporée notamment dans le code de calcul IBC 2000 aux Etats-Unis. Elle constitue une alternative à la méthode dénommée « Segmented Shearwall Design » où seules les parties de mur plein, ancrées à leurs extrémités, sont prises en compte comme la méthode A.

Dans le cas des murs pleinement ancrés, un dispositif d'ancrage est positionné à chaque extrémité de chaque partie pleine du mur, y compris de part et d'autre des ouvertures comme c'est le cas dans le DTU 31.2 et pour la méthode A proposée dans l'Eurocode 5.

Dans ce cas, un modèle mécanique a été présenté par Yasumura (2010) permettant de remonter au facteur de réduction.

Le mur pleinement ancré et comportant une ouverture forme un système en équilibre sous les efforts externes (effort horizontal et réactions aux appuis). Une analyse simplifiée du diaphragme, en considérant que le cisaillement ne pouvant être repris par l'ouverture est transféré aux parties adjacentes, conduit à une distribution des efforts telle que représentée dans la figure ci-dessous :

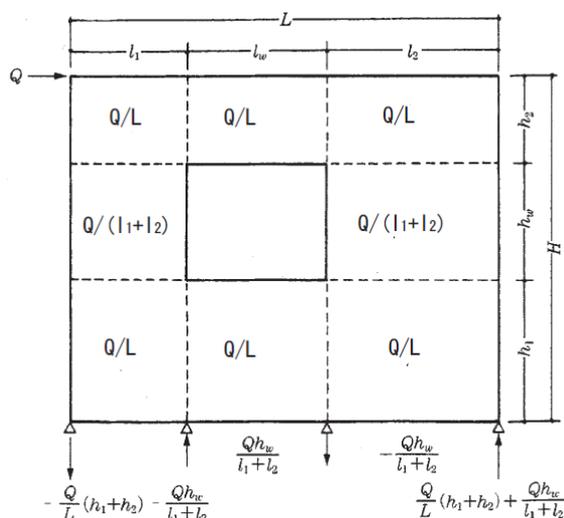


Figure 11 : Hypothèse de distribution du cisaillement dans un diaphragme avec ouverture

On considère que la résistance maximale en contreventement du mur avec ouverture,  $F_{v,o}$ , est atteinte lorsque le cisaillement dans la connexion du voile sur le montant d'extrémité est égal à celui du mur de même dimension sans ouverture sous l'effort de contreventement  $F_v$  :

- ✓ dans le mur sans ouverture, le flux de cisaillement est  $s_{v,0} = F_v/l$

- ✓ le cisaillement maximal sur le montant d'extrémité est obtenu lorsque celui-ci est soumis à un effort normal maximal  $F_v \cdot h/l$
- ✓ l'effort normal maximal dans le montant d'extrémité du mur avec ouverture soumis à l'effort de contreventement  $F_{v,o}$  est :

$$F_{v,o} \cdot \frac{(h_1 + h_2)}{l} + F_{v,o} \cdot \frac{h_w}{(l_1 + l_2)}$$

- ✓ On obtient donc l'égalité suivante :

$$F_{v,o} = F_v \cdot \frac{1}{1 + \frac{h_w \cdot l_w}{l \cdot h} \cdot \frac{l}{l_1 + l_2}}$$

Ainsi selon cette méthode, la résistance en contreventement d'un diaphragme **pleinement ancré** aux extrémités avec une ouverture ( $F_{v,o}$ ) est déduite de celle du diaphragme plein de mêmes dimensions ( $F_v$ ) par la relation :

$$F_{v,o} = r \cdot F_v$$

Où  $r$  est le ratio d'ouverture tel que défini précédemment.

Pour les murs pleinement ancrés, il convient donc de « découper » le mur en fonction des ouvertures et d'utiliser directement le facteur d'ouverture  $r$  comme coefficient de réduction de la résistance.

De plus, il n'est pas fait de distinction entre les ouvertures avec allège (fenêtres) et les ouvertures sans allège (portes et baies). A titre conservateur, il semble nécessaire de considérer une ouverture sans allège comme étant une interruption du mur et non une ouverture.

Enfin, Yasumura ayant conduit des essais à l'échelle 1:1, dans le cas d'un mur **partiellement ancré**, il propose une optimisation du facteur de réduction proposé par Sugiyama :

$$F_{v,o} = \frac{r}{2 - r} \cdot F_v$$

A noter également que Yasumura (ainsi que d'autres auteurs) conclut également au fait que la même approche avec les mêmes coefficients de réduction peut être utilisée pour évaluer la raideur du mur en contreventement avec des ouvertures.

#### 2.2.4 La méthode du document PD 6693-1

Le PD 6693-1 est un document publié par le British Standard en 2012 sous le titre « UK Non-Contradictory Complementary Information to Eurocode 5: Design of timber structures ».

Cette approche considère une discontinuité de diaphragme lorsque l'ouverture a au moins :

- ✓ Une hauteur supérieure à  $0,65.h$
- ✓ Une hauteur d'allège inférieure à  $0,25.h$

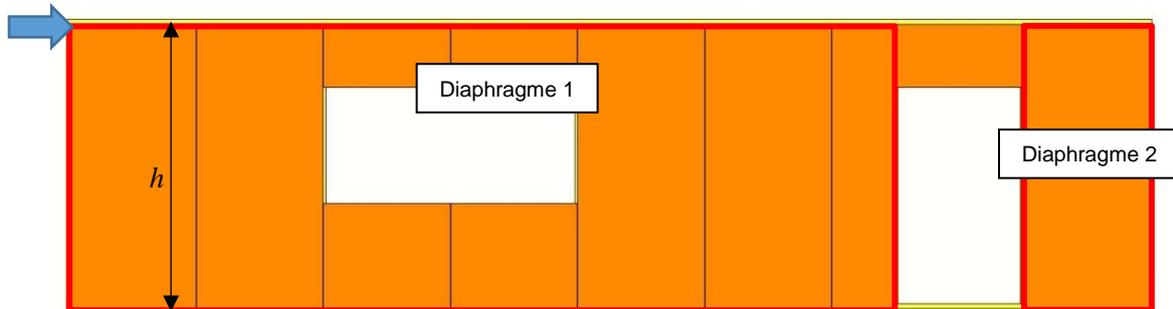


Figure 12 : Mur constitué de 2 diaphragmes au sens du PD 6693-1

Les percements de petites dimensions sont négligés selon les mêmes règles que la méthode C.

Les panneaux de pleine hauteur encadrant les ouvertures doivent avoir un élancement limité à 4 ou un panneau de largeur nominale (1200mm) doit être présent à une distance de moins de  $h/8$  de l'ouverture.

Pour la reprise des efforts tranchants en pied de mur, les frottements peuvent être pris en compte avec un coefficient de frottement bois/bois de 0,4.

Pour la reprise des efforts de soulèvement, il n'est pas obligatoire de positionner un ancrage à chaque extrémité des diaphragmes. Un coefficient est introduit lorsque les montants d'extrémité de chaque diaphragme ne sont pas suffisamment ancrés rigidement au sol (ou à la structure située en dessous). Cette méthode s'applique donc aux murs partiellement ancrés.

Le calcul de la résistance totale d'un mur s'effectue en cumulant la résistance de chacun des diaphragmes (effet cantilever).

L'application (simplifiée) de la méthode peut être conduite comme suit dans le cas de voiles simple face :

1. Calcul de la résistance par unité de longueur des fixations panneau/ossature bois  $f_{p,d,t}$  :

$$f_{p,d,t} = F_{f,Rd} \cdot (1,15 + s) / s$$

où

$F_{f,Rd}$  résistance de calcul d'une fixation panneau / bois en simple cisaillement calculée selon l'Eurocode 5

$s$  espacement des fixations en rives des panneaux

2. Pour chaque diaphragme  $i$ , calcul du coefficient de modification  $K_{i,w}$  prenant en compte la longueur du diaphragme, les charges descendantes verticales et les ancrages :

$$K_{i,w} = \left( 1 + \left( \frac{H}{\mu L} \right)^2 + \left( \frac{2M_{d,stab,n}}{\mu f_{p,d,t} L^2} \right) \right)^{0,5} - \frac{H}{\mu L}$$

Le coefficient  $K_{i,w}$  ne peut pas être pris supérieur à 1 ou inférieur à 0.

$$\text{Avec } \mu = \min \left\{ \frac{1}{f_{w,d}}, \frac{1}{f_{p,d,t}} \right\}$$

$M_{d,stab,n}$  moment résultant dans le mur (dû à l'effort en tête, les charges descendantes, ...)

$L$  longueur du diaphragme

$H$  hauteur du diaphragme

$f_{w,d}$  la résistance de calcul au soulèvement par unité de longueur des fixations en pied de diaphragme

Ce coefficient  $K_{i,w}$  représente en fait le ratio de fixations en partie basse du voile pouvant être mobilisé pour la reprise des efforts de cisaillement. Le reste étant dédié à la reprise des efforts de soulèvement. Dans le cas d'un mur pleinement ancré,  $K_{i,w}$  est donc égal à 1.

3. Pour chaque diaphragme  $i$ , calcul du coefficient de modification  $K_{opening}$  prenant en compte l'influence des ouvertures :

$$K_{opening} = 1 - 1,9 \cdot \frac{A}{HL}$$

$A$  surface totale des ouvertures dans le diaphragme

Si la hauteur d'une ouverture fait de la moitié de sa longueur ( $L_{open}$ ), alors sa surface est prise comme étant  $0,5 \cdot (L_{open})^2$ .

4. Calcul de la résistance de calcul du diaphragme  $i$   $F_{i,Rd}$  :

$$F_{i,v,Rd} = K_{opening} \cdot K_{i,w} \cdot f_{p,d,t} \cdot L$$

5. Calcul de la résistance totale du mur  $F_{v,Rd}$  :

$$F_{v,Rd} = \sum F_{i,v,Rd}$$

Enfin, une condition est donnée afin de limiter la déformation des diaphragmes :

$$K_{i,w} \cdot f_{p,d,t} \leq 8 \cdot (1 + K_{comb}) \cdot (L/H)$$

$K_{comb}$  est un facteur de combinaison des voiles double face. Il vaut 0 dans le cas d'un diaphragme à simple face ; la condition devient donc :

$$K_{i,w} \cdot f_{p,d,t} \leq 8 \cdot (L/H)$$

### 2.2.5 Le document de travail du TC250/SC5/WG3

Dans le cadre de la révision en cours des règles Eurocodes, le groupe de travail en charge de la partie « diaphragmes » est le groupe TC250/SC5/WG3. Un document de travail traitant de la vérification de la résistance en contreventement d'un mur à ossature bois a été mis en circulation en 2016. La dernière version de ce document date de 2018. L'approche proposée n'a pas encore fait l'objet d'une intégration dans la révision de l'Eurocode 5.

Ce document tente de traiter des diaphragmes d'une manière globale, c'est-à-dire à la fois des diaphragmes de mur et des diaphragmes horizontaux. Concernant les diaphragmes de mur, ce document présente, comme la version actuelle de l'Eurocode 5, deux méthodes désignées méthode A et méthode B.

La méthode A est quasiment inchangée par rapport à la méthode A déjà présente dans l'Eurocode 5 en vigueur. Seuls les panneaux sans ouverture sont considérés pour le calcul de la résistance en contreventement du mur.

La « nouvelle » méthode B n'est quant à elle pas encore décrite dans le document de travail.

La prise en compte des ouvertures n'est pas encore introduite mais des éléments sont abordés pour les percements. Ceux-ci peuvent être négligés si leur diagonal est limitée à 200mm et que la somme de leur longueur (ou hauteur) ne dépasse pas 10% de la longueur (ou hauteur) du diaphragme. Un coefficient  $k_{op}$  est introduit pour prendre en compte la réduction de résistance de la couture dans le cas particulier des percements d'insufflation d'isolant.

Finalement, la principale nouveauté apportée par ce document de travail est l'introduction d'éléments permettant l'estimation des déformations du mur en contreventement (voir §2.3).

## 2.3 Calcul de la rigidité d'un diaphragme de mur

### 2.3.1 Généralités

Dans la norme EN 1995-1-1 (Eurocode 5) en vigueur, aucune méthode permettant de déterminer la raideur apparente en contreventement n'est proposée. De plus, la majorité des publications ne traitent que de la résistance en contreventement des diaphragmes de mur.

On peut cependant citer les approches suivantes :

- ✓ Le modèle de Källsner
- ✓ Le modèle de Seim & Hummel
- ✓ Le modèle UniTn
- ✓ Le modèle de Hoekstra
- ✓ Le modèle de la norme néozélandaise
- ✓ Le modèle de la norme canadienne
- ✓ Le modèle du document de travail du TC250/SC5/WG3

A noter que l'ensemble des modèles suppose un diaphragme sans ouverture.

L'application de ces différents modèles à des configurations de diaphragmes pour lesquels nous disposons de résultats d'essais montrent qu'un certain nombre sous-estime de manière importante la raideur du diaphragme. Il s'agit notamment des modèles UniTn, Hoekstra, des normes néozélandaise et canadienne.

Nous faisons donc le choix de ne décrire dans ce rapport, que les modèles de Källsner, de Seim & Hummel et, à titre informatif, les éléments du document de travail du groupe TC250/SC5/WG3 de 2018.

### 2.3.2 Le modèle de Källsner

Ce modèle suppose que la totalité de la rigidité d'un diaphragme est pilotée uniquement par le glissement des panneaux des fixations des panneaux sur les traverses hautes et basses et sur les montants.

La participation du montant intermédiaire étant relativement faible, on peut la négliger à titre conservateur.

La raideur en contreventement  $K_{v,ser,p,j}$  d'un panneau  $j$  s'exprime alors par :

$$K_{v,ser,p,j} = \left( \frac{2 \cdot s}{K_{ser,f} \cdot \left( b_{p,j} + \frac{h}{3} \right)} + \frac{2 \cdot s \cdot h^2}{K_{ser,f} \cdot b_{p,j}^2 \cdot \left( h + \frac{b_{p,j}}{3} \right)} \right)^{-1}$$

où

- $s$       espacement des fixations en périphérie du panneau
- $b_{p,j}$     largeur du panneau  $j$
- $h$       hauteur du diaphragme (ou distance entre les traverses haute et basse)
- $K_{ser,f}$     module de glissement de la fixation panneau/ossature donné dans l'EN 1995-1-1

La raideur  $K_{v,ser,dia,i}$  du diaphragme  $i$  constitué de plusieurs panneaux sans ouverture est alors :

$$K_{v,ser,dia,i} = \sum K_{v,ser,p,j}$$

Ce modèle ne tient pas compte de la souplesse apportée par la déformation de l'ancrage d'extrémité travaillant à l'arrachement (soulèvement du côté au vent). Si l'ancrage n'est pas parfaitement rigide en arrachement, il convient donc de l'ajouter.

La rigidité de l'ancrage en arrachement  $K_{anc,ser}$  peut être soit donnée directement par la fiche technique du système d'ancrage, soit évaluée en appliquant les règles de l'Eurocode 5 pour un assemblage bois/métal (cas d'une ferrure ou équerre rigide clouée par exemple).

Les deux « systèmes » travaillant en série, les souplesses respectives s'additionnent. En supposant une rotation de corps rigide du diaphragme  $i$ , sa raideur apparente  $K_{v,ser,i}$  est :

$$K_{v,ser,i} = \left( \frac{h}{K_{anc,ser} \cdot l} + \frac{1}{K_{v,ser,dia,i}} \right)^{-1}$$

Le fonctionnement en cantilever permet ensuite de calculer la raideur totale du mur  $K_{v,ser,mur}$  en sommant les raideurs des diaphragmes sans ouverture le constituant :

$$K_{v,ser} = \sum K_{v,ser,i}$$

### 2.3.3 Le modèle de Seim & Hummel

Dans cette approche, le déplacement total en tête du diaphragme sans ouverture est défini comme étant le cumul de cinq déplacements dus respectivement à :

- ✓  $u_K$  : glissement des fixations entre le panneau et l'ossature
- ✓  $u_G$  : déformation des panneaux du diaphragme en cisaillement de voile
- ✓  $u_E$  : traction du montant au vent
- ✓  $u_{v1}$  : compression du montant sous le vent sur la traverse basse
- ✓  $u_{v2}$  : déformation de l'ancrage en traction (montant au vent)

Le déplacement total en tête du diaphragme  $i$  est :

$$u_{tot,i} = u_{K,i} + u_{G,i} + u_{E,i} + u_{v1,i} + u_{v2,i}$$

Cependant, les déplacements  $u_E$  et  $u_{v1}$  étant très faibles au regard des autres déplacements, ils peuvent être généralement négligés :

$$u_{tot,i} = u_{K,i} + u_{G,i} + u_{v2,i}$$

avec

$$u_{K,i} = \frac{1}{m} \cdot [2 \cdot l + 2 \cdot (n + 1) \cdot h] \cdot \frac{a_v \cdot F}{K_{ser} \cdot l^2}$$

$$u_{G,i} = \frac{F \cdot h}{m \cdot G \cdot t \cdot l}$$

$$u_{v2,i} = \frac{h \cdot F}{K_{anc,ser} \cdot l}$$

où

- $m$  nombre de faces contreventées (1 ou 2)
- $l$  longueur du diaphragme
- $n$  nombre de joints verticaux entre les panneaux
- $h$  hauteur du diaphragme
- $a_v$  espacement des fixations
- $F$  Effort en tête du diaphragme
- $K_{ser}$  module de glissement des fixations (panneau/ossature)

$G$  module de cisaillement de voile du panneau  
 $t$  épaisseur du panneau  
 $K_{anc,ser}$  rigidité de l'ancrage en traction (montant au vent)

La raideur globale apparente du diaphragme  $i$  est donc :

$$K_{v,ser,i} = \left( \frac{1}{m} \cdot [2 \cdot l + 2 \cdot (n + 1) \cdot h] \cdot \frac{a_v}{K_{ser} \cdot l^2} + \frac{h}{m \cdot G \cdot t \cdot l} + \frac{h}{K_{anc,ser} \cdot l} \right)^{-1}$$

Le fonctionnement en cantilever permet ensuite de calculer la raideur totale du mur  $K_{v,ser,mur}$  en sommant les raideurs des diaphragmes sans ouverture le constituant :

$$K_{v,ser} = \sum K_{v,ser,i}$$

### 2.3.4 Le document de travail du TC250/SC5/WG3

Dans le document de travail actuel il n'y a pas encore de clause traitant de règles permettant le calcul des déplacements en tête de mur. Une note propose cependant les éléments suivants :

Le déplacement total en tête d'un panneau individuel sans ouverture est défini comme étant le cumul de deux déplacements dus respectivement à :

- ✓  $u_K$  : glissement des fixations entre le panneau et l'ossature
- ✓  $u_G$  : déformation du panneau en cisaillement de voile

Le déplacement total en tête du panneau  $j$  est :

$$u_{tot,j} = u_{K,j} + u_{G,j}$$

avec

$$u_{K,j} = (2 \cdot l_j + 2 \cdot h) \cdot \frac{a_1 \cdot s_{0,d}}{K_{ser} \cdot l_j}$$

$$u_{G,j} = \frac{s_{0,d} \cdot h}{G \cdot t}$$

et

$$s_{0,d} = \frac{F_{v,d,j}}{l_j}$$

où

$l_j$  largeur du panneau  
 $h$  hauteur du panneau  
 $a_1$  espacement des fixations  
 $s_{0,d}$  Cisaillement par unité de longueur dans les fixations (panneau/ossature)  
 $K_{ser}$  module de glissement des fixations (panneau/ossature)

$G$  module de cisaillement de voile du panneau  
 $t$  épaisseur du panneau  
 $F_{v,d,j}$  Effort en tête du panneau

Il s'agit en fait de la méthode de Seim & Hummel appliquée à un panneau individuel.

La raideur du panneau  $j$  est donc :

$$K_{v,ser,j} = \left( [2 \cdot l_j + 2 \cdot h] \cdot \frac{a_1}{K_{ser} \cdot l_j^2} + \frac{h}{G \cdot t \cdot l_j} \right)^{-1}$$

Le fonctionnement en cantilever permet ensuite de calculer la raideur totale du diaphragme  $i$   $K_{v,ser,i}$  en sommant les raideurs des panneaux constituant le diaphragme sans ouverture :

$$K_{v,ser,i} = \sum K_{v,ser,j}$$

Il convient ensuite de considérer les rigidités des ancrages d'extrémité du diaphragme (en traction du côté au vent et en compression du côté sous le vent). En général, le côté en compression peut être négligé et le déplacement en tête dû au soulèvement au niveau de l'ancrage en traction est :

$$u_{v2,i} = \frac{h \cdot F_{v,d,i}}{K_{anc,ser} \cdot l_i}$$

$F_{v,d,i}$  Effort en tête du panneau  
 $K_{anc,ser}$  rigidité de l'ancrage en traction (montant au vent)  
 $l_i$  longueur du diaphragme

La raideur globale apparente du diaphragme  $i$  est donc :

$$K_{v,ser,i} = \left( \sum_j \left( [2 \cdot l_j + 2 \cdot h] \cdot \frac{a_1}{K_{ser} \cdot l_j^2} + \frac{h}{G \cdot t \cdot l_j} \right) + \frac{h}{K_{anc,ser} \cdot l_i} \right)^{-1}$$

Le fonctionnement en cantilever permet ensuite de calculer la raideur totale du mur  $K_{v,ser,mur}$  en sommant les raideurs des diaphragmes sans ouverture le constituant :

$$K_{v,ser} = \sum K_{v,ser,i}$$

### 3. EXPLOITATION DES DIFFÉRENTES APPROCHES

#### 3.1 Généralités sur les configurations

Afin d'évaluer les différentes résistances en contreventement obtenues selon les différentes approches, cinq configurations de murs ont été calculées. Elles sont représentatives d'architectures usuelles et combinent différents types d'ouvertures (baie, porte, fenêtres, ...) et différentes dimensions de panneaux (largeurs variant de 600 à 1200mm).

Toutes les configurations sont basées sur un mur plein de référence « configuration #0 » sans ouverture d'une longueur totale de 9,9m et une hauteur de 2,7m (panneaux).

Les voiles sont des panneaux d'OSB/3 fixés par pointes. Pour chaque configuration, deux types de voile ont été calculés :

- Panneaux de 9mm d'épaisseur, fixations de 2,1x45mm correspondant à la configuration de référence de la règle simplifiée du DTU 31.2
- Panneaux de 12mm d'épaisseur, fixations de 2,5x55mm

Un mur de retour du côté au vent est également intégré pour être pris en compte dans le cas des approches le permettant. Il est composé de deux panneaux de 1,2m suivis d'une ouverture de type fenêtre.

Les murs sont considérés avoir un poids de 140 kg/ml et une charge descendante verticale en tête de 500 kg/ml (charge de toiture, plafond, isolant, ...) dans le cas des approches permettant la prise en compte de cette charge.

Les ouvertures ont une hauteur de 1200mm, laissant un linteau d'une hauteur de 500mm et une allège de 1000mm.

Le côté au vent est le côté gauche du mur. Cette information est nécessaire car certaines méthodes (notamment la méthode C) peuvent conduire à des résistances différentes selon le sens de l'effort.

Toutes les configurations sont supposées respecter le DTU31.2 et notamment l'ancrage total. De fait, dans le cas de la méthode du PD6693-1, le coefficient  $K_{i,w}$  est égal à 1, et dans le cas de la méthode de Sugiyama et Yasumura, on retient le coefficient  $r$  comme coefficient direct de correction appliqué au mur plein équivalent calculé selon la méthode A.

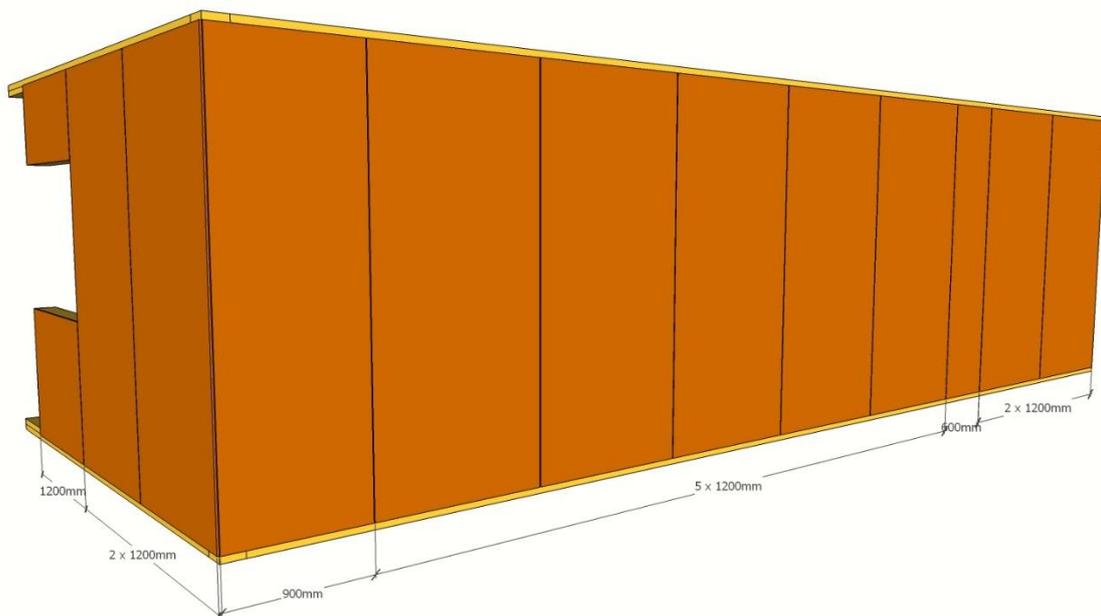
A noter que l'analyse exploite également l'approche simplifiée du DTU 31.2. Pour rappel, celle-ci s'appuie sur la méthode A appliquée à des panneaux d'OSB/3 de 9mm (fixé quels que soient le panneau et son épaisseur) avec une résistance majorée forfaitairement par un coefficient de 1,3 pour prendre en compte le caractère conservateur de la méthode A et notamment la non prise en compte des ouvertures et des panneaux élancés. De fait, elle offre un gain important par rapport à la méthode A dans le cas des voiles de faible épaisseur mais cet « avantage » se réduit pour les panneaux de forte épaisseur.

Un outil de calcul (sous la forme d'une feuille Excel) a été développé pour permettre l'ensemble des calculs sur toutes les configurations identiques.

### 3.2 Configurations retenues

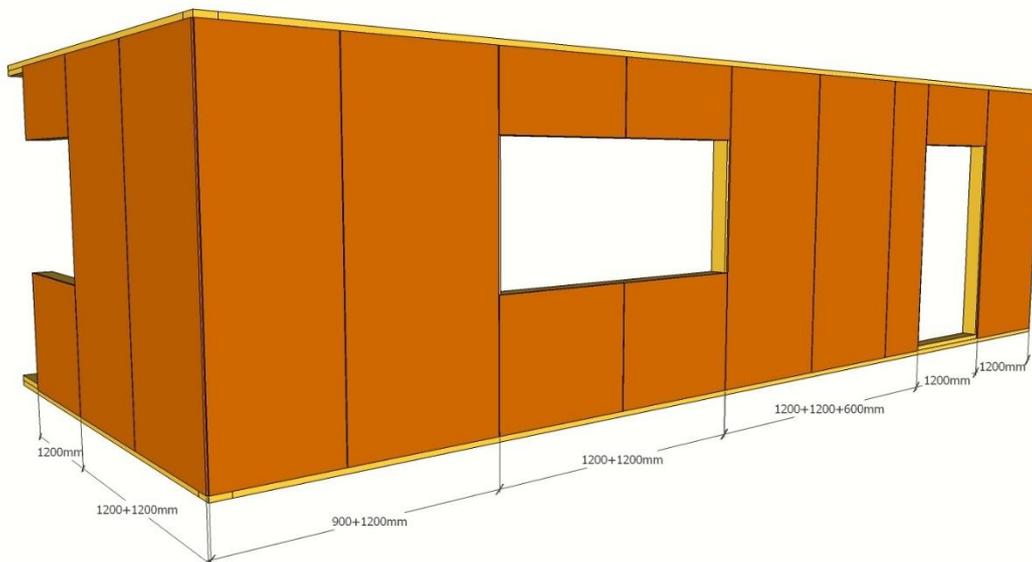
Le mur plein de référence configuration #0 est composé comme suit (de gauche à droite) :

- ✓ 1 panneau de 900mm
- ✓ 5 panneaux de 1200mm
- ✓ 1 panneau de 600mm
- ✓ 1 panneau de 1200mm



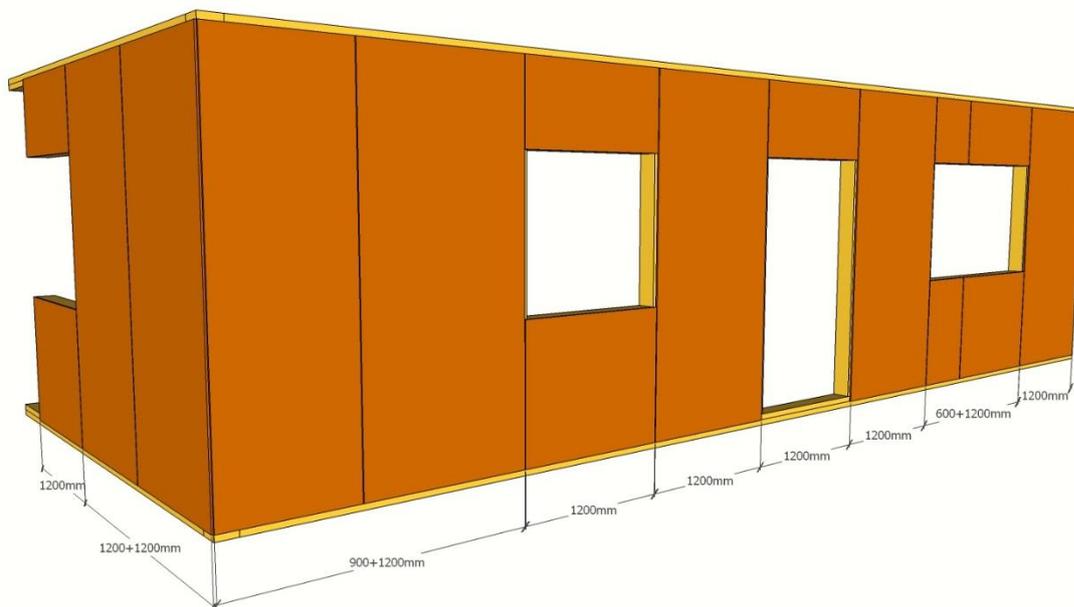
*Figure 13 : Mur plein de référence « configuration #0 »*

La configuration #1 est composée d'une grande ouverture de 2400mm et d'une porte de 1200mm.



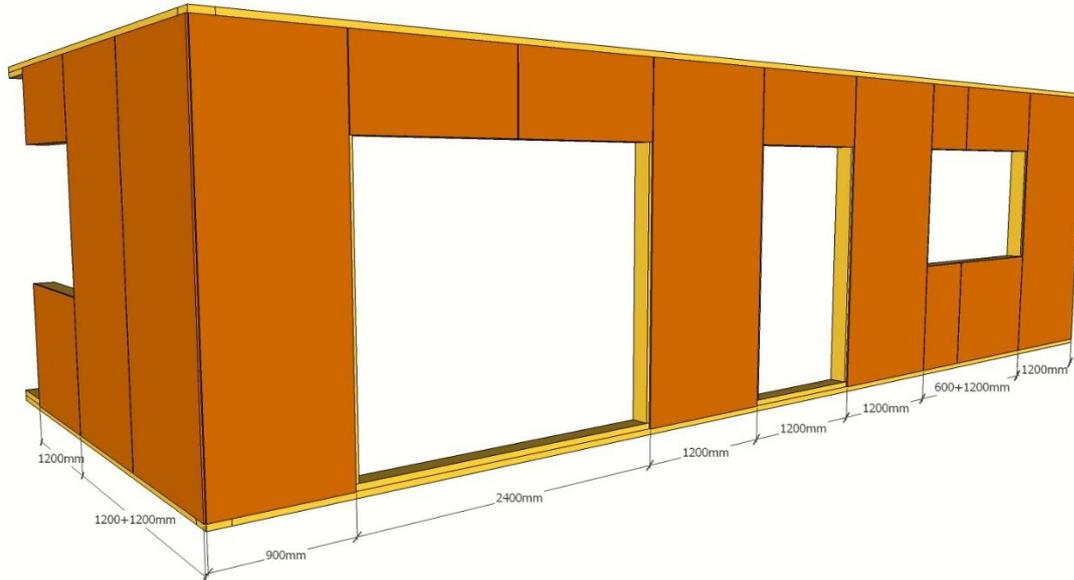
*Figure 14 : configuration #1*

La configuration #2 est composée d'une petite ouverture de 1200mm, une porte de 1200mm et une grande ouverture de 1800mm.



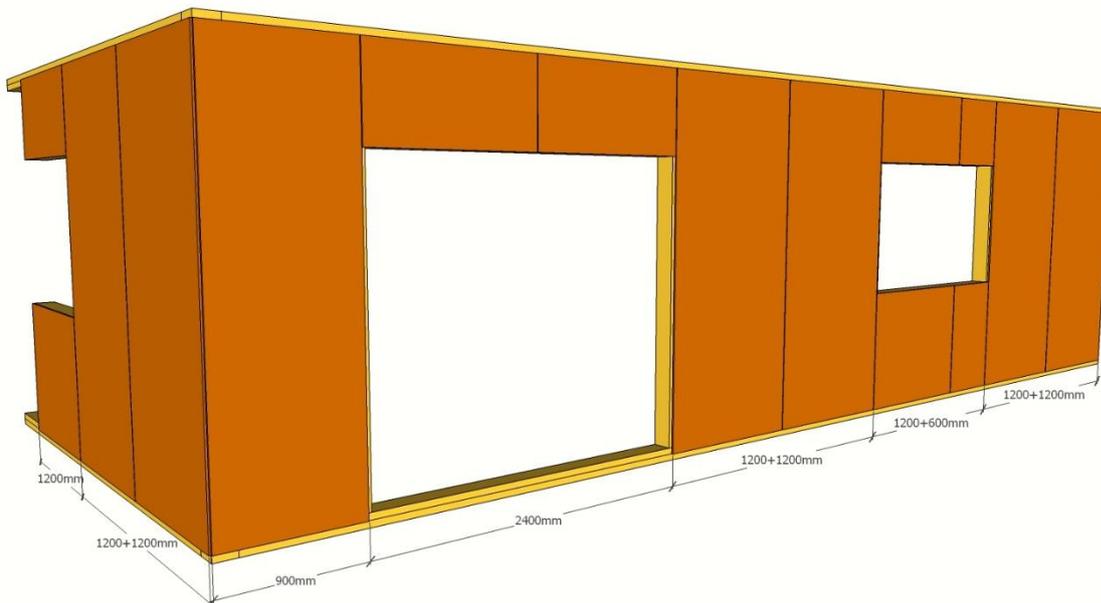
*Figure 15 : configuration #2*

La configuration #3 est composée d'une grande baie de 2400mm, une porte de 1200mm et une grande ouverture de 1800mm.



*Figure 16 : configuration #3*

La configuration #4 est composée d'une grande baie de 2400mm et une grande ouverture de 1800mm.



*Figure 17 : configuration #4*

### 3.3 Résultats sur la configuration #0 de référence

Dans le cas de cette configuration sans ouverture, seules la méthode A, la méthode C, la méthode du PD6693-1 et l'approche simplifiée du DTU 31.2 sont comparées.

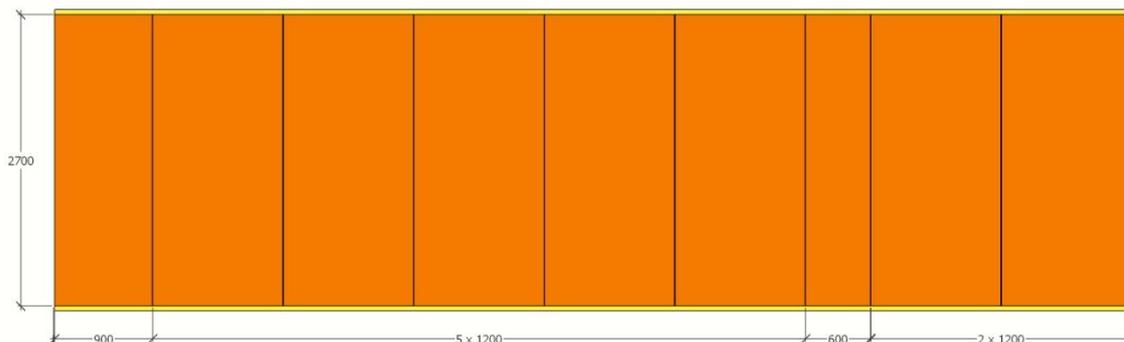


Figure 18 : Configuration #0

L'application des différentes méthodes conduit aux résultats suivants :

Tableau 1 : Panneaux de 9mm, fixations de 2,1x45mm, espacement en rive de 150mm

Méthode	A	C	PD6693-1	DTU31.2 simplifiée
$F_{v,Rd}$	24,1 kN	27,8 kN	32 kN	28,4 kN
Gain / Méthode A	1,00	1,15	1,33	1,18

Tableau 2 : Panneaux de 12mm, fixations de 2,5x50mm, espacement en rive de 150mm

Méthode	A	C	PD6693-1	DTU31.2 simplifiée
$F_{v,Rd}$	31,9 kN	36,8 kN	42,5 kN	34,1 kN
Gain / Méthode A	1,00	1,15	1,33	1,07

### 3.4 Résultats sur la configuration #1

Dans le cas de cette configuration avec ouvertures, la méthode A, la méthode C, la méthode du PD6693-1, la méthode du coefficient  $r$  (appliqué à la méthode A configuration #0) et l'approche simplifiée du DTU 31.2 sont comparées.

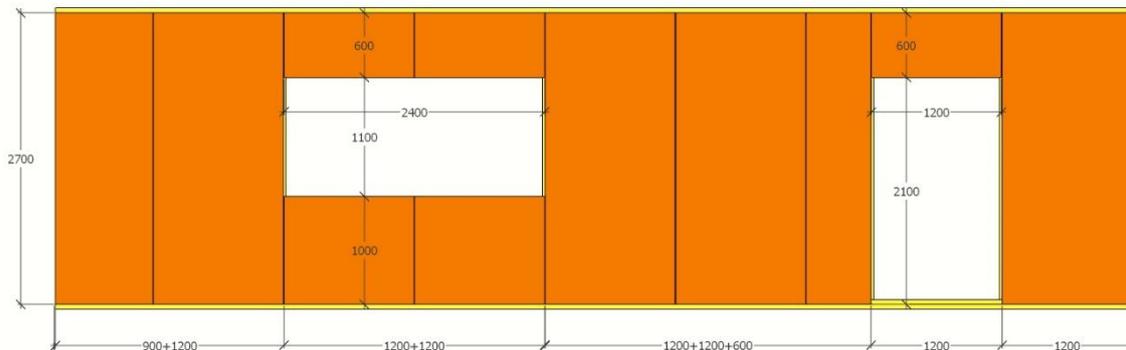


Figure 19 : Configuration #1

Tableau 3 : Panneaux de 9mm, fixations de 2,1x45mm, espacement en rive de 150mm

Méthode	A	C	PD6693-1	Coef. $r$	DTU31.2 simplifiée
$F_{v,Rd}$	14,5 kN	20 kN	22,1 kN	18 kN	17,2 kN
Gain / Méthode A	1,00	1,38	1,52	1,24	1,19

Tableau 4 : Panneaux de 12mm, fixations de 2,5x50mm, espacement en rive de 150mm

Méthode	A	C	PD6693-1	Coef. $r$	DTU31.2 simplifiée
$F_{v,Rd}$	19,3 kN	26,5 kN	29,4 kN	23,9 kN	20,6 kN
Gain / Méthode A	1,00	1,37	1,52	1,24	1,07

### 3.5 Résultats sur la configuration #2

Dans le cas de cette configuration avec ouvertures, la méthode A, la méthode C, la méthode du PD6693-1, la méthode du coefficient  $r$  (appliqué à la méthode A configuration #0) et l'approche simplifiée du DTU 31.2 sont comparées.

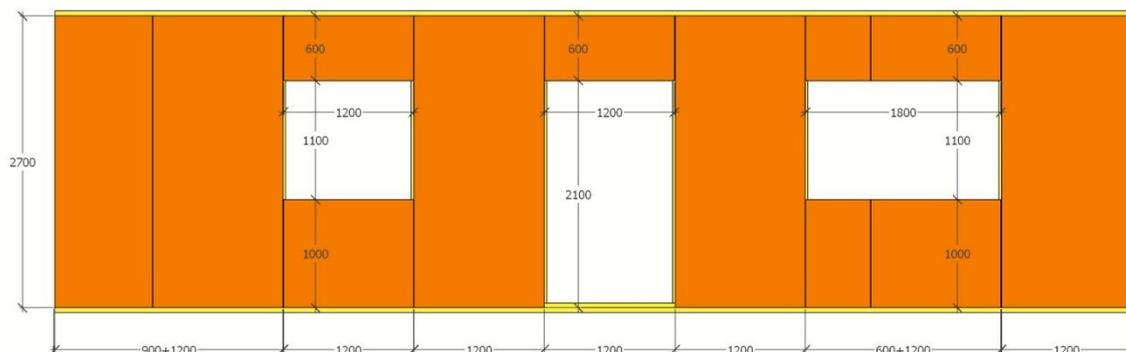


Figure 20 : Configuration #2

Tableau 5 : Panneaux de 9mm, fixations de 2,1x45mm, espacement en rive de 150mm

Méthode	A	C	PD6693-1	Coef. $r$	DTU31.2 simplifiée
$F_{v,Rd}$	14,5 kN	23 kN	20,6 kN	17,2 kN	17,2 kN
Gain / Méthode A	1,00	1,59	1,42	1,19	1,19

Tableau 6 : Panneaux de 12mm, fixations de 2,5x50mm, espacement en rive de 150mm

Méthode	A	C	PD6693-1	Coef. $r$	DTU31.2 simplifiée
$F_{v,Rd}$	19,3 kN	30,5 kN	27,4 kN	22,8 kN	20,6 kN
Gain / Méthode A	1,00	1,58	1,42	1,18	1,07

### 3.6 Résultats sur la configuration #3

Dans le cas de cette configuration avec ouvertures, la méthode A, la méthode C, la méthode du PD6693-1, la méthode du coefficient  $r$  (appliqué à la méthode A configuration #0) et l'approche simplifiée du DTU 31.2 sont comparées.

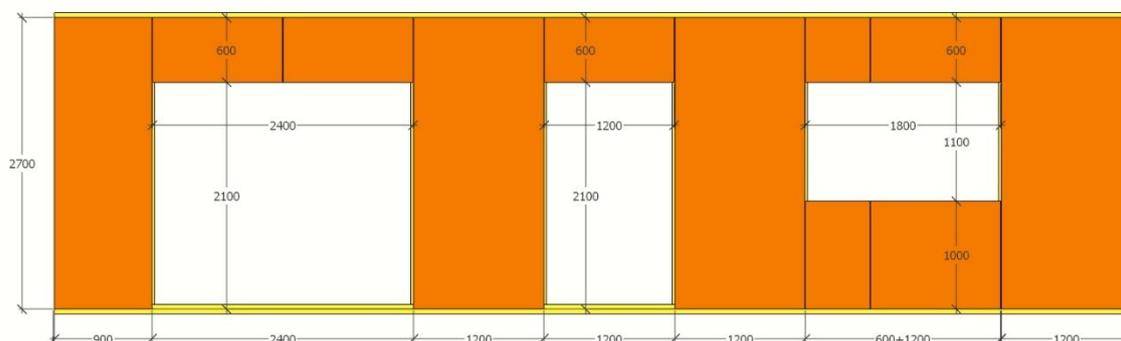


Figure 21 : Configuration #3

Tableau 7 : Panneaux de 9mm, fixations de 2,1x45mm, espacement en rive de 150mm

Méthode	A	C	PD6693-1	Coef. $r$	DTU31.2 simplifiée
$F_{v,Rd}$	11,3 kN	16,4 kN	15,9 kN	12,3 kN	13,4 kN
Gain / Méthode A	1,00	1,45	1,41	1,09	1,19

Tableau 8 : Panneaux de 12mm, fixations de 2,5x50mm, espacement en rive de 150mm

Méthode	A	C	PD6693-1	Coef. $r$	DTU31.2 simplifiée
$F_{v,Rd}$	15 kN	21,8 kN	21 kN	16,3 kN	16,1 kN
Gain / Méthode A	1,00	1,45	1,40	1,09	1,07

### 3.7 Résultats sur la configuration #4

Dans le cas de cette configuration avec ouvertures, la méthode A, la méthode C, la méthode du PD6693-1, la méthode du coefficient  $r$  (appliqué à la méthode A configuration #0) et l'approche simplifiée du DTU 31.2 sont comparées.

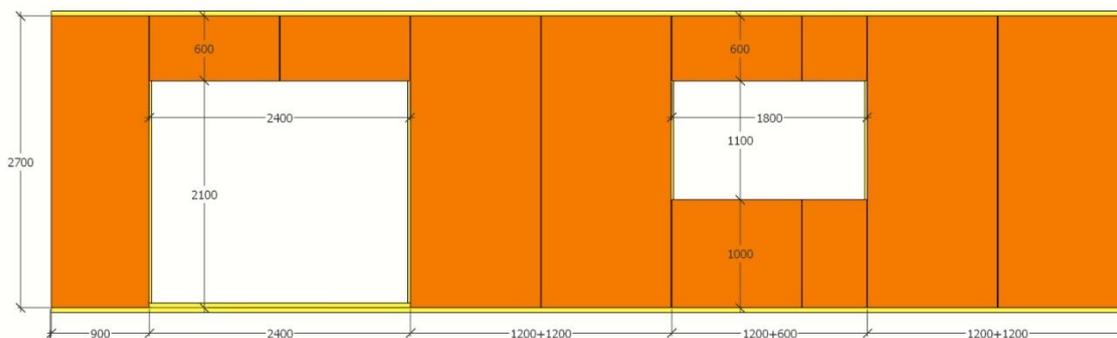


Figure 22 : Configuration #4

Tableau 9 : Panneaux de 9mm, fixations de 2,1x45mm, espacement en rive de 150mm

Méthode	A	C	PD6693-1	Coef. $r$	DTU31.2 simplifiée
$F_{v,Rd}$	14,5 kN	20 kN	19,7 kN	15,6 kN	17,2 kN
Gain / Méthode A	1,00	1,38	1,36	1,08	1,19

Tableau 10 : Panneaux de 12mm, fixations de 2,5x50mm, espacement en rive de 150mm

Méthode	A	C	PD6693-1	Coef. $r$	DTU31.2 simplifiée
$F_{v,Rd}$	19,3 kN	26,5 kN	26,2 kN	20,7 kN	20,6 kN
Gain / Méthode A	1,00	1,37	1,36	1,07	1,07

## 4. ANALYSE

### 4.1 Généralités

L'exploitation des résultats précédents permet de produire les graphes suivants qui comparent les résistances de calcul du mur selon les quatre approches, respectivement désignées :

- A : Méthode A
- C : méthode C
- PD6693-1 : méthode du PD6693-1
- A + r : Méthode du coefficient de réduction r appliqué à la méthode A du mur sans ouverture équivalent
- DTU 31.2 : Approche simplifiée du DTU 31.2

### 4.2 Configurations avec OSB/3 9mm, pointes 2,1x45mm

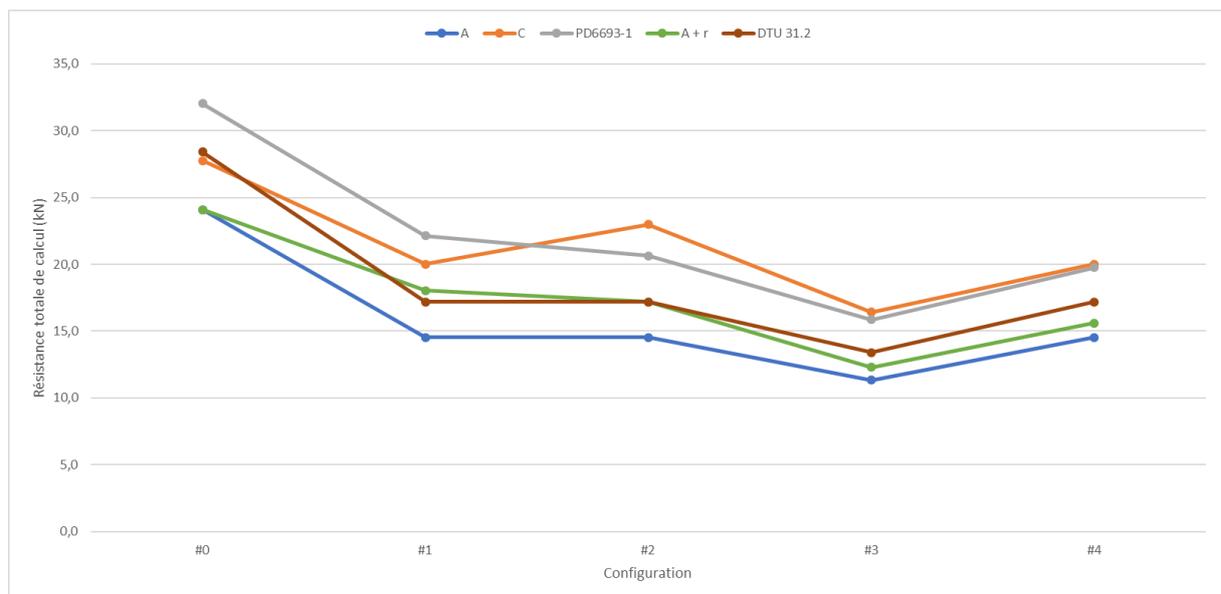


Figure 23 : Résistances de calcul, OSB/3 9mm, pointes 2,1x45mm

On observe ici le caractère très conservateur de la méthode A (courbe bleue) par rapport aux autres approches. En effet, la méthode A, non seulement néglige la contribution des parties avec ouvertures, mais en plus elle néglige les panneaux élancés ( $h/b > 4$ ) et introduit un coefficient de réduction dès que cet élancement est supérieur à 2.

Dans le cas des murs pleins, les données expérimentales de la littérature montrent en effet que la méthode A sous-estime les résistances caractéristiques de 20 à 30% (Figure 24). De plus, plusieurs résultats d'essais montrent qu'il n'y a pas d'effet significatif de l'élancement des panneaux jusqu'à un élancement de 4 (notamment des essais privés réalisés à FCBA sur des murs composés de panneaux de 600x2700mm, soit un élancement de 4,5).

Tout ceci est pris en compte de manière forfaitaire par l'approche simplifiée du DTU 31.2 qui s'appuie sur la méthode A et un coefficient de majoration de 1,3.

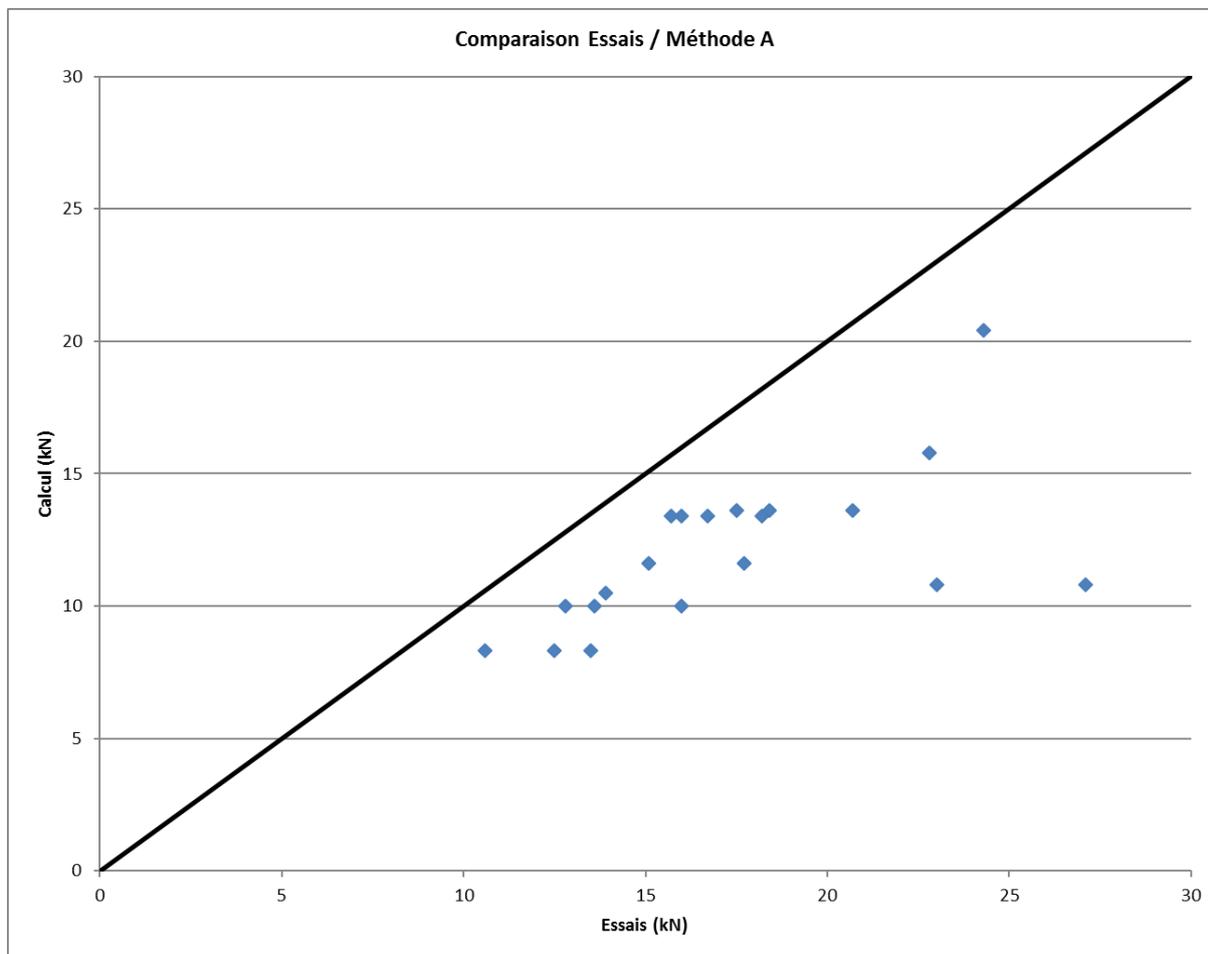


Figure 24 : Quelques exemples de comparaison essais/méthode A sur murs pleins

La courbe de la méthode C montre une incohérence de comportement. En effet, on observe une plus grande résistance sur une configuration qui comporte de plus grandes ouvertures.

La méthode du PD6693-1 est celle qui conduit d'une manière générale aux plus importantes résistances mais contrairement à la méthode C, elle affiche une cohérence avec le taux d'ouvertures.

Enfin, l'approche basée sur le coefficient de réduction  $r$  est également cohérente et présente le même comportement que la méthode du PD6693-1. Cependant, étant ici appliquée à la méthode A, elle conduit à des résistances beaucoup plus conservatrices.

En se basant sur la méthode A comme référence, le graphe suivant présente le gain de chacune des méthodes par rapport à la méthode A.

Sur les configurations de murs avec ouvertures, on observe un gain pouvant atteindre +60% pour la méthode C !

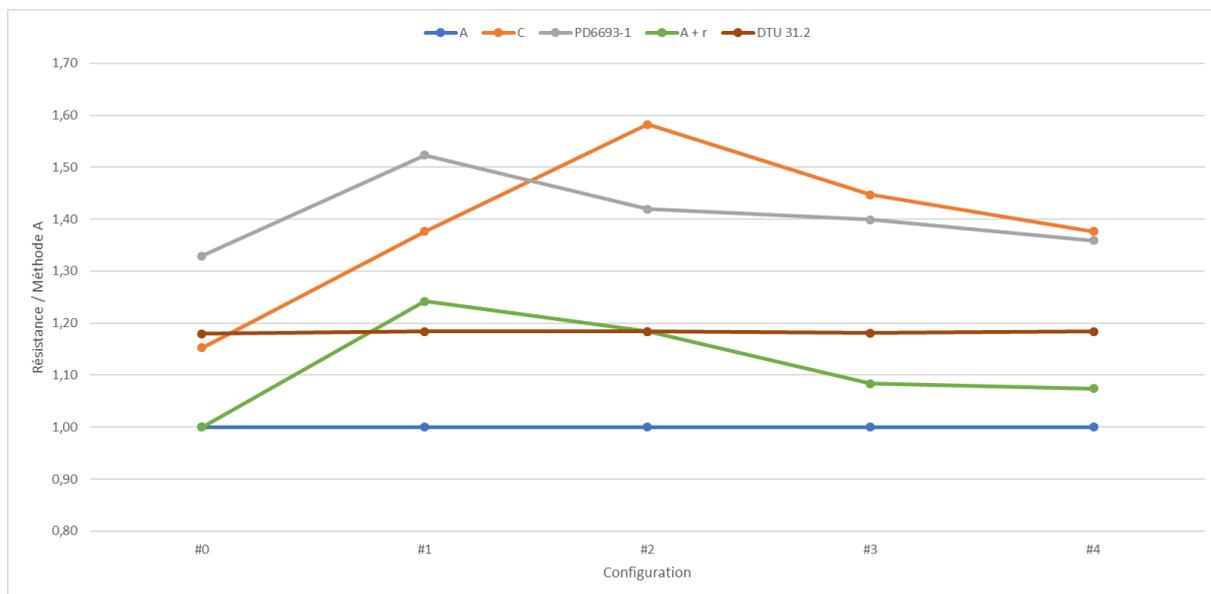


Figure 25 : Rapport / méthode A, OSB/3 9mm, pointes 2,1x45mm

### 4.3 Configurations avec OSB/3 12mm, pointes 2,5x50mm

Les mêmes comparaisons sont réalisées avec les configurations OSB/3 de 12mm et pointes de 2,5x50mm.

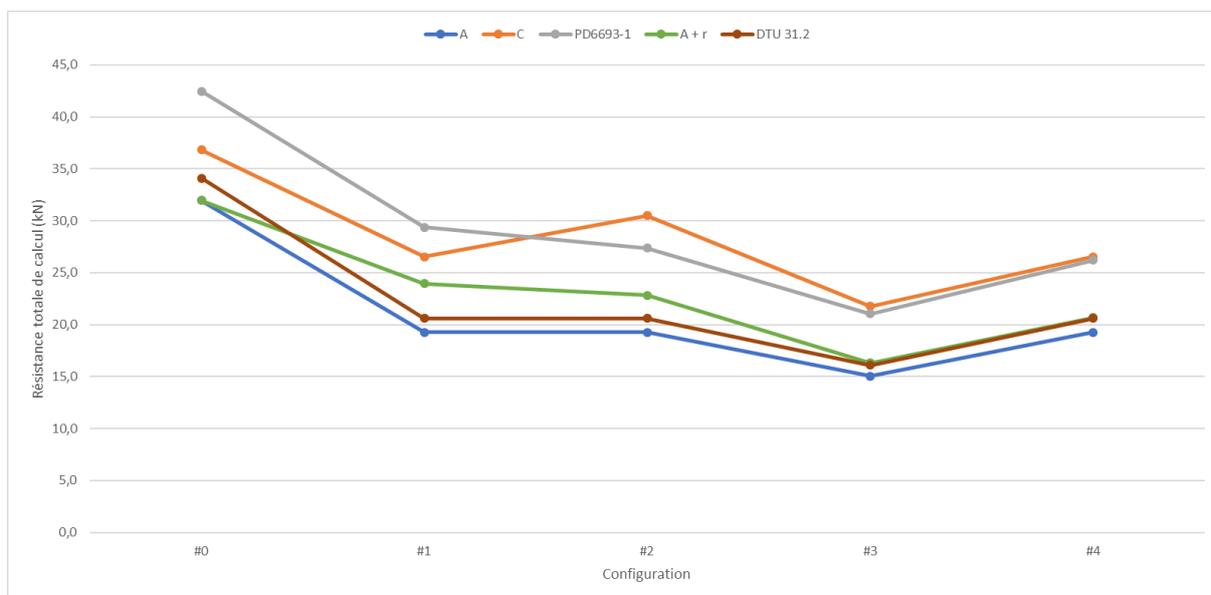


Figure 26 : Résistances de calcul, OSB/3 12mm, pointes 2,5x50mm

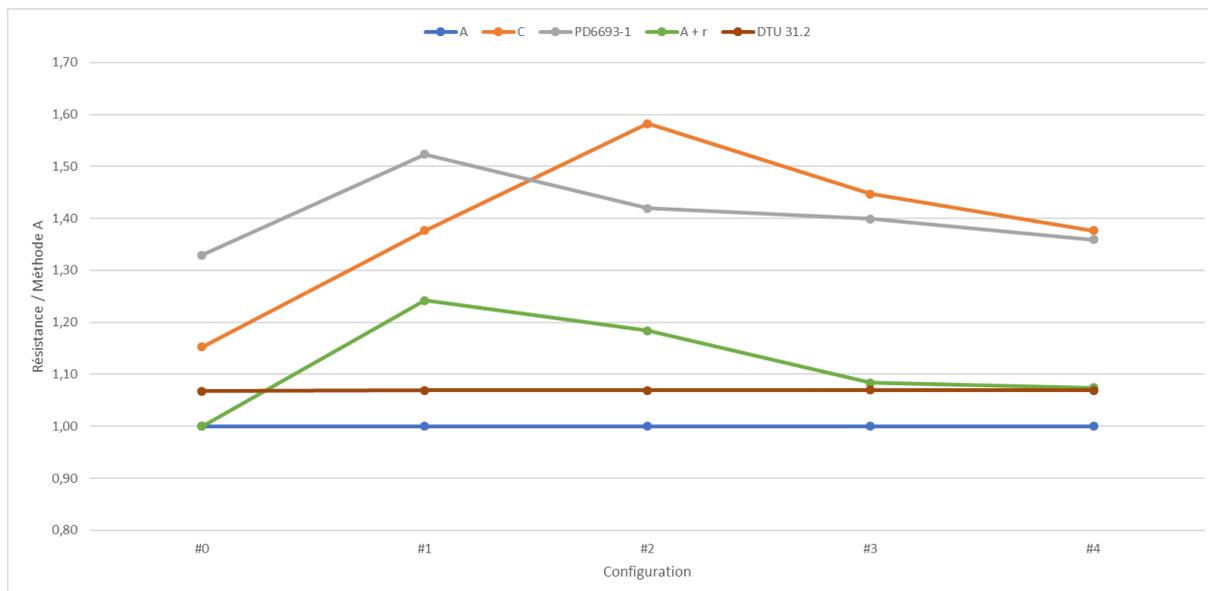


Figure 27 : Rapport / méthode A, OSB/3 12mm, pointes 2,5x50mm

Les mêmes commentaires s'appliquent.

#### 4.4 Conclusion

La méthode A est très conservatrice et ne permet pas de tenir compte convenablement de la composition réelle du mur.

La méthode C semble présenter des incohérences potentiellement selon la géométrie et la disposition des ouvertures.

Les méthodes du coefficient de réduction  $r$  et du PD6693-1 donnent le même type de comportement. Cependant, la méthode du coefficient  $r$  présente l'avantage de tenir de la géométrie des ouvertures et pas seulement du ratio d'ouvertures (contrairement à la méthode du PD6693-1).

La figure ci-après présente une comparaison de l'effet du coefficient  $r$  obtenu de manière expérimentale. Elle présente la réduction de la résistance d'un mur en fonction du coefficient  $r$  obtenue par essais sur 5 configurations de mur présentant des ouvertures différentes par rapport à un mur plein de référence (Rapport Dolan et Al, 1996).

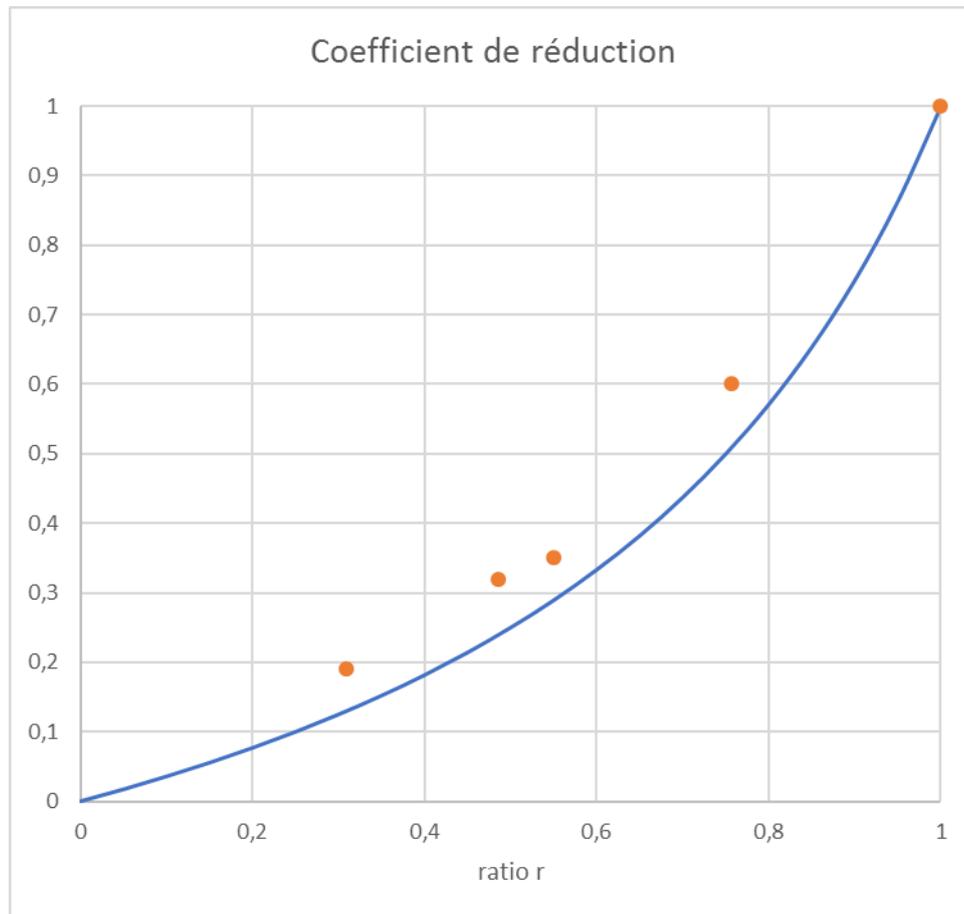


Figure 28 : réduction de la résistance en fonction du coefficient  $r$

Compte tenu de l'ensemble des éléments précédents, il est donc proposé de retenir l'approche suivante :

- Estimation de la raideur du mur selon la méthode du TC250/WG3 (Seim et Hummel simplifiée) avec prise en compte des ouvertures par la méthode du ratio  $r$
- Découpage du mur en diaphragmes selon la géométrie des ouvertures
- Prise en compte des ouvertures selon la méthode du ratio  $r$
- Calcul de la résistance selon la méthode A modifiée
- Modification de la méthode A comme suit :
  - Prise en compte de tous les panneaux
  - Coefficient de réduction  $C_i$  dû à l'élançement modifié comme suit :

$$C_i = \min \left\{ \begin{array}{l} 1 \\ 4 \cdot b/h \end{array} \right.$$

Où

$b$  largeur du panneau  
 $h$  hauteur du panneau

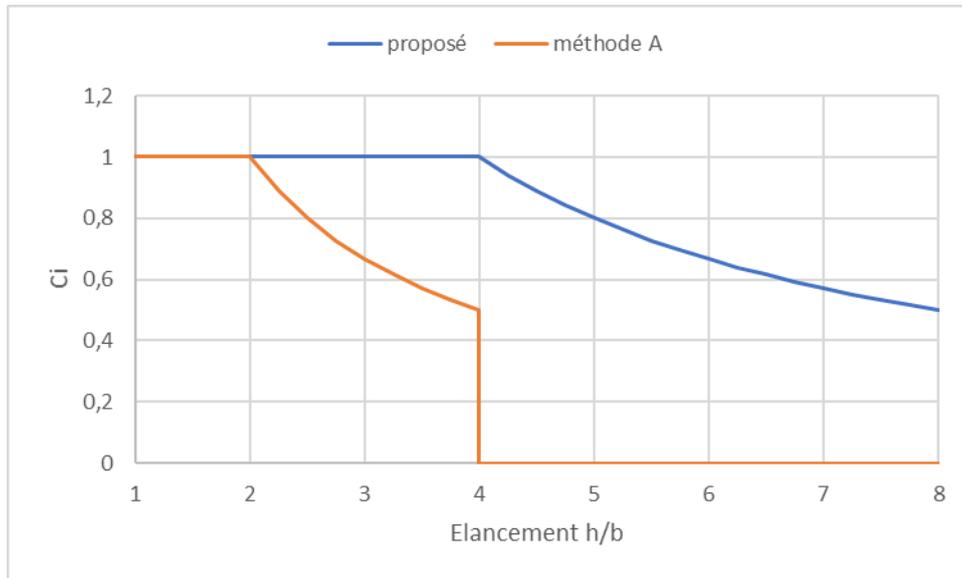


Figure 29 : Proposition de coefficient  $C_i$  prenant en compte l'élancement des panneaux constituant le voile de contreventement

## 5. MÉTHODE ALTERNATIVE PROPOSÉE

### 5.1 Hypothèses

Les percements de faibles dimensions sont supposés ne pas affecter la résistance des voiles sous réserve qu'ils respectent les conditions suivantes :

- Si il est chevêtré, les dimensions en hauteur et en largeur ne dépassent pas 300mm
- Si il n'est pas chevêtré, les dimensions en hauteur et en largeur ne dépassent pas 150mm
- La distance entre toute rive du panneau et un bord quelconque du percement est au moins égale à la plus grande dimension du percement
- Un seul percement est autorisé sur le même panneau

Les ouvertures qui ne respectent pas les conditions suivantes doivent être considérées comme des interruptions de diaphragme :

- La hauteur de l'ouverture doit être limitée à  $0,65.h$ ,  $h$  étant la hauteur du diaphragme
- La hauteur d'allège doit être d'au moins  $0,25.h$ ,  $h$  étant la hauteur du diaphragme

Les diaphragmes sont totalement ancrés, c'est-à-dire que chaque montant situé à une extrémité de diaphragme ou au droit d'une ouverture doit être ancré.

NOTE : Une proposition est faite pour le cas des diaphragmes ancrés uniquement à leurs extrémités.

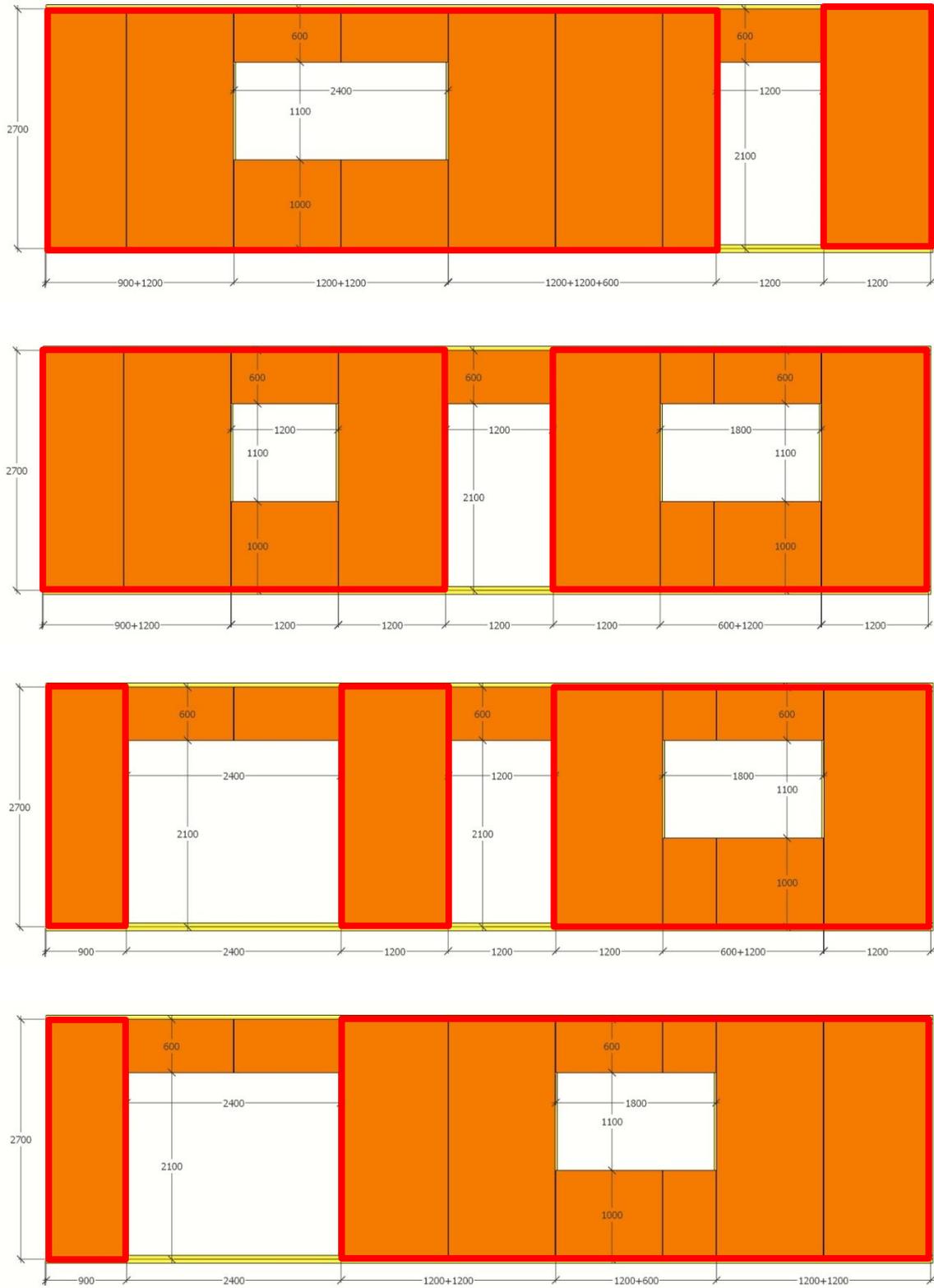
### 5.2 Calcul de la résistance

La résistance caractéristique d'une fixation panneau/ossature bois  $F_{f,Rk}$  est définie par :

$$F_{f,Rk} = 1,2 \cdot F_{v,fix,Rk}$$

où  $F_{v,fix,Rk}$  est la résistance caractéristique d'un assemblage panneau / bois en simple cisaillement calculée selon l'Eurocode 5.

Le mur est découpé en diaphragmes selon la règle des dimensions d'ouvertures générant des interruptions de voiles telle que décrite précédemment. La figure suivante présente des exemples de découpage du mur en plusieurs diaphragmes.



*Figure 30 : Exemples de découpage en diaphragmes*

La résistance de chaque diaphragme  $j$  est calculée en supposant qu'il n'y a pas d'ouvertures. Pour chaque panneau  $i$  constituant le diaphragme  $j$  sans ouverture, la résistance caractéristique en contreventement  $F_{i,v,Rk}$  est :

$$F_{i,v,Rk} = \frac{F_{f,Rk} \cdot b_i \cdot c_i}{s}$$

avec

$$c_i = \min \left\{ 4, \frac{b_i}{h} \right\}$$

$b_i$  largeur du panneau  $i$   
 $h$  hauteur du panneau  
 $s$  espacement des fixations en rives du panneau  $i$

La résistance caractéristique du diaphragme  $j$  sans ouverture  $F_{v,so,j,Rk}$  est :

$$F_{v,so,j,Rk} = \sum F_{i,v,Rk}$$

La prise en compte des ouvertures présentes dans le diaphragme  $j$  est obtenue en calculant le ratio d'ouverture  $r$  comme suit :

- ✓ le ratio entre l'aire totale des ouvertures et l'aire du diaphragme  $j$ , noté  $\alpha$  :

$$\alpha = \frac{\sum A_{ouvertures}}{A_{mur}}$$

- ✓ le ratio entre la longueur cumulée de parties de diaphragme sans ouverture  $L_{so,j}$  et la longueur totale du diaphragme  $L_{tot,j}$ , noté  $\beta$  :

$$\beta = \frac{\sum L_{so,j}}{L_{tot,j}}$$

Le ratio d'ouverture dans le diaphragme  $j$  est alors déduit de ces deux paramètres par la relation :

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

La résistance du diaphragme  $j$  avec ouvertures est alors déterminée en corrigeant la résistance du diaphragme équivalent sans ouverture :

$$F_{v,j,Rk} = r \cdot F_{v,so,j,Rk}$$

La résistance totale du mur est alors la somme des résistances des diaphragmes le constituant, soit :

$$F_{v,mur,Rk} = \sum F_{v,j,Rk}$$

La même approche est applicable au calcul des raideurs.

### 5.3 Analyse comparative

Cette méthode alternative a été appliquée aux mêmes configurations de murs analysées. On obtient alors les résultats suivants (la méthode alternative remplace la « A + r ») :

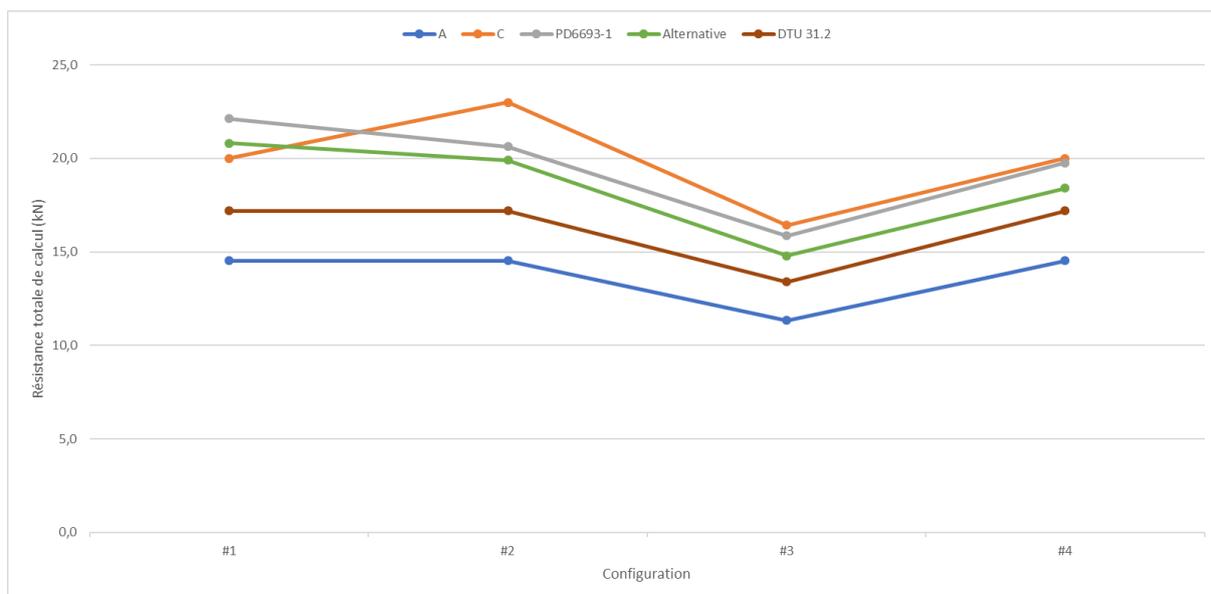


Figure 31 : Résistances de calcul, OSB/3 9mm, pointes 2,1x45mm

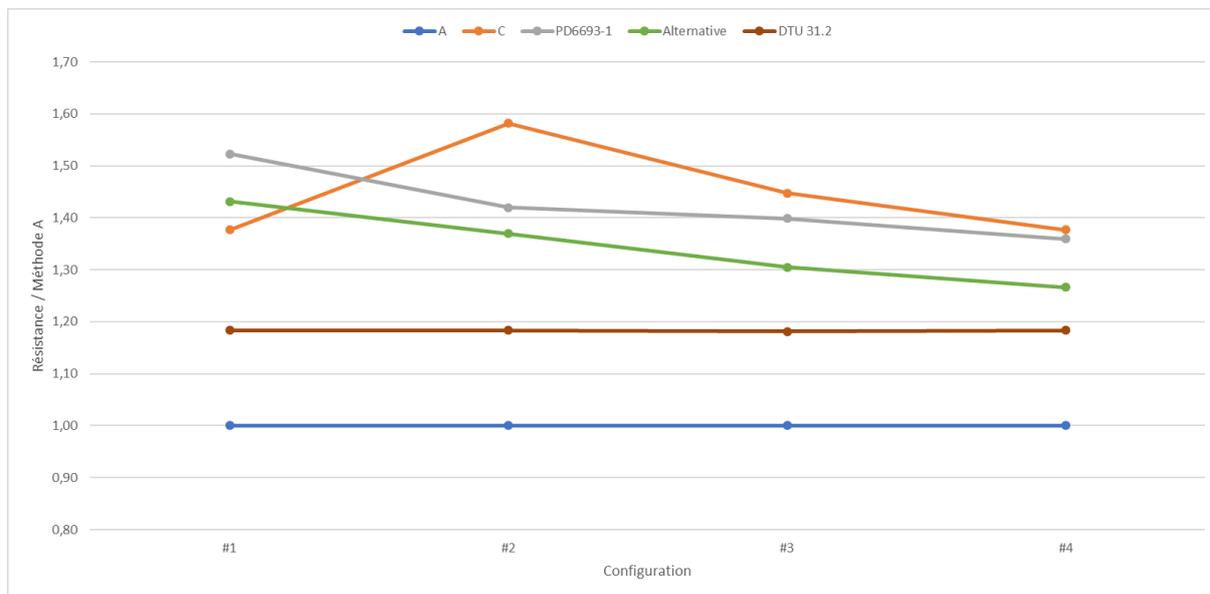


Figure 32 : Rapport / méthode A, OSB/3 9mm, pointes 2,1x45mm

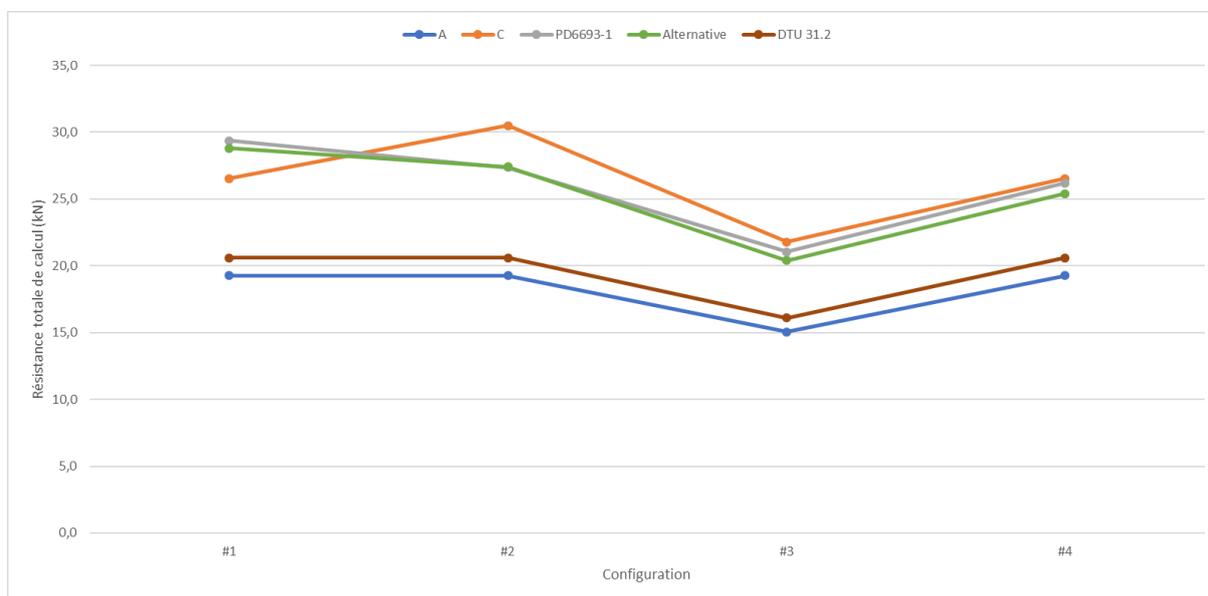


Figure 33 : Résistances de calcul, OSB/3 12mm, pointes 2,5x50mm

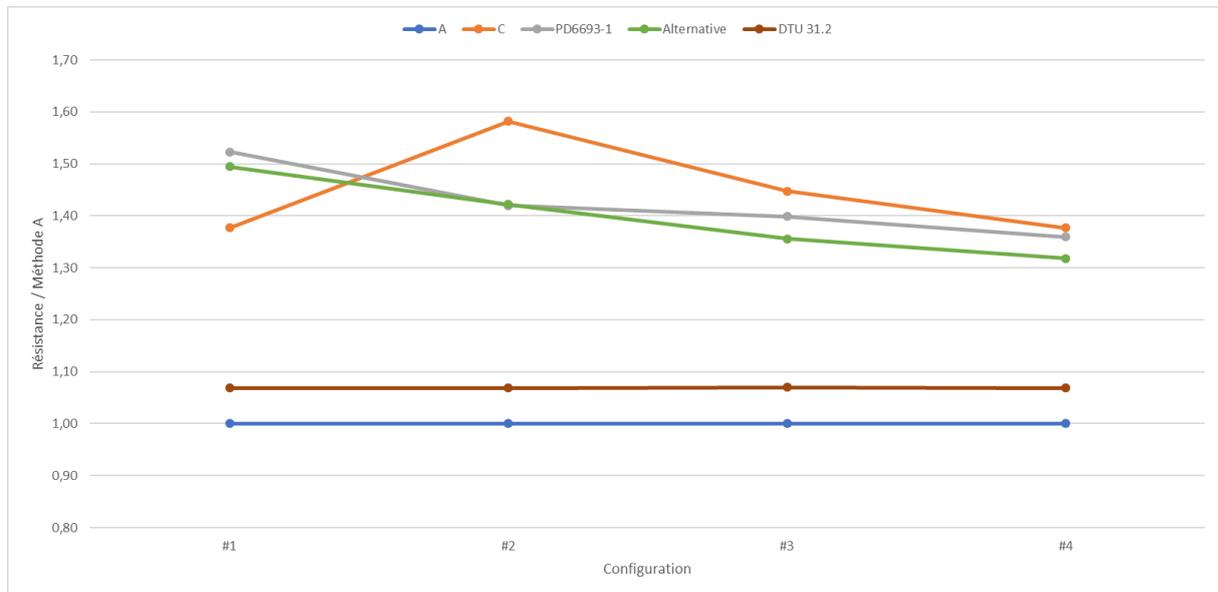


Figure 34 : Rapport / méthode A, OSB/3 12mm, pointes 2,5x50mm

La méthode proposée est cohérente en terme « d'impact des ouvertures ». Elle s'approche des résultats obtenus avec le PD6693-1 tout en restant conservatrice dans le cas des ouvertures « longues ». Elle permet une bonne optimisation de la méthode A et conduit à des résultats proches des résultats expérimentaux de la littérature.

## 5.4 Calcul de la raideur

Tout comme la résistance, le mur est découpé en diaphragmes selon la règle des dimensions d'ouvertures générant des interruptions de voiles telle que décrite précédemment.

La raideur de chaque diaphragme  $j$  est calculée en supposant qu'il n'y a pas d'ouvertures. Pour chaque panneau  $i$  constituant le diaphragme  $j$  sans ouverture, la raideur (N/mm) est déterminée par :

$$K_{v,ser,i} = \left( [2 \cdot l_i + 2 \cdot h] \cdot \frac{s_i}{K_{ser} \cdot l_i^2} + \frac{h}{G \cdot t \cdot l_i} \right)^{-1}$$

où

- $l_i$  largeur du panneau (mm)
- $h$  hauteur du panneau (mm)
- $s_i$  espacement des fixations (mm)
- $K_{ser}$  module de glissement des fixations (panneau/ossature) (N/mm)
- $G$  module de cisaillement de voile du panneau (N/mm<sup>2</sup>)
- $t$  épaisseur du panneau (mm)

La raideur du diaphragme  $j$  sans ouverture  $K_{v,ser,so,j}$  est :

$$K_{v,ser,so,j} = \sum K_{v,ser,i}$$

La raideur du diaphragme  $j$  avec ouvertures est alors déterminée en corrigeant la raideur du diaphragme équivalent sans ouverture :

$$K_{v,ser,j} = r \cdot K_{v,ser,so,j}$$

NOTE :

De manière simplifiée, on pourra considérer la participation de la raideur des ancrages comme suit :

$$K_{v,ser,j} = \left( \sum_j \left( [2 \cdot l_j + 2 \cdot h] \cdot \frac{s_j}{K_{v,ser,j} \cdot l_j^2} + \frac{h}{G \cdot t \cdot l_j} \right) + \frac{h}{K_{anc,ser} \cdot l_j} \right)^{-1}$$

$K_{anc,ser}$  rigidité de l'ancrage en traction (montant au vent) (N/mm)

$l_j$  longueur du diaphragme (mm)

La raideur totale du mur  $K_{v,ser,mur}$  est alors la somme des raideurs des diaphragmes le constituant :

$$K_{v,ser,mur} = \sum K_{v,ser,j}$$

### 5.5 Cas des murs partiellement ancrés

On entend ici par mur partiellement ancré, des murs pour lesquels les ancrages sont mise en œuvre uniquement aux extrémités de chaque diaphragme constituant le mur.

Dans ce cas, la résistance du diaphragme  $j$  avec ouvertures  $F_{v,j,Rk}$  est déterminée en corrigeant la résistance du diaphragme équivalent sans ouverture  $F_{v,so,j,Rk}$  par :

$$F_{v,j,Rk} = \frac{r}{2 - r} \cdot F_{v,so,j,Rk}$$

## 6. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Dans l'ordre chronologique :

Shear properties of plywood-sheathed wall panels with opening, Yasumura, Sugiyama, Architectural Institute of Japan, 1984

The racking resistance of timber frame walls assessed by experimental and analytical techniques, Griffiths, Thèse de l'Université de Surrey, 1987

Racking strength of wall diaphragms – Discussion of the Eurocode 5 approach, Källsner, CIB-W18, 1995

Monotonic Tests of Long Shear Walls with Openings, Report TE-1996-001, Dolan, Johnson, American Forest & Paper Association, 1996

Effect of Overturning Restraint on the Performance of Fully Sheathed and Perforated Timber Framed Shear Walls, Heine, Thèse à Virginia Polytechnic Institute and State University, 1997

Perforated shearwall design approach, Bradford, Douglas, Sugiyama, American Forest & Paper Association, 2001

A simplified plastic model for design of partially anchored wood-framed shear walls, Källsner, Girhammar, Wu, CIB-W18, 2001

A plastic design model for partially anchored wood-framed shear walls with openings, Källsner, Girhammar, Wu, CIB-W18, 2002

Perforated Shear Wall Design, Line, WDF, 2002

A Plastic Lower Bound Method for Design of Wood-framed Shear Walls, Källsner, Girhammar, 2004

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 + Amendements A1 et A2, 2004-2014

A unified design method for the racking resistance of timber framed walls for inclusion in Eurocode 5, Griffiths, Blass, Enjily, Källsner, CIB-W18, 2005

A plastic design method for incompletely anchored wood-framed wall diaphragms, Källsner, Girhammar, 2006

Influence of Openings on Shear Capacity of Wooden Walls, Dujic, Klobcar, Zarnic, CIB-W18, 2007

A plastic design procedure for wood frame wall diaphragms, Källsner, Girhammar, 2008

Manuel d'application des Eurocodes pour les structures bois, Volume Ossature bois, Programme AQCEN EC5, 2009

Timber Frame Houses : Design Principles, Hairstans, CTE, 2009

Plastic models for analysis of fully anchored light-frame timber shear walls, Källsner, Girhammar, Engineering Structures, 2009

Influence of the boundary conditions on the racking strength of shear walls with an opening, Yasumura, CIB-W18, 2010

Racking resistance of panel-sheathed shear walls with opening, Yasumura, WCTE, 2010

Some design aspects on anchoring of timber frame shear walls by transverse walls, Källsner, Girhammar, Vessby, WCTE 2010

Règles simplifiées de conception du contreventement pour le DTU 31.2, Rapport FCBA, Le Magorou, 2011

Some comments on the Sugiyama opening coefficient method and lower-bound solutions for shear walls, Jensen, Jiaotong, Källsner, Quenneville, Girhammar, CIB-W18, 2012

Evaluation of two analytical plastic design models for light frame shear walls, Källsner, Girhammar, Vessby, WCTE, 2012

Load-carrying capacity of timber frame diaphragms with unidirectional support, Munch-Andersen, Danish Timber Information, 2012

PD 6693-1: Published Document - UK Non-Contradictory Complementary Information to Eurocode 5: Design of timber structures Part 1: General – Common rules and rules for buildings, BSI, 2012

Technical note - Timber stiffening plates – State of the art, SINTEF, N. Labonnote, 2013

Comportement parasismique des murs ossature bois, Rapport SISMOB, FCBA, Faye, 2013

A parametric numerical study on the horizontal load-bearing capacity of the FPB-sheathed timber framed wall elements with openings, E. Kozem Šilih, M. Premrov, M. Kuhta, S. Šilih, 2014

Appraisal of results of racking tests, BSI, 2014

A parametric numerical study on the horizontal load-bearing capacity of the FPB-sheathed timber framed wall elements with openings, Šilih, Premrov, Kuhta, Šilih, International Journal of Civil Engineering, 2014

Load-carrying capacity of timber frame diaphragms with unidirectional support, TRAE Information, 2015

Comportement parasismique des murs ossature bois avec panneaux OSB agrafés, Rapport SISBOIS, FCBA, Faye, 2015

Shear wall design examples per 2015 WFCM and SDPWS, American Wood Council, 2016

Beregning af trækonstruktioner, Træinformation, Munch-Andersen, Larsen, 2016

Horizontal Stabilisation of Sheathed Timber Frame Structures Using Plastic Design Methods – Introducing a Handbook Part 1: Design Principles for Horizontal Stabilisation, Källsner, Girhammar, WMCAUS, 2016

Horizontal Stabilisation of Sheathed Timber Frame Structures Using Plastic Design Methods – Introducing a Handbook Part 2: Design of the joints and the anchorage devices, Källsner, Girhammar, WMCAUS, 2016

Horizontal Stabilisation of Sheathed Timber Frame Structures Using Plastic Design Methods – Introducing a Handbook Part 3: Basics of the plastic design method, Källsner, Girhammar, WMCAUS, 2016

Horizontal Stabilisation of Sheathed Timber Frame Structures Using Plastic Design Methods – Introducing a Handbook Part 4: Design in the Ultimate Limit State, Källsner, Girhammar, WMCAUS, 2016

Experimental and analytical analysis of racking resistance of partially anchored timber frame walls, International Journal of Computational Methods and Experimental Measurements, Steensels, De Proft, Vandoren, 2017

Documents de travail du CEN/TC250/SC5/WG3 de 2016 à 2018. Ces documents n'étant pas publics, ils ne sont pas explicitement listés ici.