

GRISPE PLUS



VALORISATION OF KNOWLEDGE
FOR SPECIFIC PROFILED STEEL SHEETS

WP N°: 3

WP Title: eLectures

Deliverable N°: 3.1 (4)

Deliverable Title: Design manual

Deliverable Date: 30th September 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)

Thibault RENAUX, JORIS IDE

Drafting history

FINAL DRAFT – DATE: 29th of September 2018

FINAL VERSION – DATE: 8th of October 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)	



DESIGN MANUAL FOR CORRUGATED SHEETING

RFCS funded – agreement N° 754092

FRENCH TRANSLATION

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.

RESUMÉ

L'objectif de ce manuel de calcul est de présenter une nouvelle méthode analytique de dimensionnement de tôles d'acier ondulées, 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 de tôles d'acier ondulées est basée sur des essais réalisés dans le cadre du projet Européen GRISPE (2013-2016).

Le contexte de cette méthode peut être trouvé au sein des livrables D2.5 du projet GRISPE.

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 prédimensionnement ainsi que les exigences technologiques minimales à respecter incluant la structure porteuse, les caractéristiques des profils et les assemblages.

Le chapitre 3 fournit les exigences technologiques de base.

Le chapitre 4 énumère les propriétés des matériaux des profils et des fixations.

Le chapitre 5 indique les actions qui doivent être considérées (poids propre, etc.) et leurs combinaisons.

Le chapitre 6 explique en détail la nouvelle méthode de calcul (principes, champ d'application, et description de la façon d'appliquer les différentes nouvelles formules).

Le chapitre 7 dresse la liste des considérations spécifiques de dimensionnement non couvertes par le présent manuel (feu, sismique, aspect environnemental, thermique, acoustique, etc.).

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

Une bibliographie ainsi que l'amendement proposé à la norme EN 1993-1-3 sont inclus.

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 Thibault RENAUX 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	Italy
David IZABEL	France
Markus KUHNENNE	Germany
Anna PALISSON	France
Valérie PRUDOR	France
Irene PUNCELLO	Italy
Dominik PYSCHNY	Germany
Thibault RENAUX	France
Daniel SPAGNI	France

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

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

FIGURES & TABLEAUX

Les figures et tableaux ont été réalisés par les organismes et sociétés suivants :

Figure 1.1.1	JORIS IDE
Figure 1.1.2	JORIS IDE
Figure 1.2.1	JORIS IDE
Figure 1.2.2	Copie de l'EN 1993-4-1
Figure 1.2.3	Copie du StBK-N5
Figure 1.3.1	KIT / JORIS IDE
Figure 1.3.2	KIT / JORIS IDE
Table 1.3	KIT
Figure 1.3.3	KIT
Figure 1.3.4	KIT
Figure 1.3.5	KIT
Figure 6.3.1.1	Copie du StBK-N5
Figure 6.3.1.2	Copie du StBK-N5
Figure 8.2	JORIS IDE
Figure 8.4.3.1	JORIS IDE
Figure 8.4.3.2	Copie du StBK-N5
Figure 8.5.2	JORIS IDE

SOMMAIRE

PORTÉE DE L'OUVRAGE	7
NOTATIONS.....	7
1. INTRODUCTION.....	8
1.1. Type de tôle d'acier profilée.....	8
1.2. État de l'art	8
1.3. Principaux résultats du projet GRISPE	11
1.4. Exigences et règles générales de dimensionnement	15
2. CONSIDÉRATION PRÉLIMINAIRE.....	16
2.1. Champ d'application de la nouvelle méthode de dimensionnement	16
2.2. Dispositions technologiques minimales de la trame	16
2.3. Dispositions technologiques minimale de la tôle d'acier	16
3. EXIGENCES TECHNOLOGIQUES DE BASE	16
3.1. Appuis	16
3.2. Tôles profilées et marquage CE	16
4. PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX.....	17
4.1. Tôles d'acier ondulées	17
4.2. Fixations.....	17
4.3. Coefficients de sécurité	17
5. ACTIONS ET COMBINAISONS D'ACTIONS	17
6. BASES DE CALCUL	17
6.1. Principes	17
6.2. Champ d'application de la nouvelle méthode de calcul.....	17
6.3. Procédure de dimensionnement.....	17
6.3.1. Méthode détaillée usuelle de dimensionnement	17
6.3.2. Procédure simplifiée à champ d'application réduit	18
7. CONSIDÉRATION DE DIMENSIONNEMENTS SPÉCIFIQUES	19
8. EXEMPLES DE DIMENSIONNEMENTS	19
8.1. Description de la trame et hypothèses de charges	19
8.1.1. Informations sur l'ouvrage	19
8.1.2. Hypothèses de chargement.....	19
8.2. Description de la tôle d'acier ondulée.....	21
8.3. Vérifications avec la méthode simplifiée.....	21
8.3.1. Chargement	21

Design Manual for corrugated sheeting – FR translation

8.3.2.	Application de la méthode simplifiée	21
8.4.	Vérifications par application de la méthode détaillée	22
8.4.1.	Tôle d'acier ondulée	22
8.4.2.	Application du chargement	22
8.4.3.	Application de la méthode détaillée	22
8.5.	Validation du logiciel	25
8.5.1.	Information logiciel.....	25
8.5.2.	Validation de l'exemple	25
BIBLIOGRAPHIE		28
ANNEXE : PROJET D'AMENDEMENT SOUMIS AU CEN		30

PORTÉE DE L'OUVRAGE

Le but de cet ouvrage est de présenter une nouvelle méthode de dimensionnement de tôles en acier ondulées, au sens de la référence [1], qui a été proposée pour inclusion dans [2].

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 (tel que pour le sismique et le feu), il est nécessaire de suivre les clauses pertinentes des Eurocodes et/ou de la référence [1].

NOTATIONS

En complément des notations de l'EN 1993-1-3, les symboles suivants sont utilisés :

I_y :	moment d'inertie [mm^4/mm]
R :	rayon de courbure [mm]
W_y :	module de section [mm^3/mm]
η :	coefficient de la méthode détaillée pour le calcul de la résistance au moment de flexion [-]
σ_{elr} :	contrainte de flambement [N/mm^2]
σ_c :	contrainte réduite [N/mm^2]

1. INTRODUCTION

1.1. Type de tôle d'acier profilée

Ce manuel de calcul traite des tôles d'acier ondulées (cf. Figure 1.1 ci-dessous). Les tôles d'acier ondulées présentent une courbure continue en lieu et place de sections plates à l'instar des profils trapézoïdaux.

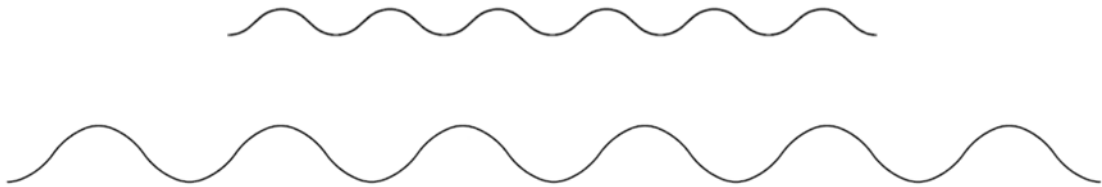


Figure 1.1.1 – Géométrie type de tôles en acier ondulées.

Deux modes de fixations sont couramment utilisés en Europe : fixation en sommet de nervure ou fixation en fond de vallée, telles que sur le Figure 1.1.2 ci-dessous :

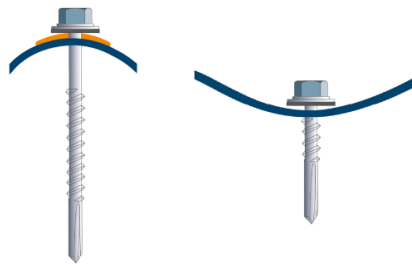


Figure 1.1.2 – Fixation en sommet d'ondulation (à gauche) et fixation en fond de vallée (à droite).

1.2. État de l'art

La norme [2] ne traite pas du dimensionnement analytique de la tôle d'acier ondulée, l'une des plus anciennes tôles d'acier utilisée quotidiennement pour la réalisation de bardages et couvertures pour l'enveloppe de bâtiments en Europe.

Par conséquent, il semblait nécessaire de fournir à l'ingénieur des outils de conception évitant de recourir à des campagnes d'essais. C'était l'objectif de l'une des parties du projet GRISPE.

La théorie de flexion conventionnelle peut être appliquée au dimensionnement de tôles d'acier ondulées car aucun voilement n'est attendu du fait de la courbure continue qui caractérise la section de tels produits.

Sur la base d'une analyse classique de l'inertie géométrique, il est possible dans un premier temps d'établir une méthode de détermination du moment de section de la géométrie typique des tôles d'acier ondulées, telle qu'en Figure 1.1.1, considérant les paramètres suivants :

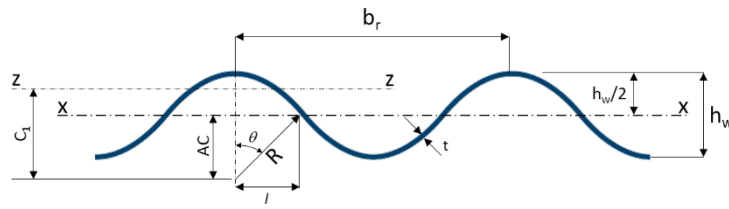


Figure 1.2.1 – Paramètres géométriques pour le moment d’aire usuel d’une tôle ondulée.

Le moment de section peut être déterminé en appliquant la démarche ci-après :

- Rayon de courbure : $R = 5 \cdot h_w / 4$;
- Longueur $l = h_w$;
- Angle θ : $\sin \theta = l / R$;
- Distance entre le centre de gravité de l’arc (axe ‘z-z’) et le centre de l’arc : $C_1 = (R \cdot \sin \theta) / \theta$;
- Distance entre le centre de l’arc et l’axe ‘x-x’: $AC = R - (h_w / 2)$;
- Moment de section pour un quart de la section brute :

$$I'_{xx} = R^3 \cdot \left(\frac{\theta + \sin \theta \cdot \cos \theta}{2} - \frac{(\sin \theta)^2}{\theta} \right) + (R \cdot \theta) \left[C_1 - \left(R - \frac{h_w}{2} \right) \right]^2$$

Dès lors, le module de section est obtenu par :

$$W_{xx} = \frac{4 \cdot I'_{xx} \cdot t}{b_r \cdot h_w / 2}$$

Au sein de la norme Allemande [3], plusieurs caractéristiques statiques sont fournies en fonction d’une gamme de valeurs du rapport entre la hauteur et le rayon de courbure pour laquelle aucun flambement n’est attendu.

Dans l’article [4], nous pouvons trouver une méthode de calcul développée à partir d’une comparaison avec une modélisation éléments finis. Cette méthode ; qui correspond à la procédure usuelle de traitement de problèmes de voilement ; contient des paramètres calibrés via comparaison avec un calcul éléments finis et consiste à déterminer un facteur de réduction qui aboutit au calcul de la contrainte de pression d’un segment de cylindre. Il reste alors à vérifier que les tôles d’acier ondulées sont couvertes par le champ d’application de l’étude menée par le CTICM. Les différentes étapes sont illustrées ci-dessous :

- Paramètre de courbure : $Z = b^2 / (R \cdot t)$, avec b la longueur de l’arc (largeur de tôle ondulée), R le rayon de courbure et t l’épaisseur ;
- Contrainte critique d’Euler :

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 \cdot E}{12(1-\nu^2)} \cdot \left(\frac{t}{b} \right)^2 ;$$

- Coefficient de voilement :

$$k_c^{(Z)} = \frac{k_c^{plate}}{2} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{48 \cdot (1-\nu^2)}{\pi^4 \cdot (k_c^{plate})^2} \cdot Z^2} \right) \text{ et } k_c^{plate} = 4 ;$$

- Contrainte de voilement critique :

$$\sigma_{cr}^{(Z)} = k_c^{(Z)} \cdot \sigma_E ;$$

- Elancement réduit : $\bar{\lambda} = \sqrt{f_y / \sigma_{cr}^{(Z)}} ;$
- Paramètres intermédiaires pour le calcul du facteur de réduction χ : $\bar{\lambda}_0 = 0,33$, $\beta = 0,73$ et α_Z donné par un tableau en fonction de Z ;
- Facteur de réduction :

$$\chi = \frac{2\beta}{\beta + \bar{\lambda} + \sqrt{(\beta + \bar{\lambda})^2 - 4\beta(\bar{\lambda} - \alpha_Z(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0))}} ;$$

- Contrainte de pression : $\sigma_u = \chi \cdot f_y$.

Un exemple d'application de la méthode de calcul proposée est fourni dans le présent document.

La norme [5], Eurocode pour les silos, fourni des relations pour calculer la rigidité, le second moment de section et le moment résistant de tôles ondulées, comme suit :

- Rigidité de compression axiale :

$$C_y = Et \left(1 + \frac{\pi^2 d^2}{4l^2} \right) ;$$

- Second moment de section : $I_y = 0,13 \cdot t \cdot d^2$ avec la notation des structures en coques et $I_x = 0,13 \cdot t \cdot h_w^2$ avec la notation appliquée dans [2] ;
- Avec le paramétrage géométrique suivant :

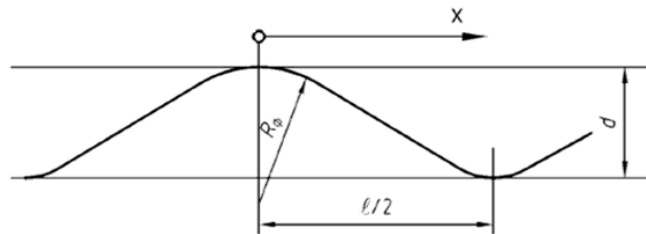


Figure 1.2.2 – Paramétrage géométrique de l'EN 1993-4-1.

Nous pouvons en déduire que le moment résistant $M_{c,Rd}$ peut être obtenu par la relation suivante :

$$M_{c,Rd} = \frac{0,13 \cdot t \cdot h_w^2}{\frac{h_w}{2}} \cdot \frac{f_{yb}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,26 \cdot t \cdot h_w \cdot f_{yb}}{\gamma_{M0}}$$

Le code Suédois [6] contient une approche pour déterminer le moment de flexion ultime de profils ondulés à section transversale sinusoïdale ou similaire, considérant le principe du flambement local.

En fonction du rapport entre le rayon de courbure r et l'épaisseur t de la tôle, le calcul du moment caractéristique est différent.

Si $R/t > 0,04 \cdot E/f_{yb}$: le moment de flexion caractéristique peut être calculé à partir d'une contrainte de compression réduite σ_c : $M_{c,Rk} = W_y \cdot \sigma_c$.

Si $r/t \leq 0,04 \cdot E/f_{yb}$: la section transversale ne nécessite pas d'être vérifiée vis-à-vis du voilement local et le moment de flexion caractéristique est déterminé par : $M_{c,Rk} = W_y \cdot f_{yb}$.

If $r/t > 0,04 \cdot E/f_{yb}$: le moment de flexion caractéristique peut être calculé à partir d'une contrainte de compression réduite par application des étapes suivantes :

- Coefficient η : $\eta = 0,19 + 0,67/\sqrt{1 + r/(100 \cdot t)}$;
- Contrainte de flambement réduite : $\sigma_{elr} = 0,60 \cdot \eta \cdot E \cdot t/r$;
- Élancement : $\alpha = \sqrt{f_{yb}/\sigma_{elr}}$;
- Pour $\alpha \leq 0,30$: $\sigma_c = f_{yb}$;
- Pour $0,30 < \alpha < 1,10$: $\sigma_c = (1,126 - 0,419 \cdot \alpha) \cdot f_{yb}$;
- Et pour $1,10 \leq \alpha$: $\sigma_c = \frac{0,8}{\alpha^2} \cdot f_{yb}$.

Et au final : $M_{c,Rk} = W_y \cdot \sigma_c$.

La Figure 1.2.3 ci-dessous présente l'évolution de la contrainte de compression ultime en fonction de l'élancement utilisé dans [6] :

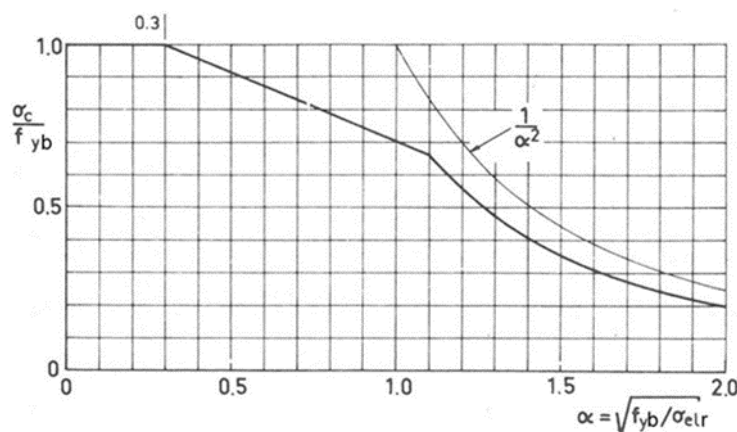


Figure 1.2.3 – Contrainte de compression ultime en fonction du voilement local de la partie cylindrique du profil.

Le moment d'inertie, utilisé pour calculer les déformations aux états limites de service, peut être déterminé considérant le moment caractéristique de flexion avec une contrainte réduite de $f_{yb}/1,5$.

1.3. Principaux résultats du projet GRISPE

Le but du projet GRISPE était de développer un modèle de dimensionnement pour calculer la capacité portante en travée et sur appui ainsi que sous charges locales (résistance à l'appui de rive).

Deux types de profils, représentatifs des tôles d'acier ondulées les plus répandues, ont été sélectionnés pour essais :

- Profil de 18 mm de profondeur avec un rayon de courbure de 23 mm et un pas d'ondulation de 76 mm tel que sur la Figure 1.3.1 ci-dessous :

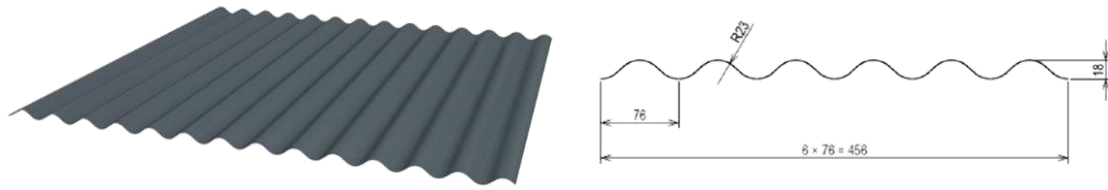


Figure 1.3.1 – Petite tôle d’acier ondulée sélectionnée pour les essais.

- Profil de 46 mm de profondeur avec un rayon de courbure de 29,25 mm et un pas d’ondulation de 150 comme indiqué à la Figure 1.3.2 ci-dessous :

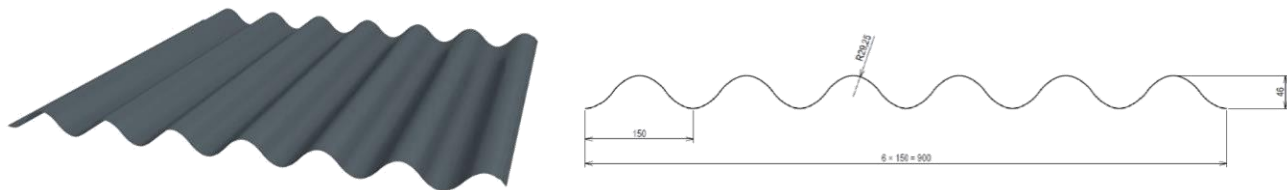


Figure 1.3.2 – Grande tôle d’acier ondulée sélectionnée pour les essais.

Au total, 95 essais ont été menés sur tôles ondulées afin de déterminer le moment de flexion résistant et la capacité de résistance en travée ainsi que sur appui intermédiaire (combinaison entre le moment de flexion et la réaction sur appui) ; incluant des essais isostatiques sous chargement gravitaire (flexion positive), des essais d’appui intermédiaire sous chargement gravitaire et sous chargement de succion, des essais de résistance sur appui de rive ainsi que des essais de résistance au cisaillement sous chargement gravitaire pour la détermination des valeurs caractéristiques de résistance sur appui d’extrémité.

Design Manual for corrugated sheeting – FR translation

Type of test	Thickness [mm]	Support width [mm] / Fastening	Span [mm]		Number of tests	
			18/76	46/150	18/76	46/150
Single span test with gravity loading	0.63	-	1500	2000	3	6
	1.00	-	2000	3000	3	3
Internal support tests with gravity loading	0.63	10	400	600	2	2
			800	1000	2	2
		40	400	600	2	2
			800	1000	2	2
	1.00	10	400	600	2	2
			1000	1200	2	2
		40	400	600	2	2
			1000	1200	2	2
Internal support tests with uplift loading	0.63	valley	400	600	2	2
			800	1000	2	2
		crest	400	600	2	2
			800	1000	2	2
	1.00	valley	400	900	2	2
			1000	1400	2	2
		crest	400	900	2	2
			1000	1400	2	2
End support tests with gravity loading	0.63	-	1000	1050	4	3
	1.00	-	1000	1050	4	3
Shear test	0.63	-	1000	1000	1	1

Table 1.3 – Campagne d’essais menée Durant le projet GRISPE.

Les essais d’appui intermédiaire pour le cas de charges ascendantes ont été divisés en deux séries : l’une pour le mode de fixation en sommet d’ondulation et l’autre pour le mode de fixation en fond de vallée (voir paragraphe 1.1).

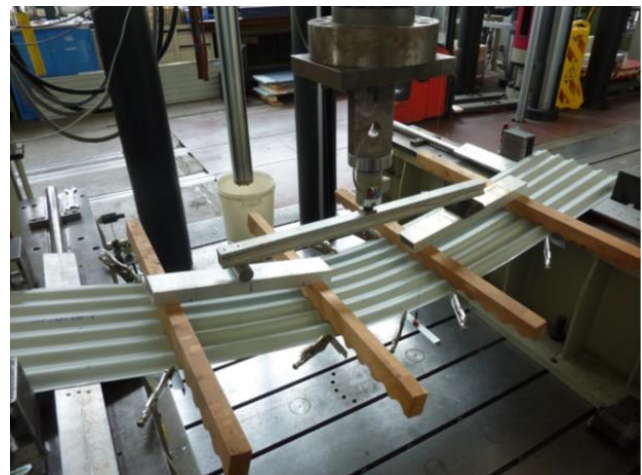
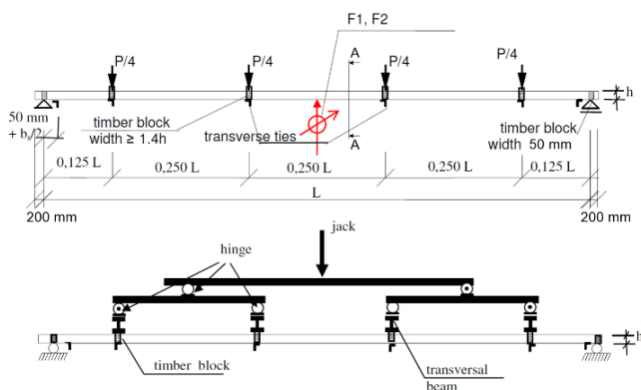


Figure 1.3.3 – Principe schématique de l’essai et exemple de rupture pour un test en travée simple.

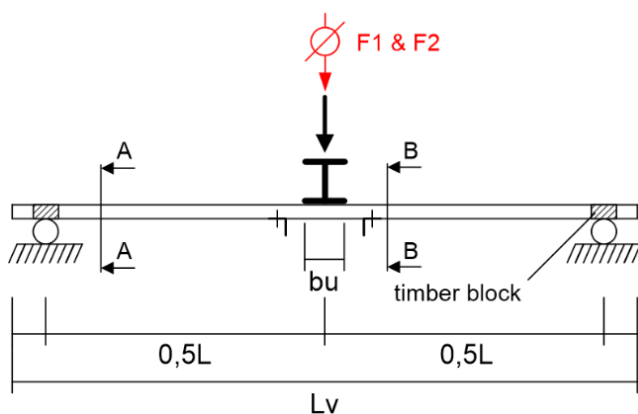


Figure 1.3.4 – Principe schématique de l'essai et exemple de rupture pour un test d'appui intermédiaire simulé avec chargement gravitaire.

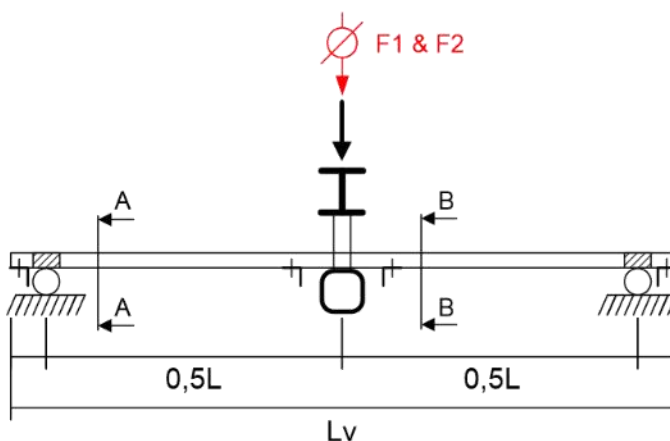
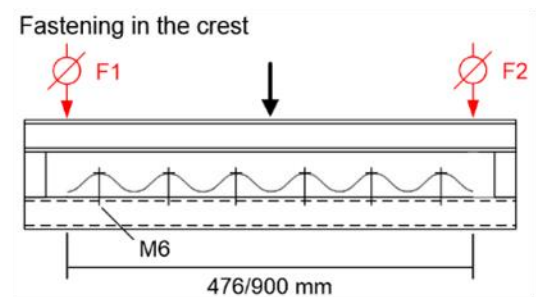
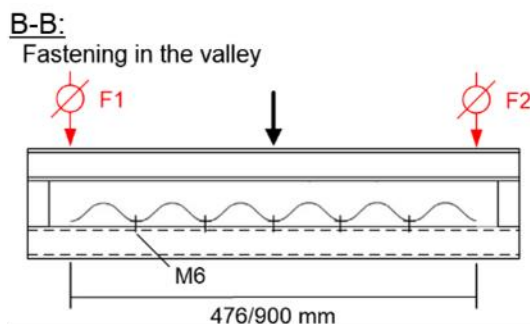


Figure 1.3.5 – Principe schématique de l'essai et exemple de rupture (fixation en fond de vallée) pour un test d'appui intermédiaire simulé avec chargement de succion.

Des séries d'essais de traction ont également été intégrées au plan d'expérimentation afin de déterminer les propriétés matériaux des maquettes. L'analyse et l'interprétation des essais se sont focalisées sur la capacité portante et les valeurs caractéristiques de profils ondulés présentant une section transversale sinusoïdale ou similaire.

Pour le comportement en flexion simple sous chargement en pression, deux formulations sont proposées :

- L'une considérant l'article 4.4 de l'EN 1993-4-1, basée sur une propriété de flexion équivalente (rigidité de flexion) ;
- Et l'autre basée sur l'approche Suédoise (contrainte de flambement).

Une feuille Excel a été développée afin de réaliser le dimensionnement de profils ondulés en flexion grâce à ces deux méthodes.

Concernant le comportement sur appui intermédiaire des profils ondulés, les résultats n'ont pas permis de dégager une loi de comportement claire du fait qu'un nombre trop important de paramètres interfère sur ce comportement, et de fait, des essais complémentaires sont nécessaires pour arriver à une conclusion viable. La réduction du moment de flexion ultime est influencée par les paramètres suivants :

- Rapport R/t de la partie de section transversale en contact avec l'appui ;
- Pas et développée d'ondulation de la section transversale ;
- Largeur et type d'appui ;
- Proportion de la réaction/effort d'appui, localisation et sens de l'effort.

Le fait que la réaction effort/appui agisse comme un effort de pression ou de tension, joue un rôle très important. Si la réaction d'appui agit comme un effort de tension sur la section transversale, il n'y a aucun effet sur le moment de flexion.

Concernant la capacité résistante à l'appui de rive et la capacité résistance au cisaillement, les résultats sont trop disparates pour formuler une règle générale de dimensionnement basée sur des relations algébriques et ce malgré le fait qu'il ait été prouvé que le cisaillement ne soit pas critique pour le dimensionnement.

En résumé : le projet GRISPE a proposé deux méthodes pour la flexion en travée et a conclu, que pour toutes les autres situations en générale, le nombre de paramètres influençant le comportement sur appui était trop important et que de fait, des essais complémentaires conséquents sont nécessaires à l'établissement d'une méthode de dimensionnement sécuritaire.

Il a été décidé que la méthode de calcul développée pour la flexion en travée, pour le comportement de tôles isostatiques, pourrait être transposée dans les Eurocodes.

1.4. Exigences et règles générales de dimensionnement

La méthode de dimensionnement suivante propose uniquement un moyen de déterminer la résistance de calcul M_{Rd} de tôles en acier ondulées sur 2 appuis conformément à la norme [7], son amendement [8] et corrigendum [9]. Les valeurs de calcul des effets des actions doivent être évaluées en conformité de chaque partie concernée de la norme [10] et son corrigendum [11] ; de la norme [12] et son corrigendum [13] et amendement [14] ; de la norme [15] et son corrigendum [16] et amendement [17].

La procédure suivante respecte les règles générales énoncées dans la norme [18] et son corrigendum [19] et amendement [20], et les bases de calcul définies dans la partie 2 de la norme [2] et son corrigendum [21].

2. CONSIDÉRATION PRÉLIMINAIRE

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

Ce manuel présente une méthode de dimensionnement afin de déterminer la résistance de tôles d'acier ondulées conformes à la norme [1].

Cette méthode est établie dans un domaine de dispositions technologiques minimales, voir paragraphes suivants.

Ce manuel ne couvre pas les dispositions de charges de montage et d'entretien.

Les règles de calcul présentées dans ce manuel sont valables uniquement si les tolérances des produits formés à froid se conforment à la norme [2] et à la norme [21].

2.2. Dispositions technologiques minimales de la trame

La tôle d'acier ondulée doit reposer sur 2 appuis sous un chargement uniformément réparti.

Le contact direct de la tôle d'acier nervurée avec du béton n'est pas admis. Un insert métallique est nécessaire.

2.3. Dispositions technologiques minimale de la tôle d'acier

Les tôles profilées doivent avoir une épaisseur nominale constante, sur la totalité de leur longueur, dans les tolérances admises ; et doivent présenter une section transversale uniforme ou effilée sur leur longueur.

Les tôles d'acier ondulées présentent une courbure continue en lieu et place de sections plates à l'instar des profils trapézoïdaux.

L'épaisseur t est l'épaisseur d'acier de calcul (épaisseur d'acier noir extraite moins la tolérance si nécessaire comme spécifié dans la clause 3.2.4 de la norme [2]), sauf indication contraire.

La tôle d'acier doit présenter les paramètres suivants :

- Ratio $r/t \leq 0,1 \cdot E/f_{yb}$;
- Pas d'ondulation : $76 \text{ mm} \leq p \leq 150 \text{ mm}$;
- Hauteur : $18 \text{ mm} \leq h \leq 46 \text{ mm}$;
- Epaisseur minimale d'acier noir : 0,55 mm.

3. EXIGENCES TECHNOLOGIQUES DE BASE

3.1. Appuis

Les appuis sont conformes aux références [18] à [20] pour l'acier ou conformes aux références [22] à [25] pour le bois.

3.2. Tôles profilées et marquage CE

Les tôles en acier profilées sont marquées CE selon la norme [1].

4. PROPRIÉTÉS DES MATÉRIAUX

4.1. Tôles d'acier ondulées

Les propriétés matériaux doivent satisfaire aux exigences formulées par la norme [2], section 3 avec une nuance d'acier minimale S 320 GD + Z.

4.2. Fixations

Les propriétés matériaux doivent satisfaire aux exigences formulées par la norme [2], section 8.

4.3. Coefficients de sécurité

Les coefficients de sécurité doivent satisfaire aux exigences formulées par la norme [2], section 2.

5. ACTIONS ET COMBINAISONS D'ACTIONS

Les actions et leurs combinaisons doivent être prises en compte et déterminées conformément aux normes :

- [8] et [9] pour les bases et combinaisons d'actions,
- [10] et [11] pour les poids propres et charges imposées,
- [12] à [14] pour les charges de neige,
- [15] à [17] pour les charges de vent.

6. BASES DE CALCUL

6.1. Principes

Cette nouvelle méthode de dimensionnement est donnée pour calculer la rigidité de flexion et le moment résistant de tôles d'acier ondulée à section transversal sinusoïdale ou similaire.

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

Cette nouvelle méthode de dimensionnement concerne les tôles d'acier ondulées sur 2 appuis sous chargement uniformément réparti.

6.3. Procédure de dimensionnement

6.3.1. Méthode détaillée usuelle de dimensionnement

Cette procédure est établie considérant le voilement local de la partie comprimée de la section transversale.

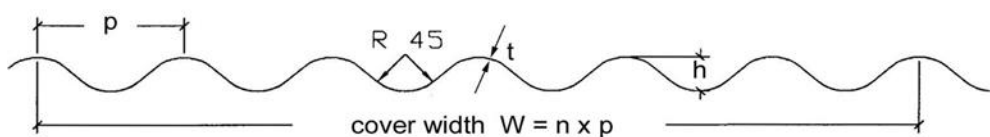


Figure 6.3.1.1 – Section transversale type.

Deux situations peuvent survenir :

Design Manual for corrugated sheeting – FR translation

- Si $R/t \leq 0,04 \cdot E/f_{yb}$: la section transversale ne nécessite pas d'être vérifiée vis-à-vis du voilement local et le moment de flexion caractéristique est déterminé par : $c_{Rk} = W_y \cdot f_{yb}$;
- Si $R/t > 0,04 \cdot E/f_{yb}$: le moment de flexion caractéristique peut être calculé à partir d'une contrainte de compression réduite σ_c : $M_{c,Rk} = W_y \cdot \sigma_c$.

Avec :

- Le coefficient d'élancement : $\lambda = (f_{yb}/\sigma_{elr})^{0,5}$;
- La contrainte de voilement : $\sigma_{elr} = 0,60 \cdot \eta \cdot E \cdot t/R$;
- Le coefficient η : $\eta = 0,19 + 0,67/(1 + R/(100 \cdot t))^{0,5}$;
- Pour $\lambda \leq 0,30$: $\sigma_c = f_{yb}$;
- Pour $0,30 < \lambda < 1,10$: $\sigma_c = (1,126 - 0,419 \cdot \lambda) \cdot f_{yb}$;
- Et pour $\lambda \geq 1,10$: $\sigma_c = (0,8/\lambda^2) \cdot f_{yb}$.

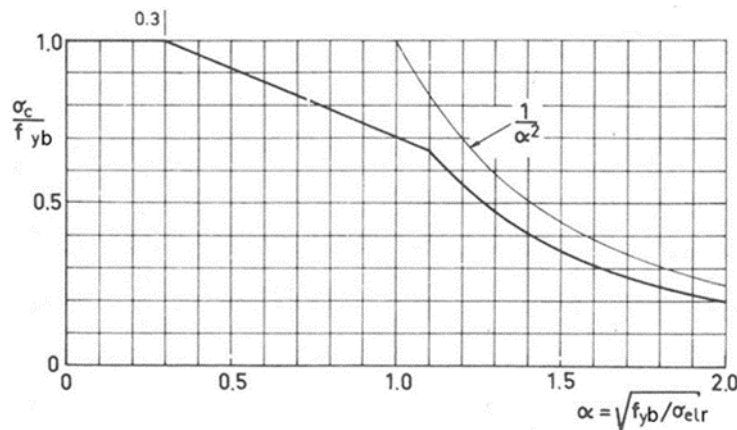


Figure 6.3.1.2 – Contrainte de compression ultime en fonction du voilement local de la partie cylindrique du profil.

Le moment d'inertie, utilisé pour calculer les déformations aux états limites de service, peut être déterminé considérant le moment caractéristique de flexion avec une contrainte réduite de $f_{yb}/1,5$.

6.3.2. Procédure simplifiée à champ d'application réduit

Si les conditions :

- Tôle d'acier ondulée en configuration isostatique et,
- Charges uniformément distribuées et,
- Ratio $R/t \leq 0,1 \cdot E/f_y$ et,
- Epaisseur d'acier noire $t_{cor} \geq 0,55 \text{ mm}$ et,
- Hauteur d'ondulation $18 \text{ mm} \leq h \leq 46 \text{ mm}$ et,
- Pas d'ondulation $76 \text{ mm} \leq p \leq 150 \text{ mm}$,

Sont réunies, la procédure simplifiée suivante peut être appliquée :

- Moment d'inertie par largeur unitaire : $I_y = 0,13 \cdot t \cdot h^2$;
- Module de section par largeur unitaire : $W_y = 0,26 \cdot t \cdot h$;
- Moment caractéristique de flexion : $M_{c,Rk} = W_y \cdot f_{yb}$

7. CONSIDÉRATION DE DIMENSIONNEMENTS SPÉCIFIQUES

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

- Pour le feu : se référer aux réglementations nationales en accord avec l'EN 1991-1-2 et l'EN 1993-1-2 ;
- Pour le séisme : se référer aux réglementations nationales en accord avec l'EN 1998-1 ;
- Pour les aspects environnementaux : se référer aux réglementations nationales ;
- Pour la thermique : se référer aux réglementations nationales en accord avec l'EN 1991-1-5 ;
- Pour l'acoustique : se référer aux réglementations nationales.

Ainsi que tout autre sujet non clairement identifié ci-avant et ci-après.

8. EXEMPLES DE DIMENSIONNEMENTS

8.1. Description de la trame et hypothèses de charges

Cet exemple de dimensionnement correspond à l'étude d'une couverture mono-versant d'un bâtiment pour lequel l'ossature porteuse est composée de poutre type IPE 80 d'entraxe courant 1,15 m, localisée dans les zones H et I au sens du paragraphe 7.2.4 de l'EN 1991-1-4.

La couverture inclinée est constituée de tôles d'acier ondulées d'épaisseur nominale 0,64 mm.

8.1.1. Informations sur l'ouvrage

L'ouvrage de 16m de hauteur est localisé dans une zone industrielle à proximité d'Oostende (Belgique) et présente une couverture mono-versant inclinée à 45°.

La valeur de base de la vitesse de référence du vent $v_{b,0}$ est de 26 m.s⁻¹.

Terrain category is assumed to be 0.

Le coefficient de direction c_{dir} et celui de saison c_{season} sont considérés à 1. Le coefficient d'orographie $c_0(z)$ est fixé à 1.

La valeur recommandée de 1 est appliquée pour le facteur de turbulence k_t .

Pour la masse volumique de l'air ρ , la valeur recommandée de l'EN 1991-1-4 est appliquée : $\rho = 1,25$ kg/m³.

Location of the building in a windswept topography: $C_e = 0,8$ according [12].

Coefficient de forme de toiture pour la disposition de charge de neige : $\mu_i = 0,8$.

8.1.2. Hypothèses de chargement

Le présent exemple de calcul ne traite pas des charges de montage. En phase de service, les charges sont inhérentes aux effets du vent et aux poids propres.

Les charges de neige sont négligées du fait de la valeur caractéristique de neige au sol au niveau de la mer de 0,2 kN/m² selon [12] et d'un facteur de combinaison Ψ_0 de 0,5 conformément à l'annexe nationale Belge de la norme [12] (pour le calcul exact : $s = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 0,064$ kN/m²).

Détermination de l'action du vent selon [15] à [17]

Valeur de référence du vent $v_b = C_{dir} \cdot C_{season} \cdot v_{b,0} = 1,00 \cdot 1,00 \cdot 26 = 26$ m.s⁻¹.

Vent moyen $v_m(z)$:

- Catégorie de terrain 0: $z_0 = 0,003$ m et $z_{min} = 1$ m ;
- $z_{0,II} = 0,05$ m ;
- Facteur de terrain $k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}}\right)^{0,07} = 0,19 \cdot \left(\frac{0,003}{0,05}\right)^{0,07} = 0,156$;
- Coefficient de rugosité $c_r(z) = k_r \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = 0,156 \cdot \ln\left(\frac{16}{0,003}\right) = 1,339$;
- $v_m(z) = c_r(z) \cdot c_0(z) \cdot v_b = 1,339 \cdot 1,00 \cdot 26 \approx 34,8$ m.s⁻¹.

Intensité de turbulence $I_v(z) = \frac{k_l}{c_0(z) \cdot \ln(z/z_0)} = \frac{1,00}{1,00 \cdot \ln(16/0,003)} = 0,117$

Pression dynamique de pointe $q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = [1 + 7 \cdot 0,117] \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 34,8^2 \approx 1,38$ kN/m²

Coefficient de pression pour couverture à simple versant :

- $\theta = 45^\circ$;
- Coefficients de pression extérieure $c_{pe,10}$:
 - o Zone H :
 - Vent at 0° : 0,6 ;
 - Vent at 180° : -0,7 ;
 - Vent at 90° : -1,0 ;
 - o Zone I : -0,9 ;
- Coefficients de pression intérieure : $c_{pi} = +0,2/-0,3$;
- Coefficient de pression nette $c_{p,net}$:
 - o Pour l'effet en pression de vent : $c_{p,net} = 0,9$;
 - o Pour l'effet en dépression de vent : $c_{p,net} = -1,2$.

Charges de vent W_{50} :

- Pour l'effet en pression de vent : $W_{50}^+ = 1,24$ kN/m² ;
- Pour l'effet en dépression de vent : $W_{50}^- = -1,65$ kN/m².

Combinaison d'actions selon [8], [9] et l'annexe nationale Belge de [8]

La combinaison la plus sévère pour l'effet de pression est : $Q^+ = 1,50 \cdot W_{50}^+ + 1,35 \cdot g_0 = 1,50 \cdot 1,24 + 1,35 \cdot 0,061 \approx 1,94 \text{ kN/m}^2$.

La combinaison la plus sévère pour l'effet de dépression est : $Q^- = 1,50 \cdot W_{50}^- + g_0 = 1,50 \cdot (-1,65) + 0,061 \approx -2,41 \text{ kN/m}^2$.

Voir paragraphe 8.2 pour g_0 .

Pour la vérification de la déformation aux Etats Limites de Service : $Q_{SLS} = W_{50}^+ + g_0 = 1,30 \text{ kN/m}^2$.

8.2. Description de la tôle d'acier ondulée

La tôle d'acier ondulée étudiée présente une section droite sinusoïdale de 76 mm de pas d'ondulation de 18 mm de hauteur et d'épaisseur d'acier nominale de 0,64 mm.

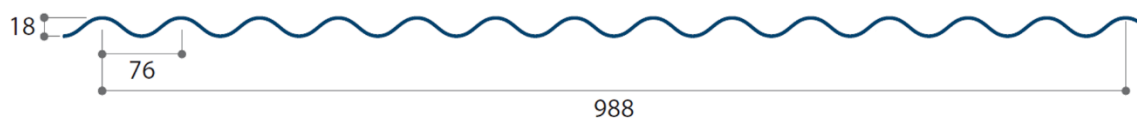


Figure 8.2 – Tôle d'acier ondulée 76.18.

Le profil ondulé est en acier de nuance S 320 GD + Z 275 d'épaisseur nominale 0,65 mm. Le poids propre g_0 du profil est de 0,060 kN/m².

Le facteur de sécurité γ_{M0} est pris égal à 1,00.

8.3. Vérifications avec la méthode simplifiée

8.3.1. Chargement

La configuration étudiée est une travée de 1m15 de longueur sous chargement uniformément distribué.

Pour l'effet de pression de vent, l'application des combinaisons d'actions, voir paragraphe 8.1.2, aboutit à un moment appliqué en travée $M_{c,Ed} = (Q^+ \cdot L^2)/8 = (1,94 \cdot 1,15^2)/8 = 0,321 \text{ kNm/m}$.

Pour l'effet de dépression de vent, l'application des combinaisons d'actions, voir paragraphe 8.1.2, aboutit à un moment appliqué en travée $M_{c,Ed} = (Q^- \cdot L^2)/8 = (2,41 \cdot 1,15^2)/8 = 0,399 \text{ kNm/m}$.

Pour les états limites de service, en application d'un critère de flèche usuel de $L/150$, la flèche maximale admissible est de 7,67 mm.

8.3.2. Application de la méthode simplifiée

Considérant l'épaisseur nominale, l'épaisseur de calcul $t = 0,60 \text{ mm}$.

Avant d'appliquer les formules de la méthode simplifiée, il est nécessaire de vérifier que $R/t \leq 0,1 \cdot E/f_{yb}$:

- $R = 5h_w/4 = 22,5 \text{ mm}$;
- $R/t = 37,50$;
- $0,1 \cdot E/f_{yb} = 0,1 \cdot \frac{210\,000}{320} = 65,625$.

Le critère est vérifié et nous pouvons appliquer la méthode simplifiée :

- Moment d'inertie par largeur unitaire : $I_y = 0,13 \cdot t \cdot h^2 = 0,13 \cdot 0,60 \cdot 18^2 = 25,27 \text{ mm}^4/\text{mm}$;
- Module de section par largeur unitaire : $W_y = 0,26 \cdot t \cdot h = 0,26 \cdot 0,60 \cdot 18 = 2,81 \text{ mm}^3/\text{mm}$;
- Moment de flexion caractéristique : $M_{c,Rk} = W_y \cdot f_{yb} = 2,808 \cdot 320 = 0,899 \text{ kN.m/m}$.

Par conséquent, le moment résistant de flexion est : $M_{c,Rd} = 0,899 \text{ kN.m/m}$.

Il est admis que, considérant la symétrie de la section transversale sinusoïdale de la tôle, les valeurs des moments résistants de calcul sous chargement gravitaire et sous chargement de succion sont égales.

Vérification de la résistance et de la déformée

Sous chargement gravitaire : Moment en travée : $\frac{M_{c,Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{0,321}{0,899} = 0,357 \leq 1,00$;

Avec chargement de succion : Moment en travée : $\frac{M_{c,Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{0,399}{0,899} = 0,444 \leq 1,00$.

La résistance de la tôle d'acier ondulée aux Etats Limites Ultimes est vérifiée.

La flèche d'une tôle d'acier ondulée sur 2 appuis est déterminée par :

$$y = \frac{5 \cdot (W_{50}^+ + g_0) \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_y} = 8,57 \text{ mm}$$

Le critère de flèche de L/150 n'est pas respecté car la déformée de la tôle d'acier ondulée ($y = 8,57 \text{ mm}$) excède la valeur maximale autorisée de 7,67 mm.

Enfin, les fixations doivent être vérifiées selon la section 8 de la référence [2].

Nota : La ruine par réaction d'appui est à considérer à partir de valeurs issues d'essais.

8.4. Vérifications par application de la méthode détaillée

8.4.1. Tôle d'acier ondulée

La tôle d'acier ondulée est identique à celle décrite au paragraphe 8.2 : 76 mm de pas d'ondulation de 18 mm de hauteur.

Le profil ondulé est en acier de nuance S 320 GD + Z 265 d'épaisseur nominale 0,65 mm. Le poids propre g_0 du profil est de 0,060 kN/m².

Le coefficient de sécurité γ_{M0} est considéré à 1,00.

8.4.2. Application du chargement

Nous reprenons ici les chargements décrits au paragraphe 8.3.1 afin d'étudier l'intérêt de la méthode détaillée par rapport à la méthode simplifiée.

8.4.3. Application de la méthode détaillée

Sur la base de l'épaisseur nominale, l'épaisseur de dimensionnement $t = 0,60 \text{ mm}$.

Avant d'appliquer les formules de la méthode, nous devons vérifier que $R/t \leq 0,04 \cdot E/f_{yb}$:

- $R = 5h_w/4 = 22,5 \text{ mm};$
- $R/t = 37,50;$
- $0,04 \cdot E/f_{yb} = 0,04 \cdot \frac{210000}{320} = 26,25.$

$R/t > 0,04 \cdot E/f_{yb}$ et le moment de flexion caractéristique peut être calculé à partir de la contrainte de compression réduite σ_c : $M_{c,Rk} = W_y \cdot \sigma_c$.

Détermination du moment d'inertie et du module de section

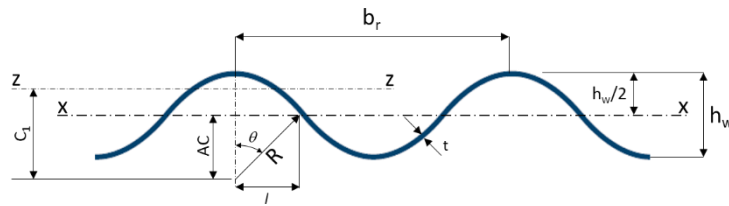


Figure 8.4.3.1 – Paramétrage géométrique pour la détermination du moment d'inertie et du module de section.

Rayon de courbure : $R = 5 \cdot h_w/4 = 22,5 \text{ mm} ;$

Longueur $l = h_w = 18 \text{ mm} ;$

Angle θ : $\sin \theta = l/R = 18/22,5$ et $\theta = 0,927 \text{ rad} ;$

Distance entre le centre de gravité de l'arc (axe 'z-z') et le centre de l'arc :

$$C_1 = (R \cdot \sin \theta)/\theta = \frac{22,5 \cdot \sin 0,927}{0,927} = 19,41 \text{ mm};$$

Distance du centre de l'arc à l'axe 'x-x' :

$$AC = R - (h_w/2) = 22,5 - 0,5 \cdot 18 = 13,5 \text{ mm};$$

Et finalement le moment de surface pour un quart de la section brute :

$$I'_{xx}/t = R^3 \cdot \left(\frac{\theta + \sin \theta \cdot \cos \theta}{2} - \frac{(\sin \theta)^2}{\theta} \right) + (R \cdot \theta) \left[C_1 - \left(R - \frac{h_w}{2} \right) \right]^2$$

$$\frac{I'_{xx}}{t} = 22,5^3 \left(\frac{0,927 + \sin 0,927 \cdot \cos 0,927}{2} - \frac{(\sin 0,927)^2}{0,927} \right) + (22,5 \cdot 0,927)[19,41 - 13,5]^2$$

$$= 882,48 \text{ mm}^3/\text{mm}$$

D'où découle le moment d'inertie :

$$I_{xx} = \frac{4 \cdot I'_{xx} \cdot t}{b_R} = \frac{4 \cdot 882,48 \cdot 0,60}{76} = 27,87 \text{ mm}^4/\text{mm}$$

Le Module de section est alors donné par :

$$W_y = \frac{4 \cdot I'_{xx} \cdot t}{b_R \cdot h_w/2} = \frac{4 \cdot 882,48 \cdot 0,60}{76 \cdot 9} = 3,10 \text{ mm}^3/\text{mm}$$

Détermination du moment résistant de flexion connaissant la contrainte réduite

Coefficient :

$$\eta = 0,19 + 0,67 / (1 + R / (100 \cdot t))^{0,5} = 0,19 + 0,67 / (1 + 22,5 / (100 \cdot 0,60))^{0,5} = 0,761 ;$$

Contrainte de flambement :

$$\sigma_{elr} = 0,60 \cdot \eta \cdot E \cdot t / R = 0,60 \cdot 0,763 \cdot 210\,000 \cdot 0,60 / 22,5 = 2558,23 \text{ N/mm}^2 ;$$

Rapport d'élancement :

$$\lambda = (f_{yb} / \sigma_{elr})^{0,5} = (320 / 2558,23)^{0,5} = 0,354 ;$$

Comme $0,30 < \lambda < 1,10$, la contrainte réduite est donnée par :

$$\sigma_c = (1,126 - 0,419 \cdot \lambda) \cdot f_{yb} = (1,126 - 0,419 \cdot 0,354) \cdot 320 = 312,9 \text{ N/mm}^2$$

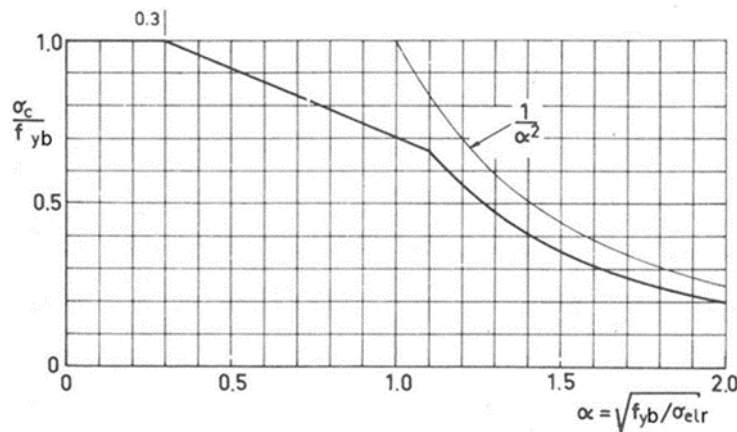


Figure 8.4.3.2 – Contrainte de compression ultime en fonction du voilement local de la partie cylindrique du profil.

Le moment de flexion caractéristique est :

$$M_{c,Rk} = W_y \cdot \sigma_c = 3,10 \cdot 312,9 = 0,969 \text{ kN.m/m}$$

Par conséquent, le moment résistant de calcul en flexion est : $M_{c,Rd} = 0,969 \text{ kN.m/m}$.

Il est admis que, considérant la symétrie de la section transversale sinusoïdale de la tôle, les valeurs des moments résistant de calcul sous chargement gravitaire et sous chargement de succion, sont égales.

Pour le moment d'inertie à utiliser aux ELS : $W_{y,SLs} = M_{c,Rk} / (f_{yb} / 1,5) = 4,54 \text{ mm}^3/\text{mm}$, et $I_{y,SLs} = W_{y,SLs} \cdot (h_w / 2) = 40,87 \text{ mm}^4/\text{mm}$.

Vérification de la résistance et de la déformation

Sous chargement gravitaire : Moment en travée : $\frac{M_{c,Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{0,321}{0,969} = 0,331 \leq 1,00 ;$

Pour les charges de soulèvement : Moment en travée : $\frac{M_{c,Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{0,399}{0,969} = 0,412 \leq 1,00.$

La résistance de la tôle d'acier ondulée aux Etats Limites Ultimes est vérifiée. La méthode détaillée présente un gain d'environ 8 % compare aux résultats de la méthode simplifiée.

Pour l'ELS, la déformation de la tôle d'acier ondulée sur 2 appuis est déterminée par :

$$y = \frac{5 \cdot (W_{50}^+ + g_0) \cdot L^4}{384 \cdot E \cdot I_{y,SLs}} = 5,30 \text{ mm}$$

Le critère de déformation de L/150 est respecté puisque la flèche de la tôle d'acier ondulée ($y = 5,30$ mm) n'excède pas le maximum permis de 7,67 mm.

En complément, les fixations doivent être vérifiées conformément à la section 8 de [2].

8.5. Validation du logiciel

8.5.1. Information logiciel

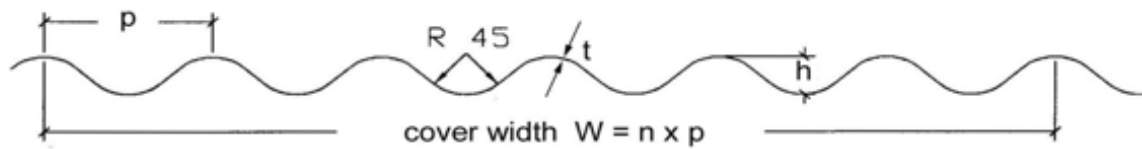
Un programme Excel dédié est disponible sur le site internet de GRISPE (www.grispeplus.eu).

8.5.2. Validation de l'exemple

Les premières informations à saisir sont les paramètres géométriques :

- Rayon de courbure : $R = 22,5$ mm pour notre exemple ;
- Hauteur du profil ondulé : $h = 18$ mm ;
- Pas d'ondulation : $p = 76$ mm.

Ensuite, il est nécessaire de renseigner le module d'Young ($E = 210\,000$ N/mm²), la limite d'élasticité ($f_{yb} = 320$ N/mm²) ainsi que le module de section ($W_y = 3150$ mm³/m fourni au paragraphe 8.4.3)



R	22,50	[mm]	E	210 000,00	[N/mm ²]
t _{cor}	0,60	[mm]	f _{yb}	320,00	[N/mm ²]
h	18,00	[mm]	W _y	3 100,00	[mm ³ /m]
p	76,00	[mm]			

Generally applicable design procedure with respect to local buckling in the compressed area

R/t	37,5 [-]	≤	0,04*E/f _{yb}	26,25 [-]
slenderness ratio α [-]	buckling stress σ _{elr} [N/mm ²]		coefficient η [-]	compressive stress σ _c [N/mm ²]
0,354	2 558,230		0,761	312,899

M_{c,Rk} 0,970 [kNm/m]

Simplified procedure for restricted application range

Check conditions (all must be fulfilled):

single span girder

uniformly distributed loads

ratio R/t 37,5 [-] ≤ 0,1*E/f_{yb} 65,625 [-]

steel core thickness t_{cor} ≥ 0,55 mm

profile height 18 mm ≤ h ≤ 46 mm

profile pitch 76 mm ≤ p ≤ 150 mm

true/false?

true/false?

true

true

true

true

M_{c,Rk} 0,899 [kNm/m]

Figure 8.5.2 – Feuille Excel pour tôle d'acier ondulée.

Comparaison entre résultats analytiques et résultats du programme Excel

Les deux méthodes sont validées du fait de la correspondance exacte sur l'ensemble des paramètres et plus précisément des résultats concernant :

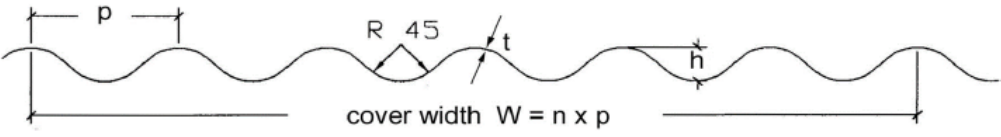
- Le ratio d'élancement ;
- La contrainte de voilement ;
- Le coefficient η ;
- La contrainte de compression ;
- Le moment de flexion caractéristique pour les deux méthodes.

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 1993-1-3:2007 – Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rule - Supplementary rules for cold-formed member and sheeting, Brussels, 2007.
- [3] DIN 59231:2003 – Hot-dip metal coated corrugated and profiled steel sheets – Dimensions, mass and static parameters, Berlin, 2003.
- [4] K. Le TRAN, L. DAVAIN, C. DOUTHE, K. SAB and J. DALLLOT – Etude de la résistance et de la stabilité des panneaux cylindriques non-raidis soumis à une compression uniforme : application aux ouvrages d'arts, Revue Construction Métallique, 1-2012.
- [5] CEN, EN 1993-4-1:2007 – Eurocode 3: Design of steel structures - Part 4-1: Silos, Brussels, 2007.
- [6] StBK-N5, Swedish code for light-gauge metal structures, Stockholm, 1982.
- [7] CEN, EN 1990:2002 – Eurocode – Basis of structural design, Brussels, 2002.
- [8] CEN, EN 1990:2002/A1:2005 – Eurocode – Basis of structural design – Amendment A1, Brussels, 2005.
- [9] CEN, EN 1990:2002/A1:2005/AC:2010 – Eurocode – Basis of structural design – Amendment A1 - Corrigendum, Brussels, 2010.
- [10] 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.
- [11] CEN, EN 1991-1-1:2002/AC:2009 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings - Corrigendum, Brussels, 2009.
- [12] CEN, EN 1991-1-3:2003 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads, Brussels, 2003.
- [13] CEN, EN 1991-1-3:2003/AC:2009 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads - Corrigendum, Brussels, 2009.
- [14] CEN, EN 1991-1-3:2003/A1:2015 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-3: General actions – Snow loads - Amendment A1, Brussels, 2015.
- [15] CEN, EN 1991-1-4:2005 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions - Wind actions, Brussels, 2005.
- [16] CEN, EN 1991-1-4:2005/AC:2010 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions - Wind actions – Corrigendum, Brussels, 2010.
- [17] CEN, EN 1991-1-4:2005/A1:2010 – Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions - Wind actions – Amendment A1, Brussels, 2010.

- [18] CEN, EN 1993-1-1:2005 – Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, 2005.
- [19] CEN, EN 1993-1-1:2005/AC:2009 – Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings - Corrigendum, Brussels, 2005.
- [20] 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.
- [21] CEN, EN 1993-1-3:2007/AC:2009 – Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rule - Supplementary rules for cold-formed member and sheeting - Corrigendum, Brussels, 2009.
- [22] CEN, EN 1995-1-1:2005 – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, Brussels, 2005.
- [23] CEN, EN 1995-1-1:2005/AC:2006 – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, Corrigendum, Brussels, 2006.
- [24] CEN, EN 1995-1-1:2005/A1:2008 – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, Amendment A1, Brussels, 2008.
- [25] CEN, EN 1995-1-1:2005/A2:2014 – Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, Amendment A1, Brussels, 2014.

ANNEXE : PROJET D'AMENDEMENT SOUMIS AU CEN

AM-1-3-2013-75	
Subject	Load bearing capacity / characteristic values of corrugated profiles with sinusoidal or similar cross section
Clause No/ Subclause No/ Annex	
Reason for Amendment	No design rules by calculation available in EN 1993-1-3
Proposed Change	In order to calculate the bending stiffness and the ultimate bending moment for corrugated profiles with sinusoidal or similar cross section, two approaches are proposed 1. Generally applicable design procedure with respect to local buckling in the compressed area  Fig nn: Typical cross section, definition of parameters σ • If $R/t \leq 0,04 * E / f_{yb}$: The cross section needs not be checked for local buckling

characteristic bending moment: $M_{c,Rk} = W_y * f_{yb}$

- If $R/t > 0,04 * E / f_{yb}$: The characteristic bending moment should be calculated using the reduced compressive stress σ_c $M_{c,Rk} = W_y * \sigma_c$

with:

slenderness ratio: $\lambda = (f_{yb} / \sigma_{elr})^{0.5}$

buckling stress $\sigma_{elr} = 0,60 * \eta * E * t / R$

coefficient η $\eta = 0,19 + 0,67 / (1 + R / (100 * t))^{0.5}$

for $\lambda < 0,30$ $\sigma_c = f_{yb}$

for $0,30 < \lambda < 1,10$ $\sigma_c = (1,126 - 0,419 * \lambda) * f_{yb}$

for $1,10 \geq \lambda$ $\sigma_c = (0,8 / \lambda^2) * f_{yb}$

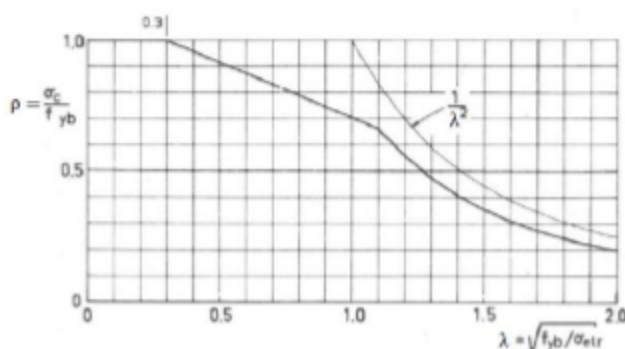


Fig nn: ultimate compressive stress with respect to local buckling of the cylindric part of the profile

The moment of inertia, which is used to calculate deformations in serviceability limit state, should be calculated using the same procedure as for bending moment, but with reduced stress $f_{yb} / 1,5$.

2. Simplified procedure for restricted application range

If the conditions

- profile installed as single span girder and
- uniformly distributed loads and
- ratio $R/t \leq 0,1 * E / f_{yb}$ and
- steel core thickness $t_{cor} \geq 0,55$ mm and
- profile height $18 \text{ mm} \leq h \leq 46 \text{ mm}$ and
- profile pitch $76 \text{ mm} \leq p \leq 150 \text{ mm}$

are met, the following simplified procedure may be adopted:

	moment of inertia per unit width $I_y = 0,13 * t * h^2$ section modulus per unit width $W_y = 0,26 * t * h$ characteristic bending moment: $M_{c,Rk} = W_y * f_{yb}$
Background Information	[1] D2.5 WP2 Background and draft annexes for EN 1993-1-3 for corrugated sheets, 31.12.2015, KIT [2] StBK-N5 Swedish Code for Light-Gauge Metal Structures, March 1982, SBI [3] EN 1993-4-1 Tanks