



WP N°: 3

WP Title: eLectures: Interactive electronic lectures

Deliverable N°: D3.1

Deliverable Title : Steel decks with embossments in 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)

Sokol Palisson Consultants, Anna Palisson

Drafting history

FINAL- DATE: 31st of June

Dissemination Level

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

D3.1 STEEL DECK WITH EMBOSSEMENTS

RFCS funded – agreement N° 754092

Disclaimer notice and EU acknowledgement of support

Disclaimer notice

By making use of any information or content in this manual (Part 1 and Part 2) 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 manual (Part 1 and Part 2) 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 No75 4092

PARTIE 1: MANUEL DE CALCUL POUR LES PLAQUES NERVUREES AVEC BOSSAGES

RESUME

L'objectif de ce manuel de calcul est de présenter une nouvelle méthode analytique de dimensionnement des plaques nervurées avec bossages, telle que développée durant le projet Européen GRISPE.

Ce manuel est basé sur les principes des Eurocodes en général et plus spécifiquement sur ceux des normes EN 1993-1-3 et EN 1993-1-5.

Cette nouvelle méthode analytique de dimensionnement des plaques nervurées avec bossages est basée sur des essais réalisés dans le cadre du projet Européen GRISPE (2013-2016).

Le background de cette méthode est décrit dans l'Annexe 1.

Le chapitre 1 détaille les types de profils concernés, l'état de l'art, les principaux résultats de recherche de GRISPE ainsi que les exigences et règles générales de dimensionnement.

Le chapitre 2 présente les considérations préalables qui doivent être prises en compte lors des phases de pré-dimensionnement incluant en particulier la vérification des champs d'application de la nouvelle méthode de calcul.

Le chapitre 3 fournit les exigences technologiques de base.

Le chapitre 4 énumère les propriétés des matériaux des profils.

Le chapitre 5 indique la détermination des actions et leurs combinaisons.

Le chapitre 6 explique la nouvelle méthode de calcul.

Le chapitre 7 dresse la liste des considérations spécifiques de dimensionnement non couvertes par le présent manuel.

Le chapitre 8 fournit des exemples pratiques d'application de la nouvelle méthode de calcul.

Une bibliographie ainsi qu'une Annexe sont incluses.

Préface

Ce manuel de calcul a été réalisé avec le soutien du financement 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, est considérée pour inclusion dans les Eurocodes.

Ce manuel de calcul a été rédigé par PALISSON Anna et a fait l'objet de discussions au sein d'un groupe de travail, du projet GRISPE PLUS, composé des membres suivants :

Mickael 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

Le(s) membre(s) correspondant(s) suivant(s) a(ont) été inclus :

SOKOL	Léopold	France
-------	---------	--------

Figures

Les figures ont été réalisées par les organismes et sociétés suivants:

Figure 1.1.1 – BACACIER

Figure 1.3.1 – KIT

Figure 1.3.2 – KIT

Figure 1.3.3 – KIT

Figure 2.2.1.1 – Copie de l'EN 1993-1-3

Figure 2.2.2.1 – Copie de l'EN 1993-1-3

Figure 6.2.1 - Sokol Palisson Consultants

Figure 6.2.2 - Sokol Palisson Consultants

Figure 8.1.1 – BACACIER

Figure 8.1.2 - Sokol Palisson Consultants

Figure 8.1.3 - Sokol Palisson Consultants

Figure 8.1.4 - Sokol Palisson Consultants

Figure 8.1.5 - Sokol Palisson Consultants

Figure 8.1.6 – Copie de l'EN 1993-1-3

Figure 8.2.1 – BACACIER

Figure 8.2.2 - Sokol Palisson Consultants

Figure 8.2.3 – Copie de l'EN 1993-1-3

Figure 8.2.4 - Sokol Palisson Consultants

Figure 8.2.5 – Copie de l'EN 1993-1-3

Figure 8.2.6 - Sokol Palisson Consultants

Figure 8.2.7 - Sokol Palisson Consultants

SOMMAIRE

Domaine d'application de la publication

Notations

1. INTRODUCTION

- 1.1. Type de tôle d'acier profilée concernée**
- 1.2. Etat de l'art avant le projet GRISPE**
- 1.3. Principaux résultats du projet GRISPE**
- 1.4. Exigences et règles générales de dimensionnement**

2. CONSIDERATION PRELIMINAIRE

- 2.1. Champ d'application de la nouvelle méthode de dimensionnement**
- 2.2. Dispositions technologiques pour la tôle d'acier**

3. EXIGENCES TECHNOLOGIQUES DE BASE

4. PROPRIETES DES MATERIAUX

5. ACTIONS ET LEURS COMBINAISONS

6. BASES DU CALCUL

- 6.1. Principes**
- 6.2. Champ d'application de la nouvelle méthode de calcul**
- 6.3. Procédure du dimensionnement**

7. CONSIDERATION DU DIMENSIONNEMENT SPECIFIQUE

8. EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT

- 8.1. Explication du logiciel "2 stiffeners – span – end support"**
- 8.2. Autocontrôle du logiciel – détails des étapes de calcul**

9. BIBLIOGRAPHIE

ANNEXE 1

DOMAINE D'APPLICATION DE LA PUBLICATION

Le but de cette publication est de présenter une nouvelle méthode de dimensionnement des plaques nervurées avec bossages qui a été proposée pour inclusion dans l'Eurocode EN 1993-1-3.

Ce manuel de calcul traite de situations qui se produisent couramment.

Pour des problèmes spécifiques (cas des ouvertures par exemple) ou pour des situations exceptionnelles (telles que pour le sismique et le feu), il est nécessaire de suivre les clauses correspondantes des Eurocodes et/ou de l'EN 1090-4.

NOTATIONS

Les symboles suivants sont utilisés:

t : épaisseur de calcul

t_{nom} : épaisseur nominale

t_{eff} : épaisseur efficace

h_w : hauteur d'âme

f_{yb} : limite d'élasticité

E : module d'Young

$LS_{embossment}$: longueur du bossage supérieur

$zS_{embossment}$: distance de la semelle inférieure au bossage supérieur

$LI_{embossment}$: longueur du bossage inférieur

$zI_{embossment}$: distance de la semelle inférieure au bossage inférieur

h : hauteur du bossage / indentation

ρ : facteur de réduction déterminé pour les bossages

t_{red} : épaisseur réduite

b_{pi} : largeur de référence de la paroi

$b_{i,eff}$: largeur efficace de la paroi

A_g : aire de la section transversale brute

A_{eff} : aire de la section transversale efficace

z_G : position de l'axe neutre

σ_{xx} : contrainte

χ_d : coefficient de réduction pour la résistance au flambement par distorsion

$M_{c,Rd}$: moment résistant

M_{span} : moment résistant en travée

e_c : distance entre la semelle comprimée et la position de l'axe neutre

s_n : largeur de la partie de l'âme entre la semelle comprimée et la position de l'axe neutre

s_{eff} : largeur efficace de l'âme

W_{eff} : module d'inertie de la section efficace

$R_{w,Rd}$: résistance transversale locale d'une âme

1. INTRODUCTION

1.1. Type de tôle d'acier profilée concernée

Ce manuel de calcul traite des plaques nervurées avec bossages ou indentations. (Fig. 1.1.1)

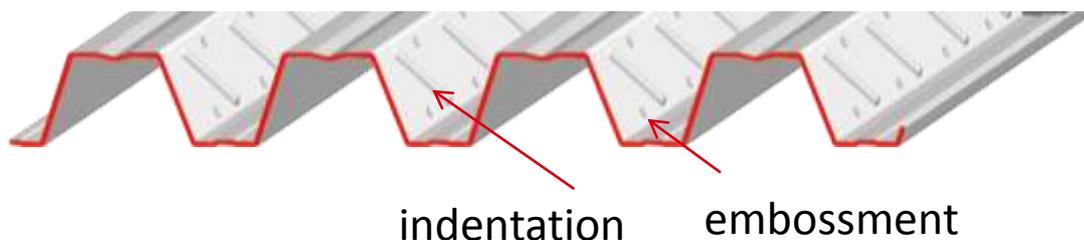


Figure 1.1.1 – Plaques nervurée en acier avec bossages et / ou indentations

1.2. Etat de l'art avant le projet GRISPE

Les plaques nervurées en acier sont devenues un élément structurel intégral dans les dalles composites pour les plafonds et les sols, avec une variété de nervures de différentes profondeurs, de bossages et d'indentations.

C'est souvent le matériau privilégié pour l'aménagement intérieur, les rénovations commerciales et industrielles et pour le bâtiment en général car il est robuste, léger et nécessite un entretien limité. Afin d'augmenter la connexion entre l'acier et le béton dans les dalles composites, les plaques nervurées sont équipées de bossages ou d'indentations.

En phase de construction où la plaque utilisée comme coffrage doit supporter le poids du béton frais et les charges de construction, l'effet des bossages et des indentations ne favorise pas la résistance au moment fléchissant. Les quelques études [1] [2] [3] [4] qui ont été réalisées ont montré que les bossages diminuaient d'environ 10% la résistance à la flexion de la plaque nervurée et augmentaient d'environ 10% la résistance transversale locale. Mais le programme expérimental qui a conduit à ces observations n'était pas assez significatif pour en tirer des conclusions solides et ne définissait pas l'effet sur l'action combinée de la réaction d'appui et du moment négatif.

Ce type de plaques a été optimisé au fil des ans et de nombreuses formes nouvelles sont apparues sur les marchés non couverts par les Eurocodes malgré leur importance commerciale croissante.

Dans la norme EN 1994-1 relative à la conception des plaques en phase mixte, un lien est établi avec l'EN 1993-1-3. La norme EN 1993-1-3 traite en 1.5.1 (4) des plaques mais dans la section 1.5.2 «Types de raidisseurs», les profils comportant des bossages et des indentations utilisés pour les dalles composites ne sont pas pris en compte.

En résumé, dans les textes actuels des Eurocodes, la seule possibilité pour les fabricants de dimensionner cette famille de produits est de réaliser des tests coûteux et chronophages.

1.3. Principaux résultats du projet GRISPE

Afin de déterminer et de comparer les valeurs de résistance des plaques nervurées en acier avec et sans bossages et indentations (Figure 1.3.1; Figure 1.3.2 et Figure 1.3.4), un vaste programme de 144 essais a été réalisé conformément à la norme EN 1993-1-3 Annexe A sur les plaques nervurées en acier avec ou sans bossages et indentations.

De plus, 54 essais de traction sur des échantillons avec et sans bossages ont été effectués afin de déterminer l'influence locale des bossages.

Sur la base des essais de traction, un coefficient de réduction de l'épaisseur du profil avec des bossages / indentations a été défini. Ce modèle de conception innovant a été validé par une analyse détaillée des résultats expérimentaux des 144 tests globaux, et des méthodes de calcul ont été développées pour déterminer la résistance au moment fléchissant, la résistance à la réaction d'appui et la résistance à l'effet combiné de la réaction d'appui et du moment fléchissant de la plaque avec bossages / indentations.



Figure 1.3.1 – Essai en travée simple



Figure 1.3.2 – Essai d'appui d'extrémité



Figure 1.3.3 – Essai d'appui intérieur

1.4. Exigences et règles générales de dimensionnement

(1) La conception des plaques nervurées en acier avec bossages / indentations doit être conforme aux règles générales données dans la norme EN 1993-1-3

(2) Des coefficients partiels appropriés doivent être adoptés pour les états limites ultimes et pour les états limites de service conformément à l'EN 1993-1-3.

2. CONSIDERATIONS PRELIMINAIRES

2.1. Champ d'application de la nouvelle méthode de dimensionnement

Ce manuel définit des exigences de calcul pour les plaques nervurées en acier avec bossages / indentations. L'exécution des structures en acier constituées en plaques nervurées est couverte par l'EN 1090.

Ce manuel donne une méthode pour le dimensionnement par calcul. Cette méthode ne s'applique que dans des gammes bien définies de caractéristiques des matériaux et de proportions géométriques.

Ce manuel ne couvre pas la prise en compte des charges relatives aux phases d'exécution et d'entretien.

Les règles de calcul données dans le présent manuel ne sont applicables que si les tolérances des profilés formés à froid sont conformes à l'EN 1993-1-3.

2.2. Dispositions technologiques pour la tôle d'acier

2.2.1. Types de sections

(1) Les plaques nervurées présentent, dans la limite des tolérances autorisées, une épaisseur nominale constante sur toute leur longueur, et peuvent avoir une section transversale uniforme ou une section de hauteur variable.

(2) Les sections transversales des tôles profilées sont composées pour l'essentiel de parois planes reliées par des éléments courbes.

(3) Les formes habituelles de tôles profilées sont présentées à la figure 2.2.1.1.

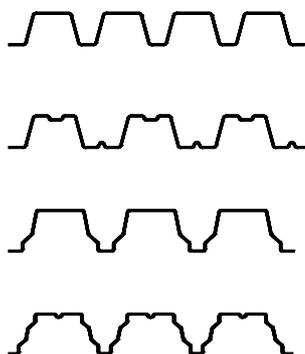


Figure 2.2.1.1 – Exemples de tôles profilées

(4) Les sections transversales des plaques nervurées peuvent être non raidies ou comporter des raidisseurs longitudinaux de leurs âmes, de leurs semelles ou les deux.

2.2.2. Dimensions des sections transversales

Les dimensions des sections transversales doivent satisfaire les exigences générales définies par l'EN 1993-1-3, section 1.5.3.

(1) L'épaisseur de métal t est l'épaisseur de calcul (définie si nécessaire par l'épaisseur de métal nu moins la tolérance comme spécifié dans la clause 3.2.4 de l'EN 1993-1-3), sauf indication contraire.

(2) Il convient de ne pas appliquer les dispositions données dans ce manuel pour le dimensionnement par calcul, aux sections transversales dont les rapports largeur sur épaisseur ne se situent pas dans la gamme de valeurs b/t , h/t , c/t and d/t données dans le tableau 2.2.2.1 (Tableau 5.1 de l'EN 1993-1-3).

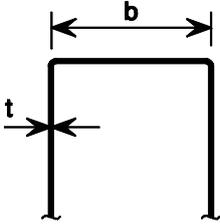
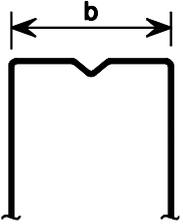
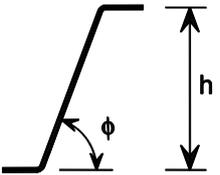
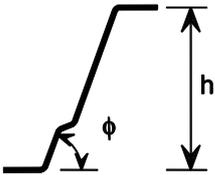
		$b/t \leq 500$
		$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin \phi$

Tableau 2.2.2.1 – Vérification des proportions géométriques

3. EXIGENCES TECHNOLOGIQUES DE BASE

Plaques nervurées et marquage CE

Les plaques nervurées en acier sont marquées CE selon la norme EN 1090-1.

4. PROPRIETES DES MATERIAUX

Tôles d'acier

Les propriétés des matériaux doivent satisfaire aux exigences formulées par la norme EN 1993-1-3, section 3.

Les types d'acier habituels sont les nuances S320GD + ZA et S350GD + ZA

Les tolérances des épaisseurs doivent satisfaire aux exigences formulées par la norme EN 1993-1-3, section 3.2.4.

5. ACTIONS ET LEURS COMBINAISONS

Les actions et leurs combinaisons doivent être prises en compte et déterminées conformément à l'EN 1991-1-6 Eurocode 1: Actions sur les structures, Partie 1-6 : Actions générales – Actions en cours d'exécution, 2005, et leurs Annexes Nationales.

6. BASES DU CALCUL

6.1. Principes

Cette nouvelle méthode de dimensionnement est donnée pour calculer:

- La résistance au moment fléchissant d'une plaque nervurée avec bossages et / ou indentations
- La résistance à la charge transversale localisée ou à la réaction d'appui d'une plaque nervurée avec bossages et / ou indentations
- La résistance à l'effet combiné du moment fléchissant et de la réaction d'appui d'une plaque nervurée avec bossages et / ou indentations

6.2. Champ d'application de la nouvelle méthode de calcul

Cette nouvelle méthode est donnée pour une plaque nervurée avec indentations (Figure 6.2.1) et / ou avec bossages (Figure 6.2.2)

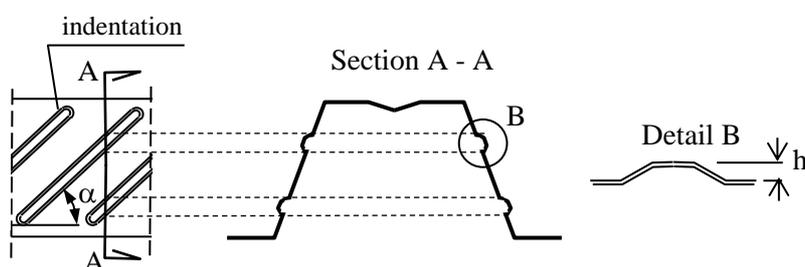


Figure 6.2.1 – Plaque nervurée avec indentations

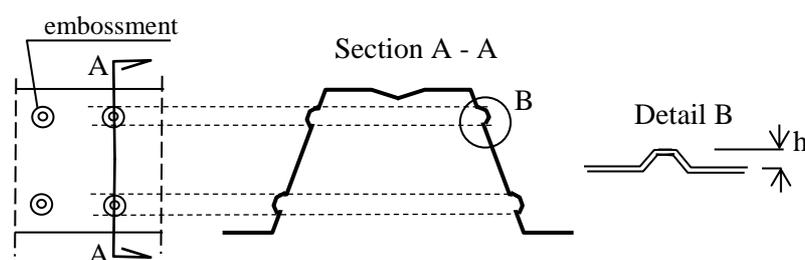


Figure 6.2.2 – Plaque nervurée avec bossages

Domaine de validité

$$0,71 \text{ mm} \leq t_{\text{cor}} \leq 1,21 \text{ mm}$$

$$h \leq 4,0 \text{ mm}$$

$$30^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$$

Pour les épaisseurs intermédiaires, le facteur de réduction ρ peut être déterminé au moyen d'une interpolation linéaire entre les valeurs t voisines données dans le tableau 6.3.

Pour $t_{cor} > 1,21$ mm les valeurs pour $t_{cor} = 1,21$ mm peuvent être adoptées de façon sécuritaire.

6.3. Procédure du dimensionnement

6.3.1. Section efficace de la plaque avec indentations et/ou bossages

(1) Lors de la première étape, la largeur efficace de la paroi plane avec des indentations (figure 6.2.1) ou des bossages (figure 6.2.2) doit être calculée conformément à 5.5.1 (2) de l'EN 1993-1-3 sans tenir compte des indentations /bossages

(2) Dans la deuxième étape, l'indentation ou le bossage doit être pris en compte en considérant les bossages / indentations (figures 6.2.1 / 6.2.2) comme des éléments plans d'épaisseur réduite

$$t_{red} = \rho * t_{cor} \text{ où:}$$

$$\rho = A * h + B$$

h est la hauteur de l'indentation / bossage en mm (voir Figures 6.2.1 et 6.2.2)

A et B sont des coefficients définis dans le tableau 6.3.1

Type of local deformation	t (mm)	h (mm)	A	B
Indentation	0.71	0 - 1.5	-0.533	1.000
		1.5 - 2.75	-0.112	0.368
		2.75 - 4.0	-0.025	0.128
	0.96	0 - 1.5	-0.467	1.000
		1.5 - 2.75	-0.186	0.580
		2.75 - 4.0	-0.020	0.122
	1.21	0 - 1.5	-0.401	1.000
		1.5 - 2.75	-0.260	0.792
		2.75 - 4.0	-0.015	0.116
Embossment	0.71	0 - 1.5	-0.267	1.000
		1.5 - 2.75	-0.056	0.684
		2.75 - 4.0	-0.013	0.564
	0.96	0 - 1.5	-0.234	1.000
		1.5 - 2.75	-0.093	0.790
		2.75 - 4.0	-0.010	0.561
	1.21	0 - 1.5	-0.201	1.000
		1.5 - 2.75	-0.130	0.896
		2.75 - 4.0	-0.008	0.558

Tableau 6.3.1 – Valeurs des coefficients A et B

(3) La section transversale pour le calcul de la section efficace doit être positionnée de manière à provoquer l'effet le plus défavorable

6.3.2. Résistance au moment fléchissant d'une plaque nervurée avec bossages et / ou indentations

Le moment résistant de calcul d'une section transversale soumise à la flexion par rapport à un axe principal $M_{c,Rd}$ est déterminé conformément à l'EN 1993-1-3 "6.1.4 Moment fléchissant", comme suit :

$$M_{c,Rd} = W_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0}$$

Il convient de déterminer le module d'inertie de la section efficace W_{eff} à partir d'une section transversale efficace soumise uniquement à un moment fléchissant par rapport à l'axe principal approprié, avec une contrainte maximale $\sigma_{max,Ed}$ égale à f_{yb} / γ_{M0} , en tenant compte des effets du flambement local et par distorsion, tels que spécifiés à la Section 5.5. et 7.1 de l'EN 1993-1-3.

6.3.3. Charge transversale localisée ou à réaction d'appui

Il convient de déterminer la résistance transversale locale d'une plaque nervurée avec bossages / indentations à partir de la formule (6.18) de l'EN 1993-1-3.

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_{yb} E} \left(1 - 0,1\sqrt{r/t} \right) \left[0,5 + \sqrt{0,02 l_a / t} \right] \left(2,4 + (\phi/90)^2 \right) / \gamma_{M1} \quad (6.18)$$

6.3.4. Effet combiné du moment fléchissant et de la réaction d'appui

(1) Dans le cas d'une plaque nervurée avec bossages / indentations, les équations (6.28a), (6.28b) et (6.28c) de l'EN 1993-1-3 peuvent être utilisées avec:

$M_{c,Rd}$ = résistance au moment fléchissant en prenant en compte les bossages / indentations conformément au § 6.3.2

$R_{w,Rd}$ = résistance transversale locale sans prendre en compte les bossages / indentations (6.3.3)

(2) Il convient de vérifier que les sections transversales soumises à l'action combinée d'un moment fléchissant M_{Ed} et d'un effort transversal dû à une charge localisée ou à une réaction d'appui F_{Ed} satisfont les équations suivantes:

$$M_{Ed} / M_{c,Rd} \leq 1$$

$$F_{Ed} / R_{w,Rd} \leq 1$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1,25$$

7. CONSIDERATION DU DIMENSIONNEMENT SPECIFIQUE

Les domaines suivants ne sont pas traités par le présent manuel :

Le feu

Le séisme

Les aspects environnementaux

La thermique

L'acoustique

Autres

8. EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT

8.1. Explication du logiciel "2 stiffeners – span – end support"

Ce logiciel permet de calculer la résistance au moment en travée et la résistance à la réaction d'appui d'extrémité pour une plaque nervurée avec deux raidisseurs dans la semelle supérieure et avec des bossages longitudinaux (indentations)

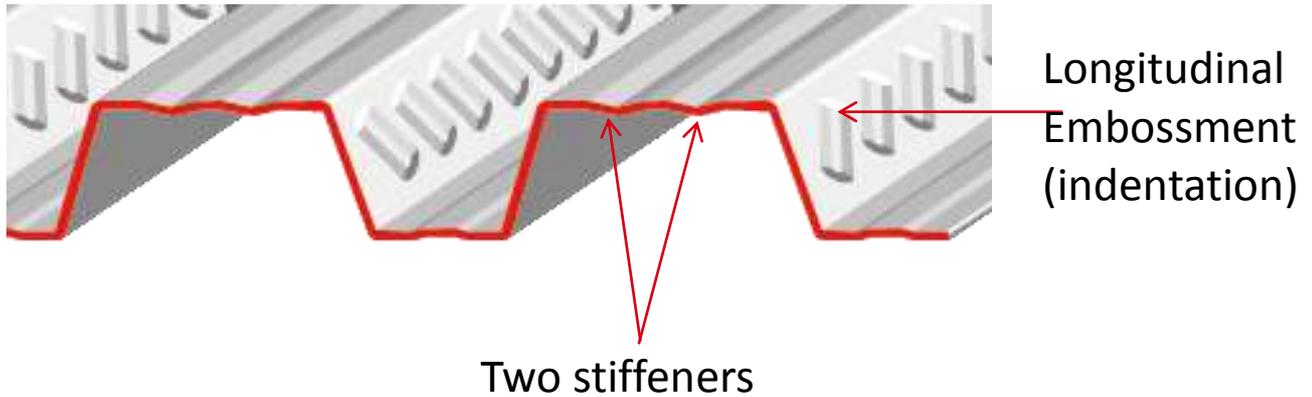


Figure 8.1.1 – Plaque nervurée avec deux raidisseurs dans la semelle supérieure et avec des bossages longitudinaux (indentations)

1) Détermination du coefficient ρ pour le bossage

La cellule rouge

Choose $t_{nom} = 0.75$ mm or $t_{nom} = 1$ mm	
--	--

 doit être complétée avec la valeur de t_{nom} du profil à calculer: 0.75 or 1

La cellule rouge

Height of the embossment $h_e < 4$ mm	
---------------------------------------	--

 doit être complétée avec la hauteur du bossage qui doit être < 4 mm

Alors la valeur du coefficient ρ sera automatiquement affichée par le logiciel

Par exemple :

- si $t_{nom} = 1$ mm et $h_e = 3$ mm

Choose $t_{nom} = 0.75$ mm or $t_{nom} = 1$ mm	1	Height of the embossment $h_e < 4$ mm	3
	if $t_{nom} = 0,75$ mm		
	$h_e < 4$ mm	ρ	
		if $t_{nom} = 1$ mm	
	$h_e < 4$ mm	ρ	
	3	0.062	

Figure 8.1.2 – Cellules de Excel qui doivent être complétées si $t_{nom} = 1$ mm

➤ si $t_{nom} = 0,75$ mm et $h_e = 2$ mm

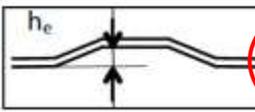
Choose $t_{nom} = 0.75$ mm or $t_{nom} = 1$ mm	0.75	Height of the embossment $h_e < 4$ mm	2
	if $t_{nom} = 0,75$ mm		
	$h_e < 4$ mm	ρ	
	2	0.150	
	if $t_{nom} = 1$ mm		
	$h_e < 4$ mm	ρ	

Figure 8.1.3 - Cellules de Excel qui doivent être complétées si $t_{nom} = 0.75$ mm

Cette valeur sera automatiquement affichée dans le tableau du paragraphe "2°

ratio ρ	
DONNEES"	0,150

2) DONNEES

Toutes les cellules rouges doivent être complétées avec les dimensions du profil (Figure 8.1.4 et Figure 8.1.5): les rayons internes R, les angles θ , l'épaisseur de calcul t , l'épaisseur nominale t_{nom} , le pas, la hauteur d'âme h_w , la profondeur du raidisseur supérieur d_s , la profondeur du raidisseur inférieur d_i , la limite d'élasticité f_{yb} , le module d'Young E, la longueur du raidisseur supérieur l_{r_s} , la longueur du bossage supérieur $LS_{embossment}$, la distance de la semelle inférieure au bossage supérieur, la longueur du bossage inférieur $LI_{embossment}$, et la distance de la semelle inférieure au bossage inférieur:

R1 (mm)	θ_1 (rad)	R2 _{sup} (mm)	R2 _{inf} (mm)	θ_2 (rad)	t_{nom} (mm)	t (mm)	
Pitch (mm)	h_w (mm)	d_s (mm)	l_{r_s} (mm)	d_i (mm)	f_{yb} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	γ_{M0}
$LS_{embossment}$ (mm)	$LI_{embossment}$ (mm)	$zS_{embossment}$ (mm)	$zI_{embossment}$ (mm)				

Tableau 8.1.1 - Cellules Excel devant être complétées avec les dimensions du profil

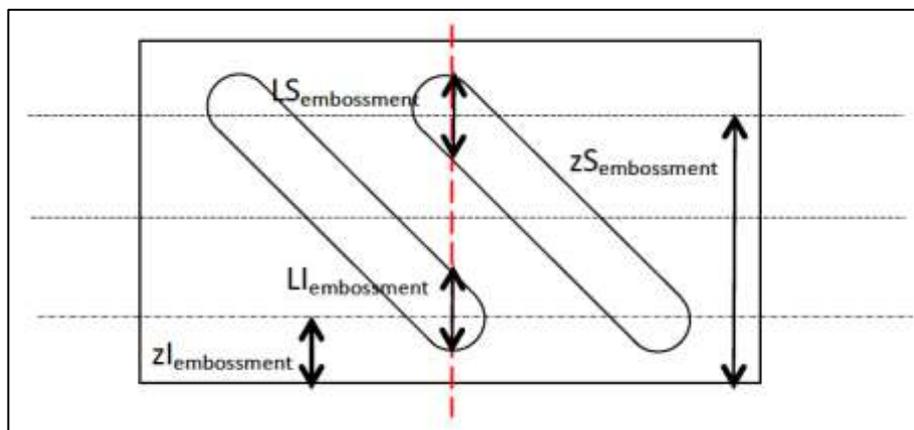


Figure 8.1.4 - Dimensions des bossages longitudinaux

Alors la valeur du coefficient p sera automatiquement affichée par le logiciel.

Compléter les cellules rouges du tableau suivant avec les dimensions (b_{pi}) des éléments de $\frac{1}{2}$ nervure. Les numéros des éléments sont donnés sur la Figure 8.1.5. La longueur des éléments est mesurée entre les points médians « P » des arrondis adjacents comme indiqué sur la Figure 8.1.6.

Element	b_{pi} (mm)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	

Tableau 8.1.2 – Cellules Excel à compléter avec les dimensions des éléments

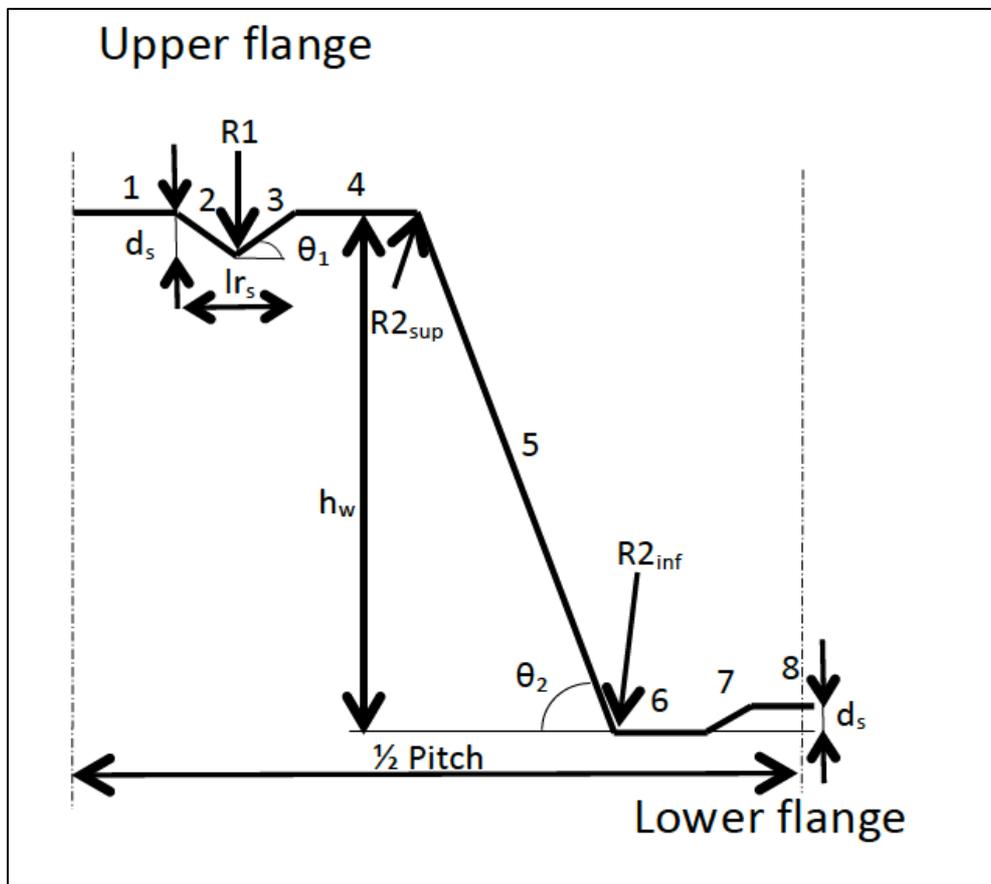


Figure 8.1.5 – Numéros des éléments et données

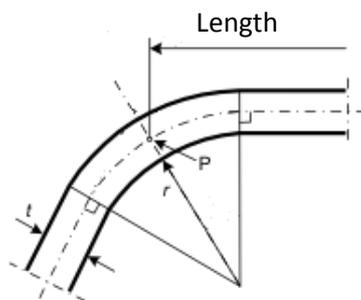


Figure 8.1.6 - Longueur des éléments mesurée entre les points médians « P »

3) Vérification des proportions géométriques

Le logiciel affiche automatiquement la vérification des proportions géométriques.

	$b/t=$	94,37			$b/t \leq 500$
	$\theta_2=$	72,00			
	$h/t=$	84,51			$45^\circ \leq \phi \leq 90^\circ$
	$500\sin(\theta_2)=$	475,52			
	$r < 0,04 t E / f_y$	18,64			$h/t \leq 500 \sin \phi$

Tableau 8.1.3 – Vérification automatiques des proportions géométriques

4) RESULTATS

Le logiciel affiche automatiquement les résultats:

⇒ moment résistant en travée **$M_{span} = 4.45 \text{ kNm/m}$**

⇒ réaction d'appui d'extrémité **$R_{endsupport} = 6.89 \text{ kN/m}$**

8.2. Autocontrôle du logiciel – détails des étapes de calcul

L'autocontrôle est basé sur le calcul de la résistance au moment en travée et de la réaction d'appui d'extrémité pour un profil d'épaisseur = 0,75 mm et avec une hauteur de bossage de 2,2 mm.

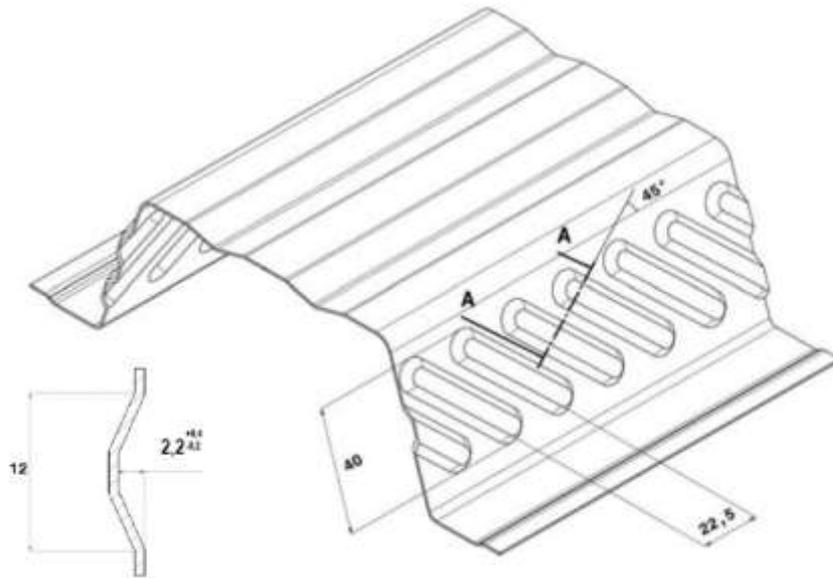


Figure 8.2.1 – Profil calculé

1) Détermination du coefficient ρ pour le bossage

Logiciel:

if $t_{nom} = 0,75$ mm	
$h_e < 4$ mm	ρ
2.2	0.122

Tableau 8.2.1 - Coefficient ρ déterminé par le logiciel

Calcul:

$\rho = A \cdot h + B$, A et B sont les coefficients donnés dans le tableau 7.3.1

Pour $h = 2,2$ ($1,5 < h < 2,75$) $\rightarrow A = -0,112$; $B = 0,368$ **$\rho = 0,122$**

2) DONNEES

Logiciel et calcul:

R1 (mm)	θ_1 (rad)	R2 _{sup} (mm)	R2 _{inf} (mm)	θ_2 (rad)	t_{nom} (mm)	t (mm)	
0,00	0,20	5,00	5,00	1,26	0,75	0,71	
Pitch (mm)	hw (mm)	d_s (mm)	l_r (mm)	d_i (mm)	f_{yb} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	γ_{M0}
207,00	60,00	2,50	25,00	1,00	320,00	210000,00	1,00
$hS_{embossment}$ (mm)	$hI_{embossment}$ (mm)	$zS_{embossment}$ (mm)	$zI_{embossment}$ (mm)				
16.97	16.97	41.25	18.75				

Tableau 8.2.2 - Cellules Excel complétées avec les dimensions du profil

Element	b_{pi} (mm)
1	8.50
2	12.75
3	12.75
4	20.00
5	61.70
6	20.50
7	1.41
8	9.00

Tableau 8.2.3 - Cellules Excel complétées avec les dimensions des éléments

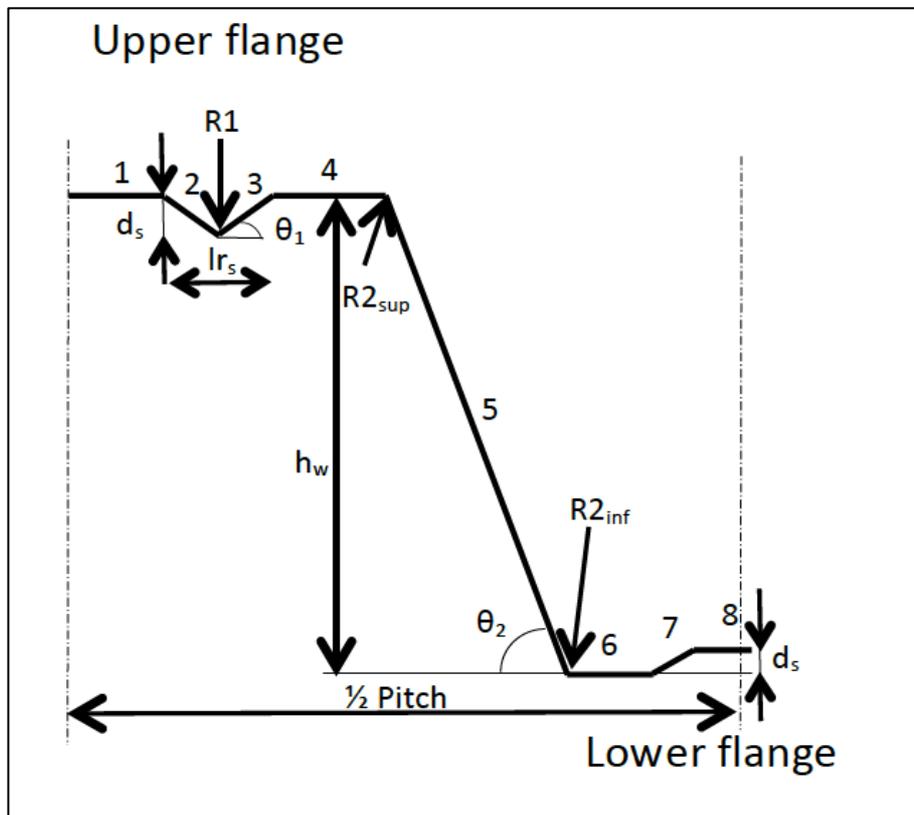


Figure 8.2.2 - Numéros des éléments

4) RESULTATS

Logiciel:

⇒ Moment résistant en travée

$M_{span} = 4.45 \text{ kNm/m}$

⇒ Réaction d'appui d'extrémité

$R_{endsupport} = 6.89 \text{ kN/m}$

Calcul:

Calcul de l'aire de la section transversale brute A_g

A_g est la somme des aires de chaque élément (longueur x t)

$$A_g = 104.2 \text{ mm}^2$$

Position de l'axe neutre: $z_G = 34.7 \text{ mm}$

Calcul de l'aire de la section transversale efficace A_{eff}

1^{ère} Etape

A_{eff} est la somme des aires des sections efficaces des éléments

Aire de la section transversale efficace de la semelle supérieure

La semelle supérieure possède 2 raidisseurs donc la section transversale efficace de la semelle est calculée conformément à l'EN 1993-1-3 § "5.5.3.4.2 Semelles munies de raidisseurs intermédiaires"

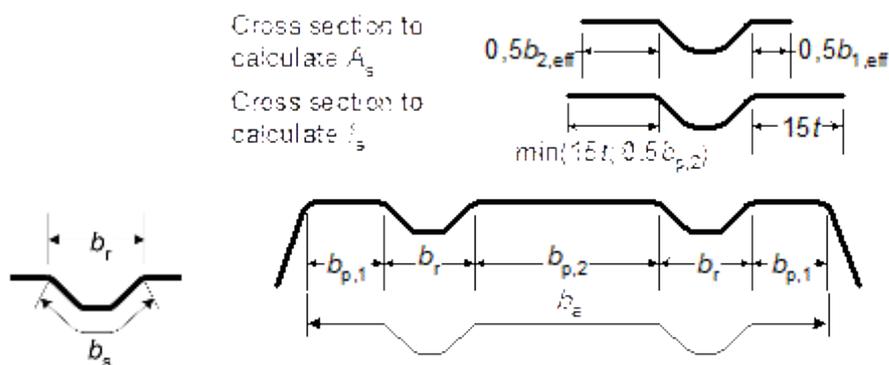


Figure 8.2.3 – Semelle avec deux raidisseurs

La contrainte dans la semelle supérieure est $\sigma_{com} = f_{yb} \times (h_w - z_G) / z_G = 233 \text{ N} / \text{mm}^2$

$$b_{p,1} = 20 \text{ mm}, \rho = 1 \rightarrow 0,5 b_{1,eff} = 10 \text{ mm}$$

$$b_{p,2} / 2 = 8,5 \text{ mm}, \rho = 1 \rightarrow 0,5 b_{2,eff} = 8,5 \text{ mm}$$

Raidisseurs:

La section transversale d'un raidisseur est calculée conformément à l'EN 1993-1-3 § "5.5.3.3 Parois munies de raidisseurs intermédiaires »

Contrainte critique de flambement $\sigma_{cr,s} = 103 \text{ N/mm}^2$

Coefficient de réduction pour la résistance au flambement par distorsion $\chi_d = 0,374$

Aire de la section transversale efficace de l'âme

L'aire de la section efficace de l'âme est calculée conformément à la section "5.5.3.4.3 Ames avec au plus deux raidisseurs intermédiaires" de l'EN 1993-1-3

La largeur efficace des éléments plats avec des bossages (Figure 8.2.7) est d'abord calculée conformément à la section 5.5.1(2) de l'EN 1993-1-3

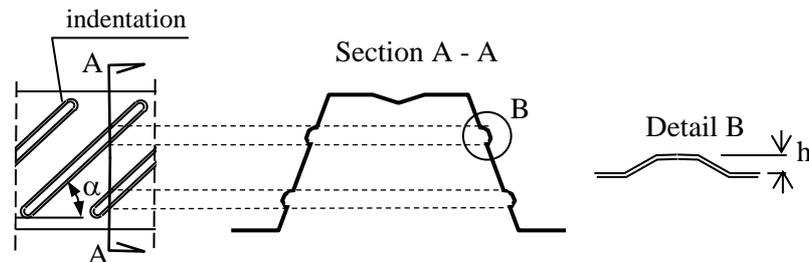


Figure 8.2.4 – Plaque avec des bossages longitudinaux (indentations)

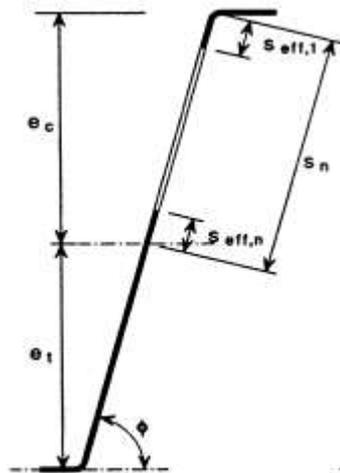


Figure 8.2.5 – Section transversale efficace de l'âme

$$e_c = h_w - z_G = 25,3 \text{ mm} \rightarrow s_n = 25,9 \text{ mm}$$

$$\sigma_{com} = f_{yb} \times (h_w - z_G) / z_G = 233 \text{ N / mm}^2 \rightarrow s_{eff,0} = 20,24 \text{ mm} \rightarrow s_{eff,1} = 20,24 \text{ mm}$$

$$\rightarrow s_{eff,n} = 30,36 \text{ mm} \rightarrow s_{eff,1} + s_{eff,n} \geq s_n \text{ l'âme est pleinement efficace}$$

$$s_{eff,1} = 0,4s_n$$

$$s_{eff,n} = 0,6s_n$$

Aire de la section transversale efficace de la semelle inférieure

Dans ce cas la semelle inférieure est en tension \rightarrow aire de la section efficace = aire de la section brute

Aire de la section transversale efficace totale

$A_{eff} = 89 \text{ mm}^2$

La position de l'axe neutre de la section efficace est: $z_G = 30,5 \text{ mm}$

Itération: étapes suivantes

Dans les étapes suivantes la nouvelle position de l'axe neutre de la section efficace est prise pour calculer la nouvelle contrainte σ_{com} .

L'aire de la section transversale efficace de la semelle supérieure est calculée comme dans l'étape 1 mais en prenant la nouvelle contrainte σ_{com} calculée avec la nouvelle position de l'axe neutre z_c

L'aire de la section transversale efficace de l'âme est calculée en considérant les indentations comme des éléments plats ayant une épaisseur réduite $t_{red} = 0,122 \times 0,71 = 0,087 \text{ mm}$ pour la longueur $L_{embossments}$ (Figure 8.2.6)

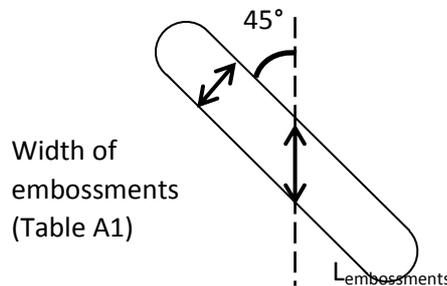


Figure 8.2.6 – Longueur des bossages longitudinaux (indentations)

$L_{embossments} = \text{largeur} / \sin(45^\circ)$ et largeur = 12 mm

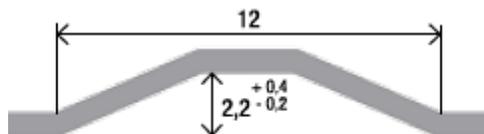


Figure 8.2.7 – Hauteur des bossages

Donc $L_{embossments} = 16,97 \text{ mm}$

Toutes les valeurs des étapes 2 et 3 sont indiquées dans le tableau suivant. La convergence est considérée satisfaisante à l'étape 3, l'itération s'arrête à l'étape 3.

		2nd step	3rd step
Upper flange	σ_{com}	309	320
	ρ pour b _{2,eff}	1	1
	0,5 b _{2,eff}	8.50	8.50
	ρ pour b _{1,eff}	1	1
	0,5 b _{1,eff}	10.00	10.00
Upper flange stiffener	$\sigma_{\alpha,s}$	102.7	102.7
	χ_d	0.37	0.37
	t _{red}	0.27	0.27
Web	e _c	29.5	31.1
	S _n	30.3	32.0
	S _{eff,0}	17.6	16.7
	S _{eff,1}	17.6	16.7
	S _{eff,n}	26.4	25.0
	S _{eff,1} + S _{eff,n}	43.9	41.6
		entire web is effective	entire web is effective
	S _{eff,1}	0,4sn	0,4sn
	S _{eff,n}	0,6sn	0,6sn
	Total effective Area	A _{eff}	63.9
Position of neutral axis	Z _c	28.9	28.7

Tableau 8.2.4 – Valeurs des étapes 2 et 3

Calcul de la résistance au moment en travée:

$$M_{c,Rd} = W_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0}$$

Pour 1/2 pas I_{eff} = 45029 mm⁴

Pour le profil I_{eff} = 435 mm³

$$v = \max(28,7; 31,3) = 31.3 \text{ mm}$$

$$W_{eff} = I_{eff} / v = 13.9 \text{ mm}^3$$

$$M_{span} = 4,45 \text{ kNm/m}$$

Le résultat est identique au résultat du logiciel

M _{span} =	4.45	kNm/m
---------------------	------	-------

Calcul de la résistance à la réaction d'appui d'extrémité:

Il convient de déterminer la résistance transversale locale d'une plaque nervurée avec des bossages longitudinaux (indentations) à partir de la formule usuelle (6.18) de l'EN 1993-1-3.

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_{yb} E} \left(1 - 0,1\sqrt{r/t} \right) \left[0,5 + \sqrt{0,02 l_a / t} \right] \left(2,4 + (\phi/90)^2 \right) / \gamma_{M1} \quad (6.18)$$

D3.1 STEEL DECKS WITH EMBOSSEMENTS

$$\alpha = 0,075$$

$$t = 0,71 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm}$$

$$l_a = 10 \text{ mm}$$

$$\phi = 72$$

$$\text{Par \u00e2me : } R_{w,Rd} = 713 \text{ N}$$

$$\text{Par m\u00e8tre: } R_{w,Rd} = 6,89 \text{ kN/m}$$

Le r\u00e9sult est identique au r\u00e9sultat du logiciel

$R_{\text{endsupport}}$	6.89	kN/m
-------------------------	------	------

9. BIBLIOGRAPHIE

- [1] Davies J.M and Jiang C., Design Procedures for Profiled Metal Sheeting and Decking in Thin-Walled Structures Vol. 27, No. I, pp. 43-53, Elsevier, 1997.
- [2] Luure P. and Crisinel M. Essais comparatifs sur tôles nervurées de plancher mixtes avec et sans bossages, ICOM/EPFL, Nov. 1993.
- [3] Mistakidis, E.S, Kyriakos, G. and Dimitriadis, L., Thin-Walled Structures: Bending resistance of composite slabs made with thin-walled steel sheeting with indentations or embossments, University of Thessaly, 38334 Volos, 2007.
- [4] Composite slabs and beams using steel decking: best practice for design and construction, MCRMA Technical Paper No. 13 SCI Publication, March 2009.

Annexe 1

Background pour la nouvelle méthode de dimensionnement des plaques nervurées avec bossages

D1.1	GRISPE WP1 Background document	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.2	GRISPE WP1 Test programme definition	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.3	GRISPE Test report of steel trapezoidal sheeting with and without embossments and outward stiffeners	Christian FAUTH (KIT)
D1.4	GRISPE WP1 Test analysis and interpretation	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.5	GRISPE Background guidance for EN 1993-1-3 to design of sheeting with embossments and indentations	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)

PARTIE 2: EXEMPLE PRATIQUE POUR LES PLAQUES NERVUREES AVEC BOSSAGES

RESUME

L'objectif de cet exemple pratique est de présenter une nouvelle méthode analytique de dimensionnement des plaques nervurées avec bossages, telle que développée durant le projet Européen GRISPE.

Cet exemple pratique est basé sur les principes des Eurocodes en général et plus spécifiquement sur ceux des normes EN 1993-1-3 et EN 1993-1-5.

Cette nouvelle méthode analytique de dimensionnement de plaques nervurées avec bossages est basée sur des essais réalisés dans le cadre du projet Européen GRISPE (2013-2016).

Le background de cette méthode est décrit dans l'Annexe 1.

Le chapitre 1 détaille la section transversale de la plaque nervurée, les données et les dimensions des bossages

Le chapitre 2 explique le calcul de la section transversale brute.

Le chapitre 3 explique le calcul de la section transversale efficace.

Le chapitre 4 explique le calcul de la résistance au moment fléchissant.

Le chapitre 5 explique le calcul de la résistance à la réaction d'appui d'extrémité.

Une Annexe est incluse.

Préface

Cet exemple pratique a été réalisé avec le soutien du financement 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, est considérée pour inclusion dans les Eurocodes.

Cet exemple pratique a été rédigé par PALISSON Anna et a fait l'objet de discussions au sein d'un groupe de travail, du projet GRISPE PLUS, composé des membres suivants :

Mickael 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

Le(s) membre(s) correspondant(s) suivant(s) a(ont) été inclus :

SOKOL	Léopold	France
-------	---------	--------

Figures

Les figures ont été réalisées par les organismes et sociétés suivants:

Figure 1.1 – BACACIER

Figure 1.1.1 – Sokol Palisson Consultants

Figure 1.3.1 – BACACIER

Figure 1.3.2 - Sokol Palisson Consultants

Figure 1.3.3 - Sokol Palisson Consultants

Figure 2.1 – Copie de l'EN 1993-1-3

Figure 3.1.1 – Copie de l'EN 1993-1-3

Figure 3.1.2 - Sokol Palisson Consultants

Figure 3.1.3 - Copie de l'EN 1993-1-3

Figure 3.1.4 - Sokol Palisson Consultants

Figure 3.2.1 - Sokol Palisson Consultants

Figure 5.1 – Copie de l'EN 1993-1-3

SOMMAIRE

DOMAINE D'APPLICATION DE LA PUBLICATION

Notations

1. INTRODUCTION

- 1.1. Section transversale de la plaque nervurée
- 1.2. Caractéristiques de la plaque nervurée
- 1.3. Dimensions des bossages

2. CALCUL DE L'AIRE DE LA SECTION TRANSVERSALE BRUTE A_g

3. CALCUL DE L'AIRE DE LA SECTION TRANSVERSALE EFFICACE A_{eff}

- 3.1. Etape 1
- 3.2. Itération: Etape 2
- 3.3. Itération: Etape 3

4. CALCUL DU MOMENT RESISTANT

5. CALCUL DE LA REACTION D'APPUI D'EXTREMITÉ

ANNEXE 1

DOMAINE D'APPLICATION DE LA PUBLICATION

Le but de cette publication est de présenter une nouvelle méthode de dimensionnement des plaques nervurées avec bossages qui a été proposée pour inclusion dans l'Eurocode EN 1993-1-3.

Cet exemple pratique traite de situations qui se produisent couramment.

Pour des problèmes spécifiques (cas des ouvertures par exemple) ou pour des situations exceptionnelles (telles que pour le sismique et le feu), il est nécessaire de suivre les clauses correspondantes des Eurocodes et/ou de l'EN 1090-4.

NOTATIONS

Les symboles suivants sont utilisés:

t : épaisseur de calcul

t_{nom} : épaisseur nominale

t_{eff} : épaisseur efficace

h_w : hauteur d'âme

f_{yb} : limite d'élasticité

E : module d'Young

$LS_{embossment}$: longueur du bossage supérieur

$zS_{embossment}$: distance de la semelle inférieure au bossage supérieur

$LI_{embossment}$: longueur du bossage inférieur

$zI_{embossment}$: distance de la semelle inférieure au bossage inférieur

h : hauteur du bossage / indentation

ρ : facteur de réduction déterminé pour les bossages

t_{red} : épaisseur réduite

b_{pi} : largeur de référence de la paroi

$b_{i,eff}$: largeur efficace de la paroi

A_g : aire de la section transversale brute

A_{eff} : aire de la section transversale efficace

z_G : position de l'axe neutre

σ_{xx} : contrainte

χ_d : coefficient de réduction pour la résistance au flambement par distorsion

$M_{c,Rd}$: moment résistant

M_{span} : moment résistant en travée

e_c : distance entre la semelle comprimée et la position de l'axe neutre

s_n : largeur de la partie de l'âme entre la semelle comprimée et la position de l'axe neutre

s_{eff} : largeur efficace de l'âme

W_{eff} : module d'inertie de la section efficace

$R_{w,Rd}$: résistance transversale locale de l'âme

1. INTRODUCTION

Cet exemple montre comment traiter les plaques nervurées avec des bossages longitudinaux (indentations) lorsqu'on détermine la résistance en flexion et la résistance d'appui d'une plaque avec deux raidisseurs dans la semelle.

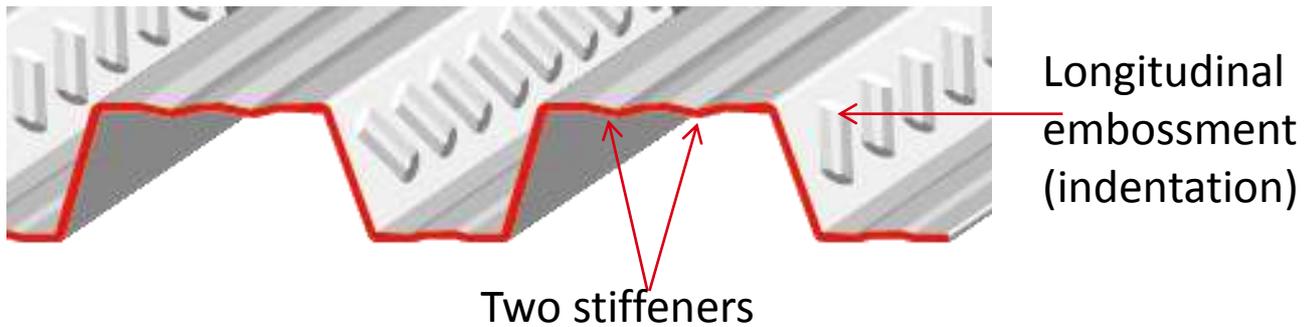


Figure 1.1 - Plaque nervurée avec deux raidisseurs dans la semelle supérieure et avec des bossages longitudinaux (indentations)

1.1. Section transversale de la plaque nervurée

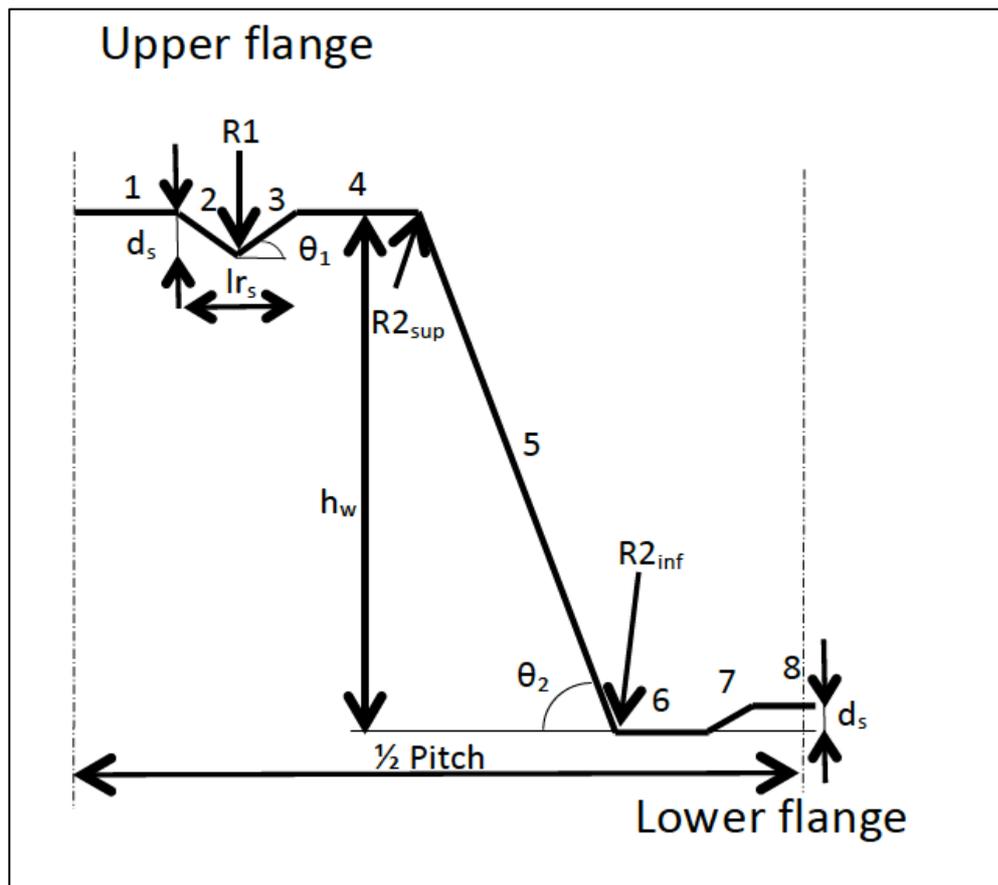


Figure 1.1.1 - Numéros des éléments

1.2. Caractéristiques de la plaque nervurée

Cet exemple est basé sur le calcul de la résistance au moment en travée et de la réaction d'appui d'extrémité pour un profil ayant les caractéristiques suivantes:

R1 (mm)	θ_1 (rad)	R2 _{sup} (mm)	R2 _{inf} (mm)	θ_2 (rad)	t _{nom} (mm)	t (mm)
0,00	0,20	5,00	5,00	1,26	0,75	0,71

Pitch (mm)	hw (mm)	d _s (mm)	lr _s (mm)	d _i (mm)	f _{yb} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	γ_{M0}
207,00	60,00	2,50	25,00	1,00	320,00	210000,00	1,00

hS _{embossment} (mm)	hI _{embossment} (mm)	zS _{embossment} (mm)	zI _{embossment} (mm)
16.97	16.97	41.25	18.75

Tableau 1.2.1 – Caractéristiques de la plaque nervurée

Element	b _{pi} (mm)
1	8.50
2	12.75
3	12.75
4	20.00
5	61.70
6	20.50
7	1.41
8	9.00

Tableau 1.2.2 - Dimensions des éléments

Vérification des proportions géométriques

b = 107; t = 0.71; h = 60; f_y = 320

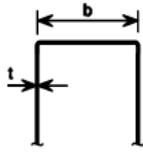
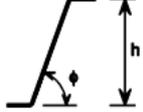
	b/t=	94,37		b/t ≤ 500
	θ_2 =	72,00		
	h/t=	84,51		45° ≤ φ ≤ 90°
	500sin(θ2)=	475,52		
	r < 0,04 t E / f _y	18,64		h/t ≤ 500 sinφ

Tableau 1.2.3 – Vérification des proportions géométriques

1.3. Dimensions des bossages

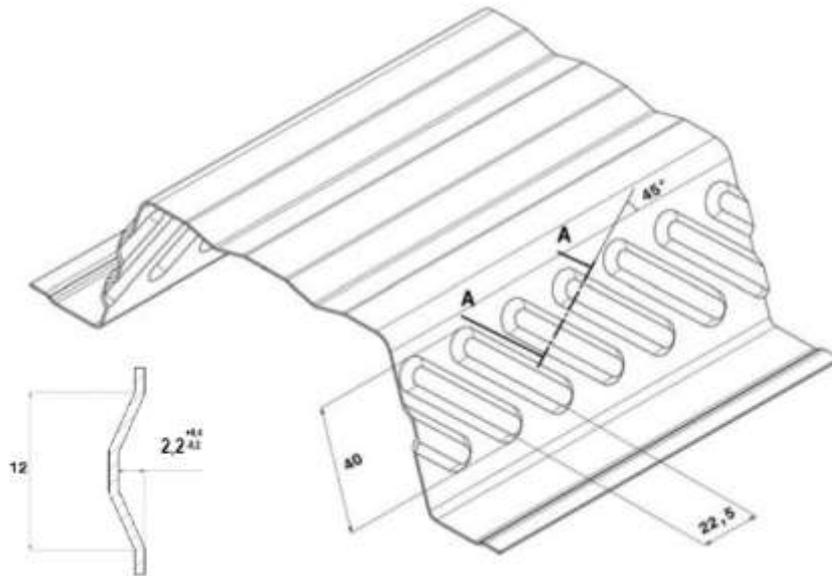


Figure 1.3.1 – Profil calculé

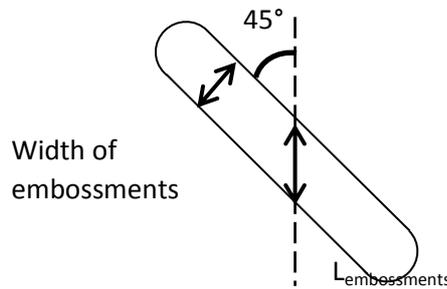


Figure 1.3.2 - Longueur des bossages longitudinaux (indentations)

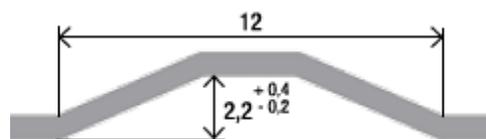


Figure 1.3.3 - Hauteur des bossages

Le domaine de validité est vérifié

$$0.71 \text{ mm} \leq t_{\text{cor}} = 0.75 \leq 1.21 \text{ mm}$$

$$h=2.2 \leq 4,0 \text{ mm}$$

$$30^\circ \leq \alpha=0.45 \leq 60^\circ$$

$L_{\text{embossments}} = \text{Largeur} / \sin (45^\circ)$ où Largeur = 12 mm

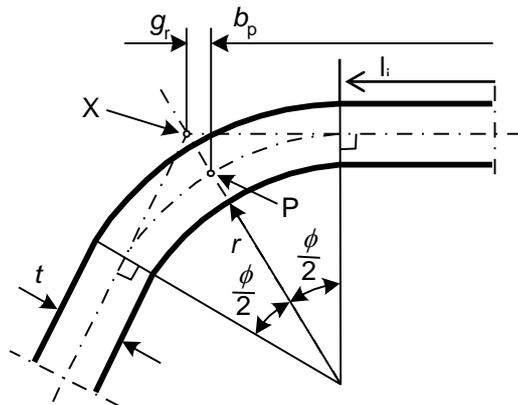
Donc $L_{\text{embossments}} = 16.97 \text{ mm}$

2. CALCUL DE L'AIRE DE LA SECTION TRANSVERSALE BRUTE

A_g

A_g est la somme des aires de chaque élément (longueur x t)

longueur = $l_i = b_p - r_m \times \sin\pi/4$



(a) midpoint of corner or bend

X is intersection of midlines

P is midpoint of corner

$$r_m = r + t/2$$

Figure 2.1 – Largeurs de référence des sections transversales de parois b_p tenant compte des rayons d'arrondi

Element	l_i (mm)	A_i (mm ²)	z (mm)	S_i (mm ³)	z_0 (mm)
1	8.5	6.0	60.0	362.1	-25.3
2	12.7	9.1	58.8	531.7	-24.0
Corner 1	0.0	0.0	57.5	0.0	-22.8
3	12.7	9.1	58.8	531.7	-24.0
4	17.1	12.1	60.0	726.8	-25.3
Corner 2 _{sup}	6.3	4.5	58.8	262.2	-24.1
5	55.8	39.6	30.0	1189.1	4.7
Corner 2 _{inf}	6.3	4.5	1.2	5.4	33.5
6	16.9	12.0	0.0	0.0	34.7
7	1.4	1.0	0.5	0.5	34.2
8	9.0	6.4	1.0	6.4	33.7
TOTAL		104.2		3616.0	34.7

Tableau 2.1 - Dimensions des éléments

$$A_g = 104.2 \text{ mm}^2$$

$$\text{Position de l'axe neutre: } z_G = S / A_g = 34,7 \text{ mm}$$

3. CALCUL DE L'AIRE DE LA SECTION TRANSVERSALE EFFICACE A_{eff}

A_{eff} est la somme des aires efficaces de chaque élément.

3.1. Etape 1

Aire de la section transversale efficace de la semelle supérieure

La semelle supérieure possède 2 raidisseurs donc la section transversale efficace de la semelle est calculée conformément à l'EN 1993-1-3 § "5.5.3.4.2 Semelles munies de raidisseurs intermédiaires"

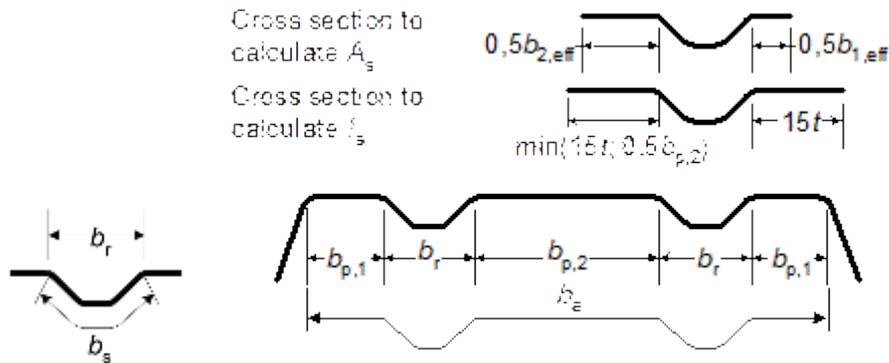


Figure 3.1.1 - Semelle avec deux raidisseurs

La contrainte dans la semelle supérieure est $\sigma_{com} = f_{yb} \times (h_w - z_G) / z_G = 233 \text{ N} / \text{mm}^2$

$$b_{p,1} = 20 \text{ mm}$$

$$\lambda_{p1} = b_{p1}/t/(28.4 \epsilon k_\sigma^{1/2}) \text{ avec } \epsilon = (235/f_{yb})^{1/2}$$

$$\psi = \sigma_2/\sigma_1 = 1 \rightarrow \text{Coefficient } k_\sigma = 4$$

$$\lambda_{p1} = 0.579$$

$$\lambda_{pred1} = \lambda_{p1} \times \sqrt{\frac{\sigma_{com}}{f_y/\gamma_{M0}}} \rightarrow \lambda_{pred1} = 0.494$$

$$\lambda_{pred1} \leq 0.673 \rightarrow \rho = 1$$

$$b_{1,eff} = \rho * b_{p1} = 20 \rightarrow \boxed{0,5 b_{1,eff} = 10 \text{ mm}}$$

$$b_{p,2} = 17 \text{ mm}$$

$$\lambda_{p1} = b_{p1}/t/(28.4 \epsilon k_\sigma^{1/2}) \text{ avec } \epsilon = (235/f_{yb})^{1/2}$$

$$\psi = \sigma_2/\sigma_1 = 1 \rightarrow \text{Coefficient } k_\sigma = 4$$

$$\lambda_{p2} = 0.492$$

$$\lambda_{pred2} = \lambda_{p2} \times \sqrt{\frac{\sigma_{com}}{f_y/\gamma_{M0}}} \rightarrow \lambda_{pred2} = 0.420$$

$$\lambda_{pred2} \leq 0.673 \rightarrow \rho = 1$$

$$b_{2,eff} = \rho * b_{p2} = 17 \rightarrow \boxed{0,5 b_{2,eff} = 8.5 \text{ mm}}$$

Raidisseurs dans la semelle supérieure:

La section transversale d'un raidisseur est calculée conformément à l'EN 1993-1-3 § "5.5.3.3 Parois munies de raidisseurs intermédiaires »

Calcul de la contrainte critique de flambement $\sigma_{cr,s}$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4,2 k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s t^3}{8 b_1^2 (3 b_e - 4 b_1)}}$$

$$b_s = 25.5 \text{ mm}, b_r = 25 \text{ mm}$$

$$b_e = 2b_{p,1} + b_{p,2} + 2b_s = 108 \text{ mm}$$

$$b_1 = b_{p,1} + 0,5 b_r = 32.5 \text{ mm}$$

Calcul de A_s

Element	l_i (mm)	A_i (mm ²)
plane part of 0.5 $b_{2\text{eff}}$	8,50	6,0
2	12,75	9,1
Corner 1	0,00	0,0
3	12,75	9,1
plane part of 0.5 $b_{1\text{eff}}$	10,00	7,10
TOTAL		31,2

Tableau 3.1.1 - Longueur et aire des éléments

$$A_s = 31.2 \text{ mm}^2$$

Calcul de I_s

Element	l_i (mm)	A_i (mm ²)	z (mm)	S_i (mm ³)	z_0 (mm)	h	I_i (mm ⁴)
plane part of min(15t;0.5 $b_{2\text{eff}}$)	8,50	6,0	0,0	0,0	0,7	0,7	3,3
2	12,75	9,1	1,3	11,3	-0,5	2,5	7,3
Corner 1	0,00	0,0	2,5	0,0	-1,8	0,0	0,0
3	12,75	9,1	1,3	11,3	-0,5	2,5	7,3
plane part of 15t	10,65	7,6	0,0	0,0	0,7	0,7	4,2
TOTAL		31,7		22,6	0,7		22,1

Tableau 3.1.2 - Longueur et moment d'inertie des éléments

$$I_s = 22.1 \text{ mm}^4$$

$$l_b = 3,65 \sqrt[4]{I_s b_1^2 (3 b_e - 4 b_1) / t^3}$$

$$l_b = 217.8$$

$$s_w = 61.7$$

$$l_b / s_w = 3.5 \geq 2 \rightarrow k_w = k_{w0}$$

$$k_{wo} = \sqrt{\frac{(2 b_e + s_w) (3 b_e - 4 b_l)}{b_l (4 b_e - 6 b_l) + s_w (3 b_e - 4 b_l)}}$$

$$k_{wo} = 1.65$$

contrainte critique de flambement $\sigma_{cr,s} = 103 \text{ N/mm}^2$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb}/\sigma_{cr,s}}$$

$$\bar{\lambda}_d = 1,77$$

$$\bar{\lambda}_d \geq 1,38 \rightarrow \chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d}$$

Coefficient de réduction pour la résistance au flambement par distorsion $\chi_d = 0,374$

$$\text{Epaisseur réduite } t_{red} = C_d t \frac{f_{yb}/g_{M0}}{S_{com,Ed}}$$

Epaisseur réduite $t_{red} = 0.36 \text{ mm}$

Aire de la section transversale efficace de l'âme

L'aire de la section efficace de l'âme est calculée conformément à la section "5.5.3.4.3 Ames avec au plus deux raidisseurs intermédiaires" de l'EN 1993-1-3

La plaque nervurée possède des bossages longitudinaux (indentations) (Figure 3.1.2). La largeur efficace des éléments plats avec des bossages (Figure 8.2.7) est d'abord calculée conformément à la section 5.5.1(2) de l'EN 1993-1-3.

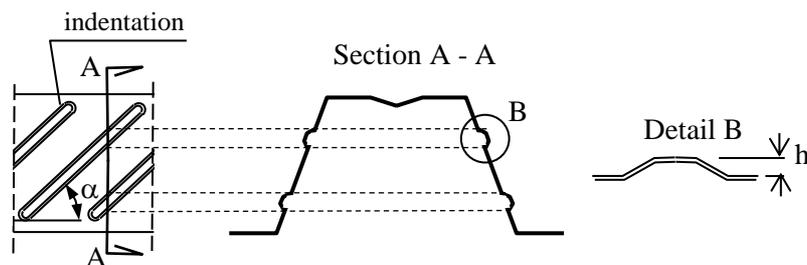


Figure 3.1.2 – Plaque avec des bossages longitudinaux (indentations)

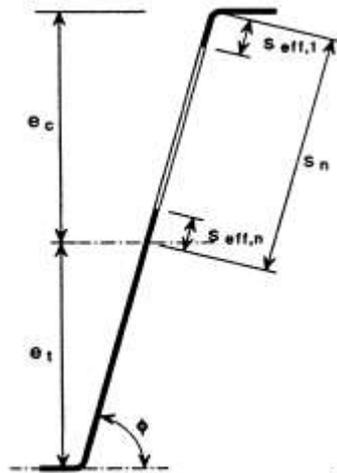


Figure 3.1.3 - Section transversale efficace de l'âme

$$e_c = h_w - z_G = 25,3 \text{ mm} \rightarrow s_n = 25,9 \text{ mm}$$

$$\sigma_{\text{com}} = f_{yb} \times (h_w - z_G) / z_G = 233 \text{ N} / \text{mm}^2$$

Les valeurs de la section efficace sont définies itérativement →

$$s_{\text{eff},0} = 0,95 t \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0} \sigma_{\text{com,Ed}}}}$$

$$\rightarrow s_{\text{eff},0} = 20,24 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},1} = s_{\text{eff},0} \rightarrow s_{\text{eff},1} = 20,24 \text{ mm}$$

$$s_{\text{eff},n} = 1,5 s_{\text{eff},0} \rightarrow s_{\text{eff},n} = 30,4 \text{ mm} \rightarrow s_{\text{eff},1} + s_{\text{eff},n} \geq l' \text{ âme est pleinement efficace}$$

$$s_{\text{eff},1} = 0,4 s_n$$

$$s_{\text{eff},n} = 0,6 s_n$$

Aire de la section transversale efficace de la semelle inférieure

Dans ce cas la semelle inférieure est en tension → toute la largeur est efficace

Aire de la section transversale efficace totale

Calcul de A_{eff}

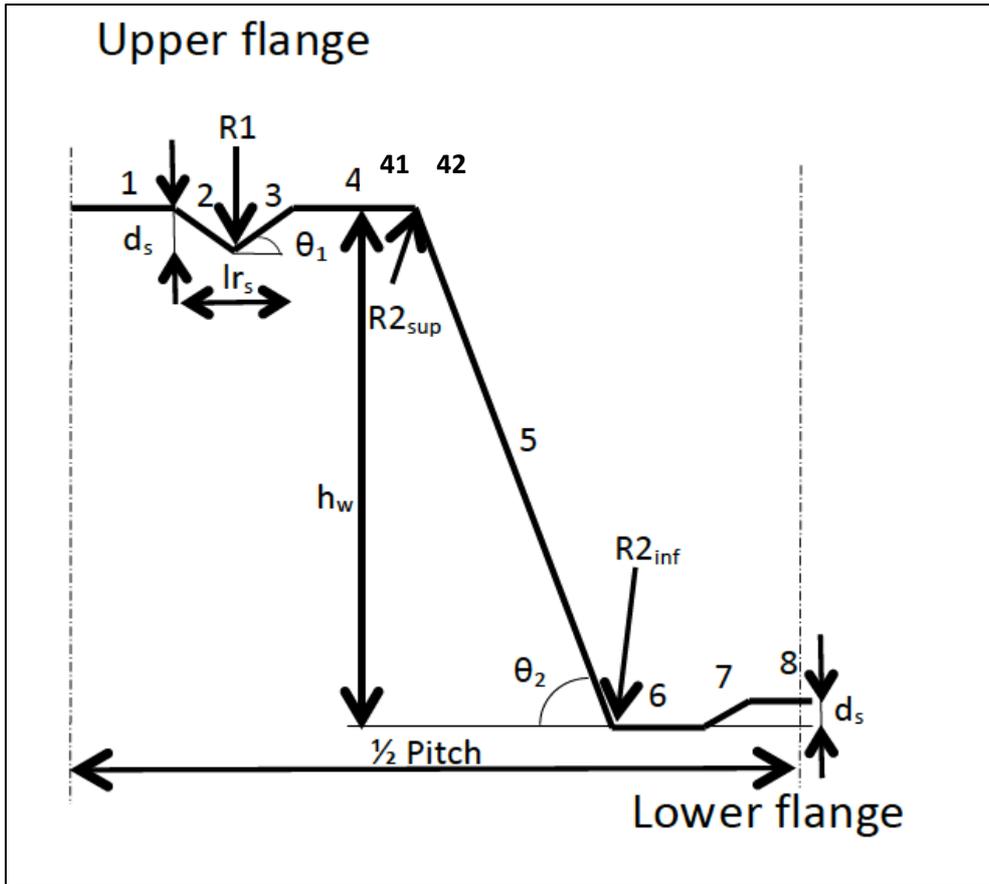


Figure 3.1.4 – Numéros des éléments

Elément	l_i (mm)	t_{eff}	A_i (mm ²)	z (mm)	S_i (mm ³)	$z0$ (mm)
1	8.50	0.36	3.1	60.0	185.8	-29.5
2	12.75	0.36	4.6	58.8	272.9	-28.2
Corner 1	0.00	0.36	0.0	57.5	0.0	-27.0
3	12.75	0.36	4.6	58.8	272.9	-28.2
41	10.00	0.36	3.6	60.0	218.6	-29.5
42	7.06	0.71	5.0	60.0	300.8	-29.5
Corner 2 _{sup}	6.28	0.71	4.5	58.8	262.2	-28.3
5	55.82	0.71	39.6	30.0	1189.1	0.5
Corner 2 _{inf}	6.28	0.71	4.5	1.2	5.4	29.3
6	16.87	0.71	12.0	0.0	0.0	30.5
7	1.41	0.71	1.0	0.5	0.5	30.0
8	9.00	0.71	6.4	1.0	6.4	29.5
TOTAL			89.0		2714.6	30.5

Tableau 3.1.3 –Longueur et aire des éléments

$$A_{\text{eff}} = 89 \text{ mm}^2$$

Position de l'axe neutre de la section efficace: $z_G = 30,5 \text{ mm}$

3.2. Iteration: Etape 2

Dans l'étape suivante la nouvelle position de l'axe neutre de la section efficace est prise pour calculer la nouvelle contrainte σ_{com} .

L'aire de la section transversale efficace de la semelle supérieure est calculée comme dans l'étape 1 mais en prenant la nouvelle contrainte σ_{com} calculée avec la nouvelle position de l'axe neutre z_c

Toutes les valeurs de l'étape 2 sont indiquées dans le tableau suivant.

		2nd step
Upper flange	σ_{com}	309
	ρ pour b 2,eff	1
	$0,5 b_{2,\text{eff}}$	8.50
	ρ pour b 1,eff	1
	$0,5 b_{1,\text{eff}}$	10.00
Upper flange stiffener	$\sigma_{cr,s}$	102.7
	χ_d	0.37
	t_{red}	0.27

Tableau 3.2.1 – Valeurs de la 2^{nde} étape pour la semelle supérieure

Aire de la section transversale efficace de l'âme

Les valeurs de l'étape 2 pour l'âme sont indiquées dans le tableau suivant.

Web	e_c	29.5
	S_n	30.3
	$S_{\text{eff},0}$	17.6
	$S_{\text{eff},1}$	17.6
	$S_{\text{eff},n}$	26.4
	$S_{\text{eff},1} + S_{\text{eff},n}$	43.9
		entire web is effective
	$S_{\text{eff},1}$	0,4sn
	$S_{\text{eff},n}$	0,6sn

Tableau 3.2.2 – Valeurs de la 2^{nde} étape pour l'âme

Les indentations sont considérées comme des éléments plats ayant une épaisseur réduite $t_{\text{red}} = \rho \times 0,71$ pour la longueur $L_{\text{embossments}}$ (Fig 1.3.2)

Détermination du coefficient ρ pour les bossages.

$\rho = A \cdot h + B$, A et B sont les coefficients définis dans le tableau 3.2.1

Type of local deformation	t (mm)	h (mm)	A	B	
Indentation	0.71	0 - 1.5	-0.533	1.000	
		1.5 - 2.75	-0.112	0.368	
		2.75 - 4.0	-0.025	0.128	
	0.96	0 - 1.5	-0.467	1.000	
		1.5 - 2.75	-0.186	0.580	
		2.75 - 4.0	-0.020	0.122	
		1.21	0 - 1.5	-0.401	1.000
			1.5 - 2.75	-0.260	0.792
			2.75 - 4.0	-0.015	0.116
Embossment	0.71	0 - 1.5	-0.267	1.000	
		1.5 - 2.75	-0.056	0.684	
		2.75 - 4.0	-0.013	0.564	
	0.96	0 - 1.5	-0.234	1.000	
		1.5 - 2.75	-0.093	0.790	
		2.75 - 4.0	-0.010	0.561	
	1.21	0 - 1.5	-0.201	1.000	
		1.5 - 2.75	-0.130	0.896	
		2.75 - 4.0	-0.008	0.558	

Tableau 3.2.3 - Valeurs des coefficients A et B

Pour $t=0.71$ mm et $h= 2,2$ mm ($1.5 < h < 2.75$) $\rightarrow A = - 0,112$; $B = 0.368$

$$\rho = 0,122$$

Epaisseur réduite des bossages $t_{red} = 0,122 \times 0,71 = 0,087$ mm pour la longueur $L_{embossments}$ (Fig 1.3.2)

La section transversale pour le calcul de la section efficace doit être positionnée de manière à provoquer l'effet le plus défavorable. Le calcul est effectué dans différentes sections transversales, la section qui induit la réduction la plus importante du moment résistant est la section qui coupe symétriquement 2 bossages comme sur la Fig. 3.2.1.

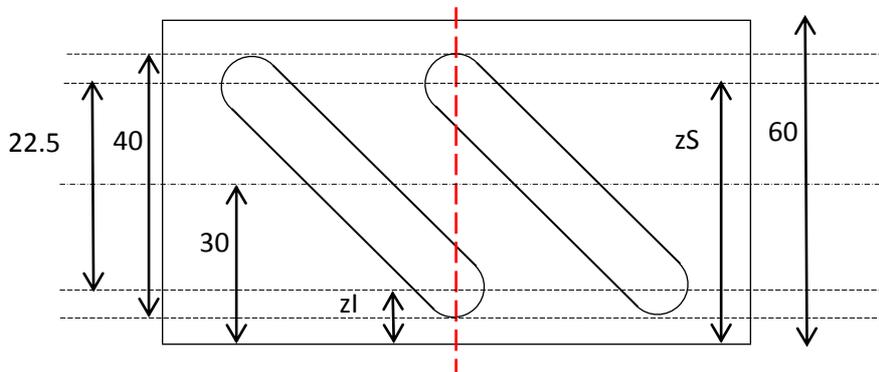


Figure 3.2.1 - Section de calcul

$$zS = 60/2 + 22.5/2 = 41.25$$

$$zI = 60/2 - 22.5/2 = 18.75$$

Aire de la section transversale efficace de la semelle inférieure

Dans ce cas la semelle inférieure est en tension → toute la largeur est efficace

Aire de la section transversale efficace totale

Calcul de A_{eff}

Elément	l_i (mm)	t_{eff}	A_i (mm ²)	z (mm)	S_i (mm ³)	$z0$ (mm)
1	8.50	0.27	2.3	60.0	140.1	-31.1
2	12.75	0.27	3.5	58.8	205.7	-29.8
Corner 1	0.00	0.27	0.0	57.5	0.0	-28.6
3	12.75	0.27	3.5	58.8	205.7	-29.8
41	10.00	0.27	2.7	60.0	164.8	-31.1
42	7.06	0.71	5.0	60.0	300.8	-31.1
Corner 2 _{sup}	6.28	0.71	4.5	58.8	262.2	-29.9
5	55.82	0.71	39.6	30.0	1189.1	-1.1
Embossment S	-16.97	0.71	-12.0	41.3	-497.0	-12.3
	16.97	0.09	1.5	41.3	60.9	-12.3
Embossment I	-16.97	0.71	-12.0	18.8	-225.9	10.2
	16.97	0.09	1.5	18.8	27.7	10.2
Corner 2 _{inf}	6.28	0.71	4.5	1.2	5.4	27.7
6	16.87	0.71	12.0	0.0	0.0	28.9
7	1.41	0.71	1.0	0.5	0.5	28.4
8	9.00	0.71	6.4	1.0	6.4	27.9
TOTAL			63.9		1846.4	28.9

Tableau 3.2.4 - Longueur et aire des éléments

$$A_{eff} = 63,9 \text{ mm}^2$$

La position de l'axe neutre de la section efficace est: $z_G = 28,9 \text{ mm}$

3.3. Itération: Etape 3

Toutes les valeurs de l'étape 3 sont indiquées dans le tableau suivant. La convergence est considérée satisfaisante à l'étape 3, l'itération s'arrête à l'étape 3.

		3rd step
Upper flange	σ_{com}	320
	ρ pour b _{2,eff}	1
	0,5 b _{2,eff}	8.50
	ρ pour b _{1,eff}	1
	0,5 b _{1,eff}	10.00
Upper flange stiffener	$\sigma_{cr,s}$	102.7
	χ_d	0.37
	t _{red}	0.27
Web	e _c	31.1
	S _n	32.0
	S _{eff,0}	16.7
	S _{eff,1}	16.7
	S _{eff,n}	25.0
	S _{eff,1} + S _{eff,n}	41.6
		entire web is effective
	S _{eff,1}	0,4sn
	S _{eff,n}	0,6sn
Total effective Area	A _{eff}	63.5
Position of neutral axis	z _c	28.7

Tableau 3.3.1 – Valeurs de l'étape 3

4. CALCULATION DU MOMENT RESISTANT

Le moment résistant est calculé avec les valeurs de l'étape 3

Elément	l _i (mm)	t _{eff}	A _i (mm ²)	z(mm)	S _i (mm ³)	z ₀ (mm)	h	I _i (mm ⁴)
1	8,50	0,27	2,3	60,0	135,4	-31,3	0,7	2209,5
2	12,75	0,27	3,4	58,8	198,8	-30,0	2,5	3055,7
Corner 1	0,00	0,27	0,0	57,5	0,0	-28,8	0,0	0,0
3	12,75	0,27	3,4	58,8	198,8	-30,0	2,5	3055,7
41	10,00	0,27	2,7	60,0	159,3	-31,3	0,7	2599,4
42	7,06	0,71	5,0	60,0	300,8	-31,3	0,7	4908,6
Corner 2 _{sup}	6,28	0,71	4,5	58,8	262,2	-30,1	0,0	4039,5
5	55,82	0,71	39,6	30,0	1189,1	-1,3	53,1	9375,7
Embossment S	-16,97	0,71	-12,0	41,3	-497,0	-12,5	16,1	-2156,2
	16,97	0,09	1,5	41,3	60,9	-12,5	16,1	264,0
Embossment I	-16,97	0,71	-12,0	18,8	-225,9	10,0	16,1	-1456,9
	16,97	0,09	1,5	18,8	27,7	10,0	16,1	178,4
Corner 2 _{inf}	6,28	0,71	4,5	1,2	5,4	27,5	0,0	3377,1
6	16,87	0,71	12,0	0,0	0,0	28,7	0,7	9872,1
7	1,41	0,71	1,0	0,5	0,5	28,2	1,0	799,2
8	9,00	0,71	6,4	1,0	6,4	27,7	0,7	4906,9
TOTAL			63,5		1822,3	28,7		45028,6

Tableau 4.1 – Valeurs de l'étape 3

$$M_{c,Rd} = W_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0}$$

Pour 1/2 pas $I_{eff} = 45029 \text{ mm}^4$

Pour le profil $I_{eff} = 435 \text{ mm}^3$

$$v = \max(28,7; 31,3) = 31,3 \text{ mm}$$

$$W_{eff} = I_{eff} / v = 13.9 \text{ mm}^3$$

$$M_{span} = 4,4 \text{ kNm/m}$$

5. CALCUL DE LA REACTION D'APPUI D'EXTREMITE

Il convient de déterminer la résistance transversale locale d'une plaque nervurée avec des bossages longitudinaux (indentations) à partir de la formule usuelle (6.18) de l'EN 1993-1-3.

$$R_{w,Rd} = \alpha t^2 \sqrt{f_{yb} E} (1 - 0,1\sqrt{r/t}) \left[0,5 + \sqrt{0,02 l_a / t} \right] (2,4 + (\phi/90)^2) / \gamma_{M1} \quad (6.18)$$

Dans ce cas la réaction d'appui d'extrémité est avec $c \leq 1,5 h_w$ par rapport à l'extrémité libre donc il s'agit de la Catégorie 1

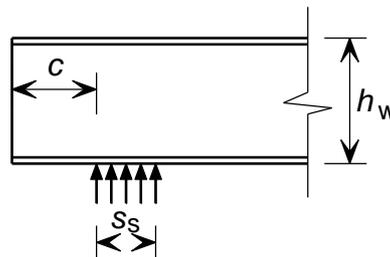


Figure 5.1 - Réaction de l'appui d'extrémité avec $c \leq 1,5 h_w$: Catégorie 1

Pour la Catégorie 1 pour les plaques nervurées $\alpha = 0,075$ and $l_a = 10\text{mm}$

$$t = 0,71 \text{ mm}$$

$$r = 5 \text{ mm}$$

$$\phi = 72$$

Par âme : $R_{w,Rd} = 713 \text{ N}$

Pas = 207 mm

Par mètre: $R_{w,Rd} = 6,9 \text{ kN/m}$

Annexe 1

Background pour la nouvelle méthode de dimensionnement des plaques nervurées avec bossages

D1.1	GRISPE WP1 Background document	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.2	GRISPE WP1 Test programme definition	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.3	GRISPE Test report of steel trapezoidal sheeting with and without embossments and outward stiffeners	Christian FAUTH (KIT)
D1.4	GRISPE WP1 Test analysis and interpretation	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)
D1.5	GRISPE Background guidance for EN 1993-1-3 to design of sheeting with embossments and indentations	Anna PALISSON (Sokol Palisson Consultants)