GRISPE PLUS

VALORISATION OF KNOWLEDGE
FOR SPECIFIC PROFILED STEEL SHEETS

WP N°: 3
WP Title: eLectures
Deliverable N°: 3.1
Deliverable Title: Design manual – French
Deliverable Date: 30th june 2018

The GRISPE PLUS project has received financial support from the European Community's Research Fund for Coal and Steel (RFCS) under grant agreement N° 754092

Author(s)
Mickael BLANC, BACACIER

Drafting history
DRAFT N° 1 – DATE: 22nd june 2018
FINAL VERSION – DATE: 30th june 2018

Dissemination Level		
PU	*Public-Open*	**X**
PP	*Restricted to the Commission Services, the Coal and Steel Technical Groups and the European Committee for Standardisation (CEN)*	
RE	*Restricted to a group specified by the Beneficiaries*	
CO	*Confidential, only for Beneficiaries (including the Commission services)*	

DISCLAIMER NOTICE
AND
EU ACKNOWLEDGEMENT OF SUPPORT

Disclaimer notice

By making use of any information or content in this manual you agree to the following:

No warranties

All the information or content provided in this manual is provided "as is" and with no warranties. No express or implies warranties of any type, including for example implied warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, are made with respect to the information or content, or any use of the information or content in this manual.

The authors make no representations or extend no warranties of any type as to the completeness, accuracy, reliability, suitability or timeliness of any information or content in this manual.

Disclaimer of liability

This manual is for informational purposes only. It is your responsibility to independently determine whether to perform, use or adopt any of the information or content in this manual.

The authors specifically disclaim liability for incidental or consequential damages and assume no responsibility or liability for any loss or damage suffered by any person as a result of the use or misuse of any of the information or content in this manual.

The authors will not be liable to you for any loss or damage including without limitation direct, indirect, special or consequential loss or damage, or any loss or damage whatsoever arising from loss of data or loss of business, production, revenue, income, profits, commercial opportunities, reputation or goodwill, arising out of, or in connection with, the use of the information or content in this manual.

The authors do not represent, warrant, undertake or guarantee that the use of the information or content in this manual will lead to any particular outcome or results.

Reasonableness

By using this manual, you agree that the exclusions and limitations of liability set out in this disclaimer are reasonable. If you do not think they are reasonable, you must not use this manual.

Severability

If any part of this disclaimer is declared unenforceable or invalid, the remainder will continue to be valid and enforceable.

"The information and views set out in this report, article, guide, etc. (select the correct word) are those of the author(s) and do not necessarily reflect the official opinion of the European Union. Neither the European Union and bodies nor any person acting on their behalf may be held responsible for the use which may be made of the information or views contained therein"

EU acknowledgement of support

The GRISPE project has received financial support from the European Community's Research Fund for Coal and Steel (RFCS)under grant agreement n° 75 4092.

PREFACE

Ce Manuel de dimensionnement a été effectué avec le soutien financier du RFCS n°754092.

Cette nouvelle méthode de calcul a été présentée au groupe d'évolution de l'EN 1993-1-3 en 2016-2017 et prise en compte pour l'introduction dans les Eurocodes.

Ce Manuel de dimensionnement a été écrit par Mickaël BLANC et a été discuté dans le groupe de travail de GRISPE PLUS composé des membres suivants :

Mickaël BLANC	France
Silvia CAPRILI	Italie
David IZABEL	France
Markus KUHNENNE	Allemagne
Anna PALISSON	France
Valérie PRUDOR	France
Irene PUNCELLO	Italie
Dominik PYSCHNY	Allemagne
Thibaut RENAUX	France
Daniel SPAGNI	France

FIGURES

Les figures ont été produites par les sociétés suivantes

Figure 0.1	BACACIER
Figure 1.1	BACACIER
Figure 1.2	BACACIER
Figure 1.3	BACACIER
Figure 1.4	JORIS IDE
Figure 1.5	KIT
Figure 1.6	BACACIER
Figure 1.7	BACACIER
Figure 1.8	KIT
Figure 1.9	KIT
Figure 5.1	BACACIER
Figure 5.2	BACACIER
Figure 5.3	BACACIER
Figure 5.4	BACACIER
Figure 5.5	BACACIER
Figure 7.1	BACACIER
Figure 7.2	BACACIER
Figure 7.3	BACACIER
Figure 7.4	BACACIER
Figure 7.5	BACACIER
Figure 7.6	BACACIER

CONTENU

Portée de la publication 7
Notations 7
1. Introduction 8
1.1. Type de profilés aciers concernés 8
1.2. État de l'art 8
1.3. Résultats principaux de GRISPE 9
1.4. Conditions et règles de dimensionnement générales 11
2. Considérations préliminaires 13
2.1. Domaine d'application de la nouvelle méthode de dimensionnement 13
2.2. Dispositions technologiques 13
3. Conditions technologiques de base 13
4. Propriétés du matériau 13
5. Bases du dimensionnement 14
5.1. Principes 14
5.2. Domaine d'application de la nouvelle méthode de dimensionnement 14
5.3. Méthode de dimensionnement 14
5.3.1. Moment résistant avec la large plage comprimée 14
5.3.2. Moment résistant avec la large plage tendue 15
5.3.3. Résistance à la réaction d'appui d'extrémité 17
5.3.4. Résistance au déboîtement 17
6. Considérations particulières 17
7. Exemple de dimensinnement 18
7.1. Description du bâtiment et chargement 18
7.2. Hypothèses 18
7.2.1. Disposition 18
7.2.2. Géométrie du profil 19
7.2.3. Propriétés du matériau 19
7.3. Calcul des résistances du profil 19
7.3.1. Validité de la géométrie du profil 19
7.3.2. Résistance au déboîtement 19
7.3.3. Moment résistant sous charges de pression 20
7.3.1. Moment résistant sous charges de dépression 22
7.3.2. Résistance à la réaction d'appui d'extrémité 24
7.4. Vérification en ELU 25
7.4.1. Charges et effort internes 25
7.4.2. Vérifications 25
7.5. Vérification en ELS 26
7.5.1. Charges et déplacements 26
7.5.2. Vérifications 26

7.6. Vérifications du logiciel 26
Table des figures 27
Bibliographie 28
Annexe: Projet d'amendement soumis au CEN 29

PORTEE DE LA PUBLICATION

Le but de cette publication est de présenter la nouvelle méthode de dimensionnement pour les lames ou clins à fixations cachées conformément à [1] qui a été proposé à l'introduction dans [2].

Ce manuel de dimensionnement traite de situations courantes réalistes.

Pour les situations exceptionnelles (séisme, incendie, etc.) il est nécessaire de se conformer aux clauses pertinentes des Eurocodes et/ou de [1].

NOTATIONS

Les symboles suivants sont utilisés :

b_u: largeur utile de la grande plage de la lame

h: hauteur hors-tout de la lame ou clin

b_f: largeur de la rive fixée de l'emboîtement de la lame ou clin

c_f: largeur de la rive libre de l'emboîtement de la lame (non défini pour un emboîtement en chevron)

φ: angle d'inclinaison entre l'emboitement et la plage

L: portée de la lame ou clin

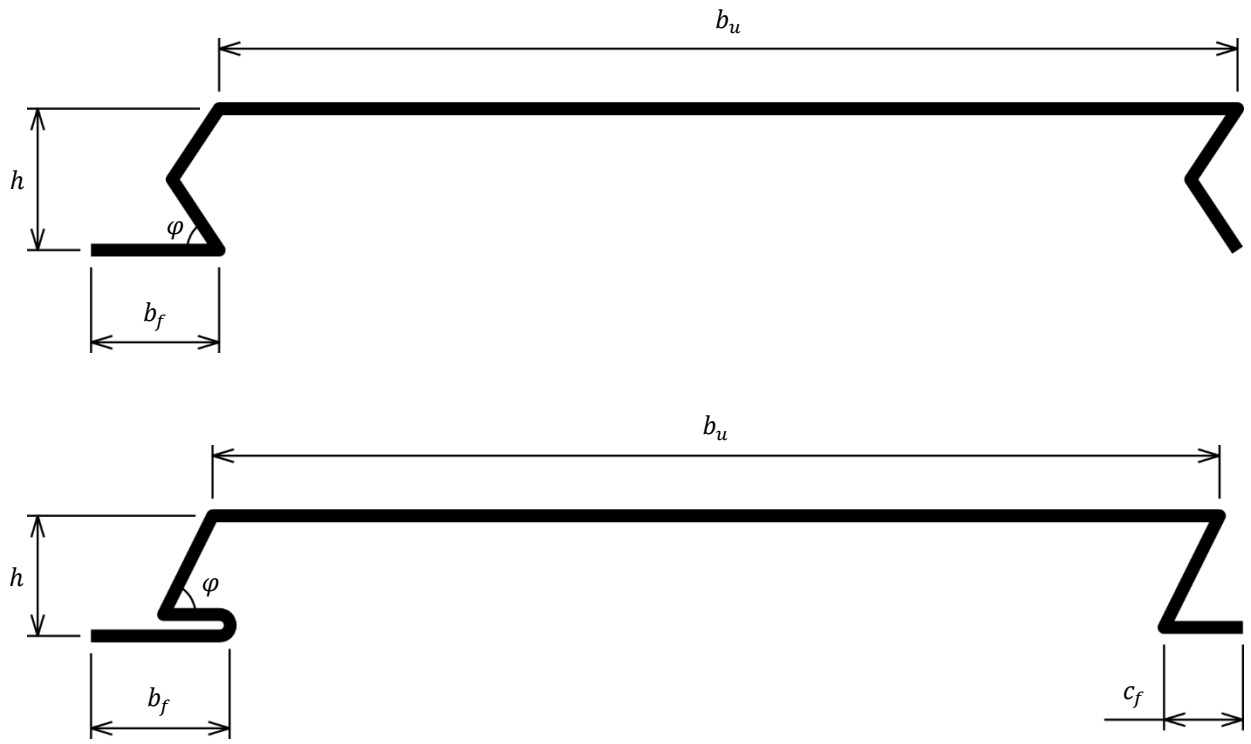


Figure 0.1 Définition géométrique d'une lame ou clin

1. INTRODUCTION

1.1. Type de profilés aciers concernés

Ce manuel de dimensionnement traite des lames ou clins utilisées en bardage. La méthode présentée ci–après est valide pour les deux formes d'emboîtement principales pour de tels profilés : l'emboîtement en chevron (Figure 1.1) et l'emboîtement à tenon (Figure 1.2).

Figure 1.1 Lame ou clin à emboîtement en chevron

Figure 1.2 Lame ou clin à emboîtement à tenon

1.2. État de l'art

Dans l'histoire de l'enveloppe métallique, les lames ou clins ont été développés pour des applications esthétiques. La recherche de solutions à fixations cachées et de large plage plane ont pris le pas sur les considérations mécaniques. A cette fin, plusieurs formes d'emboîtement, comme le montre la Figure 1.3,ont été développées par les industriels.

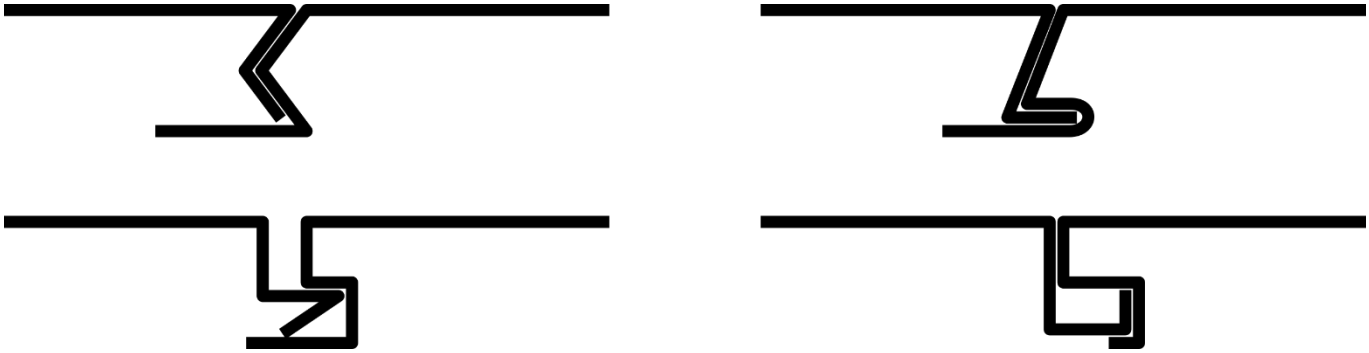


Figure 1.3 Différentes formes d'emboîtement (non exhaustif)

Pour ce qui est de l'aspect esthétique, les deux points précédents (fixations cachées et large surface plane) présentent un avantage certain et une réponse adaptée aux exigences des architectes. Ceci fait de ces produits des profils de préconisation qui deviennent courant car de plus en plus prescrit.

Concernant l'évaluation des performances de ces lames ou clins sous action de vent, des réponses diverses sont apportées par chaque pays. Quand certains autorisent seulement le dimensionnement par essais, d'autres autorise le dimensionnement par calcul et essais. Bien que les méthodes de dimensionnement soient différentes, aucune solution harmonisée n'a été incluse dans les Eurocodes.

Les lames ou clins ne font pas explicitement partie du domaine d'emploi courant de l'Eurocode. Toutefois, comme les plateaux, ils peuvent être définis comme une « section en large U, avec deux semelles étroites, deux âmes et une plage ». Nous pouvons donc supposer que les formules données pour le calcul des résistances des plateaux doivent donner des résultats intéressants appliquées à des lames ou clins.

Même si ces formules donnent une estimation correcte du comportement des profils traité ici, un mode ruine typique doit être pris en compte. Le fait d'avoir une rive de l'emboîtement libre de se déplacer, nécessaire pour proposer des solutions à fixations cachées, un comportement spécifique est observé pendant les essais en dépression. Au fur et à mesure que la charge est appliquée, la rive libre sort peu à peu de l'emboîtement, jusqu'à un déboîtement de ce dernier (voir Figure 1.4), alors que l'aspect du clin (lame) est encore correct.

Figure 1.4 Déboîtement progressif des clins lors d'essais en dépression

1.3. Résultats principaux de GRISPE

Une campagne d'essais complète aux Eurocodes (voir [3] et [4]) a été menée sur les deux profils présentés à la Figure 1.1, comprenant :

- Essais de flexion sur 2 appuis en chambre à vide (voir Figure 1.5)
  - Sous charges de pression
  - Sous charges de dépression
- Essais de flexion sur 3 appuis en chambre à vide
  - Sous charges de pression
  - Sous charges de dépression
- Essais d'appui d'extrémité

Ces essais ont été réalisés dans deux épaisseurs nominales différentes : 0,75 et 1 mm.

Figure 1.5 Éprouvette installée sur la chambre à vide (montage sous charge de pression)

Un des résultats les plus significatifs est le fait que, pour les essais sur 3 appuis sous actions de pression et dépression, les lames ou clins n'offrent aucune résistance sur appui intermédiaire et se comportent comme une rotule. L'analyse de la mesure des réactions d'appuis montre que la réaction d'appui central est égal à celle attendue pour deux poutres isostatiques et non celle attendue pour une poutre continue (voir Figure 1.6 and Figure 1.7). Cette observation est confirmée par les moments résistants caractéristiques (M_{Rk}) des profils à mi-travée qui sont constants, que les essais soient réalisés sur 2 ou 3 appuis.

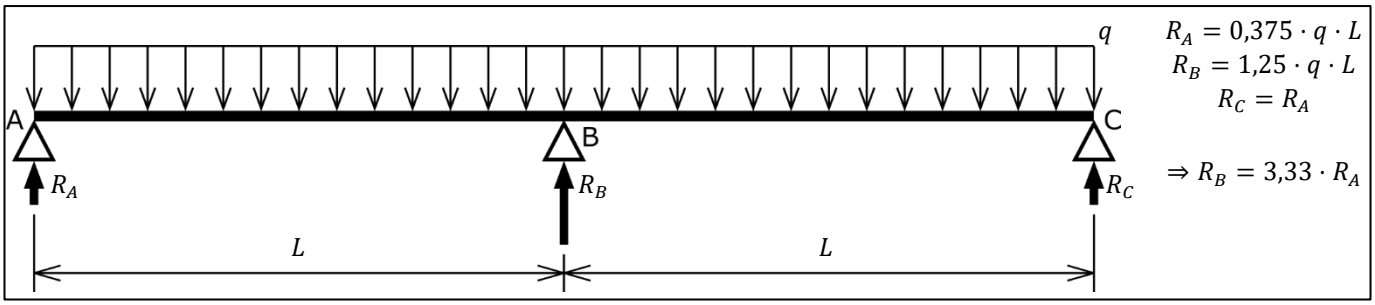


Figure 1.6 Comportement attendu pour les essais sur 3 appuis

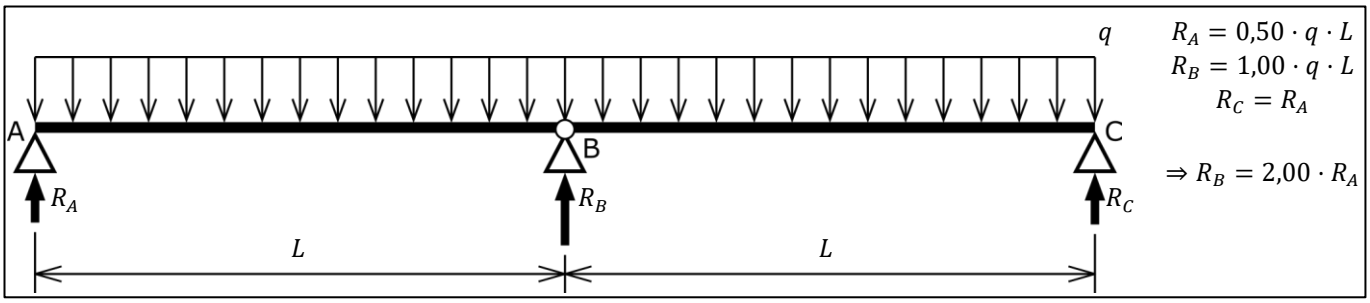


Figure 1.7 Comportement constaté pour les essais sur 3 appuis

L'autre enseignement majeur des essais de flexion en dépression est que, contrairement aux essais avec blocs de bois, le déboîtement des lames ou clins n'est pas l'unique mode de ruine observé dans la chambre à vide. Des échantillons ont ruinés par déboîtement mais la plupart d'entre eux ont ruinés par voilement local de l'emboîtement à mi-travée, comme montré sur la Figure 1.8. La chambre à

vide est le moyen le plus réaliste d'appliquer des actions représentant celles de vent auxquelles sont soumis les lames ou clins sur des bâtiments réels, les valeurs de résistance actuelles données pour les lames ou clins, lorsque les essais sont réalisés avec des blocs de bois, doivent être sous-estimées.

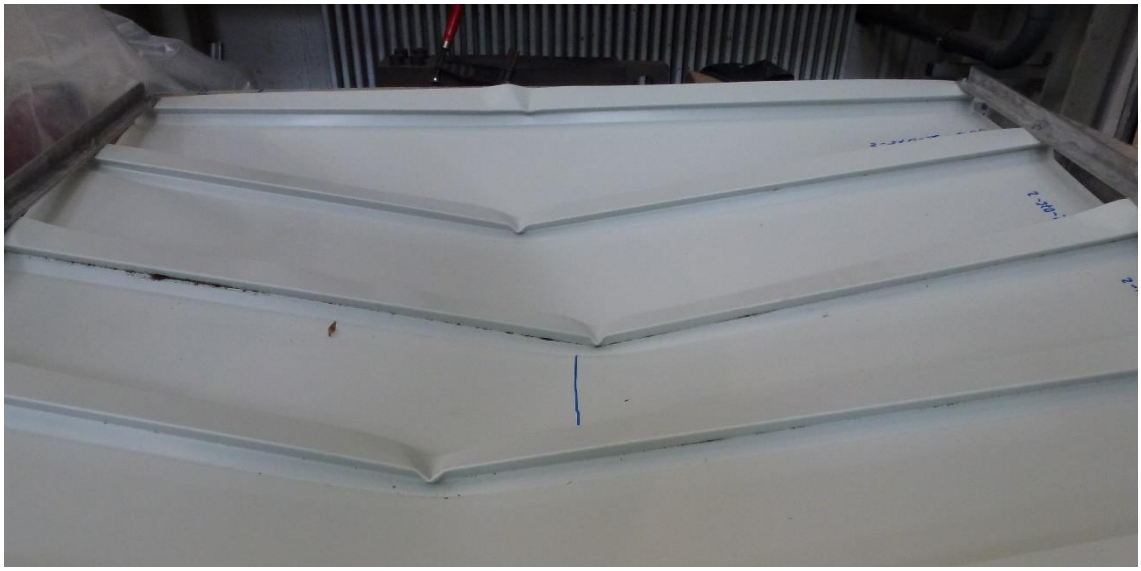


Figure 1.8 Ruine par voilement local de l'emboîtement pour un essai sur 2 appuis en dépression

Ce point pourrait constituer le sujet principal d'une étude complète permettant de mieux comprendre ce phénomène. Une ruine typique par déboîtement pour un essai de flexion sur 3 appuis en dépression est montrée sur la Figure 1.9 ci–dessous.

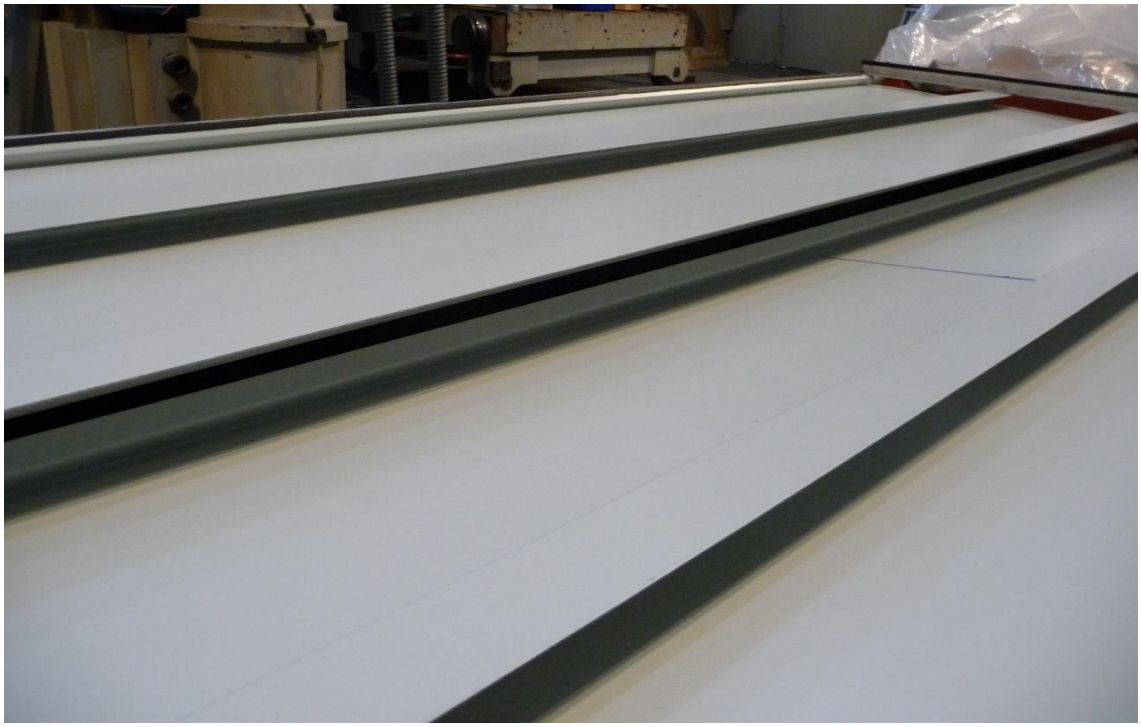


Figure 1.9 Ruine par déboîtement lors d'un essai de flexion sur 3 appuis en dépression

1.4. Conditions et règles de dimensionnement générales

La méthode de dimensionnement suivante n'offre qu'un moyen de déterminer les résistances de calcul R_d selon [5] et son amendement [6].Les valeurs de calcul des effets des actions doivent être évaluées conformément à chaque partie pertinente de [7] ou [8] et son amendement [9].

La procédure suivante respecte les règles générales définies dans [10] et son amendement [11] et les bases de calculs définies dans la partie 2 de [2].

Un projet d'amendement a été proposé au CEN pour validation et inclusion dans l'Eurocode. Ce projet d'amendement est donné en Annexe.

2. CONSIDERATIONS PRELIMINAIRES

2.1. Domaine d'application de la nouvelle méthode de calcul

Ce manuel présente une nouvelle méthode de calcul pour les lames ou clins conformes à [1].

2.2. Dispositions technologiques

Les dimensions minimales des appuis sont :

- Appuis en acier :
  - Largeur minimale : 40 mm
  - Épaisseur minimale : 1,5 mm
- Appuis en bois :
  - Largeur minimale : 60 mm
  - Hauteur minimale : 80 mm
- Appuis en béton : non autorisé directement. Afin de corriger l'irrégularité du parement, une ossature secondaire métallique ou en bois doit être installé.

Les caractéristiques des vis sont :

- Appuis en acier :
  - Diamètre minimal : 5,5 mm
  - Longueur minimale : telle que la vis traverse le support
- Appuis en bois :
  - Diamètre minimal : 6,3 mm
  - Longueur minimale : telle que l'ancrage est d'au moins 50 mm

La densité de fixation est : 1 vis par appui par lame ou clin.

3. CONDITIONS TECHNOLOGIQUES DE BASE

Les lames ou clins sont marqués CE selon la norme [1].

4. PROPRIETES DU MATERIAU

Les propriétés du matériau, si elles ne sont pas précisées plus loin, utilisés dans le calcul doivent satisfaire aux conditions définies dans la partie 3 de [2].

5. BASES DU DIMENSIONNEMENT

5.1. Principes

La méthode est basée sur le calcul des plateaux déjà incluses dans [2]. Cette méthode est complétée par un critère complémentaire prenant en compte le possible déboîtement.

La nouvelle méthode de calcul peut être utilisée pour déterminer :

- la résistance au moment fléchissant avec la large plage comprimée,
- la résistance au moment fléchissant avec la large plage tendue,
- la résistance à la réaction d'appui d'extrémité,
- la résistance au déboîtement.

5.2. Domaine d'application de la nouvelle méthode de calcul

La procédure de calcul présentée ci–après est utilisée pour déterminer la résistance des lames ou clins à condition que les caractéristiques géométriques se situent dans le domaine suivant :

$0{,}75\ mm$	$\leq$	t_{nom}	$\leq$	$1{,}00\ mm$
		b_f	$\leq$	$40\ mm$
$25\ mm$	$\leq$	h	$\leq$	$30\ mm$
		b_u	$\leq$	$300\ mm$
		φ	$\leq$	$60°$
$11\ mm$	$\leq$	c_f		

Pour les notations, voir la Figure 0.1.

Les valeurs des résistances de calculs obtenues ne sont adaptées que pour évaluer la tenue du profil à des charges uniformes, principalement des actions de vent.

5.3. Méthode de calcul

5.3.1. Moment résistant avec la large plage comprimée

Selon [12] et son amendement [13], la partie efficace de la large plage (paroi interne uniformément comprimée) est :

$$b_{u,eff} = \rho_u \cdot b_u$$

On détermine le centre de gravité de la section (voir Figure 5.1), en considérant la largeur efficace de la grande plage $b_{u,eff}$ et les rives pleinement efficaces.

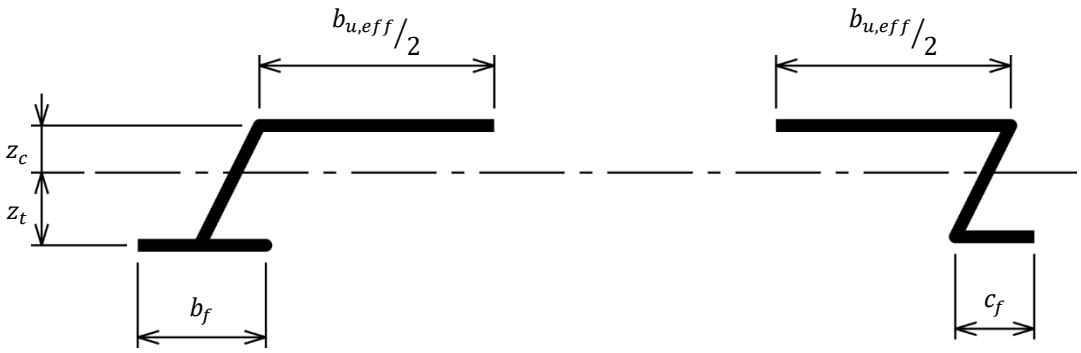


Figure 5.1 Centre de gravité de la section transversale prenant en compte la large plage efficace

La hauteur efficace comprimée de l'âme (voir Figure 5.2), conformément à [12] et son amendement [13] est :

$$h_{eff} = \rho_w \cdot z_c$$

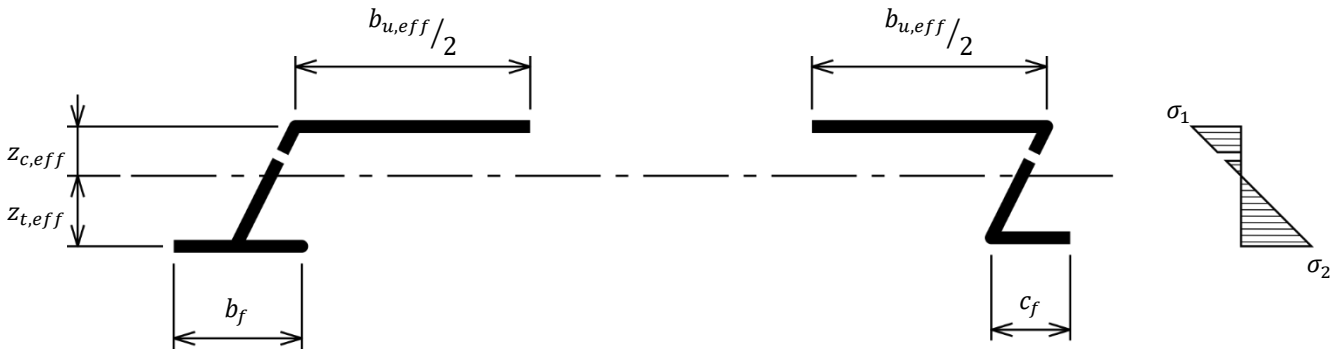


Figure 5.2 Centre de gravité de la section efficace et distribution de contraintes

Le moment résistant est ainsi calculé, en prenant en compte l'efficacité des âmes et de la large plage, avec la formule (10.19) of [2] :

$$M_{c,Rd} = W_{eff} \cdot \frac{0{,}8 \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}}$$

Avec :

$$W_{eff} = \frac{I_{y,eff}}{\max\left(z_{c,eff}; z_{t,eff}\right)}$$

Note
Un amendement a été proposé pour supprimer le facteur $0{,}8$ dans une future version de l'Eurocode. Une fois cet amendement publié, le facteur $0{,}8$ pourra être supprimé de la formule $M_{c,Rd}$ ci-dessus.

5.3.2. Moment résistant avec la large plage tendue

Selon le § 10.2.2.2(1) de [2], le centre de gravité de la section brute est déterminé. La largeur efficace de la large plage est calculé en fonction de la position du centre de gravité de e_0 de la section brute (voir Figure 5.3) :

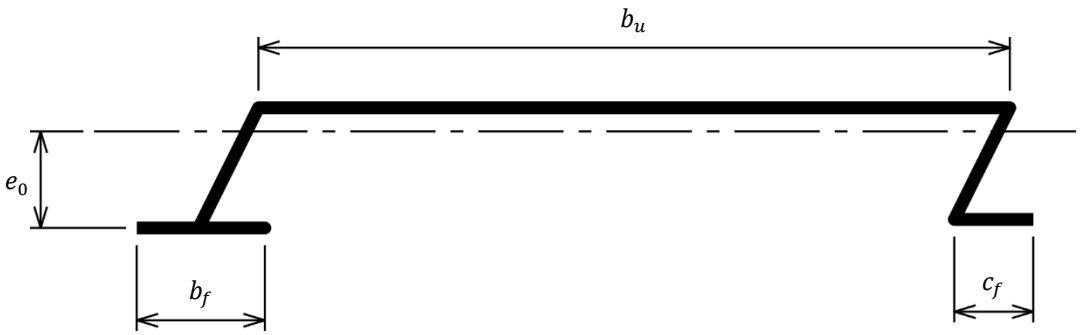


Figure 5.3 Centre de gravité de la section brute

La largeur efficace de la large plage est ainsi déterminée avec la formule suivante :

$$b_{u,eff} = \frac{53{,}3 \cdot 10^{10} \cdot {e_0}^2 \cdot t^4}{h \cdot L \cdot {b_u}^3}$$

Les largeurs efficaces des rives sont évaluées selon [12] et son amendement [13], comme des parois comprimées en console :

$$\begin{cases} b_{f,eff} = \rho_b \cdot b_f \\ c_{f,eff} = \rho_c \cdot c_f \end{cases}$$

Basé sur les largeurs efficaces des plages $b_{u,eff}$, $b_{f,eff}$, $c_{f,eff}$ et les âmes pleinement efficaces, nous déterminons la position du centre de gravité de la section (voir Figure 5.4)

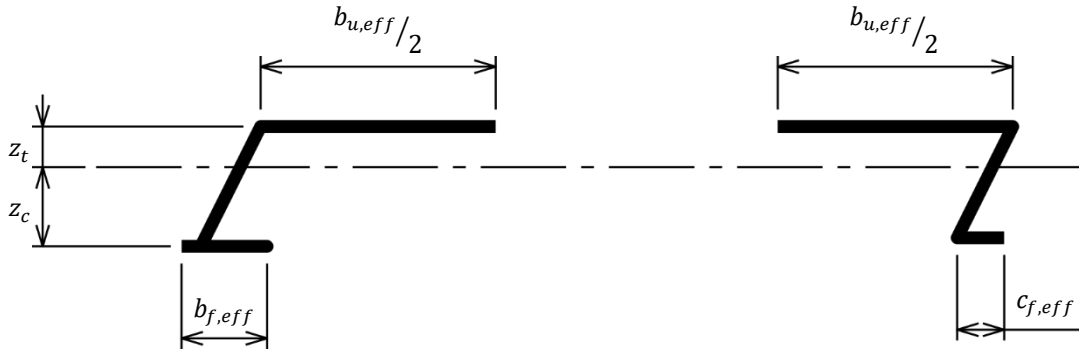


Figure 5.4 Centre de gravité de la section transversale prenant en compte les plages efficaces

Comme ci–avant, la partie efficace comprimée de l'âme (voir Figure 5.5), conformément [12] et son amendement [13], est :

$$h_{eff} = \rho_w \cdot z_c$$

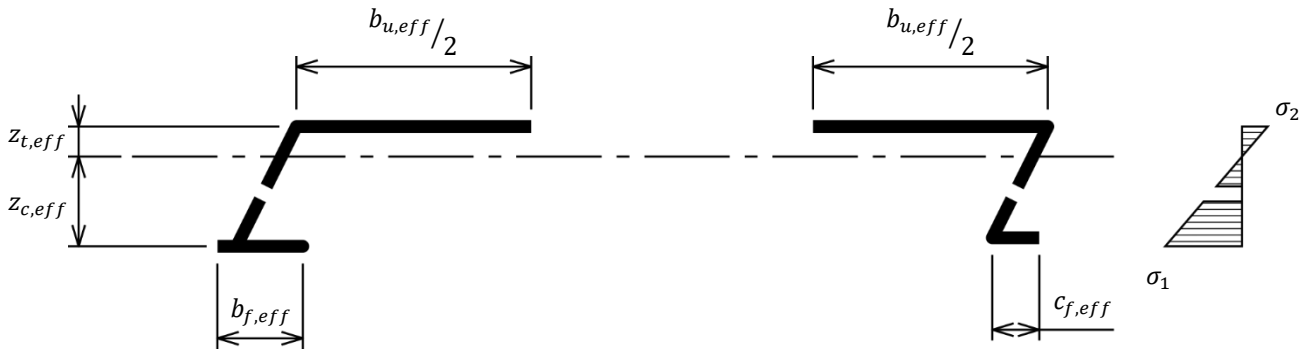


Figure 5.5 Centre de gravité de la section efficace et distribution de contraintes

Comme précédemment, le moment résistant est alors déterminé, prenant en compte les âme et plages efficaces, en utilisant la formule (10.19) de [2]:

$$M_{b,Rd} = W_{eff} \cdot \frac{0{,}8 \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}}$$

Avec:

$$W_{eff} = \frac{I_{y,eff}}{\max(z_{c,eff}; z_{t,eff})}$$

Note
Un amendement a été proposé pour supprimer le facteur $0{,}8$ dans une future version de l'Eurocode. Une fois cet amendement publié, le facteur $0{,}8$ pourra être supprimé de la formule $M_{b,Rd}$ ci-dessus.

5.3.3. Résistance à la réaction d'appui d'extrémité

Selon §6.1.7.3(2) de [2], la résistance d'une âme à la réaction d'appui d'extrémité est déterminé par :

$$R_{w,Rd} = \frac{\alpha \cdot t^2 \cdot \sqrt{f_{yb} \cdot E} \cdot \left(1 - 0.1 \cdot \sqrt{\frac{r}{t}}\right) \cdot \left(0.5 + \sqrt{0.02 \cdot \frac{l_a}{t}}\right) \cdot \left[2.4 + \left(\frac{\varphi}{90}\right)^2\right]}{\gamma_{M1}}$$

Avec :

- $\alpha = 0.115$ (nouvelle valeur proposée dans l'amendement)
- $l_a = 10\ mm$

Pour les notations, voir la Figure 0.1.

5.3.4. Résistance au déboîtement

Pour évaluer la résistance au déboîtement des clins doit être calculé par :

$$q_{Rd} = 2 \cdot \frac{E \cdot 1000 \cdot t^3 \cdot \delta_{lim}}{12 \cdot (1 - \nu^2) \cdot \sqrt{\left(\frac{2 \cdot {b_f}^3}{3}\right)^2 + \left[b_f \cdot \left(\frac{b_u \cdot h}{3} + \frac{h^2}{2}\right)\right]^2}} \cdot \frac{1000}{b_u}$$

Avec :

$$\delta_{lim} = \begin{cases} c_f & \text{pour les emboîtements à tenon} \\ \dfrac{h}{2 \cdot \tan\varphi} & \text{pour les emboîtements en chevron} \end{cases}$$

Pour les notations, voir la Figure 0.1.

6. SITUATIONS PARTICULIERES

Les situations suivantes ne sont pas traitées par le présent document :

- le calcul à l'incendie,
- le calcul au séisme,
- les aspects environnementaux,
- les aspects thermiques,
- les aspects acoustiques,
- tout autre sujet non explicitement évoqué ci–avant ou ci–après.

7. EXEMPLE DE DIMENSINNEMENT

7.1. Description du bâtiment et chargement

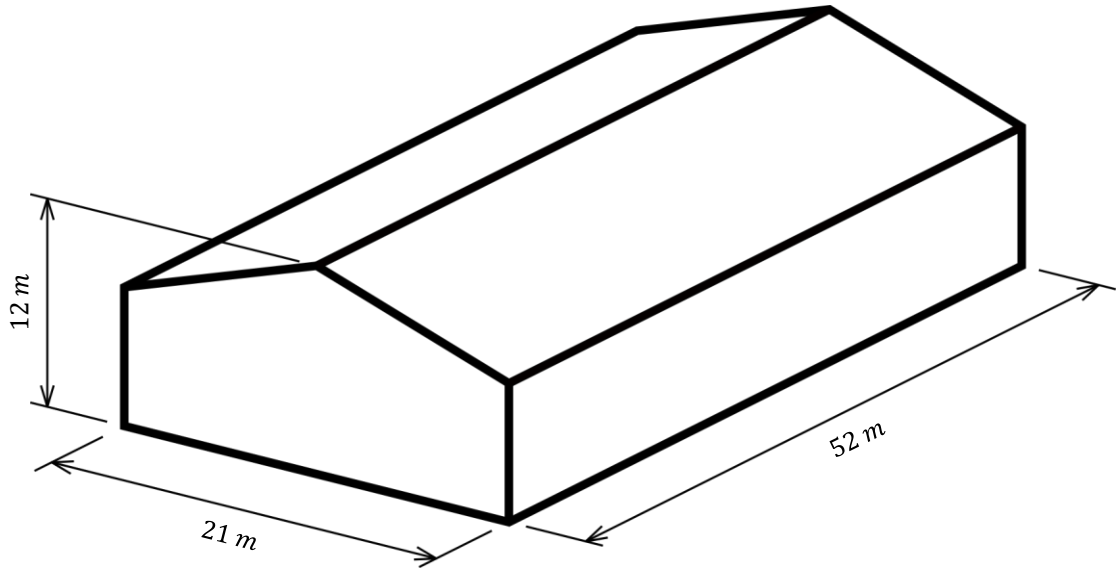


Figure 7.1 Dimensions du bâtiment

Seules les actions de vent sont prises en compte par la suite.

Valeurs de calcul des actions (W) :

Pression dynamique de base :

$$q_p = 456\ N/m^2$$

Coefficient de pression :

Pression extérieure $c_{pe} = +0{,}7$

Dépression extérieure $c_{pe} = -1{,}2$

Pression interne $c_{pi} = \pm 0{,}3$

Combinaisons

États Limites Ultimes (ELU) :

$$1{,}5 \times W$$

États Limites de Service (ELS):

$$W$$

Critère de flèche retenu à l'ELS : $L/200$

7.2. Hypothèses

7.2.1. Disposition

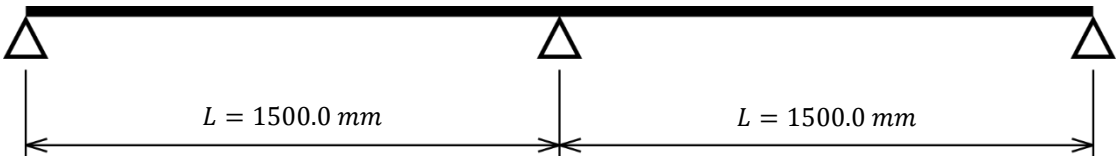


Figure 7.2 Schéma statique de la disposition des lames ou clins

7.2.2. Géométrie du profil

Le profil calculé ci–après est le suivant :

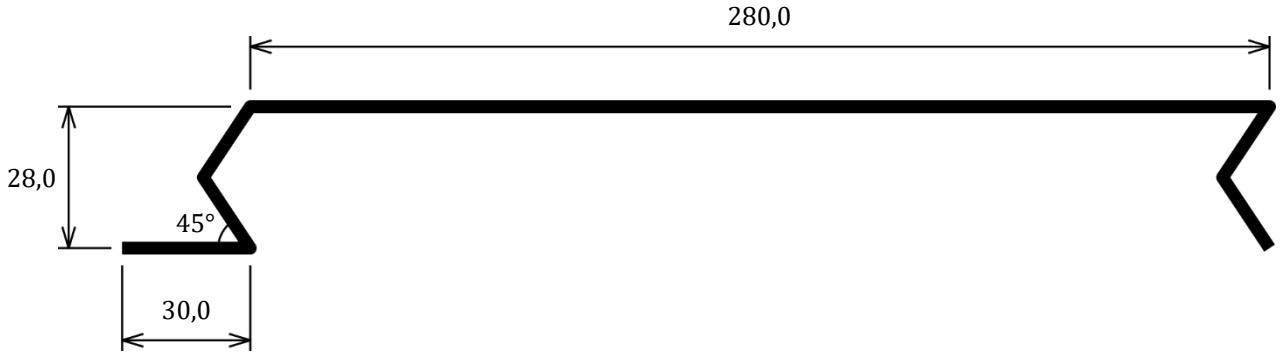


Figure 7.3 Géométrie du profil calculé

Notations :

$b_u = 280{,}0\ mm$
$h = 28{,}0\ mm$
$b_f = 30{,}0\ mm$
$\varphi = 45°$

7.2.3. Propriétés du matériau

Général :

$E = 210000\ N/mm^2$
$\nu = 0{,}3$

Acier utilisé :

Nuance d'acier : S320
$f_{yb} = 320\ N/mm^2$
$t_{nom} = 0{,}75\ mm$
$t = 0{,}71\ mm$

7.3. Calcul des résistances du profil

7.3.1. Validité de la géométrie du profil

$0{,}75\ mm \leq t_{nom} = 0{,}75\ mm < 1{,}00\ mm$
$b_f = 30{,}0\ mm < 40\ mm$
$25\ mm < h = 28{,}0\ mm < 30\ mm$
$b_u = 280{,}0\ mm < 300\ mm$
$\varphi = 45° < 60°$

La géométrie du profil est comprise dans le domaine de validité de la méthode de calcul.

7.3.2. Résistance au déboîtement

$$\delta_{lim} = \frac{28{,}0}{2 \cdot \tan 45} = 14{,}0\ mm$$

$$q_{Rd} = 2 \cdot \frac{210000 \times 1000 \times 0{,}71^3 \times 14{,}0}{12 \cdot (1 - 0{,}3^2) \cdot \sqrt{\left(\frac{2 \times 30{,}0^3}{3}\right)^2 + \left[30{,}0 \cdot \left(\frac{280{,}0 \times 28{,}0}{3} + \frac{28{,}0^2}{2}\right)\right]^2}} \cdot \frac{1000}{280{,}0}$$

$$= 7486\ {}^{N}/_{m^2}$$

7.3.3. Moment résistant sous charges de pression

Sous charges de pression, la large plage est sollicitée en compression.

Étape 1 : Largeur efficace de la large plage (uniformément comprimée)

Selon le Tableau 4.1 de [12] et son amendement [13]: $k_\sigma = 4{,}0$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{320}} = 0{,}857$$

$$\bar{\lambda}_{p,u} = \frac{280{,}0/0{,}71}{28{,}4 \times 0{,}857 \times \sqrt{4{,}0}} = 8{,}102 > 0{,}5 + \sqrt{0{,}085 - 0{,}055 \times 1} = 0{,}673$$

$$\rho_u = \frac{8{,}102 - 0{,}055 \cdot (3+1)}{8{,}102^2} = 0{,}120$$

$$\frac{b_{u,eff}}{2} = \frac{0{,}120 \times 280{,}0}{2} = 16{,}8\ mm$$

Étape 2 : Calcul de z_c et z_t

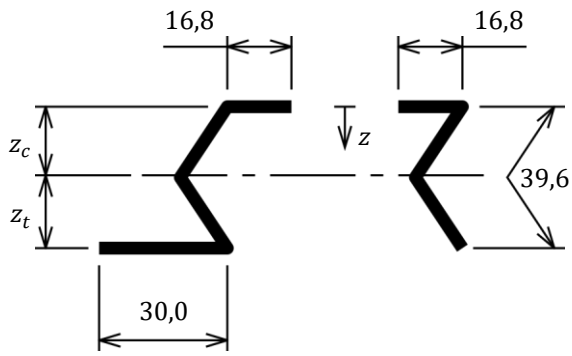


Figure 7.4 Calcul de z_c (large plage en compression)

	l mm	z mm	$l \cdot z$ mm^2
Rive gauche (fixée)	16,8	0,0	0,00
	39,6	14,0	554,40
	30,0	28,0	840,00
Rive droite (libre)	16,8	0,0	0,00
	39,6	14,0	554,40
Σ	**142,8**	**–**	**1948,80**

$$z_c = \frac{1948{,}80}{142{,}8} = 13{,}6\ mm$$

$$z_t = 28{,}0 - 136 = 14{,}4\ mm$$

Étape 3 : Efficacité de l'âme

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -\frac{14{,}4}{13{,}6} = -1{,}059$$

$$k_\sigma = 5{,}98 \cdot (1 + 1{,}059)^2 = 25{,}35$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{28{,}0/0{,}71}{28{,}4 \times 0{,}857 \times \sqrt{25{,}35}} = 0{,}322 < 0{,}673$$

$$\rho_w = 1{,}0$$

L'âme est pleinement efficace.

Étape 4 : Calcul de $M_{b,Rd,c}$

	l mm	z mm	$l \cdot z$ mm^2	$l \cdot z^2$ mm^3	I_{part}/t mm^3
Rive gauche (fixée)	16,8	0,0	0,00	0,000	0,706
	39,6	14,0	554,40	7761,600	2587,200
	30,0	28,0	840,00	23520,000	1,260
Rive droite (libre)	16,8	0,0	0,00	0,000	0,706
	39,6	14,0	554,40	7761,600	2587,200
Σ	**142,8**	**–**	**1948,80**	**39043,200**	**5174,400**

$$z_{c,eff} = \frac{1948{,}80}{142{,}8} = 13{,}6\ mm$$

$$z_{t,eff} = 28{,}0 - 13{,}6 = 14{,}4\ mm$$

$$I_{y,eff} = (39043{,}200 + 5174{,}400 - 142{,}8 \times 13{,}6^2) \cdot 0{,}71 \times \frac{1000{,}0}{280{,}0} = 45149\ mm^4/m$$

$$W_{eff} = \frac{45149}{\max(13{,}6; 14{,}4)} = 3135\ mm^3/m$$

$$M_{c,Rd} = (3135 \cdot 10^{-3}) \times \frac{0{,}8 \times 320}{1{,}0} = 802\ N \cdot m/m$$

7.3.1. Moment résistant sous actions de dépression

Sous actions en dépression, la large plage est sollicitée en traction.

Étape 1 : Centre de gravité de la section brute

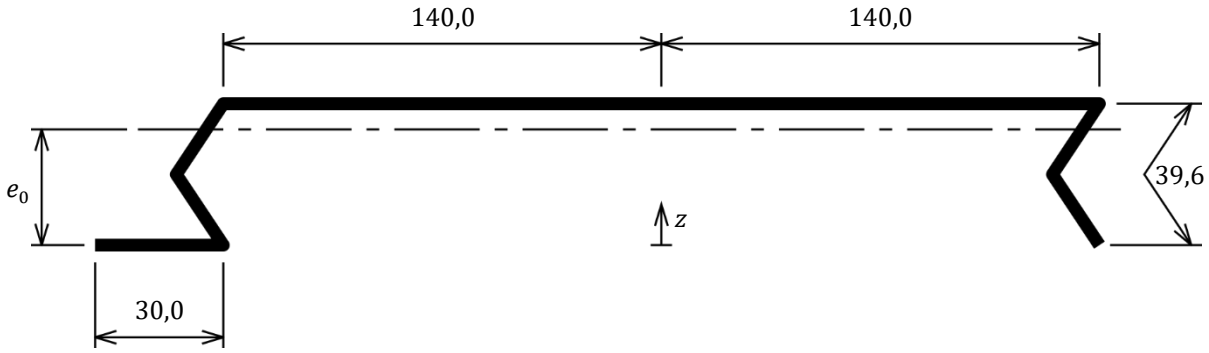


Figure 7.5 Calcul de e_0 (large plage en traction)

	l mm	z mm	$l \cdot z$ mm^2
Rive gauche (fixée)	30,0	0,0	0,00
	39,6	14,0	554,40
	140,0	28,0	3920,00
Rive droite (libre)	39,6	14,0	554,40
	140,0	28,0	3920,00
Σ	**389,2**	**–**	**8948,80**

$$e_0 = \frac{8948{,}80}{389{,}2} = 23{,}0\ mm$$

Étape 2 : Largeur efficace de la large plage

$$\frac{b_{u,eff}}{2} = \frac{53{,}3 \times 10^{10} \times 23{,}0^2 \times 0{,}71^4}{2 \times 28{,}0 \times 1500 \times 280{,}0^3} = 38{,}9\ mm$$

Étape 3: Largeur efficace des rives (uniformément comprimées)

Selon le Tableau 4.2 de [12] et son amendement [13]: $k_\sigma = 0.43$

$$\bar{\lambda}_{p,b} = \frac{30{,}0/0{,}71}{28{,}4 \times 0{,}857 \times \sqrt{0{,}43}} = 2{,}647 > 0{,}748$$

$$\rho_b = \frac{2{,}647 - 0{,}188}{2{,}647^2} = 0{,}351$$

$$b_{f,eff} = 0{,}351 \times 30{,}0 = 10{,}5\ mm$$

Étape 4 : Calcul de z_c et z_t

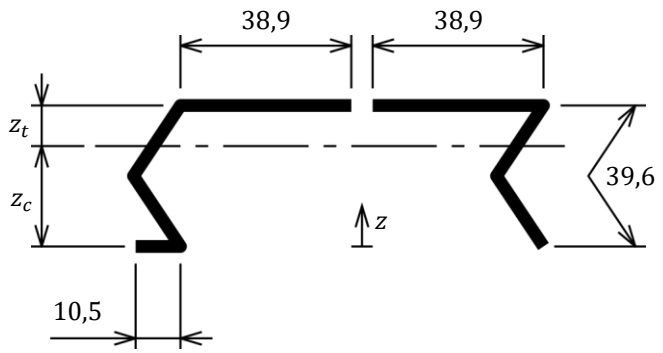


Figure 7.6 Calcul de z_c (large plage en traction)

	l mm	z mm	$l \cdot z$ mm^2
Rive gauche (fixée)	10,5	0,0	0,00
	39,6	14,0	554,40
	38,9	28,0	1089,20
Rive droite (libre)	39,6	14,0	554,40
	38,9	28,0	1089,20
Σ	**167,5**	**–**	**3287,20**

$$z_c = \frac{3287{,}20}{167{,}5} = 19{,}6\ mm$$

$$z_t = 28{,}0 - 19{,}6 = 8{,}4\ mm$$

Étape 5 : Efficacité de l'âme

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -\frac{8{,}4}{19{,}6} = -0{,}429$$

$$k_\sigma = 7{,}81 - 6{,}29 \times (-0{,}429) + 9{,}78 \times (-0{,}429)^2 = 12{,}31$$

$$\bar{\lambda}_w = \frac{28{,}0/0{,}71}{28{,}4 \times 0{,}857 \times \sqrt{12{,}31}} = 0{,}462 < 0{,}673$$

$$\rho_w = 1{,}0$$

L'âme est pleinement efficace.

Étape 6 : Calcul de $M_{b,Rd,c}$

	l mm	z mm	$l \cdot z$ mm^2	$l \cdot z^2$ mm^3	I_{part}/t mm^3
Rive gauche (fixée)	10,5	0,0	0,00	0,000	–
	39,6	14,0	554,40	7761,600	2587,200
	38,9	28,0	1089,20	30497,600	–
Rive droite (libre)	39,6	14,0	554,40	7761,600	–
	38,9	28,0	1089,20	30497,600	2587,200
Σ	**167,5**	**–**	**3287,20**	**76518,400**	**5174,400**

$$z_{c,eff} = \frac{3287{,}20}{167{,}5} = 19{,}6\ mm$$

$$z_{t,eff} = 28{,}0 - 19{,}6 = 8{,}4\ mm$$

$$I_{y,eff} = (76518{,}400 + 5174{,}400 - 167{,}5 \times 19{,}6^2) \cdot 0{,}71 \times \frac{1000{,}0}{280{,}0} = 43985\ {mm^4}/{m}$$

$$W_{eff} = \frac{43985}{\max(19{,}6; 84)} = 2244\ {mm^3}/{m}$$

$$M_{b,Rd} = (2244 \cdot 10^{-3}) \times \frac{0{,}8 \times 320}{1{,}0} = 574\ {N \cdot m}/{m}$$

7.3.2. Résistance à la réaction d'appui d'extrémité

Chaque lame ou clin a deux âmes, on a donc :

$$R_{w,Rd} = 2 \cdot \frac{0{,}115 \cdot 0{,}71^2 \cdot \sqrt{320 \cdot 210000} \cdot \left(1 - 0{,}1 \cdot \sqrt{\frac{2{,}0}{0{,}71}}\right) \cdot \left(0{,}5 + \sqrt{0{,}02 \cdot \frac{10{,}0}{0{,}71}}\right) \cdot \left[2{,}4 + \left(\frac{45}{90}\right)^2\right]}{1{,}0} \cdot \frac{1000{,}0}{280{,}0}$$
$$= 7716\ {N}/{m}$$

7.4. Vérification en ELU

7.4.1. Actions et effort internes

En pression :

Action de vent :

$$w_{p,ult} = 1{,}5 \cdot [0{,}7 - (-0{,}3)] \cdot 456 = 684\ N/m^2$$

Moment en travée maximal :

$$M_{Ed,p} = \frac{684 \times 1{,}500^2}{8} = 192\ N \cdot m$$

Réaction d'appui d'extrémité :

$$R_{Ed,p} = \frac{(1.5 \times 456) \cdot 1{,}500}{2} = 513\ N$$

En dépression :

Action de vent :

$$w_{s,ult} = 1{,}5 \cdot [-1{,}2 - 0{,}3] \cdot 456 = -1026\ N/m^2$$

Moment en travée maximal :

$$M_{Ed,s} = \frac{1026 \times 1{,}500^2}{8} = 289\ N \cdot m$$

Le critère d'interaction n'est pas vérifié car il est admis que l'appui intermédiaire se comporte comme une rotule (cf. Figure 1.7).

7.4.2. Vérifications

En pression :

Moment en travée maximal :

$$\frac{M_{c,Rd}}{M_{Ed,p}} = \frac{802}{289} = 2{,}78 > 1.0$$

Réaction d'appui d'extrémité :

$$\frac{R_{w,Rd}}{R_{Ed,p}} = \frac{7716}{513} = 15{,}04 > 1.0$$

En dépression :

Action de vent :

$$\frac{q_{Rd}}{w_{s,ult}} = \frac{7486}{1026} = 7{,}30 > 1.0$$

Moment en travée maximal :

$$\frac{M_{b,Rd}}{M_{Ed,s}} = \frac{574}{289} = 1{,}99 > 1.0$$

La résistance des fixations doit être vérifiée conformément au §8 de [2].

Le critère d'interaction n'est pas vérifié car il est admis que l'appui intermédiaire se comporte comme une rotule (cf. Figure 1.7).

7.5. Vérification en ELS

7.5.1. Actions et déplacements

En pression :

Action de vent :

$$w_{p,ser} = [0{,}7 - (-0{,}3)] \cdot 456 = 456\ N/m^2$$

Flèche maximale :

$$\delta_p = \frac{456 \times 1{,}500^4}{192 \times 210000 \times 45149 \cdot 10^{-6}} = 1{,}3 \cdot 10^{-3}\ m$$

En dépression :

Action de vent :

$$w_{s,ser} = (-1{,}2 - 0{,}3) \cdot 456 = -684\ N/m^2$$

Flèche maximale :

$$\delta_s = \frac{684 \times 1{,}500^4}{192 \times 210000 \times 43985 \cdot 10^{-6}} = 2{,}0 \cdot 10^{-3}\ m$$

7.5.2. Vérifications

En pression :

Flèche maximale :

$$\delta_p = 1{,}3 \cdot 10^{-3}\ m < \frac{1{,}500}{200} = 7{,}5 \cdot 10^{-3}\ m$$

En dépression :

Action de vent :

$$\frac{q_{Rd}}{w_{s,ult}} = \frac{7486}{684} = 10{,}94 > 1{,}0$$

Flèche maximale :

$$\delta_s = 2{,}0 \cdot 10^{-3}\ m < \frac{1{,}500}{200} = 7{,}5 \cdot 10^{-3}\ m$$

7.6. Vérifications du logiciel

Un fichier Excel est disponible sur le site internet GRISPE plus (www.grispeplus.eu). Le tableau suivant donne une comparaison des valeurs calculées ci–dessus et les valeurs données par le fichier.

Valeur	Calcul manuel	Calcul logiciel
q_{Rd} N/m^2	7486	7486
$M_{c,Rd}$ $N \cdot m/m$	802	797
$M_{b,Rd}$ $N \cdot m/m$	574	567
$R_{w,Rd}$ N/m	7716	7716

Les différences observées ci–dessus sont le résultat des erreurs d'arrondis sur les valeurs intermédiaires.

TABLE DES FIGURES

Figure 0.1 Définition géométrique d'une lame 7
Figure 1.1 Lame à emboîtement en chevron 8
Figure 1.2 Lame à emboîtement à tenon 8
Figure 1.3 Différentes formes d'emboîtement (non exhaustif) 8
Figure 1.4 Déboîtement progressif des clins lors d'essais en dépression 9
Figure 1.5 Éprouvette installée sur la chambre à vide (montage sous charge de pression) 10
Figure 1.6 Comportement attendu pour les essais sur 3 appuis 10
Figure 1.7 Comportement constaté pour les essais sur 3 appuis 10
Figure 1.8 Ruine par voilement local de l'emboîtement pour un essai sur 2 appuis en dépression . 11
Figure 1.9 Ruine par déboîtement lors d'un essai de flexion sur 3 appuis en dépression 11
Figure 5.1 Centre de gravité de la section transversale prenant en compte la large plage efficace 14
Figure 5.2 Centre de gravité de la section efficace et distribution de contraintes 15
Figure 5.3 Centre de gravité de la section brute 15
Figure 5.4 Centre de gravité de la section transversale prenant en compte les plages efficaces ... 16
Figure 5.5 Centre de gravité de la section efficace et distribution de contraintes 16
Figure 7.1 Dimensions du bâtiment 18
Figure 7.2 Schéma statique de la disposition des clins 18
Figure 7.3 Géométrie du profil calculé 19
Figure 7.4 Calcul de z_c (large plage en compression) 20
Figure 7.5 Calcul de e_0 (large plage en traction) 22
Figure 7.6 Calcul de z_c (large plage en traction) 23

BIBLIOGRAPHIE

[1] CEN, EN 14782:2006 – Self-supporting metal sheet for roofing, external cladding and internal lining - Product specification and requirements, Brussels, 2006.

[2] CEN, EN 1993-1-3:2006 – Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rule - Supplementary rules for cold-formed member and sheeting, Brussels, 2006.

[3] C. FAUTH, GRISPE – WP4: Calculation method for cladding systems – D 4.3 Test report, 2016.

[4] M. BLANC, GRISPE – WP4: Calculation method for cladding systems – D4.4 Test analysis and interpretation, 2016.

[5] CEN, EN 1990:2002 – Eurocode – Basis of structural design, Brussels, 2002.

[6] CEN, EN 1990:2002/A1:2005 – Eurocode – Basis of structural design – Amendment A1, Brussels, 2005.

[7] CEN, EN 1991-1-1:2002 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings, Brussels, 2002.

[8] CEN, EN 1991-1-4:2005 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions - Wind actions.

[9] CEN, EN 1991-1-4:2005/A1:2010 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions - Wind actions – Amendment A1.

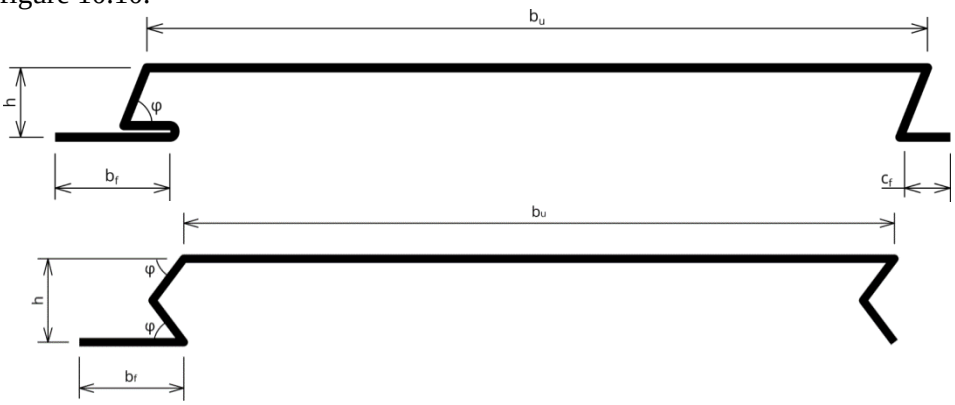
[10] CEN, EN 1993-1-1:2005 – Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, 2005.

[11] CEN, EN 1993-1-1:2005/A1:2014 – Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings – Amendment A1, Brussels, 2014.

[12] CEN, EN 1993-1-5:2006 – Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: General rules - Plated structural elements, Brussels, 2006.

[13] CEN, EN 1993-1-5:2006/A1:2017 – Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: General rules - Plated structural elements – Amendment A1.

ANNEXE : PROJET D'AMENDEMENT SOUMIS AU CEN

AM–1-3–2013–60	
Subject	Plank profiles
Clause No. / Subclause No. / Annex	Clauses 6.1.7.3 (5), Section 10.2
Reason for amendment	The plank profiles are often used but the information is not provided in the EN 1993-1-3 as to the design rules for this type of profiles.
Proposed change	The current clause 6.1.7.3 (5) states: (5) The value of the coefficent α should be obtained from the following: a) for Category 1: - for sheeting profiles: α = 0,075 ... (6.20a) - for liner trays and hat sections: α = 0,057 ... (6.20b) b) for Category 2: - for sheeting profiles: α = 0,15 ... (6.20c) - for liner trays and hat sections: α = 0,115 ... (6.20d) Replace the current clause Avec : (5) The value of the coefficient α should be obtained from the following: a) for Category 1 : – for sheeting profiles: α = 0,075 ... (6.20a) – for liner trays and hat sections: α = 0,057 ... (6.20b) – for plank profiles: α = 0,115 ... (6.20c) b) for Category 2: – for sheeting profiles: α = 0,15 ... (6.20d) – for liner trays and hat sections: α = 0,115 ... (6.20e) – for plank profiles: α = 0,115 ... (6.20f) The current title of the section 10.2 is : **10.2 Liner trays restrained by sheeting** Replace the current title Avec : **10.2 Liner trays restrained by sheeting and plank profiles** Add the following sentence and figure to the clause 10.2.1 (1): Plank profiles should be large channel type section with two webs and a flat wide flange. The joint between planks can be a clip one or chevron shaped as shown in figure 10.10.  Figure 10.10: Typical geometry for plank profiles

Renumber the remaining figures

The current clause 10.2.1 (2) states:

(2) The resistance of the webs of liner trays to shear forces and to local transverse forces should be obtained using 6.1.5 to 6.1.11, but using the value of $M_{c,Rd}$ given by (3) or (4).

Replace the clause 10.2.1 (2) Avec :

(2) The resistance of the webs of liner trays and plank profiles to shear forces and to local transverse forces should be obtained using 6.1.5 to 6.1.11, but using the value of $M_{c,Rd}$ given by (3) or (4).

Add in the current clause 10.2.1 (3):

The moment resistance $M_{c,Rd}$ of a plank profile may be obtained using 10.2.2 provided that the geometrical properties are within the range given in table 10.7

Table 10.7: Range of validity for plank profiles

0,75 mm ≤	t_{nom}	≤ 1 mm
	b_f	≤ 40 mm
25 mm ≤	h	≤ 30 mm
	b_u	≤ 300mm
	φ	≤ 60°
11 mm ≤	c_f	

The current clause 10.2.1 (4) states:

(4) Alternatively the moment resistance of a liner tray may be determined by testing provided that it is ensured that the local behaviour of the liner tray is not affected by the testing equipment.

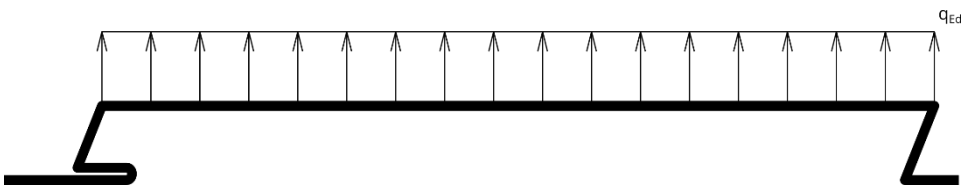
Change the clause 10.2.1 (4) Avec :

(2) Alternatively the moment resistance of a liner tray or plank profile may be determined by testing provided that it is ensured that the local behaviour of the liner tray or plank profile is not affected by the testing equipment.

Add the following new section :

10.2.3 Non dislocation of the joint for plank profiles

(1) Dislocation of the joints is a particular failure mode for plank profiles when solicited in suction



(2) To prevent the dislocation of the joint of plank profile, it must be verified :

$$q_{Ed}\ (\text{kN/m}^2) \leq q_{Rd}\ (\text{kN/m}^2)$$

(3) The load resistance regarding joint dislocation of a plank profile is :

$$q_{Rd} = \frac{0{,}8 \cdot 2 \cdot E \cdot 1000 \cdot t^3 \cdot \delta_{\text{lim}}}{b_u \cdot \left(12 \cdot (1-\nu^2) \cdot \sqrt{\left(\frac{2 \cdot {b_f}^3}{3}\right)^2 + \left[b_f \cdot \left(\frac{b_u \cdot h}{3} + \frac{h^2}{2}\right)\right]^2}\right)}$$

Where:

- For clip joint:

$$\delta_{\text{lim}} = c_f$$

- For chevron shaped joint:

$$\delta_{\text{lim}} = \frac{h}{2 \cdot \tan\varphi}$$

Background information	D4.5 – Background guidance for EN 1993-1-3 Proposal from M. Blanc, T. Renaux, and D. Izabel