

# Guide pour la conception et la justification de la stabilité des pannes en bois lamellé par le bac acier

Julien BRASSY

**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

Mai 2019

Avec le soutien



**CODIFAB**  
comité professionnel de développement  
des industries françaises de l'ameublement et du bois

# SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>Contexte</b> .....	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Objectif</b> .....	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Domaine d'application général</b> .....	<b>7</b>
	3.1 Domaine d'application .....	7
	3.2 Cas des trémies .....	10
	3.3 Utilisation du présent document .....	10
	3.4 Interaction flexion /cisaillement.....	10
<b>4</b>	<b>Règles de moyen</b> .....	<b>11</b>
	4.1 Domaine d'application des règles de moyen .....	11
	4.1.1 Actions .....	11
	4.1.2 Pannes en bois lamellé.....	11
	4.1.3 Bac et fixations.....	12
	4.1.4 Paramètres de calcul .....	12
	4.2 Abaques de dimensionnement .....	13
	4.3 Dimensionnement des assemblages pannes/poutres .....	13
<b>5</b>	<b>Méthode de calcul</b> .....	<b>14</b>
	5.1 Préambule : conditions de rigidité de la NF EN 1995-1-1 et de NF EN 1993-1-3.....	14
	5.2 Pannes d'aplomb et pannes déversées .....	15
	5.3 Démarche générale de calcul.....	16
	5.4 Exemple de calcul : pannes posées à dévers .....	17
	5.4.1 Données et hypothèses .....	17
	5.4.2 Calcul de la rigidité du panneau par panne à stabiliser et par unité de longueur.....	20
	5.4.3 Décomposition des efforts dans le plan du bac (hors stabilité) ....	27
	5.4.4 Vérification des pannes intermédiaires.....	28
	5.4.5 Détermination des efforts d'anti flambement et d'anti déversement puis de l'effort total dans le plan du bac .....	28

5.4.6	Vérification des assemblages pannes/bac.....	29
5.4.7	Vérification du bac et de ces assemblages.....	29
5.4.8	Conclusion.....	33
5.5	Exemple de calcul : variante avec les mêmes pannes posées d’aplomb	34
5.5.1	Données et hypothèses .....	34
5.5.2	Calcul de la rigidité du panneau par panne à stabiliser et par unité de longueur.....	34
5.5.3	Décomposition des efforts dans le plan du bac (hors stabilité) ....	34
5.5.4	Vérification des pannes intermédiaires.....	34
5.5.5	Détermination des efforts d’anti flambement et d’anti déversement puis de l’effort total dans le plan du bac .....	35
5.5.6	Vérification des assemblages pannes/bac.....	37
5.5.7	Vérification du bac et de ces assemblages.....	38
5.5.8	Conclusion.....	38
<b>6</b>	<b>Annexe A : Caractéristiques des bacs .....</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Annexe B : Caractéristiques des fixations .....</b>	<b>40</b>
<b>8</b>	<b>Annexe C : Panneaux avec ouvertures .....</b>	<b>41</b>
8.1	Généralités .....	41
8.2	Ouvertures discrètes .....	41
8.2.1	Exigences.....	41
8.2.2	Résistance des panneaux avec ouvertures discrètes.....	42
8.2.3	Flexibilité des panneaux avec ouvertures discrètes.....	42
8.2.4	Déformation des panneaux avec ouvertures discrètes .....	42
8.3	Ouvertures en bandes .....	42

## Figures

---

<b>Figure 1</b> : Panneau.....	<b>8</b>
<b>Figure 2</b> : Effort dans le plan du bac .....	<b>9</b>
<b>Figure 3</b> : Pannes posées d'aplomb.....	<b>15</b>
<b>Figure 4</b> : Pannes posées à dévers .....	<b>15</b>
<b>Figure 5</b> : Vue en plan de la toiture.....	<b>17</b>
<b>Figure 6</b> : Pannes posées à dévers .....	<b>18</b>
<b>Figure 7</b> : Fixations des bacs .....	<b>19</b>
<b>Figure 8</b> : Définitions des termes "sheeting", « decking » .....	<b>26</b>
<b>Figure 9</b> : Pannes posées d'aplomb.....	<b>36</b>
<b>Figure 10</b> : Ouvertures discrètes, (1) : axe longitudinal des ondes .....	<b>41</b>
<b>Figure 11</b> : Ouvertures en bandes .....	<b>41</b>

## Tableaux

---

<b>Tableau 1</b> : Efforts tranchants dans le plan du bac non pondérés en DaN en fonction de la portée des pannes pour la vérification des assemblages pannes/poutres.....	<b>13</b>
<b>Tableau 2</b> : Tableau 5.4 des recommandations – impact du nombre de pannes ....	<b>21</b>
<b>Tableau 3</b> : Tableau 5.8 des recommandations – position des fixations et nombre de bacs sur la hauteur du panneau .....	<b>22</b>
<b>Tableau 4</b> : Tableau 5.6 des recommandations – Valeur de $K_1$ pour les assemblages au creux de chaque onde.....	<b>24</b>
<b>Tableau 5</b> : Tableau 5.2 des recommandations – Nombre de fixations sur la largeur d’un bac.....	<b>25</b>
<b>Tableau 6</b> : Tableau 5.1 des recommandations – Résistance et glissement des fixations.....	<b>26</b>
<b>Tableau 7</b> : Caractéristiques des bacs .....	<b>39</b>
<b>Tableau 8</b> : Caractéristiques des fixations .....	<b>40</b>

# 1 Contexte

---

Les professionnels du Syndicat National du Bois Lamellé (SNBL) sont souvent amenés à utiliser le bac acier pour antifermer et antidéverser les pannes en lamellé-collé des ouvrages neufs et sous certaines conditions.

Si la justification des assemblages bac/pannes n'est pas problématique, celle du bac acier est en revanche plus complexe puisqu'elle fait intervenir l'Eurocode 3. Cette justification n'est donc pas ergonomique au quotidien.

## 2 Objectif

---

Dans ce contexte, le SNBL a émis le souhait qu'un guide soit rédigé. Ainsi, avec l'appui du CTICM, FCBA a mis à plat la méthode de calcul par le biais d'un exemple et proposé des règles de moyens en fonction de différents paramètres (charges, pente, portées, entraxe, type de bac, ...).

## 3 Domaine d'application général

---

### 3.1 Domaine d'application

Le présent document traite de la conception et de la justification à froid de la stabilité (flambement, déversement) des pannes en bois lamellé par le bac acier. Ces pannes sont des éléments secondaires, à l'inverse des poutres porteuses qui sont des éléments primaires et qui doivent être stabilisées par un dispositif approprié autre que le bac.

*Note : Dans le cadre du présent document, les éléments à stabiliser sont principalement des pannes mais la méthode de calcul générale peut également s'appliquer aux poteaux support de bardage.*

Ce guide s'applique aux ouvrages neufs. La charpente bois doit être conforme à la NF DTU 31.1. En outre, son dimensionnement doit être effectué conformément à la NF EN 1995-1-1 et les documents associés. Les éléments de charpente doivent respecter les exigences de rectitude de la section 10 de la NF EN 1995-1-1, aucun effet du second ordre n'est pris en compte dans le cadre du présent document. Le rapport hauteur/largeur des pannes à stabiliser doit être inférieur ou égal à 9, elles sont sur deux appuis.

L'ouvrage de couverture doit être réalisé conformément à la NF DTU 43.3. En outre, la fixation du bac sur ces pannes est systématiquement effectuée en fond d'onde, une onde sur deux en partie courante et à chaque onde sur les pannes aux extrémités du bac. Le couturage longitudinal entre bacs est effectué en sommet d'onde tous les 50cm maximum. Dans le cadre du présent document, la pente de toiture doit être inférieure ou égale à 10 % et d'au minimum 3%.

La classe de construction II est visée dans le cadre du présent document. Au sens de la NF EN 1993-1-3, la classe de construction II correspond à des constructions dans lesquelles les plaques nervurées formées à froid sont calculées pour contribuer à la résistance et à la stabilité d'éléments structuraux individuels en complément de la reprise des actions habituelles poids propre, neige et vent. Dans le cadre du présent document, les bacs ne sont pas conçus pour reprendre des efforts apportés par des dispositifs de sécurité individuels ou ligne de vie.

**NOTE IMPORTANTE :** Les bacs acier visés par le présent document doivent être des bacs acier structurels de classe II au sens de la NF EN 1993-1-3 et marqués CE selon la NF EN 1090-1. Ainsi, dans le cadre du présent document, par « bac acier » il faut entendre « bac acier structurel de classe II au sens de la NF EN 1993-1-3 et marqué CE selon la NF EN 1090-1 ».

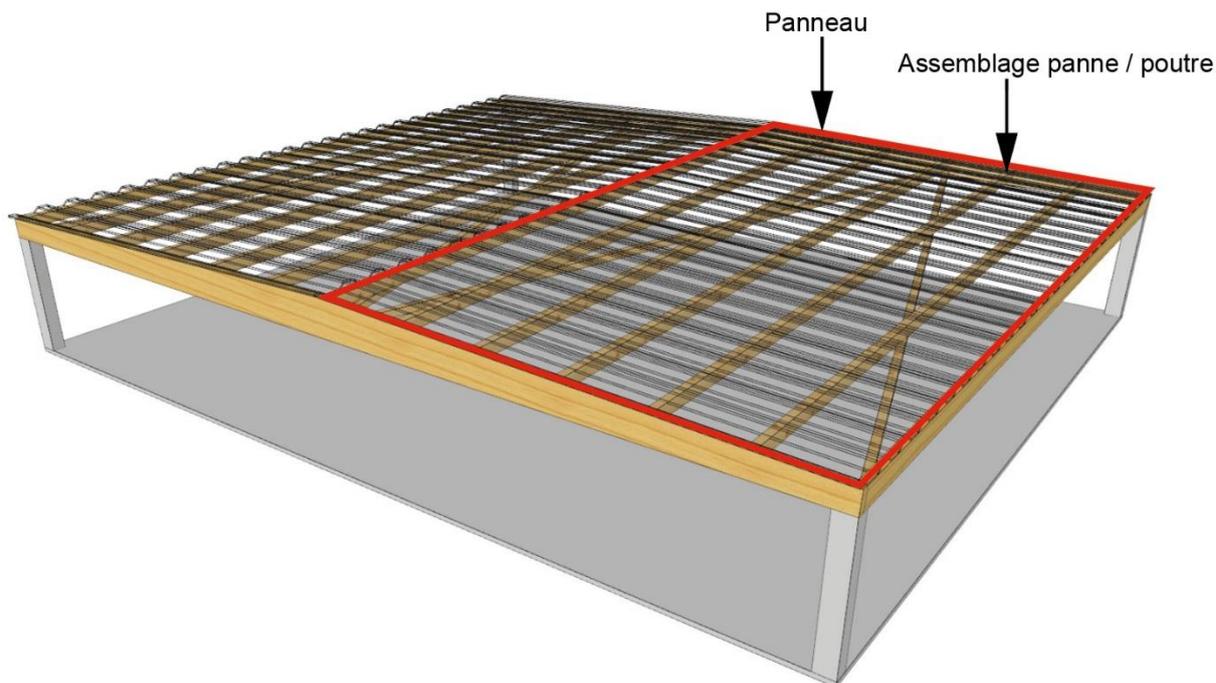
Lorsque que la méthode de calcul est appliquée aux poteaux support de bardage, les mêmes exigences s'appliquent aux plateaux.

*Note : Cette exigence de marquage pour la classe de construction II est apparue relativement récemment et les fabricants de bac sont en train de mettre en conformité avec cette dernière.*

Dans le cadre du présent document, le bac acier constitue un maintien latéral, total ou partiel, de la membrure haute des pannes en bois lamellé. Il transmet un effort de cisaillement, qui, conformément à la NF EN 1993-1-3 notamment, doit être transmis aux poutres au droit de chaque panne à stabiliser. Il faudra donc vérifier que l'assemblage des pannes sur les poutres

est capable de reprendre cet effort. En outre, la conception des appuis de pannes doit empêcher la rotation en torsion aux appuis.

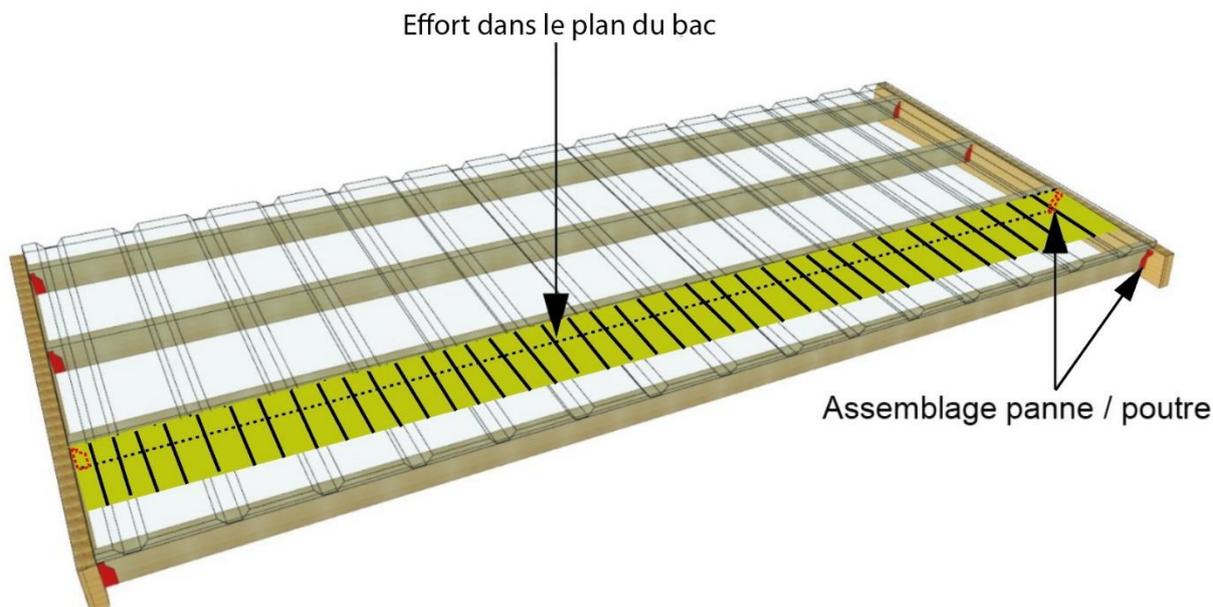
On raisonne donc par panneau. Dans le cadre du présent document, par « panneau » on entend « élément constitué de plusieurs plaques sur un versant et une travée ayant pour vocation d'assurer la stabilité des pannes en complément de la reprise des actions habituelles poids propre, neige et vent ». La figure ci-dessous illustre ce point. Les plaques ainsi assemblées assurent un effet diaphragme local à l'échelle du panneau uniquement.



*Figure 1 : Panneau*

Dans le cadre du présent document, les efforts dans le plan du bac sont :

- La composante dans le plan du bac des actions habituelles poids propre, neige et vent ;
- Les efforts de stabilité (anti-flambement et anti-déversement) ;
- Pour le cas des pannes posées d'aplomb, les efforts induits par ce mode de pose.



*Figure 2 : Effort dans le plan du bac*

La contribution éventuelle de la raideur en rotation pouvant être apportée par le bac n'est pas considérée dans le cadre du présent document. En complément de la reprise des actions habituelles poids propre, neige et vent, le bac ne permet d'assurer qu'un maintien de la membrure haute des pannes. Dans le cas notamment d'efforts de soulèvement importants, des dispositifs de stabilisation de la membrure basse des pannes doivent être prévus si le dimensionnement met en évidence leur nécessité.

Dans le cadre du présent document, les bacs acier ne jouent en aucun cas le rôle de contreventement et ne participent pas à la stabilité globale des ouvrages. Des dispositifs spécifiques autres doivent donc être prévus à cet effet.

Lorsque le bac acier participe à la stabilité des pannes, il doit être considéré comme un élément structural de l'ouvrage et ne doit pas être remplacé sans que les effets sur la stabilité de l'ouvrage soient pris en compte. Le cas échéant, lors du levage de l'ouvrage notamment ou d'un remplacement par exemple, des dispositifs provisoires doivent être prévus.

Le fait que le bac stabilise les pannes doit être acté par le charpentier et le couvreur dès le lancement du projet. Le dossier d'exécution doit clairement préciser que le bac acier stabilise les pannes en complément de la reprise des actions habituelles poids propre, neige et vent.

La détermination des efforts structuraux dans le plan et perpendiculairement au plan du bac, la vérification de l'aptitude du bac à assurer la stabilité des pannes pour le cas considéré et la note de calculs doivent être réalisés par le charpentier puis transmis, avec les hypothèses associées (propriétés du bac et fixations notamment), au couvreur. Il y aura lieu de vérifier que les propriétés du bac mis en œuvre correspondent bien à celles considérées au calcul.

*Note : La prise en compte des bacs ne dispense pas d'utiliser des entretoisements provisoires, en particulier pour des grandes portées ou des pentes importantes, pour garantir la rectitude des poutres maintenues, qui pourraient être déformées lors du levage ou au moment de la pose de la couverture par exemple, ceci afin de respecter les exigences de rectitude de la section 10 de la NF EN 1995-1-1.*

La stabilité en situation d'incendie ainsi qu'en situation de séisme ne sont pas visées par le présent document.

### 3.2 Cas des trémies

Conformément à la NF EN 1993-1-3 §10.3.4, des ouvertures de petites dimensions, régulièrement réparties, dont la surface cumulée représente jusqu'à 3 % de la surface d'un panneau, peuvent être disposées sans calcul particulier, à condition que le nombre total de fixations ne soit pas réduit.

Des ouvertures dont la surface cumulée représente jusqu'à 15 % de la surface d'un panneau (aire de la surface du panneau prise en compte pour les calculs) peuvent être disposées si cela est justifié par des calculs détaillés. Il convient de diviser les surfaces comprenant des ouvertures plus importantes, en plusieurs surfaces plus petites, chacune constituant un panneau à part entière.

Les chevêtres doivent être réalisés conformément aux exigences du DTU 43.3.

Note : Le cas des panneaux avec des ouvertures est traité au paragraphe 8.3 des recommandations de la CECM. Ce paragraphe est repris en annexe C du présent document.

### 3.3 Utilisation du présent document

Le présent document propose deux voies pour la justification de la stabilité des pannes par le bac acier :

- Règles de moyen sous forme d'abaques de dimensionnement si le cas de figure considéré est dans le domaine d'application des règles de moyen (paragraphe 4 du présent document) ;
- Dimensionnement conformément à la méthode de calcul proposée sinon ou si volonté d'optimisation (paragraphe 5 du présent document).

*Note : le domaine d'application des règles de moyen a été établi dans la recherche du meilleur compromis représentativité/performance.*

### 3.4 Interaction flexion /cisaillement

Il convient de calculer, en premier lieu, toutes les plaques nervurées qui font partie d'un panneau pour leur utilisation principale en flexion. Ceci est réalisé au moyen des abaques fournis par le fabricant du bac.

Conformément aux recommandations de la CECM et à la NF EN 1993-1-3 §10.3.4, pour garantir que toute détérioration des plaques se produira par flexion avant que la résistance de panneau soit atteinte, il convient de vérifier que la contrainte de cisaillement résultant de l'effet diaphragme local (à l'échelle du panneau uniquement) n'excède pas  $0,25 f_{yb}/\gamma_{M1}$ .

Compte tenu que seul le maintien latéral est retenu dans ce document (pas d'encastrement élastique bac panne), il est alors supposé que les charges transversales n'affectent pas la résistance ni la rigidité en cisaillement horizontal du panneau et qu'il n'est pas nécessaire d'effectuer une vérification avec interaction entre charges verticales et cisaillement horizontal.

## 4 Règles de moyen

---

### 4.1 Domaine d'application des règles de moyen

La méthode de calcul utilisée pour les présentes règles de moyen est celle décrite au paragraphe 5 du présent document. Outre le domaine d'application général cité au paragraphe 3 du présent document, les règles de moyen ont été établies sur la base des hypothèses ci-dessous.

#### 4.1.1 Actions

- Altitude inférieure ou égale à 1000m ;
- Classe de service 2 ;
- Toiture non accessible (catégorie H) ;
- Actions maximum sur le plan de toiture :
  - o Actions permanentes : 35 DaN/m<sup>2</sup> ou 50 DaNm<sup>2</sup> compris poids propre du bac et divers ;
  - o Actions d'exploitation : 80 DaN/m<sup>2</sup> ou 150 DaN conformément à la NF EN 1991-1-1 ;
  - o Actions de neige :  $S_d = 36 \text{ DaN/m}^2$
  - o Actions de neige accidentelle :  $S_d = 80 \text{ DaN/m}^2$
  - o Actions de vent :  $W_{\text{pression}} = 30 \text{ DaN/m}^2$ ;  $W_{\text{soulèvement}} = - 55 \text{ DaN/m}^2$
- Actions dues au séisme : aucune.
- Actions de compression maximum dans les pannes :
  - o Actions permanentes : 350 DaN pour la charge répartie de 35 DaN/m<sup>2</sup> ou 500 DaN pour la charge répartie de 50 DaN/m<sup>2</sup>;
  - o Actions de neige :  $S_d = 360 \text{ DaN}$  ;
  - o Actions de neige accidentelle :  $S_d = 800 \text{ DaN/m}^2$
  - o Actions de vent :  $W_{\text{comp}} = 1000 \text{ DaN}$

*Note : dans tous les cas traités par le présent document, toutes les charges réparties sauf le poids propre des pannes sont appliquées sur le bac acier.*

#### 4.1.2 Pannes en bois lamellé

- Bois lamellé conforme à la NF EN 14080 :2013 et de classe de résistance mécanique GL24h ou GL28h (voir **NOTE IMPORTANTE** ci-dessous) qu'il soit refendu ou non ;
- Toutes les pannes ont la même section ;
- Epaisseur des lamelles 45mm ;
- $K_{cr} = 1$  ;
- Contreflèche égale à la flèche instantanée sous poids propre ;
- Pour le dimensionnement à l'ELS, seules les exigences minimales de la NF EN 1995-1-1 sont prises en compte ;
- Panne à inertie constante et horizontale;
- Aucun délardement pris en compte;
- Conformément à la NF EN 14080, lorsque la panne comporte au moins 10 lamelles, le produit ( $E_{0,g,k} \times G_{g,k}$ ) est augmenté d'un facteur 1,4.
- Coefficient  $k_h$  de la NF EN 1995-1-1 pris en compte ;

**NOTE IMPORTANTE :** Les cas de figure qui passent en GL24h peuvent ne pas passer en GL28h. En effet, si le fait de passer en GL28h par exemple permet potentiellement d'optimiser les sections, cela conduit à des efforts plus importants dans le plan du bac étant donné que la panne est plus rigide (module axial supérieur dans le cas présent) ce qui se traduit par un  $k_{crit}$  plus faible.

#### 4.1.3 Bac et fixations

- Bacs acier de classe II au sens de la NF EN 1993-1-3 et marqués CE selon la NF EN 1090-1 sur trois appuis minimum ;
- Longueur des bacs : 15000mm maximum;
- Epaisseur nominale du bac égale à 0.75mm ;
- Type de bacs (voir caractéristiques en Annexe A):
  - o Type 1 si l'entraxe des pannes est inférieur ou égale à 3m ;
  - o Type 2 sinon.
- Mise en œuvre conformément aux exigences de la NF DTU 43.3 ;
- Type de fixation bacs/pannes : type SW3-T-H15-6,5x50 ou similaire à chaque onde aux extrémités des bacs et une onde sur deux en partie courante (voir caractéristiques en annexe B) ;
- Couturage longitudinal des bacs en sommet d'onde par vis diamètre 4.8mm entraxe 500mm.

#### 4.1.4 Paramètres de calcul

Les paramètres de calcul et les plages de valeurs associées sont les suivantes :

- Pannes d'aplomb ou déversée ;
- Portée des pannes de 6m à 12m bornes incluses ;
- Entraxe des pannes de 1.5m à 3.5m bornes incluses ;
- Nombre de pannes par versant de 7 à 13 bornes incluses ;
- Largeur des bois de 65mm, 78mm, 90mm, 105mm et 115mm;
- Pente de 3% à 10% bornes incluses.

## 4.2 Abaques de dimensionnement

Voir tableaux de résultats joints « Tableaux V4\_XXGLXXh.pdf ». Pour un couple charge permanente/classe de résistance mécanique, seule la portée des pannes varie d'un tableau à l'autre.

La légende pour les modes de rupture est la suivante :

- Inter : Interaction flexion/cisaillement des bacs ;
- Fixat : Résistance des fixations au cisaillement du bac sur les pannes ;
- Extré : Ruine de l'extrémité du bac ;
- Voile : Voilement par cisaillement
- Diam : Pression diamétrale assemblage bac/panne
- Cisail : Résistance en cisaillement du panneau
- « - » : Le taux de travail de la panne est supérieur à 1 au regard du domaine d'application considéré.

Les colonnes « W » donnent les taux de travail.

## 4.3 Dimensionnement des assemblages pannes/poutres

Comme évoqué précédemment, l'effort tranchant dans le plan du bac doit être transmis aux poutres support des pannes au droit de chaque panne à stabiliser. Il faudra donc vérifier que l'assemblage des pannes sur les poutres est capable de reprendre cet effort. Les efforts tranchants non pondérés dans le plan du bac suivants pourront être pris en compte pour effectuer ce dimensionnement dans le cadre des présentes règles de moyen :

Portée des pannes (m)	6	7	8	9	10	11	12
G	85	105	125	145	165	180	200
Q	50	55	60	65	70	70	70
S	60	75	85	95	110	120	130
S <sub>ad</sub>	130	160	180	210	240	260	290
W <sub>pression</sub>	30	35	40	45	50	55	60
W <sub>soulèvement</sub>	-10	-15	-25	-35	-45	-50	-60

*Tableau 1 : Efforts tranchants dans le plan du bac non pondérés en DaN en fonction de la portée des pannes pour la vérification des assemblages pannes/poutres*

*Note : Ces efforts sont à cumuler avec les charges descendantes. Les pannes sont supposées être dimensionnées avec un taux de travail le plus proche possible de 100%.*

## 5 Méthode de calcul

### 5.1 Préambule : conditions de rigidité de la NF EN 1995-1-1 et de NF EN 1993-1-3

Pour que la panne puisse être considérée comme étant maintenue latéralement dans le plan de la plaque, la NF EN 1993-1-3 donne, au paragraphe 10.1.1, une exigence à satisfaire sur la rigidité partielle apportée à la panne par la plaque assemblée à chaque nervure :

$$S \geq \left( EI_w \frac{\pi^2}{L^2} + GI_t + EI_z \frac{\pi^2}{L^2} 0,25h^2 \right) \frac{70}{h^2}$$

*Note : Cette formule donnée par la NF EN 1993-1-3 est adaptée aux pannes métalliques. Pour les sections pleines rectangulaires visées dans le cadre du présent document, le terme faisant intervenir l'inertie de gauchissement  $I_w$  peut être négligé.*

Il est précisé que si la plaque est assemblée une nervure sur deux, il convient de substituer  $0.2xS$  à  $S$ .

Les premiers calculs effectués sur la base des hypothèses précédentes montrent que cette exigence est rarement satisfaite. Ainsi, au sens de la NF EN 1993-1-3, il n'est pas possible de considérer que le panneau constitue un blocage latéral total de la panne.

Suite à ce constat, une étude a été menée sur quelques exemples, au moyen du logiciel de calcul aux éléments finis LTBeamN développé pour le CTICM moyennant quelques adaptations pour le bois. Cette étude a permis de montrer que la valeur du coefficient  $k_{crit}$ , calculée sur la base du moment critique de déversement donné par ce logiciel, est égale à 1 bien avant que l'exigence de rigidité minimale donnée au paragraphe 9.2.5.2 de la NF EN 1995-1-1 soit satisfaite et bien avant que l'exigence de rigidité de la NF EN 1993-1-1 soit satisfaite.

Il apparaît alors que ces exigences sont trop sécuritaires pour les configurations étudiées dans le cadre du présent document, notamment, pour le cas de l'exigence de la NF EN 1995-1-1, du fait de la présence de nombreux blocages latéraux relativement proches sur la panne. Ainsi, ces exigences ne sont pas considérées.

Au regard de ce qui précède pour cette problématique, la démarche adoptée dans le cadre du présent document est la suivante :

- Pour les abaques de dimensionnement des règles de moyen :
  - o Le coefficient  $k_{crit}$  est calculé pour chaque cas traité sur la base du moment critique donné par le logiciel LTBeamN.

*Note : Les calculs effectués montrent que, sur le domaine d'emploi des règles de moyen, la valeur du coefficient  $k_{crit}$  est toujours égale à 1. La valeur du coefficient  $k_{c,z}$  est également prise égale à 1.*

- Pour un dimensionnement suivant la méthode proposée au paragraphe 5 du présent document, les coefficients  $k_{crit}$  et  $k_{c,z}$  doivent être déterminés par une méthode appropriée.

## 5.2 Pannes d'aplomb et pannes déversées

Le bac acier constitue un blocage latéral de la membrure haute des pannes. Ainsi, celles-ci ne peuvent se déformer que suivant une direction perpendiculaire au plan du bac comme l'illustrent les figures ci-dessous. Seule la composante des efforts perpendiculaire au plan du bac est représentée sur ces figures, la composante dans le plan du bac est directement reprise en cisaillement par ce dernier.

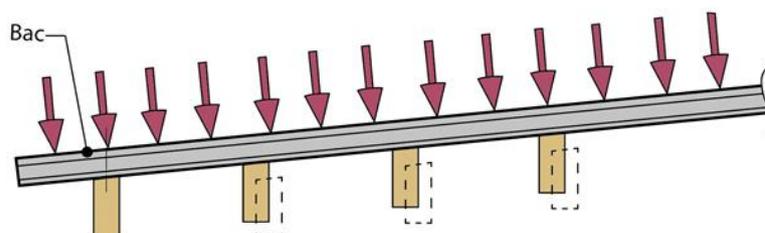


Figure 3 : Pannes posées d'aplomb

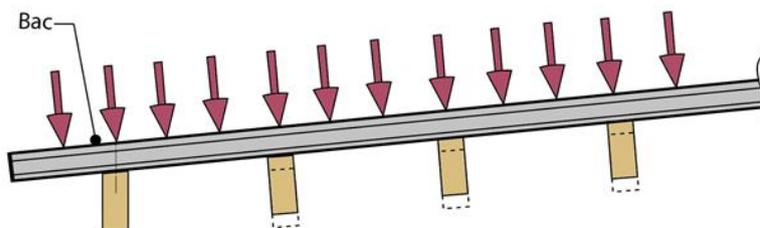


Figure 4 : Pannes posées à dévers

Ceci implique notamment que :

- à l'inverse des pannes posées à dévers, les pannes posées d'aplomb vont travailler en flexion déviée avec une composante de flexion autour de leur axe faible. Ces pannes vont également subir une déformation un peu plus importante. Les pannes posées d'aplomb travaillent donc moins bien. De plus, si l'on considère la rotation est dans une certaine mesure bloquée aux appuis, cette configuration engendre également de la torsion dans la panne. A noter qu'au regard des pentes considérées dans le cadre du présent document, le dimensionnement des pannes n'est que peu impacté par la pose d'aplomb.
- lorsque les pannes sont posées d'aplomb, leur déformation perpendiculairement au plan du bac engendre un effort dans le plan du bac, transmis par les fixations pannes/bac. Cet effort est à cumuler avec la composante des charges dans le plan du bac et les efforts d'anti flambement et d'anti déversement.

### 5.3 Démarche générale de calcul

La démarche générale de la méthode de calcul est la suivante :

- Calcul de la rigidité du panneau par panne à stabiliser et par unité de longueur de panne ;
- Détermination des coefficients  $k_{crit}$  et  $k_{c,z}$ ;
- Décomposition des efforts dans le plan du bac ;
- Vérification des pannes intermédiaires conformément à la NF EN 1995-1-1 et les documents associés ;
- Détermination des efforts d'anti flambement et d'anti déversement conformément à la NF EN 1995-1-1 et les documents associés puis de l'effort total dans le plan du bac;
- Vérification des assemblages pannes/bac conformément à la NF EN 1995-1-1 et les documents associés ;
- Vérification du bac et de ces assemblages conformément aux recommandations de la Convention Européenne de la Construction Métallique (CECM) – European Recommendations for the application of metal sheeting acting as diaphragm. Publication n°88, 1995.

La méthode est développée au paragraphe suivant par l'intermédiaire de deux exemples de calcul.

*Note : Par « pannes intermédiaires » on entend ici pannes qui ne sont pas en extrémité d'un élément unitaire de bac.*

## 5.4 Exemple de calcul : pannes posées à dévers

### 5.4.1 Données et hypothèses

Les données et hypothèses générales sont celles du paragraphe 4.1 du présent document. Les charges permanentes sont prises égales à 35 DaN/m<sup>2</sup> compris poids propre du bac et divers.

On considère le plan de toiture suivant :

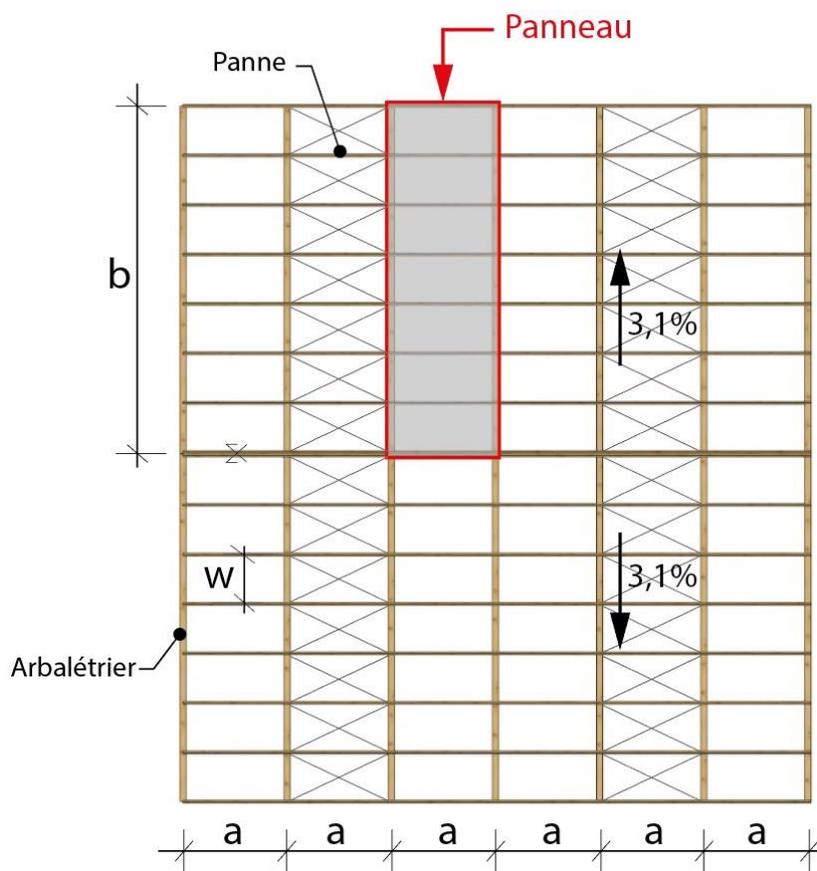


Figure 5 : Vue en plan de la toiture

Aucune entretoise n'est prévue pour la stabilité des pannes sur la base des hypothèses prises. A noter qu'en fonction des efforts, des dispositions complémentaires peuvent être nécessaires pour les pannes de la poutre au vent.

Les pannes de section 78x315 et de classe de résistance mécanique GL24h sont posées à dévers. Une variante avec les pannes posées d'aplomb est traitée au paragraphe 5.5 du présent document.

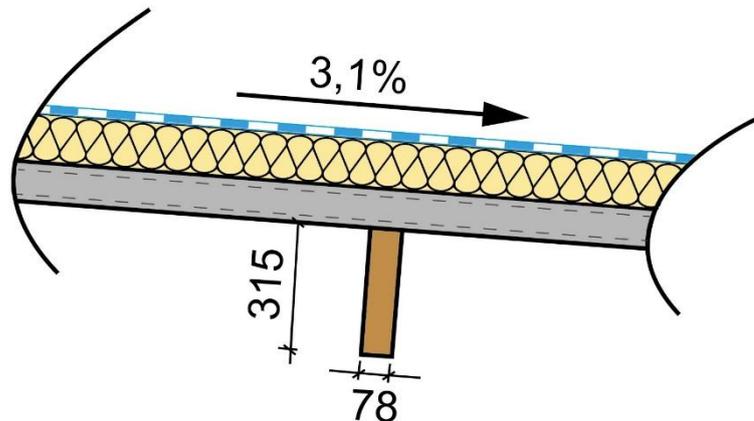


Figure 6 : Pannes posées à dévers

Le bac est de type 1 (voir annexe A).

On note :

- $a$  : portée des pannes,  $a = 6\text{m}$  ;
- $w$  : entraxe des pannes,  $w = 3\text{m}$  ;
- $b$  : la hauteur totale du panneau,  $b = 21\text{m}$  ;
- $d$  : la longueur d'onde du bac,  $d = 250\text{mm}$  ;
- $h$  : la hauteur du bac,  $h = 39\text{mm}$  ;
- $n$  : nombre de travées sur la hauteur du panneau,  $n = 7$  ;
- $n_b$  : nombre de bacs sur la hauteur,  $n_b = 2$  ;
- $n_{sh}$  : nombre de bacs sur la largeur,  $n_{sh} = 6$  ;
- $n_p$  : nombre de pannes sur la hauteur,  $n_p = n+1 = 8$  ;
- $p$  : entraxe des fixations bac/panne le long de la panne,  $p = 500\text{mm}$  ;
- $n_s$  : nombre d'attache de coutures sur la hauteur du panneau,  $n_s = 21000/500 + 1 = 43$  ;
- $n_f$  : nombre de fixation sur la largeur du bac,  $n_f = 3$  ;
- $\nu$  : coefficient de poisson de l'acier :  $\nu = 0.3$  ;
- $u$  : longueur développée d'une onde de bac :  $u = 308\text{mm}$  ;
- $I_{ys}$  : inertie de flexion par unité de largeur du bac,  $I_{ys} = 203 \text{ mm}^4/\text{mm}$  ;
- $\ell$  : largeur de la crête de l'onde,  $\ell = 180\text{mm}$  ;
- $n_{raidisseurs}$  : nombre de raidisseurs sur la longueur de la panne,  $n_{raidisseurs} = 11$ .

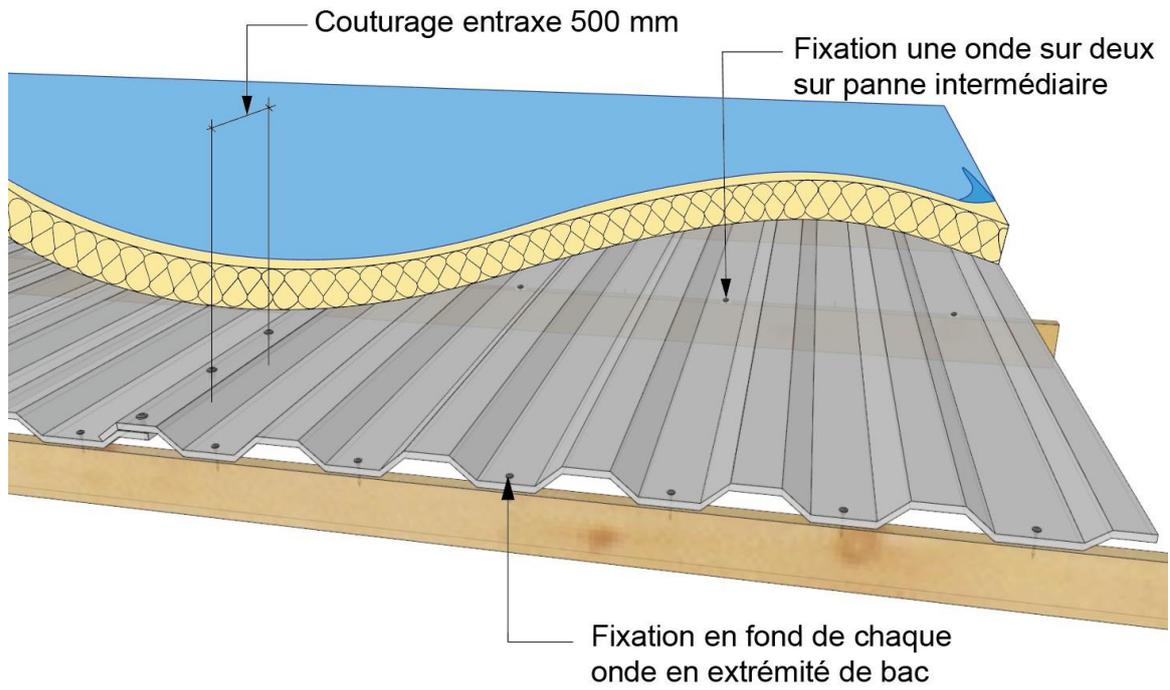


Figure 7 : Fixations des bacs

### 5.4.2 Calcul de la rigidité du panneau par panne à stabiliser et par unité de longueur

Il faut tout d'abord calculer la rigidité en cisaillement du panneau. Pour cela, on utilise la formule donnée par les recommandations de la CECM en annexe B.III par panne à stabiliser :

$$S_{act} = \frac{a}{c(n+1)}$$

Où :

- a est la portée des pannes ;
- n est le nombre de travées sur la hauteur du bac ;
- c est la flexibilité en cisaillement du panneau.

La flexibilité en cisaillement c du panneau est calculé comme suit :

$$C = C_{1.1} + C_{1.2} + C_{2.1} + C_{2.2}$$

avec :

- $c_{1.1}$  : distorsion du profil ;
- $c_{1.2}$  : déformation en cisaillement des panneaux ;
- $c_{2.1}$  : glissement au niveau des fixations du bac sur les pannes ;
- $c_{2.2}$  : glissement au niveau des attaches de couture.

On a :

$$c_{1.1} = \frac{ad^{2,5}\alpha_1\alpha_4K}{Et^{2,5}(nw)^2}$$

Cette expression ne s'applique que si  $b/d \geq 10$ . Dans le cas présent on a  $b/d = 21000/250 = 84$ , la condition est donc satisfaite.

Les coefficients  $\alpha_1$ ,  $\alpha_4$  et K sont à déterminer selon les tableaux 5.4 et 5.8 des recommandations.

Nombre total de pannes par panneau (ou par bac pour $\alpha_1$ ) $n_p$	Facteurs		
	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$
2	1,00	1,00	1,00
3	1,00	1,00	1,00
4	0,85	0,75	0,90
5	0,70	0,67	0,80
6	0,60	0,55	0,71
7	0,60	0,50	0,64
8	0,60	0,44	0,58
9	0,60	0,40	0,53
10	0,60	0,36	0,49
11	0,60	0,33	0,45
12	0,60	0,30	0,42
13	0,60	0,29	0,39
14	0,60	0,27	0,37
15	0,60	0,25	0,35
16	0,60	0,23	0,33
17	0,60	0,22	0,31
18	0,60	0,21	0,30
19	0,60	0,2	0,28
20	0,60	0,19	0,27

*Tableau 2 : Tableau 5.4 des recommandations – impact du nombre de pannes*

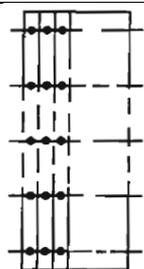
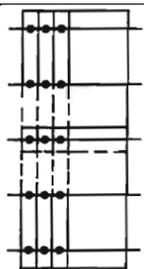
	Position des fixations			
	Chaque onde	Une onde sur deux	Chaque onde aux deux extrémités de bac	Chaque onde à une extrémité de bac
Un seul bac sur la hauteur du panneau	 $K = K_1$ $\alpha_1$ voir tableau 5.4 $\alpha_4 = 1$ (1)	 $K = K_2$ $\alpha_1$ voir tableau 5.4 $\alpha_4 = 1$ (2)	 $K = K_1$ $\alpha_1 = 1$ $\alpha_4 = 1$ (3)	 $K = K_2$ $\alpha_1 = 0,5$ $\alpha_4 = 1$ (4)
$n_b$ bacs sur la hauteur du panneau	 $K = K_1$ $\alpha_1$ voir tableau 5.4 pour le nombre de pannes par bac $\alpha_4 = (1+0,3n_b)$ (5)	 $K = K_2$ $\alpha_1$ voir tableau 5.4 pour le nombre de pannes par bac $\alpha_4 = (1+0,3n_b)$ (6)	 $K = K_1$ $\alpha_1 = 1$ $\alpha_4 = (1+0,3n_b)$ (7)	 $K = K_2$ $\alpha_1$ voir tableau 5.4 pour le nombre de pannes par bac $\alpha_4 = (1+0,3n_b) \times (1-1/n_b)$ (8)

Tableau 3 : Tableau 5.8 des recommandations – position des fixations et nombre de bacs sur la hauteur du panneau

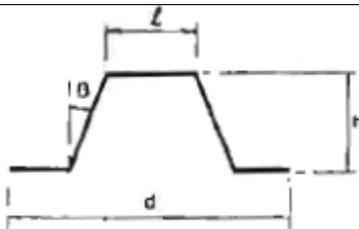
Les bacs sont fixés en creux d'onde une onde sur deux sur les pannes intermédiaires et à chaque onde sur les pannes d'extrémité de bac. On se réfère donc à la case (7) du tableau 5.8 des recommandations qui donne :

$$\alpha_1 = 1$$

$$\alpha_4 = 1 + 0,3 \times n_b = 1 + 0,3 \times 2 = 1.6$$

$$K = K_1$$

Le bac étant fixé au creux de chaque onde à ces extrémités,  $K_1$  est à déterminer selon le tableau 5.6 des recommandations en fonction des caractéristiques du bac :



$\Theta$ (°)	h/d	l/d								
		0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
0	0,1	0,013	0,03	0,041	0,041	0,046	0,05	0,066	0,103	0,193
	0,2	0,042	0,096	0,131	0,142	0,142	0,153	0,199	0,311	0,602
	0,3	0,086	0,194	0,264	0,285	0,283	0,302	0,388	0,601	1,188
	0,4	0,144	0,323	0,438	0,473	0,468	0,494	0,629	0,972	1,935
	0,5	0,216	0,438	0,654	0,703	0,695	0,729	0,922	1,42	2,837
	0,6	0,302	0,674	0,911	0,98	0,965	1,008	1,266	1,938	3,892
	0,7	0,402	0,895	1,208	1,3	1,277	1,329	1,661	2,536	5,098
	0,8	0,516	1,146	1,546	1,662	1,631	1,692	2,107	3,208	6,453
5	0,1	0,014	0,031	0,041	0,044	0,044	0,049	0,066	0,107	0,205
	0,2	0,05	0,099	0,128	0,134	0,132	0,146	0,198	0,336	0,652
	0,3	0,107	0,202	0,253	0,26	0,254	0,28	0,386	0,681	1,548
	0,4	0,188	0,338	0,413	0,417	0,404	0,448	0,629	1,158	2,639
	0,5	0,295	0,507	0,604	0,601	0,578	0,648	0,934	1,783	
	0,6	0,429	0,706	0,823	0,806	0,772	0,877	1,306	2,586	
	0,7	0,591	0,935	1,066	1,028	0,983	1,135	1,756	3,605	
	0,8	0,78	1,191	1,328	1,264	1,208	1,423	2,299	4,838	
10	0,1	0,016	0,031	0,04	0,042	0,042	0,048	0,065	0,111	0,221
	0,2	0,056	0,101	0,123	0,125	0,123	0,139	0,2	0,366	0,873
	0,3	0,125	0,204	0,238	0,233	0,226	0,264	0,402	0,786	
	0,4	0,222	0,338	0,375	0,356	0,345	0,418	0,689	1,445	
	0,5	0,349	0,494	0,526	0,486	0,473	0,605	1,082	2,428	
	0,6	0,502	0,668	0,682	0,615	0,608	0,837	1,607		
	0,7	0,677	0,851	0,834	0,736	0,752	1,128	2,308		
	0,8	0,869	1,035	0,975	0,844	0,907	1,494	3,2		
15	0,1	0,017	0,031	0,04	0,041	0,041	0,047	0,066	0,115	0,241
	0,2	0,062	0,102	0,118	0,115	0,113	0,134	0,209	0,403	
	0,3	0,139	0,202	0,218	0,204	0,2	0,254	0,44	0,945	
	0,4	0,244	0,321	0,325	0,293	0,294	0,414	0,796		
	0,5	0,37	0,448	0,426	0,371	0,396	0,636	1,329		
	0,6	0,506	0,568	0,508	0,434	0,513	0,941			
	0,7	0,646	0,668	0,561	0,483	0,664	1,349			
	0,8	0,766	0,735	0,578	0,527	0,861				
20	0,1	0,018	0,032	0,039	0,039	0,039	0,046	0,066	0,111	0,276
	0,2	0,068	0,101	0,111	0,106	0,104	0,131	0,221	0,452	
	0,3	0,148	0,193	0,194	0,174	0,177	0,255	0,492		
	0,4	0,249	0,289	0,267	0,23	0,259	0,444	0,931		
	0,5	0,356	0,372	0,315	0,27	0,364	0,725			
	0,6	0,448	0,42	0,326	0,303	0,512				
	0,7	0,509	0,423	0,301	0,346					
	0,8	0,521	0,372	0,259	0,413					
25	0,1	0,019	0,032	0,038	0,038	0,038	0,045	0,068	0,126	0,313
	0,2	0,072	0,099	0,103	0,095	0,095	0,129	0,236	0,513	

	0,3	0,151	0,178	0,166	0,144	0,16	0,268	0,557		
	0,4	0,238	0,244	0,204	0,176	0,247	0,494			
	0,5	0,306	0,272	0,203	0,204	0,376				
	0,6	0,333	0,248	0,172	0,241					
	0,7	0,3	0,174	0,142						
	0,8	0,204	0,081							
30	0,1	0,02	0,032	0,037	0,036	0,036	0,044	0,07	0,133	
	0,2	0,075	0,095	0,094	0,084	0,087	0,132	0,256		
	0,3	0,148	0,157	0,135	0,116	0,152	0,291			
	0,4	0,208	0,186	0,139	0,139	0,253				
	0,5	0,226	0,161	0,112	0,176					
	0,6	0,18	0,089	0,093						
	0,7	0,077								
35	0,1	0,021	0,032	0,036	0,034	0,034	0,043	0,072	0,142	
	0,2	0,076	0,089	0,083	0,072	0,082	0,137	0,281		
	0,3	0,137	0,13	0,102	0,093	0,151				
	0,4	0,162	0,119	0,082	0,12					
	0,5	0,123	0,059							
	0,6	0,032								
40	0,1	0,023	0,032	0,034	0,032	0,032	0,043	0,075	0,155	
	0,2	0,075	0,081	0,07	0,06	0,077	0,146			
	0,3	0,116	0,096	0,068	0,078					
	0,4	0,1	0,053	0,048						
	0,5	0,024								
45	0,1	0,024	0,031	0,032	0,029	0,03	0,043	0,079		
	0,2	0,071	0,069	0,056	0,05	0,073				
	0,3	0,086	0,057	0,041						
	0,4	0,032								

Tableau 4 : Tableau 5.6 des recommandations – Valeur de  $K_1$  pour les assemblages au creux de chaque onde.

Des interpolations linéaires donnent :

$$K_1 = 0.215$$

D'où :

$$c_{1.1} = \frac{6000 \times 250^{2.5} \times 1 \times 1.6 \times 0.215}{210 \times 0.7^{2.5} \times (7 \times 3000)^2} = 0.0537 \text{ mm/kN}$$

On a :

$$c_{1.2} = \frac{2a\alpha_2(1+\nu)(1+2h/d)}{Etnw}$$

Le coefficient  $\alpha_2$  est déterminé selon le tableau 5.4 des recommandations (voir tableau 2 du présent document) :  $\alpha_2 = 0.44$

D'où :

$$c_{1.2} = \frac{2 \times 6000 \times 0,44 \times (1 + 0,3) \times \left(1 + 2 \times \frac{39}{250}\right)}{210 \times 0,7 \times 7 \times 3000} = 0.0029 \text{ mm/kN}$$

On a :

$$c_{2.1} = \frac{2as_p\rho\alpha_3}{(nw)^2}$$

Le coefficient  $\alpha_3$  est déterminé selon le tableau 5.4 des recommandations (voir tableau 2 du présent document) :  $\alpha_3 = 0.58$

$s_p$  est le coefficient de glissement des fixations du bac sur les pannes. On a  $s_p = \frac{1}{K_{ser}}$ , avec :

$$K_{ser} = 2 \times \rho_m^{1.5} \times \frac{d}{23} = 2 \times 420^{1.5} \times \frac{4.95}{23} = 3704 \text{ N/mm}$$

Conformément à la NF EN 1995-1-1, un coefficient 2 est appliqué pour les assemblages bois/métal.

D'où  $s_p = 0.27 \text{ mm/kN}$

D'où :

$$c_{2.1} = \frac{2 \times 6000 \times 0,27 \times 500 \times 0.58}{(7 \times 3000)^2} = 0.0021 \text{ mm/kN}$$

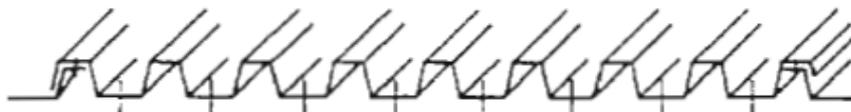
Et enfin :

$$c_{2.2} = \frac{2s_s s_p (n_{sh} - 1)}{2n_s s_p + \beta_1 n_p s_s}$$

Le coefficient  $\beta_1$  est déterminé pour les pannes intermédiaires à l'aide du tableau 5.2 des recommandations (voir tableau 5 ci-dessous).

Nombre total de fixations sur la largeur d'un bac $n_f$	$\beta_1$		$\beta_2$
	Cas 1 - sheeting	Cas 2 - decking	
2	0,13	1,00	1,00
3	0,30	1,00	1,00
4	0,44	1,04	1,11
5	0,58	1,13	1,25
6	0,71	1,22	1,40
7	0,84	1,33	1,56
8	0,97	1,45	1,71
9	1,10	1,56	1,88
10	1,23	1,68	2,04

Tableau 5 : Tableau 5.2 des recommandations – Nombre de fixations sur la largeur d'un bac



Cas 1 : Couturage en sommet d'onde (sheeting)



Cas 2 : Couturage en fond d'onde (decking)

Figure 8 : Définitions des termes "sheeting", « decking »

Dans notre cas de figure, pour une toiture et pour  $n_f = 3$  on prend  $\beta_1 = 0,3$  dans la colonne « sheeting ».

$s_s$  est le coefficient de glissement des attaches de couture fourni par le tableau 5.1 des recommandations (voir tableau 6 ci-dessous).

(1) Fixations bac/pannes				
	Type de rondelle	Diamètre (mm)	Résistance au cisaillement $F_p$ et $F_{sc}$ (kN)	Glissement $s_p$ et $s_{sc}$ (mm/kN)
Vis	Tête large	5,5 6,3	$\min(1,9 \times f_u \times d_n \times t ; 6,5)$ $\min(1,9 \times f_u \times d_n \times t ; 8)$	0,15
	Tête large et rondelle néoprène	5,5 6,3	$\min(1,9 \times f_u \times d_n \times t ; 6,5)$ $\min(1,9 \times f_u \times d_n \times t ; 8)$	0,35
(2) Coutures				
		Diamètre (mm)	Résistance au cisaillement $F_s$ (kN)	Glissement $s_s$ (mm/kN)
Vis		4,1 to 4,8	$\min(2,9 \times (t/d_n)^{0,5} \times f_u \times d_n \times t ; 3,8)$	0,25
Rivets		4,8	$\min(3,2 \times (t/d_n)^{0,5} \times f_u \times d_n \times t ; 3)$	0,30
Avec : - $F_u$ est la résistance ultime à la traction du bac (kN/mm <sup>2</sup> ) - $d_n$ est le diamètre nominal de la fixation (mm) - $t$ est l'épaisseur net du bac (mm)				
Les commentaires du paragraphe 5.3.2 des recommandations de la CECM doivent être pris en compte.				

Tableau 6 : Tableau 5.1 des recommandations – Résistance et glissement des fixations

On a  $s_s = 0,25$  mm/kN pour les vis.

D'où :

$$c_{2.2} = \frac{2 \times 0,27 \times 0,25 \times (6 - 1)}{2 \times 43 \times 0,27 + 0,3 \times 8 \times 0,27} = 0.0283 \text{ mm/kN}$$

Donc :

$$c = c_{1.1} + c_{1.2} + c_{2.1} + c_{2.2} = 0,0537 + 0,0029 + 0,0021 + 0,0283 = 0,087 \text{ mm/kN}$$

D'où :

$$S_{act} = \frac{6000}{0,087 \times (7+1)} = 8620,690 \text{ kN.mm/mm}$$

Le logiciel LTBeamN, une fois la rigidité du panneau par panne à stabiliser et par unité de longueur renseignée ( $k_v'$  dans le logiciel) permet ensuite de déterminer le moment critique :

$$M_{max,cr} = 993,43 \text{ kN.m}$$

Le coefficient  $k_{crit}$  est ensuite calculé selon la NF EN 1995-1-1 en injectant la valeur du moment critique obtenue dans la formule (6.31), on obtient :

$$K_{crit} = 1$$

On prend alors :

$$K_{c,z} = 1$$

*Note : A noter que le cas de figure traité dans le cadre du présent exemple étant dans le domaine d'application des règles de moyen et étant donné que les tous les calculs effectués dans ce domaine d'application donnent  $k_{crit} = 1$ , cette valeur pouvait d'office être prise en compte.*

### 5.4.3 Décomposition des efforts dans le plan du bac (hors stabilité)

	Effort perpendiculaire au plan du bac	Effort dans le plan du bac
G (DaN/m <sup>2</sup> )	34.98	1.08
q (DaN/m <sup>2</sup> )	79.96	2.48
Q (DaN)	149.93	4.65
S (DaN/m <sup>2</sup> )	35.98	1.12
S <sub>ad</sub> (DaN/m <sup>2</sup> )	79.96	2.48
W <sub>1</sub> (DaN/m <sup>2</sup> )	30	0
W <sub>2</sub> (DaN/m <sup>2</sup> )	-55	0

Par exemple, pour G, avec une pente de 3.1% soit 1.78°, on a :

$$G_{perpendiculaire \text{ plan bac}} = 35 \times \cos(1.78) = 34.98 \text{ DaN/m}^2$$

$$G_{plan \text{ bac}} = 35 \times \sin(1.78) = 1.08 \text{ DaN/m}^2$$

Il faut ajouter à cela le composante du poids propre dans le plan du bac soit :

$$G_{poids \text{ propre plan bac}} = 0.078 \times 0.315 \times 420 \times \sin(1.78) = 0.32 \text{ DaN/m}$$

Les efforts perpendiculaires au plan du bac sont repris par les pannes et les efforts dans le plan du bac sont directement repris en cisaillement par le bac et transmis à chaque appui par les assemblages pannes/poutres.

#### 5.4.4 Vérification des pannes intermédiaires

Sur la base des hypothèses prises, les pannes sont ensuite dimensionnées conformément à la NF EN 1995-1-1 et les documents associés avec les coefficients  $k_{crit}$  et  $k_{c,z}$  déterminés précédemment.

Les résultats sont, pour la flexion/compression :

	ELU	ELS
Taux de travail max	86%	70%
Cas de charges	1,35xG+1,5xq	1xG+1xq

Note : L'inertie de torsion est calculée au moyen de la formule suivante :

$$I_{tor} = \frac{(b \times h)^4}{40 \times \frac{b \times h}{12} (b^2 + h^2)}$$

#### 5.4.5 Détermination des efforts d'anti flambement et d'anti déversement puis de l'effort total dans le plan du bac

Sur la base des hypothèses prises et pour chaque cas de charge, la charge par unité de longueur  $q_{d,stab}$  due aux efforts d'anti flambement et d'anti déversement est alors calculée selon le paragraphe 9.2.5.3 de la NF EN 1995-1-1 au moyen de la formule suivante :

$$q_{d,stab} = k_l \times \frac{n \times N_d}{30 \times a}$$

Où :

$$k_l = \min\left(1; \sqrt{\frac{15}{a}}\right)$$

Et :

$$N_d = F_{c,0,d} + (1 - k_{crit}) \times \frac{M_d}{h}$$

Note 1 : Conformément à la NF EN 1995-1-1 et les documents associés, c'est le  $k_{crit}$  de la panne non stabilisée qui est utilisé pour la détermination des efforts. De même,  $M_d$  est la valeur de calcul du moment maximum dans la panne.

Note 2 : Ces efforts sont à cumuler avec la composante des charges dans le plan du bac lors de la vérification de ce dernier.

Par exemple, pour le cas de charges 1,35xG, on a :

$$F_{c,0,d} = 4725 \text{ N}$$

$$M_d = 7002309 \text{ N.mm}$$

Pour la poutre non stabilisée on a :  $k_{crit} = 0.73$

On a  $k_l = 1$

D'où :

$$N_d = 4725 + (1 - 0.73) \times \frac{7002309}{315} = 10727 \text{ N}$$

Donc, par panne on a :

$$q_{d,stab} = 1 \times \frac{10727}{30 \times 6} = 60 \text{ N/m}$$

L'effort total dans le plan du bac par panne est :

$$q_{tot \text{ plan bac}} = q_{d,stab} + q_{d,efforts \text{ plan bac}}$$

Par exemple pour 1,35xG on a :

$$q_{tot \text{ plan bac}} = q_{d,stab} + 1,35 \times (G_{plan \text{ bac}} \times w + G_{poids \text{ propre,plan bac}})$$

$$q_{tot \text{ plan bac}} = 60 + 1,35 \times (1,08 \times 10 \times 3 + 0,32 \times 10)$$

$$q_{tot \text{ plan bac}} = 108.06 \text{ N/m}$$

#### 5.4.6 Vérification des assemblages pannes/bac

Les assemblages pannes/bac reprennent les efforts suivants :  $q_{tot \text{ plan bac}} \times p$

La vérification des assemblages pannes/bac est ensuite effectuée conformément à la NF EN 1995-1-1 et les documents associés. Les résultats sont les suivants :

	ELU
Taux de travail max	7%
Cas de charges	1,35xG+1,5xS+0,9xW1

*Note : Ce mode de rupture n'est pas dimensionnant dans ce cas de figure.*

#### 5.4.7 Vérification du bac et de ces assemblages

Ces vérifications sont effectuées conformément aux recommandations de la CECM.

a) Résistance en pression diamétrale sur la tôle des assemblages pannes/bac

La résistance en pression diamétrale est calculée selon la NF EN 1993-1-3, tableau 8.2 selon la formule suivante :

$$F_{b,Rd} = \alpha d t f_u / \gamma_{M2} \quad \text{avec} \quad \gamma_{M2} = 1,25$$

Pour  $t_1 \geq 2,5 \times t$  et  $t < 1$ , on a :

$$\alpha = \min \left\{ \begin{array}{l} 3,2 \times \sqrt{\frac{t}{d}} \\ 2.1 \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} 3,2 \times \sqrt{\frac{0.7}{6.5}} \\ 2.1 \end{array} \right. = 1.05$$

Note :  $t_1$  est l'épaisseur maximale des pièces assemblées et  $t$  l'épaisseur la plus faible.

D'où

$$F_{b,Rd} = 1,05 \times 6,5 \times 0,7 \times \frac{390}{1,25} = 1490 \text{ N} = F_p$$

b) Résistance en pression diamétrale des attaches de couture

La résistance en pression diamétrale des attaches de couture est calculée de la même manière que précédemment.

Pour  $t=t_1$ , on a :

$$\alpha = \min \left\{ \begin{array}{l} 3,2 \times \sqrt{\frac{t}{d}} \\ 2.1 \end{array} \right. = \min \left\{ \begin{array}{l} 3,2 \times \sqrt{\frac{0.7}{4.8}} \\ 2.1 \end{array} \right. = 1.22$$

D'où

$$F_{b,Rd} = 1,22 \times 4.8 \times 0,7 \times \frac{390}{1,25} = 1278 \text{ N} = F_s$$

c) Résistance au cisaillement du panneau

La résistance au cisaillement du panneau par panne à stabiliser est calculée au moyen de la formule suivante :

$$P_{max} = \frac{1}{n} \left[ n_s F_s + \frac{\beta_1}{\beta_3} (n + 1) F_p \right]$$

Avec  $\beta_3 = 1$  lorsque le couturage est réalisé en fond d'onde et, lorsque le couturage est réalisé en sommet d'onde comme dans le cas présent, on a :

$$\beta_3 = \frac{n_f - 1}{n_f} = \frac{3 - 1}{3} = 0,667$$

D'où :

$$P_{max} = \frac{1}{7} \times \left[ 43 \times 1278 + \frac{0,3}{0,667} \times (7 + 1) \times 1490 \right] = 8616 \text{ N}$$

Selon le paragraphe III.1.2 des recommandations de la CECM, trois exigences sont à satisfaire :

- Résistance des fixations du bac sur les pannes  
On doit vérifier que :

$$0,6 \frac{W}{\alpha_3 \rho} F_p \geq P_{max}$$

On a :

$$0,6 \times \frac{3000}{0,58 \times 500} \times 1490 = 9248 \text{ N} > P_{max}$$

L'exigence est satisfaite.

- Ruine de l'extrémité du bac

Pour des fixations dans toutes les ondes à l'extrémité du bac, on doit vérifier que :

$$0,9 \frac{t^{1,5} w f_y / \gamma_M}{d^{0,5}} \geq P_{max}$$

On a :

$$0,9 \times \frac{0,7^{1,5} \times 3000 \times 320 / 1}{250^{0,5}} = 32003 \text{ N} > P_{max}$$

L'exigence est satisfaite.

- Voilement par cisaillement du bac

Les contraintes de cisaillement peuvent engendrer un voilement local ou un voilement global du bac. Conformément au paragraphe 5.4 des recommandations des CECM, l'interaction du voilement local et du voilement global peut être négligé si :

$$l / t \leq 2,9 (E / f_y)^{0,5}$$

On a :

$$\frac{l}{t} = \frac{180}{0,7} = 257$$

et

$$2,9 \times \left( \frac{E}{f_y} \right)^{0,5} = 2,9 \times \left( \frac{210000}{320} \right)^{0,5} = 74$$

L'exigence n'est pas satisfaite. L'interaction voilement local/voilement global doit donc être considérée.

- o Résistance au voilement global

Selon le paragraphe 5.4.1 des recommandations de la CECM, la résistance au voilement globale est :

$$V_g = \frac{14,4}{b} D_x^{1/4} D_y^{3/4} (n_p - 1)^2$$

Où  $D_x$  et  $D_y$  sont les rigidités orthogonales unitaires du bac :

$$D_x = \frac{E \times t^3 \times d}{12 \times (1 - \nu^2) \times u} = \frac{210000 \times 0,7^3 \times 250}{12 \times (1 - 0,3^2) \times 308} = 5354 \text{ N.mm}$$

$$D_y = \frac{E \times I_{ys}}{d} = \frac{210000 \times 203 \times 250}{250} = 42630000 \text{ N.mm}$$

D'où

$$V_g = \frac{14,4}{21000} \times 5354^{0,25} \times 42630000^{0,75} \times (8 - 1)^2 = 151633 \text{ N}$$

- Résistance au voilement local

Selon le paragraphe 5.4.2 des recommandations de la CECM, la résistance au voilement local est calculée comme suit pour un bac dont la paroi en creux d'onde est non raidie :

$$V_l = 4,83 \times E \times \left(\frac{t}{l}\right)^2 \times b \times t = 4,83 \times 210000 \times \left(\frac{0,7}{180}\right)^2 \times 21000 \times 0,7 = 225493 \text{ N}$$

- Résistance réduite au voilement

La résistance réduite au voilement par cisaillement est obtenue par :

$$V_{red} = \frac{V_g \times V_l}{V_g + V_l} = \frac{151633 \times 225493}{151633 + 225493} = 90665 \text{ N} > n \times P_{max} = 7 \times 8616 = 60312$$

L'exigence est satisfaite.

Conformément à l'annexe B.II des recommandations de la CECM, il faut vérifier les deux exigences ci-dessous :

- $T_d + V_{s.Sd} \leq \frac{L}{8 \times p} \times F_p$

$$T_d + V_{s.Sd} = q_{tot \text{ plan bac}} \times \frac{a}{2}$$

Avec  $q_{plan \text{ bac}}$  déterminé conformément au paragraphe 5.4.5 du présent document. Pour le cas de charges dimensionnant  $1,35 \times G + 1,5 \times S + 0,9 \times W_1$  on a :

$$T_d + V_{s.Sd} = q_{tot \text{ plan bac}} \times \frac{a}{2} = 288,85 \times \frac{6}{2} = 866,56 \text{ N}$$

$$\frac{L}{8 \times p} \times F_p = \frac{6000}{8 \times 500} \times 1490 = 2235 \text{ N}$$

L'exigence est satisfaite.

- $T_d + V_{s.Sd} \leq P_{max}$

$$\text{On a } 866,56 \leq 8616$$

L'exigence est satisfaite.

#### Interaction flexion /cisaillement

Comme évoqué au paragraphe 3.4 du présent document, il convient de calculer, en premier lieu, toutes les plaques nervurées qui font partie d'un panneau pour leur utilisation principale en flexion. Ceci est réalisé au moyen des abaques fournis par le fabricant du bac.

Conformément aux recommandations de la CECM et à la NF EN 1993-1-3 §10.3.4, pour garantir que toute détérioration des plaques se produira par flexion avant que la résistance de panneau soit atteinte, il convient de vérifier que la contrainte de cisaillement résultant de l'effet diaphragme local n'excède pas  $0,25 f_{yb}/Y_{M1}$ .

Il est alors supposé que les charges transversales n'affectent pas la résistance ni la rigidité en cisaillement horizontal du panneau et qu'il n'est pas nécessaire d'effectuer une vérification avec interaction entre charges verticales et cisaillement horizontal.

Pour effectuer cette vérification, il est vérifié que l'effort de cisaillement horizontal est inférieur à 25% de la résistance au cisaillement du bac, comme suit :

$$n \times (T_d + V_{s.sd}) \leq 0,25 \times V_{red}$$

$$n \times (T_d + V_{s.sd}) = 7 \times (866,56) = 6065,92 \text{ N}$$

$$0,25 \times V_{red} = 0,25 \times 90665 = 22666 \text{ N}$$

L'exigence est satisfaite.

#### 5.4.8 Conclusion

Toutes les exigences étant satisfaites, sur la base des hypothèses prises, le bac est apte à assurer la stabilité des pannes en bois lamellé dans le cadre du présent exemple.

Comme évoqué précédemment, il y aura lieu de vérifier que les assemblages pannes/poutres peuvent transmettre l'effort tranchant des pannes aux poutres.

## 5.5 Exemple de calcul : variante avec les mêmes pannes posées d'aplomb

### 5.5.1 Données et hypothèses

Toutes les données et hypothèses sont identiques à celles de l'exemple précédent sauf que les pannes sont posées d'aplomb.

### 5.5.2 Calcul de la rigidité du panneau par panne à stabiliser et par unité de longueur

Le calcul est identique à celui de l'exemple précédent, on a :

$$S_{act} = \frac{6000}{0,087 \times (7 + 1)} = 8620,690 \text{ kN}$$

De la même manière que pour l'exemple précédent, le coefficient  $k_{crit}$  est ensuite calculé selon la NF EN 1995-1-1 en injectant la valeur du moment critique obtenue dans la formule (6.31), on obtient :

$$K_{crit} = 1$$

On prend alors :

$$K_{c,z} = 1$$

*Note : A noter que le cas de figure traité dans le cadre du présent exemple étant dans le domaine d'application des règles de moyen et étant donné que tous les calculs effectués dans ce domaine d'application donnent  $k_{crit} = 1$ , cette valeur pouvait d'office être prise en compte.*

### 5.5.3 Décomposition des efforts dans le plan du bac (hors stabilité)

La décomposition des efforts dans le plan du bac est identique à celle de l'exemple précédent sauf qu'il n'y a pas de composante du poids propre dans le plan du bac.

De la même manière que précédemment, les efforts perpendiculaires au plan du bac sont repris par les pannes et les efforts dans le plan du bac sont directement repris en cisaillement par le bac.

### 5.5.4 Vérification des pannes intermédiaires

Pour ce cas de figure, les pannes sont vérifiées en considérant les propriétés des pannes (inerties, ...) dans le repère du bac, qui constitue un blocage latéral de la membrure haute. Sur la base des hypothèses prises, les pannes sont ensuite dimensionnées conformément à la NF EN 1995-1-1 et les documents associés avec les coefficients  $k_{crit}$  et  $k_{c,z}$  déterminés précédemment.

Les résultats sont, pour la flexion/compression :

	ELU	ELS
Taux de travail max	86%	70%
Cas de charges	1,35xG+1,5xq	1xG+1xq

*Note : le dimensionnement des pannes n'est pas impacté par la pose à dévers dans le cas présent au regard notamment de la faible pente.*

### 5.5.5 Détermination des efforts d'anti flambement et d'anti déversement puis de l'effort total dans le plan du bac

Pour les pannes posées d'aplomb, l'effort total dans le plan du bac par panne vaut :

$$q_{tot\ plan\ bac} = q_{d,efforts\ plan\ bac} - q_{d,stab} \times \cos(1,78) - q_{d,pannes\ d'aplomb}$$

Par exemple pour 1,35xG on a :

$$q_{d,stab} \times \cos(1,78) = 60 \times \cos(1,78) \approx 60\ N/m$$

*Note 1 : on considère dans le cadre de cet exemple que l'effort de stabilité pour les pannes posées d'aplomb est égal à celui pour les pannes posées à dévers. En toute rigueur, il doit être recalculé.*

*Note 2 : lorsque les pannes sont posées d'aplomb, les efforts d'anti flambement et d'anti déversement ont une composante perpendiculaire au plan du bac. Il faudra vérifier que le bac peut reprendre ces efforts supplémentaires par exemple en ramenant ces efforts à une charge surfacique à ajouter aux charges reprises en flexion par le bac dimensionné au moyen de l'abaque fournisseur.*

Puis :

$$q_{d,efforts\ plan\ bac} = 1,35 \times (G_{plan\ bac} \times w)$$

$$q_{d,efforts\ plan\ bac} = 1,35 \times (1,08 \times 10 \times 3) = 44\ N/m$$

Enfin, lorsque les pannes sont posées d'aplomb, le bac constituant un blocage latéral de la membrure haute, leur déformation perpendiculairement au plan du bac engendre un effort dans le plan du bac. En effet, si on imagine une panne posée d'aplomb non fixée sur le bac et le bac bloqué dans son plan, la composante des charges dans le plan du bac engendre un glissement de la panne à l'interface avec le bac. Lorsque les pannes sont liaisonnées avec le bac, ce dernier s'oppose à ce déplacement, de ce fait, un effort part donc dans le plan du bac, il est opposé à la composante des charges dans le plan du bac.

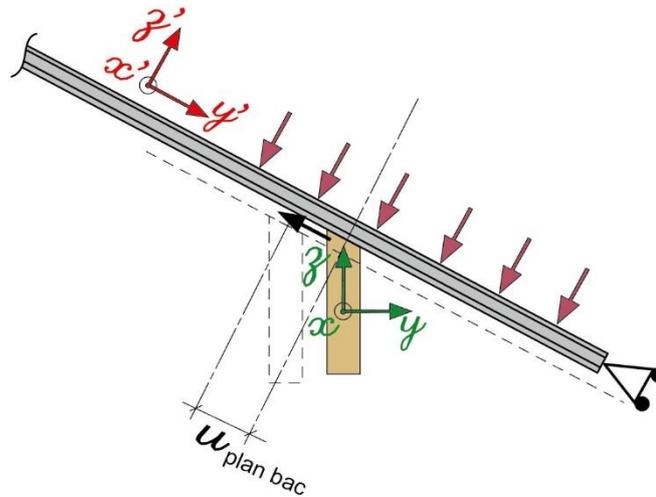


Figure 9 : Pannes posées d'aplomb

Pour déterminer cet effort, il faut tout d'abord calculer le déplacement de la panne dans le plan du bac si elle n'était pas fixée au bac, noté  $u_{\text{plan bac}}$ . Pour cela, la composante des efforts perpendiculaire au plan du bac est décomposée selon les deux axes principaux de la panne, par exemple, pour G on a :

$$G_y = 34,98 \times \sin(1,78) \times 3 = 3,3 \text{ DaN/m}$$

$$G_z = 34,98 \times \cos(1,78) \times 3 + 0,078 \times 0,315 \times 420 = 115,2 \text{ DaN/m}$$

Soit  $u_y$  et  $u_z$  respectivement les flèches de la panne suivant y et z :

$$u_y = \frac{5 \times 3,3 \times 10 \times 6000^4}{384 \times 1000 \times E \times I_z} = 3,89 \text{ mm}$$

$$u_z = \frac{5 \times 115,2 \times 10 \times 6000^4}{384 \times 1000 \times E \times I_y} = 8,32 \text{ mm}$$

D'où  $u_{\text{plan bac}} = 3,6 \text{ mm}$ .

On a :

$$q_{d,\text{pannes d'aplomb}} = \frac{u_{\text{plan bac}} \times 384 \times E \times I_z}{5 \times L^4}$$

On  $I_z$  est l'inertie équivalente de la panne autour de  $z'$ .

Ainsi pour G on a :

$$q_{d,\text{pannes d'aplomb}} = \frac{3,6 \times 1000 \times 384 \times 11500 \times 12640083}{5 \times 6000^4} = 31 \text{ N/m}$$

D'où pour 1,35xG :

$$q_{\text{tot plan bac}} = 44 - 60 - 42 = -58 \text{ N/m}$$

### 5.5.6 Vérification des assemblages pannes/bac

La vérification des assemblages pannes/bac est ensuite effectuée conformément à la NF EN 1995-1-1 et les documents associés.

Les assemblages pannes/bac et uniquement les assemblages pannes/bac sont calculés ici avec tous les efforts dans le même sens. Par exemple pour 1,35xG :

$$q_{tot\ plan\ bac,assemblages} = 44 + 60 + 42 = 146\ N/m$$

Toutes combinaisons confondues, les résultats sont les suivants :

	ELU
Taux de travail max	1%
Cas de charges	1,35xG+1,5xq

*Note : la diminution du taux de travail s'explique par l'apparition d'une composante de traction dans l'assemblage du fait de la pose d'aplomb ce qui en change l'écriture.*

### 5.5.7 Vérification du bac et de ces assemblages

Il faut vérifier les deux exigences ci-dessous, toutes les autres étant identiques à celles effectuées à l'exemple précédent :

$$\circ T_d + V_{s.Sd} \leq \frac{L}{8 \times p} \times F_p$$

$$T_d + V_{s.Sd} = q_{tot\ plan\ bac} \times \frac{a}{2}$$

Avec  $q_{plan\ bac}$  déterminé conformément au paragraphe 5.5.5 du présent document. Pour le cas de charges dimensionnant  $1,35 \times G + 1,5 \times W_1 + 0,75 \times S$  on a :

$$T_d + V_{s.Sd} = q_{tot\ plan\ bac} \times \frac{a}{2} = 239 \times \frac{6}{2} = 717\ N$$

$$\frac{L}{8 \times p} \times F_p = \frac{6000}{8 \times 500} \times 1490 = 2235\ N$$

L'exigence est satisfaite.

$$\circ T_d + V_{s.Sd} \leq P_{max}$$

$$On\ a\ 717 \leq 8616$$

L'exigence est satisfaite.

Interaction flexion /cisaillement

Pour effectuer cette vérification, il est vérifié que l'effort de cisaillement horizontal est inférieur à 25% de la résistance au cisaillement du bac, comme suit :

$$n \times (T_d + V_{s.Sd}) \leq 0,25 \times V_{red}$$

$$n \times (T_d + V_{s.Sd}) = 7 \times (717) = 5019\ N$$

$$0,25 \times V_{red} = 0,25 \times 90665 = 22666\ N$$

L'exigence est satisfaite.

### 5.5.8 Conclusion

Toutes les exigences étant satisfaites, sur la base des hypothèses prises, le bac est apte à assurer la stabilité des pannes en bois lamellé dans le cadre du présent exemple.

Comme évoqué précédemment, il y aura lieu de vérifier que les assemblages pannes/poutres peuvent transmettre l'effort tranchant des pannes aux poutres.

## 6 Annexe A : Caractéristiques des bacs

	Type 1	Type 2
fu (Mpa)	390	390
fy (Mpa)	320	320
E (Mpa)	210000	210000
h (mm)	39	46
t (mm)	0.7	0.7
l (mm)	180	167,5
d (mm)	250	237,5
Largeur (mm)	1000	950
$\theta$ (°)	27,707	24,141
u (mm)	307,91	304,18
lys (mm <sup>4</sup> /mm)	203	284,2
l/d	0,72	0,71
h/d	0,16	0,19
K1	0,215	0,2416

*Tableau 7 : Caractéristiques des bacs*

**NOTE IMPORTANTE :** Comme évoqué au paragraphe 3 du présent document, les bacs acier visés par le présent document doivent être des bacs acier structurels de classe II au sens de la NF EN 1993-1-3 et marqués CE selon la NF EN 1090-1. Ainsi, dans le cadre du présent document, par « bac acier » il faut entendre « bac acier structurel de classe II au sens de la NF EN 1993-1-3 et marqué CE selon la NF EN 1090-1 ».

## 7 Annexe B : Caractéristiques des fixations

---

	SW3-T-H15- 6,5x50	Goldovis bois TH10 6,5x63
d (mm)	6,5	6,5
d <sub>h</sub> (mm)	15	15
L (mm)	50	63
d <sub>int</sub> (mm)	4,5	4,7
d <sub>ef</sub> (mm)	4,95	5,17
L <sub>ef</sub> (mm)	49,3	62,3
f <sub>u,b</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	350	430
f <sub>ax,k</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	13,18	13,18
f <sub>head,k</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	35,13	37,77
f <sub>tens,k</sub> (N)	19560	14820

*Tableau 8 : Caractéristiques des fixations*

## 8 Annexe C : Panneaux avec ouvertures

### 8.1 Généralités

Le cas des petites ouvertures dont la surface cumulée représente jusqu'à 3 % de la surface d'un panneau est traité au paragraphe 3.2 du présent document. Les ouvertures plus grandes peuvent être de deux types :

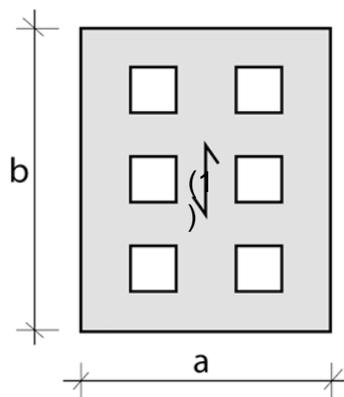


Figure 10 : Ouvertures discrètes, (1) : axe longitudinal des ondes

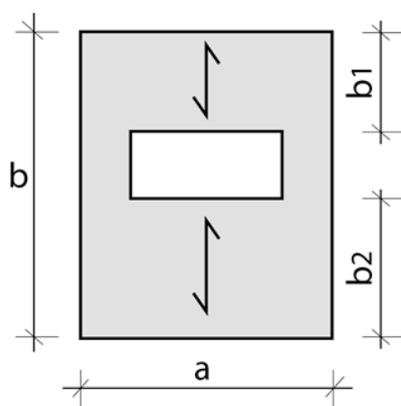


Figure 11: Ouvertures en bandes

### 8.2 Ouvertures discrètes

#### 8.2.1 Exigences

Les ouvertures discrètes dans les panneaux doivent respecter les exigences suivantes :

- Les ouvertures doivent être supportées sur leur quatre cotés par un chevêtre assemblé sur la structure porteuse ;
- Les bacs doivent être fixés au creux de chaque onde sur les éléments du chevêtre perpendiculaires aux ondes et avec un espacement maximum de 300mm sur les éléments du chevêtre parallèles aux ondes ;
- Dans la direction perpendiculaire aux ondes, les largeurs des bacs adjacents entre les ouvertures doivent être supérieures ou égales à la largeur de l'ouverture ;
- Dans la direction parallèle aux ondes, la longueur totale des ouvertures ne doit pas dépasser 25% de la longueur du panneau ;

- e) Les deux exigences précédentes conduisent à une surface maximum des ouvertures de 12,5% de la surface de chaque panneau.

### 8.2.2 Résistance des panneaux avec ouvertures discrètes

Pour les panneaux dont les ouvertures respectent les exigences définies précédemment et un entraxe régulier des attaches de coutures respectant les exigences définies au paragraphe 3.1 du présent document, la réduction maximum de la résistance peut être prise égale à 50%. Si aucune réduction de la résistance n'est prise en compte :

- le nombre d'attaches de couture sur une couture interrompue par une ouverture est doublé ou,
- les ouvertures sont éloignées des extrémités du bâtiment dans le sens de la longueur d'au moins 25% de la longueur du bâtiment.

### 8.2.3 Flexibilité des panneaux avec ouvertures discrètes

L'augmentation de la flexibilité d'un panneau du fait de la présence d'ouvertures peut être prise en considération en multipliant la flexibilité en cisaillement  $c$  par les facteurs suivants :

- Assemblage au creux de chaque onde :

$$\frac{1}{1 - 4 \times \frac{h^{0.5}}{50} \times \frac{A_d}{a \times b}}$$

- Assemblage une onde sur deux :

$$\frac{1}{1 - 2,5 \times \frac{h^{0.5}}{50} \times \frac{A_d}{a \times b}}$$

Où :

- $h$  est la hauteur du profil ;
- $A_d$  est la somme totale des ouvertures dans le panneau;
- $a$  est la largeur du panneau;
- $b$  est la hauteur du panneau.

### 8.2.4 Déformation des panneaux avec ouvertures discrètes

Pour un ensemble de panneau dans lequel certains panneaux comportent des ouvertures et d'autres non, la déformation à mi longueur doit être calculée selon le principe suivant, considérée sur la moitié de la longueur du panneau:

$$\sum_i \text{cisaillement panneau}_i \times \text{flexibilité panneau}_i$$

## 8.3 Ouvertures en bandes

Les panneaux avec des ouvertures en bandes ne respectent pas l'exigence 8.2.1(c). Si  $b_1$  et  $b_2$  (voir figure 11) ne diffèrent pas plus de 20%, la hauteur effective peut être prise égale à  $b_1+b_2$ . Sinon, le panneau peut être considéré de manière sécuritaire en considérant une hauteur effective égale à la plus grande valeur entre  $b_1$  et  $b_2$ .