

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: 30 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)

*Walter SALVATORE, Silvia CAPRILI, Irene PUNCELLO
University of Pisa – Dept. of Civil and Industrial Engineering*

Drafting history

FINAL DRAFT – DATE: 15th of July 2018

FINAL VERSION – DATE: 15th of July 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)	

GRISPE PLUS

VALORISATION OF KNOWLEDGE
FOR SPECIFIC PROFILED STEEL SHEETS

MANUEL DE CALCUL POUR LES PROFILS CINTRÉS

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 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 because 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/these manual/guidelines are those of the authors 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 Plus project has received financial support from the European Community's Research Fund for Coal and Steel (RFCS) under grant agreement No. 754092.

RESUME

L'objectif de ce manuel de calcul est de présenter une nouvelle méthode analytique de dimensionnement des profils cintrés, 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 profils cintrés 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.

Plus en détail:

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 (principes, domaine d'application, et description de l'application des nouvelles formules).

Le chapitre 7 dresse la liste des considérations spécifiques de dimensionnement non couvertes par le présent manuel (Feu, Séisme, Aspects environnementaux, Thermique, Acoustique).

Le chapitre 8 fournit des exemples pratiques.

Une bibliographie est incluse.

REMARQUE IMPORTANTE

Les données expérimentales ont été obtenues et fournies par Rainer Holz, IFL –ING LEICHTBAU et Daniel Ruff and Christian Fauth, KIT –KARLSRUHE INSTITUTE OF TECHNOLOGY

PREFACE

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 Walter Salvatore, Silvia Caprili and Irene Puncello se basant sur les données expérimentales et les considérations déjà établies par le concluant projet de recherche GRISPE; ce manuel de calcul 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
Thibault RENAUX	France
Walter SALVATORE	Italie
Daniel SPAGNI	France

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

FIGURES ET TABLEAUX

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

Figure 1.1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Figure 1.2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Figure 1.3	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Figure 1.4	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Figure 1.5	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Figure 1.6	source web https://en.wikipedia.org/wiki/File:Roll_forming.png
Figure 1.7	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Figure 1.8	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Figure 1.9	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Figure 1.10	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Figure 1.11	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Figure 6.1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Figure 6.2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Figure 8.1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Figure 8.2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Figure 8.3	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Figure 8.4	Tracé à partir du logiciel SAP 2000
Figure 8.5	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Tableau 1	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Tableau 2	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE
Tableau 3	Karlsruher Institut für Technologie (KIT) – projet GRISPE

SOMMAIRE

DOMAINE D'APPLICATION DE LA PUBLICATION	11
NOTATIONS	12
1. INTRODUCTION	13
1.1. Type de tôle d'acier profilée concernée	13
1.2. Etat de l'art avant le projet GRISPE.....	14
1.3. Principaux résultats du projet GRISPE	14
1.4. Exigences et règles générales de dimensionnement	18
2. CONSIDERATIONS PRELIMINAIRES	19
2.1. Champ d'application de la nouvelle méthode de dimensionnement.....	19
3. EXIGENCES TECHNOLOGIQUES DE BASE	19
3.1. Exigences concernant les profils et le marquage CE	19
4. PROPRIETES DES MATERIAUX.....	19
4.1. Tôles d'acier	19
5. ACTIONS ET LEURS COMBINAISONS	20
6. BASES DU CALCUL	20
6.1. Principes.....	20
6.2. Champ d'application de la nouvelle méthode de calcul.....	20
6.3. Procédure du dimensionnement	20
6.3.1. Configuration travée simple sans appuis horizontaux: calcul de la résistance au moment de flexion	20
6.3.2. Configuration travée simple avec appuis horizontaux: calcul de la résistance au moment de flexion	21
7. CONSIDERATION DU DIMENSIONNEMENT SPECIFIQUE.....	25
7.1. Situations non couvertes par le présent manuel.....	25
8. EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT	25
8.1. Explication de la procédure de calcul.....	25
8.1.1. Travée simple sans appuis horizontaux	27
8.1.2. Travée simple avec appuis horizontaux	27
9. BIBLIOGRAPHIE	34

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 Profil cintré par roulage sur machine à galets (variante A).....	13
Figure 1-2 Profil cintré par crantage de la semelle intérieure (variante B).	13
Figure 1-3 Profil cintré à la pose (variante C).	13
Figure 1-4: Section transversale du profil sinusoïdal.	14
Figure 1-5: Section transversale du profil trapézoïdal.	14
Figure 1-6 Procédé de profilage.	15
Figure 1-7: Paramètres du profile cintré.	16
Figure 1-8: Dispositif d'essai en travée simple.....	17
Figure 1-9: Photo du dispositif d'essai en travée simple.....	17
Figure 1-10: Dessin du dispositif d'essai en travée simple (profile 18/76).	17
Figure 1-11: Photo du dispositif d'essai en travée simple avec supports horizontaux (profil 39/333).	18
Figure 6-1: Exemple de modèle simple avec ressorts horizontaux (Source Rainer Holz projet grispe).....	22
Figure 6-2: longueur de flambement d'après DIN 18 800 - 2.....	24
Figure 8-1: Configuration simple travée sans supports horizontaux.....	25
Figure 8-2: Configuration simple travée avec supports horizontaux.....	26
Figure 8-3: Dimensions du model géométrique.	28
Figure 8-4: Exemple d'un modèle simple avec ressorts horizontaux.	29
Figure 8-5: coefficient de longueur de flambement b issu de DIN 18800 - 2.	31

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Essais réalisés.	16
Tableau 2: Flèche à mi- portée représentative sous chargement caractéristique $F_{u,k}$	23
Tableau 3 : Efforts internes et flèches des arcs sous charge de rupture caractéristique..	29

DOMAINE D'APPLICATION DE LA PUBLICATION

Le but de cette publication est de présenter une nouvelle méthode de dimensionnement des profils cintrés 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 la 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_N	épaisseur de calcul
R	rayon de courbure
b	longueur de l'arc
L	longueur de la portée
f	hauteur
β	coefficient de la longueur de flambement
$\alpha[^\circ]$	angle de courbure
N_D	valeur de calcul de l'effort de compression
M	valeur de calcul du moment de flexion
M_d	résistance de calcul du moment de flexion
N_{dD}	résistance de calcul de l'effort de compression
$\max N_{dD}$	effort de flambement idéal
$ult N_{dD}$	effort de flambement critique
α	rapport d'élanement
L_{cr}	longueur de flambement
i_{ef}	rayon de giration de la section transversale efficace
σ_{cd}	contrainte de compression de calcul
A_{ef}	aire de la section transversale efficace pour la compression axiale
σ_{elg}	contrainte de compression eulérienne pour la section brute
A_g	aire de la section brute
$M_{c,Rk,F}$	moment de flexion caractéristique en travée
$F_{u,k}$	charge caractéristique
b_V	largeur de l'éprouvette d'essai
L_V	longueur de la portée
L	longueur de l'éprouvette d'essai
s	demi longueur de l'arc
g	poids propre de l'éprouvette d'essai n
f_{max}	flèche verticale à la mi- portée
F_u	charge de ruine d'essai
$C_{f,i}$	raideur globale de l'éprouvette
C_f	valeur moyenne de tous les essais d'un même sous-ensemble, considérée comme représentative pour une famille
f_{eq}	flèche verticale équivalente à mi- portée, considérée comme représentative pour une famille
C_{ind}	rigidité di raidisseur de l'appui horizontal
f_{yk}	limite d'élasticité caractéristique

1. INTRODUCTION

1.1. Type de tôle d'acier profilée concernée

Ce manuel de calcul traite des profils cintrés

Généralement, ce type de profils peut être obtenu par trois procédés de cintrage différents:

- Roulage sur machine à galets (voir Figure 1-1)
- Crantage de la semelle intérieure (voir Figure 1-2)
- Procédé de cintrage in situ (voir Figure 1-3)

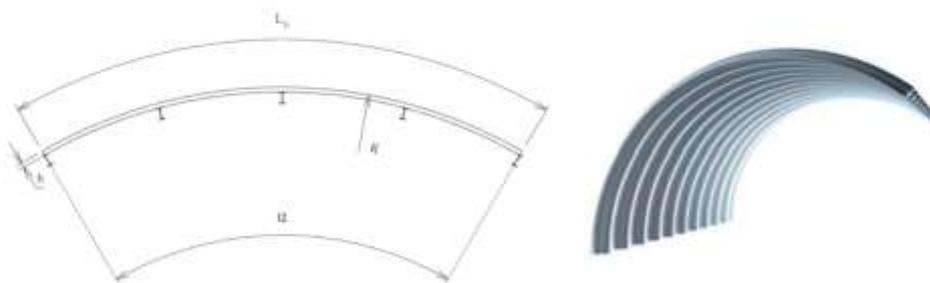


Figure 1-1 Profil cintré par roulage sur machine à galets (variante A).

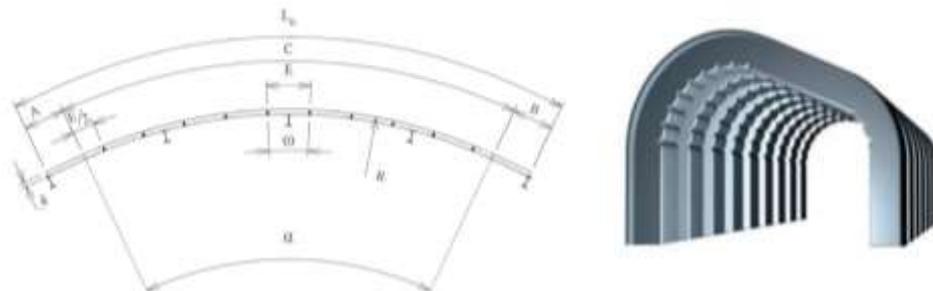


Figure 1-2 Profil cintré par crantage de la semelle intérieure (variante B).

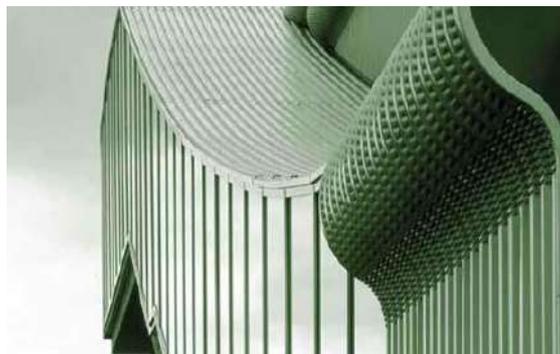


Figure 1-3 Profil cintré à la pose (variante C).

Dans le manuel de calcul actuel, seule la performance structurelle des **profils cintrés par un procédé de roulage continu sur machine à galets (VARIANTE A)** sera analysée. Les performances structurelles doivent être évaluées par rapport à la capacité portante des profils plats correspondants.

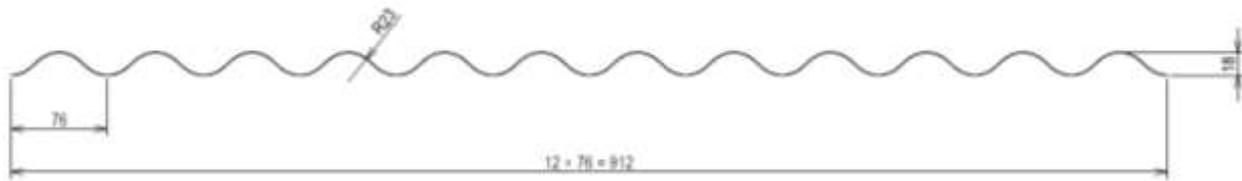


Figure 1-4: Section transversale du profil sinusoïdal.

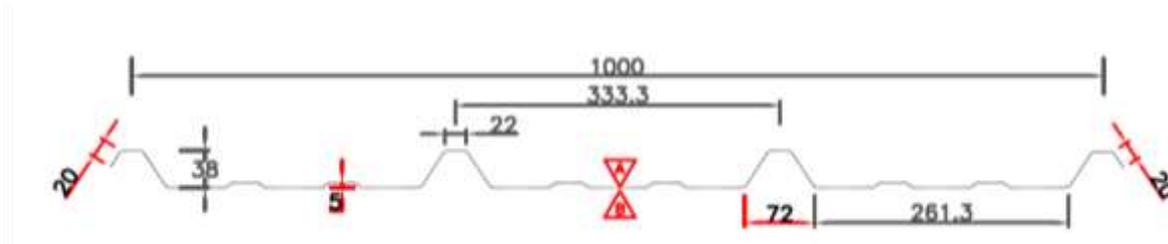


Figure 1-5: Section transversale du profil trapézoïdal.

1.2. Etat de l'art avant le projet GRISPE

La capacité portante en flexion des profils obtenus par crantage de la semelle intérieure (Variante B) n'est pas visée par le projet de recherche GRISPE car les profils ainsi obtenus sont généralement destinés à des portées réduites.

Dans le même temps, les profils obtenus avec le 'procédé de cintrage in situ' (variante C) peuvent être simplement calculés conformément à la norme EN 1993-1-3: 2005 pour les profils plats, car le rayon de courbure est très grand. Pour eux, aucune modification de la capacité portante n'est attendue par rapport aux profils conventionnels.

Comme indiqué précédemment, dans le présent manuel de calcul, sont visés les profils obtenus par roulage sur machine à galets (variante A).

L'influence des contraintes résiduelles provenant de la fabrication a déjà été examinée par le centre de recherche sur l'acier, le bois et la maçonnerie en Allemagne, au moyen d'une vaste campagne d'essais expérimentaux. Différents tests ont été réalisés selon la norme DIN 18807-2 sur des profils trapézoïdaux cintrés de différents fabricants. Le rayon de courbure variait entre 4 et 19 m et les deux supports n'étaient pas fixés lors des essais. La différence mesurée de la capacité portante en flexion entre un profil plat et un profil cintré était comprise entre zéro et dix pourcents.

Les données présentées dans la littérature scientifique actuelle font référence à une variation de la capacité portante des profils cintrés par rapport aux profils plats de 20% (semelle étroite en compression) à 30% (semelle large en compression) [1].

Il convient de noter que si les deux supports sont fixes, la théorie de la flexion n'est plus applicable car le profil se comporte comme un arc.

1.3. Principaux résultats du projet GRISPE

Comme indiqué précédemment, l'étude porte sur les profils cintrés lors de la fabrication par cintrage / profilage. Le processus de profilage consiste à cintrer en continu une longue bande de tôle (généralement une bobine d'acier) en section désirée. La bande est passée dans des jeux de galets successifs, chaque jeu ne réalisant qu'une partie

incrémentielle de la flexion, jusqu'à ce que la section souhaitée (profil) soit obtenue. Ce processus est utilisé pour produire des pièces à profil constant avec de grandes longueurs et en grande quantité. Un schéma simple de la procédure est présenté dans la Figure 1 6 suivante.

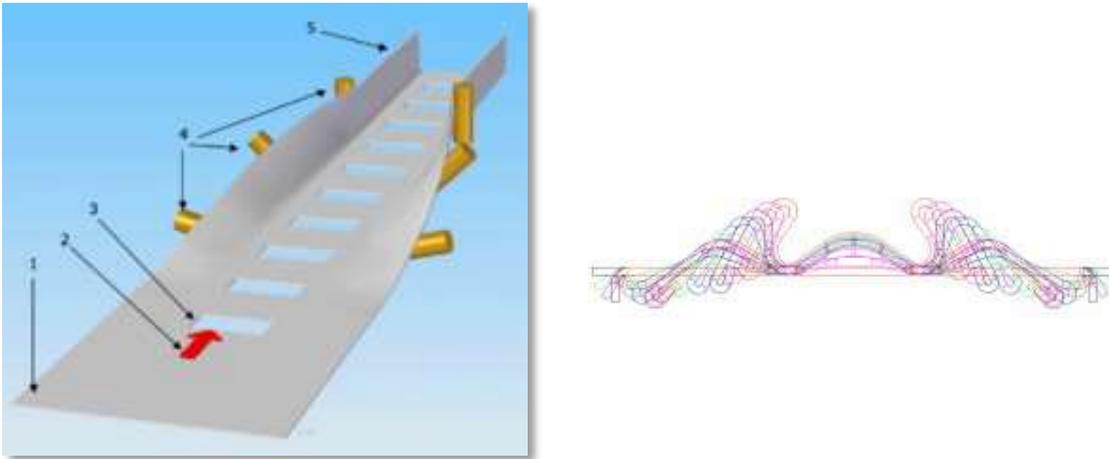


Figure 1-6 Procédé de profilage.

Les sections profilées présentent certains avantages par rapport à ceux obtenus par extrusion: les composants peuvent être plus légers, avec des parois plus minces et plus solides, après avoir été formés à froid. De plus, le processus de profilage est plus rapide que le processus d'extrusion.

Les effets du processus sur les propriétés du matériau sont minimes. Les propriétés physiques et chimiques ne changent pratiquement pas, mais le processus peut provoquer un écrouissage, des microfissures ou un amincissement dans l'angle de pliage qui concernent les propriétés mécaniques du matériau. Ces conditions doivent être correctement prises en compte.

Le projet GRISPE a étudié la modification de la performance structurelle (capacité portante) du profil cintré obtenu par rapport à des profils plats (des déformations plastiques se développant dans les fibres extrêmes de la section peuvent altérer la capacité portante) pour différents rayons de courbure.

Dans le projet GRISPE, un vaste programme d'essais a été réalisé pour déterminer la capacité en flexion des profilés cintrés pour différents rayons de courbure.

Deux sections différentes de profil ont été testées: des **profils sinusoïdaux** fournis par Bacacier (profil 18/76), voir Figure 1-4 et des **profils trapézoïdaux** avec raidisseurs fournis par Arcelor Mittal Construction France (profil 39/333), voir Figure 1-5. Pour chaque forme de profil, des profils de 0,63 et 1,0 mm d'épaisseur nominale ont été fournis.

Deux configurations différentes ont été sélectionnées pour l'exécution des tests expérimentaux, respectivement pour l'analyse des performances structurelles du profil cintré soumis à un moment de flexion uniquement et soumis à l'effet combiné de moment de flexion et charge axiale.

Le Tableau 1 suivant résume les essais réalisés.

La Figure 1-7 présente les paramètres d'un profil cintré.

Type of test	Profile	R [m]	b [mm]	Span L [mm]	s [mm]	f [mm]	α [°]	Number of tests
Single span positive bending test	18/76 $t_N = 0.63$ mm	∞	2200	2000	2200	0	0	3
		20.0	2201			30	6.31	2
		10.0	2204			61	12.63	2
		4.0	2229			154	31.92	2
	18/76 $t_N = 1.00$ mm	∞	3200	3000	3200	0	0	1
		20.0	3203			64	9.18	4
		10.0	3214			129	18.41	3
		4.0	3292			334	47.16	3
	39/333 $t_N = 0.63$ mm	∞	3200	3000	3200	0	0	3
		20.0	3203			64	9.18	2
		10.0	3214			129	18.41	2
		6.0	3239			217	30.93	3
	39/333 $t_N = 1.00$ mm	∞	4200	4000	4200	0	0	2
		20.0	4208			111	12.05	2
		10.0	4232			223	24.24	2
		6.0	4291			380	40.98	2
Single span positive bending test with horizontal support	39/333 $t_N = 0.63$ mm	6.0	3239	3000	3200	217	30.93	2
		6.0	4291	4000	4200	380	40.97	3
		6.0	5300	5000	5129	576	50.61	3

Tableau 1: Essais réalisés.

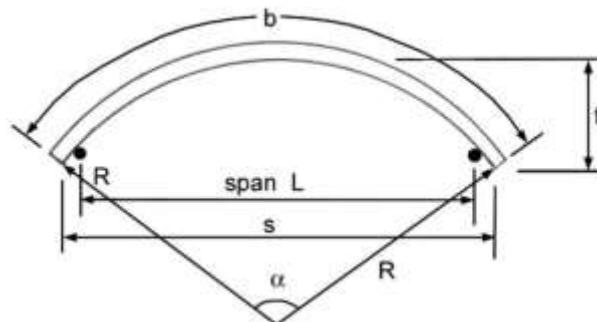


Figure 1-7: Paramètres du profil cintré.

Dans la première configuration (uniquement moment de flexion), le moment résistant en flexion et le moment d'inertie efficace ont été déterminés à l'aide d'essais de charge avec des tôles cintrées à une travée, chargées avec deux ou quatre charges linéaires verticales afin de simuler une charge uniformément répartie (voir Figure 1-8 et Figure 1-9). Les éprouvettes ont été placées sur des supports mobiles dans le sens horizontal. Par conséquent, aucune force axiale ne peut apparaître dans le sommet de l'éprouvette cintrée alors que le moment de flexion devient maximal.

Le rayon de courbure a été varié pour analyser l'influence sur les contraintes internes et sur la capacité en moment de flexion du profil.

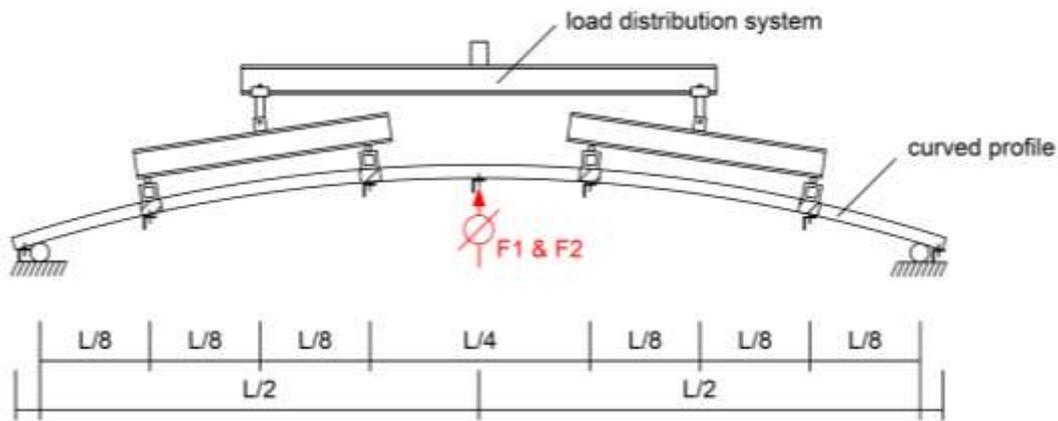


Figure 1-8: Dispositif d'essai en travée simple.



Figure 1-9: Photo du dispositif d'essai en travée simple.

Dans la deuxième configuration (moment de flexion et effort axial), les profils cintrés ont été placés sur des supports fixés horizontalement (voir Figure 1-10 et Figure 1-11). De cette façon, les profils se sont comportés comme un arc et ont été sollicités par le moment de flexion et l'effort de compression axiale.

Ces tests ont été réalisés pour vérifier la formule de calcul du moment de flexion / compression axiale combinée donnée par l'EN 1993-1-3. Cette formule étant valable pour les profils trapézoïdaux, ces tests n'ont pas été effectués avec profil sinusoïdal. En modifiant la portée de l'échantillon, différentes pentes ont été obtenues avec, par conséquent, des rapports différents moment de flexion / compression axiale.

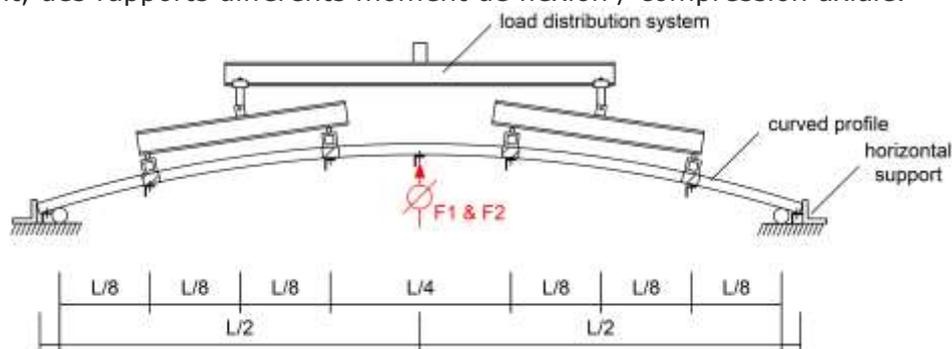


Figure 1-10: Dessin du dispositif d'essai en travée simple (profil 18/76).



Figure 1-11: Photo du dispositif d'essai en travée simple avec supports horizontaux (profil 39/333).

Sur la base des résultats des tests expérimentaux effectués sur les éprouvettes mentionnées ci-dessus, il peut être proposé pour les profils cintrés soumis uniquement au moment de flexion de réduire la capacité de moment de flexion de 10%, par rapport à la capacité de moment de flexion des profils plats.

En revanche, pour les profils cintrés avec support horizontal (arc: $M + N$), des considérations supplémentaires doivent être apportées précisant ce qui résulte des expérimentations. Tout d'abord, il a été noté que l'influence des déplacements horizontaux (dans cette seconde configuration non autorisés) ne peut être négligée de manière conservatrice: les déplacements plus élevés sont associés à des efforts internes plus faibles. En conséquence, la méthodologie de conception doit prendre en compte directement la présence du support horizontal et le schéma structurel correspondant devient hyper-statique. Il est suggéré d'utiliser la procédure de conception suivante :

1. Les efforts internes de l'arc (moments de flexion, forces axiales) doivent être évaluées à l'aide des valeurs de la section transversale brute A_g et J_g de la plaque profilée
2. Le déplacement horizontal au niveau des supports ne doit pas être négligé. Plus le déplacement est significatif, plus les efforts internes deviennent défavorables. Par conséquent, il est nécessaire de prendre en compte le déplacement horizontal en modélisant le support avec un ressort horizontal correspondant. La raideur du ressort, qui dépend de la sous-structure et de la fixation de la tôle profilée, doit être "ajustée" afin de faire coïncider les déplacements horizontaux calculés avec les valeurs réelles (expérimentales). Pour éviter toute conception non sécuritaire, la rigidité du ressort ne doit pas être surestimée; la sous-estimation de la rigidité des ressorts entraîne une surestimation des déplacements horizontaux et, par conséquent, une conception plaçant en sécurité.
3. L'interaction moment de flexion - compression axiale doit être calculée à l'aide de la formule d'interaction de la norme DIN 18807, mais sans limitation de α à 1

1.4. Exigences et règles générales de dimensionnement

- (1) La conception des profils cintrés doit être conforme aux règles générales données dans la norme 1993-1-1.
- (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 donne une méthode de calcul pour déterminer la résistance des profils cintrés.

Ce manuel donne une méthode pour le dimensionnement par calcul.

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.

Les règles de calcul sont basées sur l'élaboration de données expérimentales sur les échantillons de profils cintrés décrits précédemment.

La procédure de conception est valable pour les profils cintrés lors de la fabrication par pliage ou roulage. Elle n'est pas valable pour les profils cintrés par flexion lors du montage ou par crantage de la semelle intérieure de la section transversale.

Le coefficient d'élasticité alpha ne doit pas être limité à 1, comme spécifié dans la norme DIN 18807 pour les profils plats.

Le déplacement horizontal au niveau des supports peut être modélisé par des ressorts horizontaux. Le déplacement horizontal conduit à des moments de flexion plus élevés dans l'arc. La raideur du ressort doit être compatible avec la raideur horizontale de la sous-structure, y compris les déformations lors de la fixation du profil de l'arc. Plus la raideur du ressort est faible, plus les moments de flexion sont importants; l'estimation de la raideur du côté "faible" conduit à une conception sécuritaire.

3. EXIGENCES TECHNOLOGIQUES DE BASE

3.1. Exigences concernant les profils et le marquage CE

Les plaques nervurées en acier sont marquées CE selon la norme EN 14782 (si non structurelle) ou EN 1090-1 (si structurelle).

4. PROPRIETES DES MATERIAUX

4.1. Tôles d'acier

Si non spécifié, les propriétés des matériaux doivent satisfaire aux exigences formulées par la norme EN 1993-1-3, section 3.

Les tolérances d'épaisseur doivent satisfaire les exigences formulées par la norme EN 1993-1-3, section 3.2.4.

- Épaisseur de métal nu $t_{cor} = 0,58$ mm
- limite d'élasticité $f_{y,k} = 408,3$ N/mm²

Les informations détaillées concernant les caractéristiques des profils sont contenues dans le § 8.1.

5. ACTIONS ET LEURS COMBINAISONS

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

EN 1990 Eurocode 0: Bases de calcul des structures

EN 1991-1-1: 2005 Eurocode 1: Actions sur les structures - Partie 1-1: Actions générales – Poids volumiques, poids propres, charges d’exploitation pour les bâtiments

EN 1991-1-3: 2005- Eurocode 1: Actions sur les structures - Partie 1-3: Actions générales – Charges de neige

EN 1991-1-6: 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 à mi- travée, dans la configuration d’élément à simple travée sans appui horizontaux.
- L’interaction moment fléchissant - compression axiale, dans la configuration de travée simple avec supports horizontaux.

Pour appliquer cette méthode de calcul, le profile doit être chargé symétriquement.

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

La méthode de dimensionnement suivante peut être utilisée pour évaluer la capacité portante des profils cintrés.

Lors des essais réalisés dans le projet GRISPE, des profils avec différentes épaisseurs, longueurs de portée et rayons de cintrage ont été testés, ainsi que décrits dans le Tableau

Les efforts internes de l’arc (moments de flexion, efforts axiaux) doivent être calculés en utilisant les valeurs de la section transversale brute A_g et J_g de la plaque profilée.

Le modèle de conception est vérifié pour les arcs à chargement symétrique.

Les déplacements horizontaux sur appuis ne peuvent pas être négligés.

Le domaine d’application est identique à celui donné pour la formule interactive donnée dans la DIN 18807, partie 3, section, article 3.3.6.1.

6.3. Procédure du dimensionnement

6.3.1. Configuration travée simple sans appuis horizontaux: calcul de la résistance au moment de flexion

Le procédé de cintrage par pliage ou par roulage engendre des déformations plastiques dans les fibres extrêmes de la section transversale. Cela conduit à des contraintes

internes dans la section transversale qui peuvent avoir une influence sur la résistance en flexion de la section transversale elle-même. Les résultats d'essais ont montré cependant que l'influence est plutôt faible et de plus non uniforme.

- Pour les profils avec une épaisseur égale à 1 mm, la courbure n'influence pas la résistance au moment fléchissant du profil cintré par rapport au profil plat.
- Pour les profils avec une épaisseur égale à 0.63 mm, la résistance au moment fléchissant est affectée par l'application de courbure dans les deux sens:

- + 25 % pour le profil sinusoïdal 18/76
- 15 % pour le profil trapézoïdal 39/333

Compte tenu de ce comportement et de la faible sensibilité de la capacité de moment fléchissant, il est proposé - de manière conservatrice - de réduire de 10% la capacité de moment fléchissant du profil plat correspondant (voir équation 6.1). Ce facteur de réduction doit être considéré comme un facteur de sécurité supplémentaire pour couvrir la dispersion; ce n'est pas un coefficient justifié mécaniquement.

$$M_{c,Rk,F}(curved\ profile) = 0,9 \cdot M_{c,Rk,F}(flat\ profile) \quad 6(1)$$

6.3.2. Configuration travée simple avec appuis horizontaux: calcul de la résistance au moment de flexion

La norme allemande DIN 18807 contient des règles de conception pour les plaques trapézoïdales soumises à des moments de flexion et des forces de compression axiales combinées. Il a été vérifié si cette procédure pouvait également être adoptée pour les profils cintrés avec un effet de la courbure.

En cas de force de compression et de moment de flexion, l'équation suivante 6 (2) est donnée

$$\frac{N_D}{N_{dD}} \cdot \left[1 + 0,5 \cdot \alpha \left(1 - \frac{N_D}{N_{dD}} \right) \right] + \frac{M}{M_d} \leq 1 \quad 6(2)$$

Où:

- N_D valeur de calcul de l'effort de compression
- M valeur de calcul du moment fléchissant
- M_d valeur de calcul de la résistance au moment fléchissant
- N_{dD} valeur de calcul de la résistance à l'effort de compression

Et le rapport d'élanement étant défini comme:

$$\alpha = \frac{L_{cr}}{i_{eff} \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{y,k}}{E}} \quad 6(3)$$

Où:

- L_{cr} longueur de flambement. La formulation est communément acceptée puisque fournie par la norme DIN 18 800, partie 2 (voir figure 6 2).
- i_{ef} rayon de giration de la section efficace

Généralement, dans la formule d'interaction M-N, le coefficient α devrait être limité à 1 si $\alpha > 1$. Mais cette limite n'est pas valide lorsque le rapport d'élanement α est directement

utilisé pour déterminer la contrainte de compression limite par rapport au flambement global.

Ci-après, la procédure DIN pour la combinaison du moment fléchissant et de la compression axiale modifiée pour être «adaptée» au cas des profils cintrés est décrite en détail étape par étape.

1. Détermination des efforts internes de l'arc sous une charge de rupture caractéristique.

Cette étape (1) peut être réalisée en calibrant un modèle simple basé sur les résultats de tests expérimentaux. La calibration permet de supposer une rigidité représentative des ressorts horizontaux positionnés en correspondance des deux extrémités du profilé (voir Figure 6-1). Figure 6-1: Exemple de modèle simple avec ressorts horizontaux (Source Rainer Holz projet grispe).

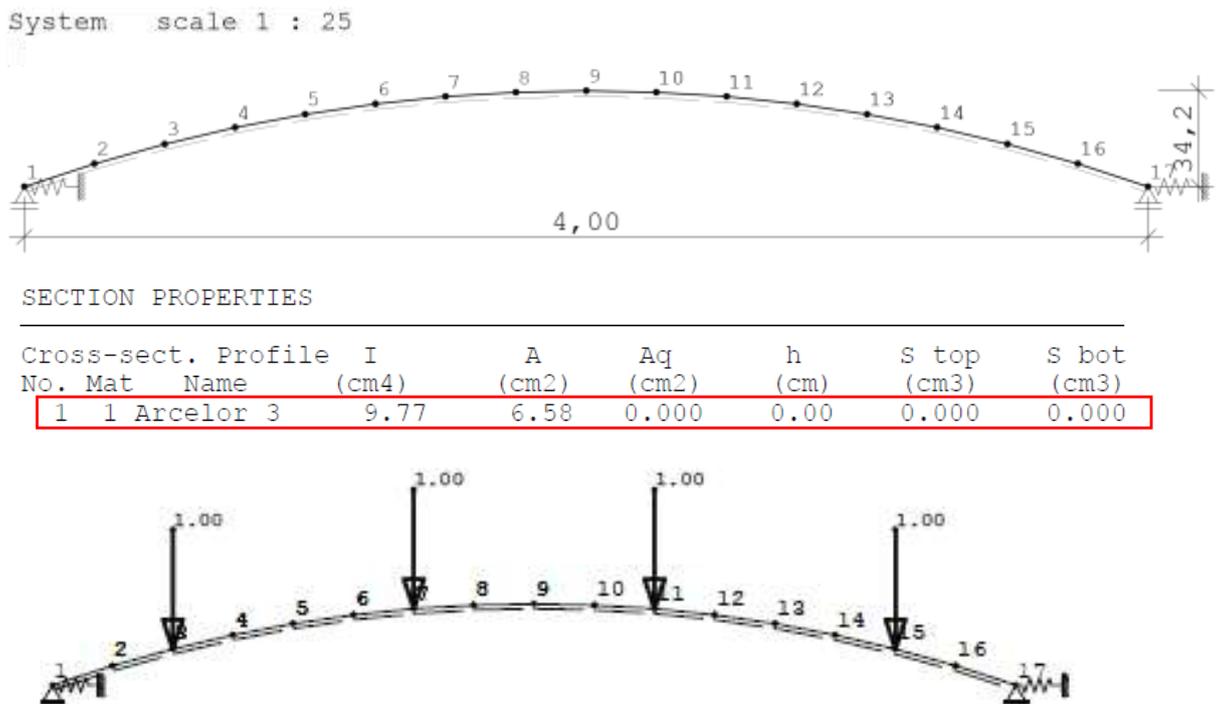


Figure 6-1: Exemple de modèle simple avec ressorts horizontaux (Source Rainer Holz projet grispe).

Par exemple, compte tenu des données expérimentales présentées précédemment, un modèle simple, représentatif de la configuration structurelle du profil cintré, doit être élaboré. Pour simplifier, l'arc de cercle peut être représenté par un polygone. Les deux supports situés aux extrémités sont équipés de ressorts horizontaux pour permettre et contrôler les déviations horizontales, tandis que les supports sont fixés verticalement. La charge de rupture caractéristique est appliquée en fonction des tests expérimentaux réalisés (par exemple, avec 4 charges verticales linéaires égales à 0,125 L - 0,25 L - 0,25 L - 0,25 L - 0,125 L) et le poids propre du profil est négligé. De toute évidence, pour la procédure de calibration, dans le cas de schémas de chargement différents, le modèle doit être mis à jour de manière appropriée.

Le calcul des efforts internes est effectué pour le système représentant le sous-ensemble considéré sous une charge de rupture caractéristique. Chaque sous-ensemble consiste en plusieurs tests identiques avec différentes charges de rupture particulières et différentes valeurs de flèche particulières. Une valeur de flèche commune doit être évaluée à partir des tests, représentant tout le sous-ensemble: cette valeur représentative n'est pas alors directement la flèche d'un test particulier (par exemple, il peut s'agir de la déflexion moyenne à la charge de rupture caractéristique, comme supposé ci-après). Par exemple, en prenant en compte les résultats des tests précédents, la procédure suivante peut être adoptée.

Pour chaque *i*-ème test, la flèche verticale à mi-portée f_{max} et la charge de rupture (particulière) correspondante F_u (test) permettent de déterminer un «paramètre de rigidité» particulier, comme suit

- Rigidité globale du *i*-ème échantillon

$$C_{f,i} = F_u / f_{max} \quad 6(4)$$

- Valeur moyenne de tous les tests du même sous-ensemble, considéré comme représentatif de cette famille

$$C_f = Mean (C_{f,i}) \quad 6(5)$$

En utilisant la valeur de rigidité globale de la famille (C_f), il est possible d'évaluer une flèche à mi- portée moyenne sous une charge de rupture caractéristique, considérée comme représentative de cette famille.

Etant donné que les efforts internes de l'arc sont calculés par unité de largeur, le résultat doit être multiplié par la largeur de l'éprouvette.

$$f_{eq} = F_{u,k} / C_f * b_v \quad 6(6)$$

Lors du calcul de l'arc à l'aide d'un logiciel utilisé pour réaliser le modèle, la raideur des supports horizontaux varie et est finalement verrouillée à une valeur pour laquelle la flèche calculée à mi-portée sous charge de rupture caractéristique correspond à la flèche f_{eq} selon le Tableau 2. Cette raideur du support horizontal est égale à C_{ind} mentionné ci-dessus.

Après le calibrage du modèle sur la base de ce qui précède, l'évaluation des efforts internes est possible.

test no. SSP-H-39-...	F_u kN	deflection f_{max} at mid-span (mm)	L m	b_v m	overall stiffness specimen $C_{f,i}$ (kN/mm)	mean value stiffness C_f	repr. deflection (mm) for $F_{u,k}$, width 1 m
217-063-1	9,12	18,0	3,00	0,667	0,507	0,444	16,6
217-063-2	8,95	23,5	3,00	0,667	0,381		
380-063-1	9,49	17,6	4,00	0,667	0,539	0,589	14,4
380-063-2	11,43	19,2	4,00	0,667	0,595		
380-063-3	11,03	17,4	4,00	0,667	0,634		
576-063-1	5,67	23,6	5,00	0,667	0,240	0,329	13,4
576-063-2	5,17	14,1	5,00	0,667	0,367		
576-063-3	6,83	18,0	5,00	0,667	0,379		

Tableau 2: Flèche à mi- portée représentative sous chargement caractéristique $F_{u,k}$.

2. Détermination de la longueur de flambement L_{cr} .

La longueur de flambement d'un arc en forme de cercle peut être trouvée dans la littérature, par exemple DIN 18 800 partie 2 (voir Figure 6-1).

longueur de flambement $L_{cr} = s_K =: s_K = \beta \cdot s$,

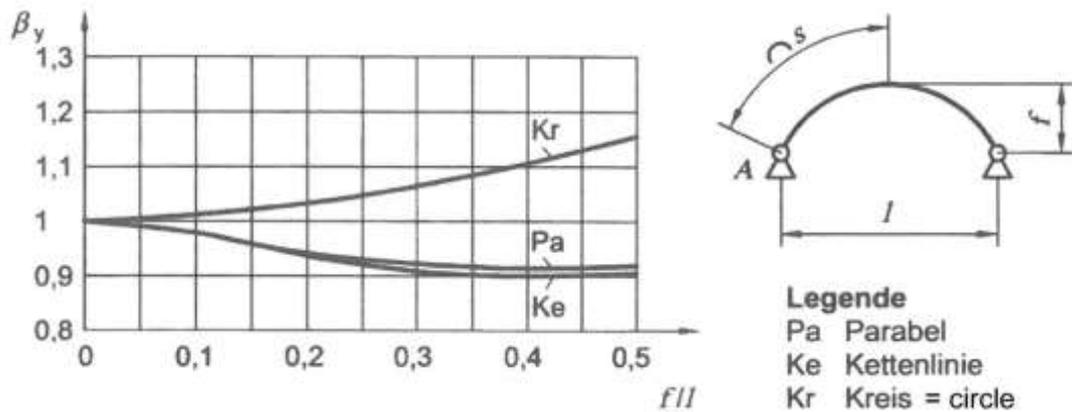


Figure 6-2: longueur de flambement d'après DIN 18 800 - 2.

3. Détermination de la résistance de calcul de l'effort de compression N_{dD}

$$N_{dD} = \min(\sigma_{cd} \cdot A_{ef}; 0,8 \cdot \sigma_{elg} \cdot A_g) \quad 6(7)$$

Où:

- σ_{cd} contrainte de compression de calcul
- A_{ef} aire de la section efficace pour la compression axiale
- σ_{elg} contrainte de compression eulérienne pour la section brute
- A_g aire de la section brute

4. Calcul de l'interaction moment fléchissant / compression axiale, conformément à DIN 18807

$$\frac{N_D}{N_{dD}} \cdot \left[1 + 0,5 \cdot \alpha \left(1 - \frac{N_D}{N_{dD}} \right) \right] + \frac{M}{M_d} \leq 1 \quad 6(8)$$

Où:

- N_D valeur de calcul de l'effort de compression
- M valeur de calcul du moment fléchissant
- M_d valeur de calcul de la résistance au moment fléchissant
- N_{dD} valeur de calcul de la résistance à l'effort de compression

Conformément à DIN 18807, le rapport d'élanement défini précédemment par l'équation 6(3) devrait être limité à 1.

Sur la base des résultats de GRISPE, une procédure DIN modifiée est proposée sans limitation de α à une valeur égale à 1; de cette manière, les résultats obtenus sont un peu plus conservateurs que ceux obtenus par l'approche DIN pure.
Le calibrage de la méthode a été effectué avec un chargement symétrique uniquement.

7. CONSIDERATION DU DIMENSIONNEMENT SPECIFIQUE

7.1. Situations non couvertes par le présent manuel

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

- Pour le feu: les réglementations nationales conformes à l'EN 1991-1-2 et l'EN 1993-1-2 et leurs annexes nationales doivent être considérées.
- Pour le séisme: les réglementations nationales conformes à l'EN 1998-1 et leurs annexes nationales doivent être considérées.
- Pour les aspects environnementaux: les réglementations nationales doivent être considérées.
- Pour la thermique: les réglementations nationales conformes à l'EN 1991-1-5 et leurs annexes nationales doivent être considérées.
- Pour l'acoustique: les réglementations nationales doivent être considérées.

Et pour tous les autres sujets non clairement identifiés précédemment ou ultérieurement.

8. EXEMPLE DE DIMENSIONNEMENT

8.1. Explication de la procédure de calcul

La procédure de calcul présentée permet de calculer le moment résistant à mi- portée pour un profil cintré, obtenu par le processus de roulage appliqué à une plaque plane. Deux configurations différentes ont été prises en compte :

- Travée simple sans supports horizontaux (profil contraint par moment fléchissant uniquement), voir Figure 8-1.
- Travée simple avec supports horizontaux (profil contraint par une combinaison de moment fléchissant et d'effort axial), voir Figure 8-2.

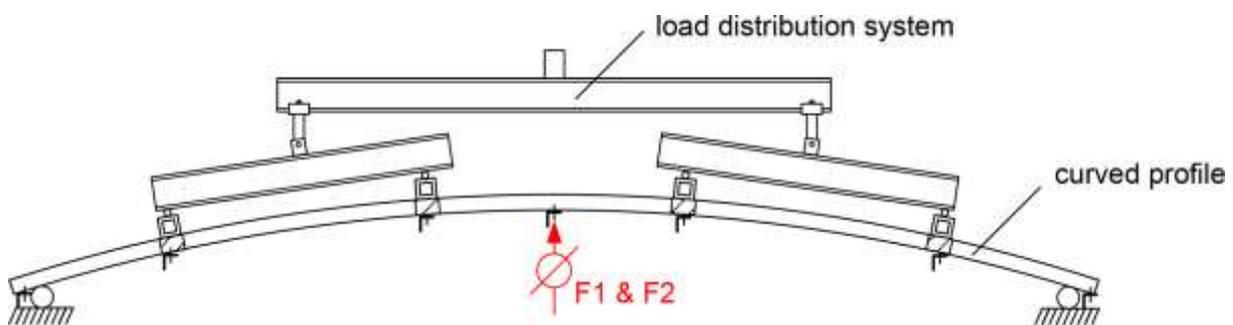


Figure 8-1: Configuration simple travée sans supports horizontaux.

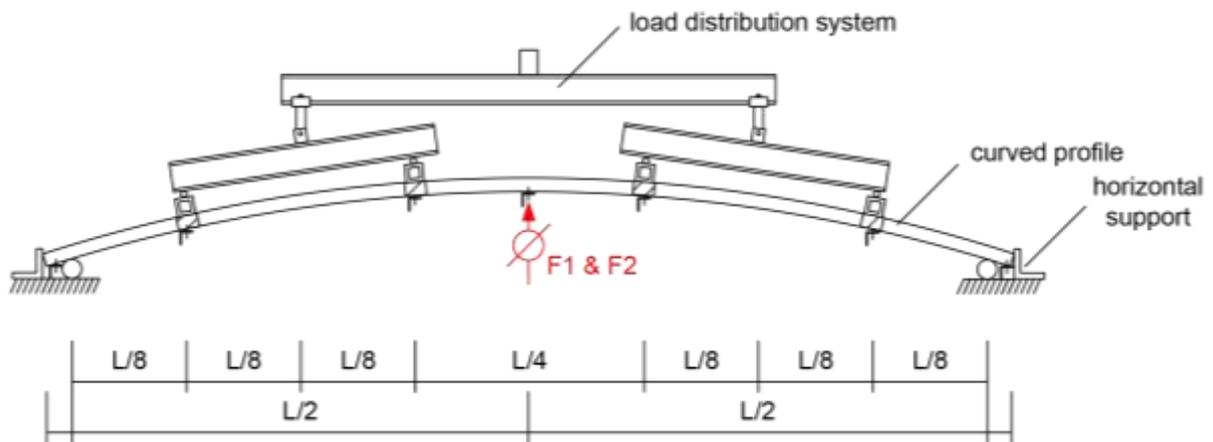
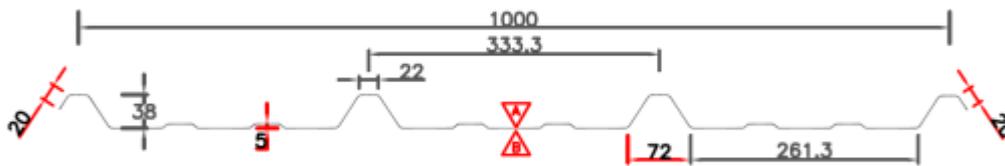


Figure 8-2: Configuration simple travée avec supports horizontaux.

Dans les paragraphes suivants, l'évaluation de la capacité portante des configurations décrites est présentée en détail en considérant un profil présentant les caractéristiques suivantes:



- Profil: Arcelor 39/333
- Famille d'essai: H-39-380-63
- Longueur de la portée de l'arc: 4.0 m
- Hauteur de l'arc: 342 mm
- Largeur de l'arc: 1 m
- Rayon de la courbure: 6.02 m
- Charge de rupture caractéristique (charge appliquée dans le calcul): 12.77 kN/m
- Poids propre du profil: 0.095 kN/m²
- Longueur du profil: 4.20 m
- Propriétés de la section transversale brute
 - aire $A_g = 6.58 \text{ cm}^2/\text{m}$
 - moment d'inertie $J_g = 9.77 \text{ cm}^4/\text{m}$
 - rayon de giration $i_g = 1.218 \text{ cm}$
- Propriétés de la section transversale efficace en compression axiale
 - aire $A_{ef} = 1.89 \text{ cm}^2/\text{m}$
 - moment d'inertie $J_{ef} = 5.21 \text{ cm}^4/\text{m}$
 - rayon de giration $i_{ef} = 1.660 \text{ cm}$
- Le moment résistant du profil est donné par le fabricant
 - moment positif en travée $M_d^+ = 1.093 \text{ kNm/m}$
 - moment fléchissant négatif $M_d^- = 1.426 \text{ kNm/m}$

8.1.1. Travée simple sans appuis horizontaux

Dans le cas de travée simple *sans* supports horizontaux, la charge génère un moment fléchissant et des forces de cisaillement dans le profil, les efforts axiaux sont en revanche négligeables.

La charge est appliquée par 4 chargements linéaires à 0,125 L – 0,25 L – 0,25 L – 0,25 L – 0,125 L et, dû au système de distribution de charge isostatique, les 4 lignes de charge sont égales.

D'après ce qui a été proposé dans le projet GRISPE d'après la campagne d'essais expérimentaux, la capacité portante du profil cintré pourrait être évaluée à 90% de la capacité portante du profil plat correspondant.

Le moment fléchissant maximal à mi- travée d'un profil plat peut être évalué à l'aide de l'équation suivante :

$$M_{c,Rk,F} = \frac{F_{u,k}}{b_v} \cdot \frac{L}{8} + g \cdot L_v \cdot [2L - L_v]/8$$

Où:

$M_{c,Rk,F}$ moment fléchissant caractéristique à mi-portée (kNm/m)

$F_{u,k}$ effort caractéristique en kN (incluant le pré chargement)

b_v largeur de l'éprouvette d'essai

L_v longueur de l'éprouvette d'essai

L longueur de la portée (ici: L = 2,00 ou 3,00 ou 4,00 m)

g poids propre du profil

Selon les caractéristiques de l'exemple de profil mentionné ci-dessus, la valeur suivante peut être obtenue pour le profil plat «original»:

$$M_{c,Rk,F} = \frac{12.77}{1} \cdot \frac{4}{8} + 0.095 \cdot 4.20 \cdot [2 \cdot 4 - 4.20]/8 = 6.57 \text{ kN/m/m}$$

Cette valeur doit être introduite dans le tableau Excel de la cellule rouge correspondante. De cette manière, la valeur de la capacité portante du profil cintré correspondant est automatiquement affichée par le fichier Excel, elle est simplement évaluée en appliquant une réduction de 10% à celui qui est plat.

$M_{c,Rk,F}(\text{curved profile}) = 0,9 \cdot M_{c,Rk,F}(\text{flat profile})$			
$M_{c,Rk,F,flat profile}$	6.57	[kNm/m]	$M_{c,Rk,F,curved profile}$
			5.91 [kNm/m]

8.1.2. Travée simple avec appuis horizontaux

Dans le cas d'une travée simple avec des supports horizontaux, une approche en plusieurs étapes, décrite en détail ci-après, doit être adoptée. Comme cela a déjà été expliqué dans le manuel de calcul, la solution du problème dans cette condition de charge / contrainte doit être trouvée en considérant le problème comme hyper-statique. Lorsque les déplacements horizontaux sont limités, le profil cintré se comporte comme un arc.

Etape 1: Détermination des efforts internes de 'l'arc' sous charge de rupture caractéristique.

System scale 1 : 25

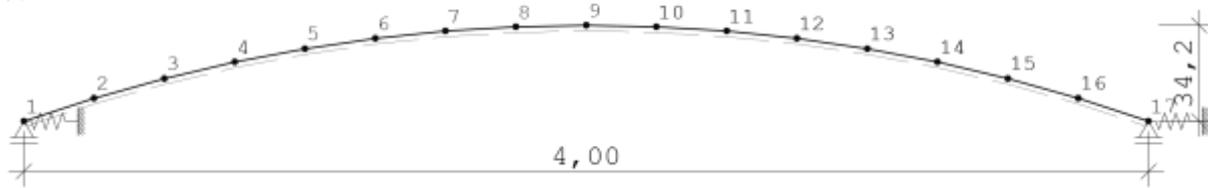


Figure 8-3: Dimensions du model géométrique.

L'arc en forme de cercle est modélisé par un polygone composé de 16 sections droites; les nœuds sont nommés par des numéros de 1 à 17 (voir Figure 8-3 et Figure 8-4). Le calcul se réfère à 1,0 m de largeur du profil. Les supports aux extrémités (nœuds 1 et 17) sont équipés de ressorts horizontaux pour permettre et contrôler les déviations horizontales; les supports sont fixés verticalement. Le chargement est appliqué sous la forme de 4 charges linéaires verticales égales, à 0,125 L - 0,25 L - 0,25 L - 0,25 L - 0,125 L (correspondant aux nœuds 3, 7, 11 et 13). Le poids propre du profil est négligé.

Étant donné que les efforts internes de l'arc dépendent du déplacement horizontal au niveau des supports, il est crucial d'adopter la rigidité correcte du ressort lorsque les efforts internes sont calculés. Compte tenu de l'influence de la raideur du ressort sur les efforts internes, il convient d'estimer la raideur du ressort «du côté faible» afin d'obtenir une condition conservatrice pour le calcul. Négliger les déplacements horizontaux au niveau des supports entraîne des efforts internes trop favorables et, par conséquent, une conception non sécuritaire. La raideur du ressort est ainsi choisie de manière à ce que le déplacement vertical calculé au sommet corresponde au déplacement vertical mesuré lors des essais.

Le calcul des efforts internes est effectué pour un système, qui représente le sous-ensemble considéré sous une charge de rupture caractéristique. Une valeur de flèche commune doit être développée à partir des tests représentant la famille de sous-ensembles. Veuillez noter que cette valeur représentative n'est pas directement la flèche d'un test particulier.

Pour chaque essai la flèche à mi-portée f_{max} et la charge de rupture correspondante (particulière) F_u (test) définissent un "paramètre de rigidité" particulier:

Rigidité globale de l'échantillon

$$C_{f,i} = F_u / f_{max}$$

La valeur moyenne de tous les tests du même sous-ensemble est considérée comme représentative de cette famille.

$$C_f = \text{Mean} (C_{f,i})$$

En utilisant la valeur de rigidité globale de la famille, il est possible de calculer une flèche médiane à mi-portée sous une charge de rupture caractéristique, considérée comme représentative de cette famille.

Étant donné que les efforts internes de l'arc sont calculés par unité de largeur, le résultat doit être multiplié par la largeur de l'éprouvette.

$$f_{eq} = F_{u,k} / C_f * b_v$$

Test setup/ span	Cross section	Spring stiffness at support C_r [kN/m/cm]	Failure load [kN/m]	Displacement		Support reactions [kN/m]		M/N values [kN/m/m, kN/m]			
				f_h (support)	f_v (summit)	R_h	R_v	at load point near to summit		at support	
								max M	corresp N	max N	
1/3.00m	gross	fixed	11.03	0.00	0,11	20.46	5.52	0.17	20.62	21.19	
		68.00	11.03	0.28	1.67	18.81	5.52	0.49	18.98	19.60	
		20.00	11.03	0.79	4.55	15.76	5.52	1.08	15.94	16.65	
		10.00	11.03	1.28	7.33	12.82	5.52	1.65	13.01	13.80	
	effective	fixed	11.03	0.00	0.41	20.35	5.52	0.19	20.51	21.08	
		88.00	11.03	0.22	1.66	19.64	5.52	0.33	19.80	20.40	
2/4.00m	gross	fixed	12.77	0.00	0.08	19.13	6.39	0.35	19.35	20.16	
		62.00	12.77	0.30	1.45	18.64	6.39	0.40	18.87	19.70	
		20.00	12.77	0.88	4.10	17.69	6.39	0.71	17.92	18.80	
		10.00	12.77	1.64	7.56	16.45	6.39	1.11	16.69	17.62	
	effective	fixed	12.77	0.00	0.39	19.09	6.39	0.26	19.31	20.13	
		79.00	12.77	0.24	1.44	18.88	6.39	0.33	19.11	19.93	
		20.00	12.77	0.91	4.51	18.29	6.39	0.51	18.53	19.37	
		10.00	12.77	1.76	8.33	17.56	6.39	0.75	17.80	18.68	
	3/5.00m	gross	fixed	6.62	0.00	0.02	9.23	3.31	0.16	9.36	9.81
			29.00	6.62	0.31	1.34	9.01	3.31	0.26	9.14	9.60
			20.00	6.62	0.45	1.91	8.91	3.31	0.30	9.04	9.50
		effective	10.00	6.62	0.86	3.67	8.61	3.31	0.43	8.74	9.22
fixed			6.62	0.00	0.23	9.22	3.31	0.16	9.35	9.80	
33.00			6.62	0.28	1.33	9.12	3.31	0.21	9.09	9.70	
20.00	6.62	0.45	2.07	9.05	3.31	0.24	9.18	9.63			
10.00	6.62	0.89	3.91	8.88	3.31	0.31	9.01	9.48			

Tableau 3 : Efforts internes et flèches des arcs sous charge de rupture caractéristique

Lignes de couleur verte: raideur du ressort du support adaptée à la flèche à mi-portée testée.
Ligne marquée en rouge: exemple de configuration prise en compte dans le calcul détaillé

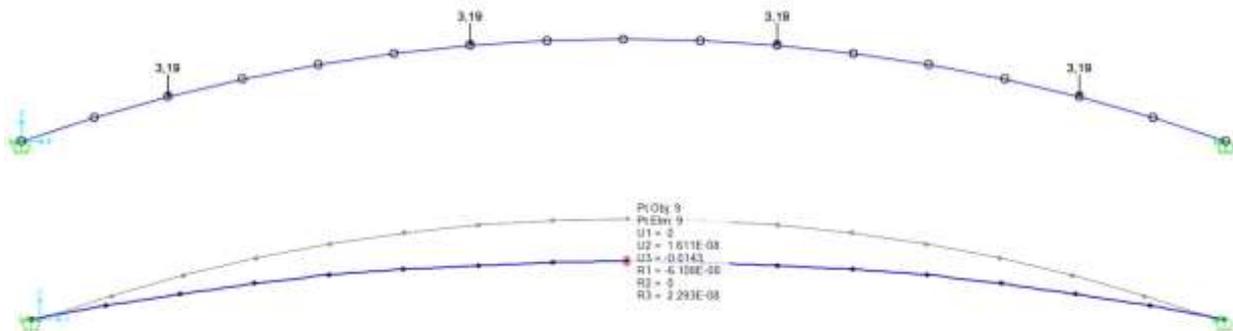


Figure 8-4: Exemple d'un modèle simple avec ressorts horizontaux.

Lors du calcul de l'arc à l'aide d'un logiciel, la raideur du ressort du support horizontal varie et est finalement verrouillée à une valeur pour laquelle la flèche à mi-portée

calculée sous une charge de rupture caractéristique correspond à la flèche f_{eq} . Cette raideur de ressort du support horizontal est celle mentionnée ci-dessus C_{ind} .

La charge de rupture dans l'exemple analysé a une valeur de 12.77kN/m comme on peut le voir sur le Tableau 3. Dans le modèle, cette valeur est appliquée en quatre points, ce qui donne la valeur suivante :

$$F_{u, nodes} = 12.77/4 = 3.19\text{kN}$$

La flèche verticale à mi- portée pour l'exemple actuel a une valeur égale à :

$$f_v = 1.45 \text{ cm}$$

Cette valeur est atteinte par le modèle, en adoptant une raideur de ressort du support horizontal égal à :

$$C_f = 62 \text{ kN/m/cm}$$

Dans le modèle calibré, en tenant compte de la section avec moment de flexion maximal (au point de charge proche du sommet), les valeurs suivantes sont obtenues:

$$M = 0.40 \text{ kNm/m}$$

$$N_D = 18.87 \text{ kN/m}$$

Ces valeurs doivent être insérées dans les cellules rouges correspondantes du tableau Excel :

f_{yb}	408.3	[N/mm ²]	$N_{C,Ed}$	18.87	[kN/m]
E	210000	[N/mm ²]	$M_{C,Ed}$	0.40	[kNm/m]
$L_{cr} = \beta s$	207.9	[cm]	$M_{C,Rd}$	1.09	[kNm/m]
A_g	6.58	[cm ² /m]			
i_g	1.22	[cm]			
A_{ef}	1.89	[cm ² /m]			
i_{ef}	1.66	[cm]			

Etape2: Détermination de la longueur de flambement L_{cr} .

La longueur de flambement d'un arc en forme de cercle peut être trouvée dans la littérature, par exemple DIN 18800-2 fournit les expressions suivantes:

Longueur de l'arc b

Rapport hauteur/portée f/L

Coefficient de longueur de flambement $\beta = f$ (rapport hauteur/portée f/L) du diagramme

$$\text{Longueur de flambement } L_{cr} = \beta * s = \beta * b/2$$

s est la mi- longueur de l'arc, comme représenté sur la Figure 8-4.

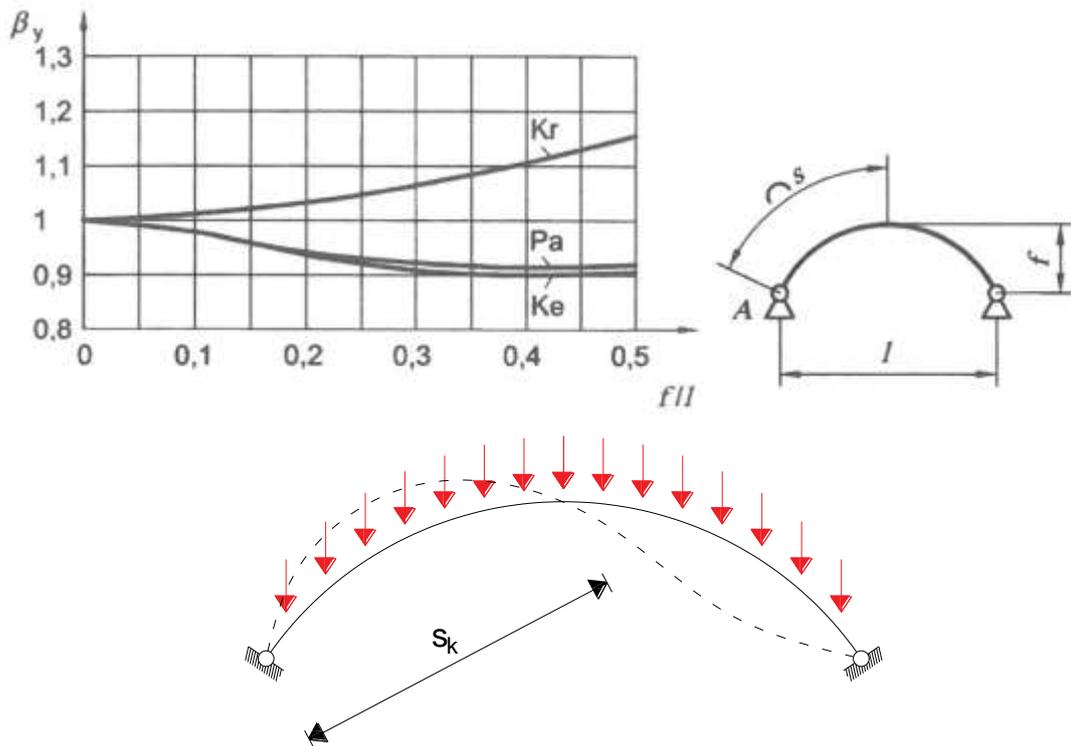


Figure 8-5: coefficient de longueur de flambement β issu de DIN 18800 – 2.

Par exemple on peut utiliser les données suivantes:

Hauteur de l'arc $f = 342 \text{ mm}$

portée $L = 4000 \text{ mm}$

penne au support $\alpha/2 = 0,338$

rayon de courbure $R = 4000 / (2 * \sin 0,338) = 6024 \text{ mm}$

longueur de l'arc $b = 6024 * 2 * 0,338 = 4072 \text{ mm}$

Rapport hauteur/portée $f/L = 342 / 4000 = 0,085$

Coefficient de longueur de flambement $\beta = 1,02$

longueur de flambement $L_{cr} = 1,02 * 4072 / 2 = 2079 \text{ mm}$

La valeur de la longueur de flambement doit être insérée dans la cellule rouge correspondante du tableau Excel:

f_{yb}	408.3	[N/mm ²]	$N_{c,Ed}$	18.87	[kN/m]
E	210000	[N/mm ²]	$M_{c,Ed}$	0.4	[kNm/m]
$L_{cr} = \beta s$	207.9	[cm]	$M_{c,Rd}$	1.09	[kNm/m]
A_g	6.58	[cm ² /m]			
i_g	1.22	[cm]			
A_{ef}	1.89	[cm ² /m]			
i_{ef}	1.66	[cm]			

Etape 3: Détermination de la résistance à l'effort de compression calculée N_{dD}

$$N_{dD} = \min(\sigma_{cd} \cdot A_{ef}; 0.8 \cdot \sigma_{elg} \cdot A_g)$$

Effort de flambement « idéal »:

$$\max N_{dD} = 0.8 \cdot \sigma_{elg} \cdot A_g$$

$$\max N_{dD} = 0.8 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_g}{L_{cr}^2}$$

$$\max N_{dD} = 0.8 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 9.77}{207.9^2}$$

$$\max N_{dD} = 37.47 \text{ kN}$$

Effort de flambement critique :

$$\text{ult} N_{dD} = \sigma_{cd} \cdot A_{ef}$$

Rapport d'élanement:

$$\alpha = \frac{L_{cr}}{i_{ef} \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{f_{yk}}{E}}$$

$$\alpha = \frac{207.9}{1.66 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{408.3}{210000}} = 1.758$$

Courbe de flambement issue de DIN 18807:

α	σ_{cd}/β_s
$\alpha \leq 0.30$	1.00
$0.30 < \alpha \leq 1.85$	$1.126 - 0.419 \alpha$
$1.85 < \alpha$	$1.2 / \alpha^2$

$$\frac{\sigma_{cd}}{f_{yk}} = 1.126 - 0.419 \cdot 1.758 = 0.390$$

$$\sigma_{cd} = 0.390 \cdot 408.3 = 159.0 \text{ N/mm}^2$$

Effort de flambement critique:

$$\text{ult} N_{dD} = 15.9 \cdot 1.8895 = 30.06 \text{ kN/m}$$

Résistance calculée déterminante:

$$N_{dD} = 30.06 \text{ kN/m}$$

Les valeurs de rapport d'élanement, d'effort de flambement idéal, de facteur de réduction et d'effort de flambement critique sont automatiquement affichées dans le fichier Excel, une fois que les cellules rouges ont été remplies avec toutes les données requises.

f_{yb}	408.3	[N/mm ²]	$N_{c,Ed}$	18.87	[kN/m]
E	210000	[N/mm ²]	$M_{c,Ed}$	0.40	[kNm/m]
$L_{cr}=\beta s$	207.9	[cm]	$M_{c,Rd}$	1.09	[kNm/m]
A_g	6.58	[cm ² /m]			
i_g	1.22	[cm]			
A_{ef}	1.89	[cm ² /m]			
i_{ef}	1.66	[cm]			

Slenderness ratio α [-]	Ideal buckling force [kN/m]	Reduction factor χ [-]	Critical buckling force [kN/m]
1.76	37.45	0.39	30.05
$N_{c,Rd}$	30.05 [kN/m]		
$N_{c,Ed} / N_{c,Rd}$	0.63 [-]		
$M_{c,Ed} / M_{c,Rd}$	0.37 [-]		

Etape 4: interaction moment fléchissant/ compression axiale

Selon DIN 18807, la valeur d'élanement $\alpha = 1,758$ devrait être limitée à 1, mais le calcul avec la procédure modifiée DIN 1880 est proposé ci-après: la modification consiste à ne pas limiter la valeur du coefficient α dans la formule d'interaction M-N.

$$\frac{N_D}{N_{dD}} \cdot \left[1 + 0.5 \cdot \alpha \left(1 - \frac{N_D}{N_{dD}} \right) \right] + \frac{M}{M_d} \leq 1$$

$$\frac{18.87}{30.06} \cdot \left[1 + 0.5 \cdot 1.758 \left(1 - \frac{18.87}{30.06} \right) \right] + \frac{0.40}{1.093}$$

$$= 0.628 \cdot [1 + 0.5 \cdot 1.758(1 - 0.628)] + 0.366$$

$$= 0.833 + 0.366 = 1.20 > 1$$

L'interaction M-N est automatiquement affichée par le fichier Excel.

Interaction formula	$\frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \cdot \left[1 + 0.5 \cdot \alpha \cdot \left(1 - \frac{N_{c,Ed}}{N_{c,Rd}} \right) \right] + \frac{M_{c,Ed}}{M_{c,Rd}}$	=	1.20 > 1.0
---------------------	--	---	------------

La formule confirme bien qu'avec le chargement de 4 charges de 3,19 kN, soit 12,77 kN, l'arc s'effondre comme on l'a observé lors des tests.

9. BIBLIOGRAPHIE

- [1] James L. Jorgenson J.L., Chowdhury A.H.: Buckling Strength of cold formed steel curved panels.
- [2] EN 1090-4:2016 Execution Of Steel Structures And Aluminium Structures - Part 4: Technical Requirements For Cold-Formed Structural Steel Elements And Cold-Formed Structures For Roof, Ceiling, Floor And Wall Applications
- [3] CEN, EN 1990 Eurocode: basis of structural design
- [4] CEN, EN 1991-1-1: 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-1: General actions - Densities, self-weight, imposed loads for buildings
- [5] CEN, EN 1991-1-2: 2005- Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire
- [6] CEN, EN 1991-1-3: 2005- Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-3: General actions - Snow loads
- [7] CEN, EN 1991-1-4: 2005- Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions
- [8] CEN, EN 1991-1-5: 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-5: General actions - Thermal actions
- [9] CEN, EN 1991-1-6: 2005 Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-6: General actions - Actions during execution"
- [10] CEN, EN 1993-1-2: 2005 Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design
- [11] CEN, EN 1993-1-3:2006 – Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rule - Supplementary rules for cold-formed member and sheeting, Brussels, 2006.
- [12] CEN, EN 1998-1: 2013 Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance
- [13] DIN 18807 part 1 and part 3: trapezoidal sheeting in buildings; steel trapezoidal sheeting.
- [14] DIN 18800 part2: steel structures- stability- buckling of bars and skeletal structures
- [15] R. HOLZ, GRISPE – WP2: Curved Profiles – D2.2 Test program definition, 2016
- [16] R. HOLZ, GRISPE – WP2: Curved Profiles – D2.4 Test analysis and interpretation,2016

Annexe 1

Background pour la nouvelle méthode de dimensionnement des profils cintrés.

D2.1	GRISPE WP2 Background document	Christian FAUTH (KIT)
D2.2	GRISPE WP1 Test programme definition	Rainer HOLZ (IFL)
D2.3	GRISPE Test report of curved profiles	Christian FAUTH (KIT)
D2.4	GRISPE WP1 Test analysis and interpretation	Rainer HOLZ (IFL)
D2.5	GRISPE Background guidance for EN 1993-1-3 to design of sheeting with embossments and indentations	Christian FAUTH (KIT)