Reconstitution de la continuité de tôles d'acier nervurées sur appuis intermédiaires par assemblage de profils **Justification par calculs** selon les Eurocodes

Par Thibault RENAUX, Rainer HOLZ et Christian FAUTH

Article

RÉSUMÉ

Cet article s'inscrit dans le cadre des travaux du projet GRISPE PLUS (valorisation), menés suite au projet GRISPE (recherche). Tous deux ont fait l'objet de subventions européennes RFCS et traitent de 9 familles de produits d'enveloppe métallique. Cet article est consacré à l'une des 9 familles de produits, à savoir des assemblages de tôles d'acier nervurées (TAN) destinées à la réalisation de toitures plates.

Après une présentation du contexte décrivant plusieurs problématiques d'ingénierie, un inventaire des solutions actuellement disponibles au sein du corpus normatif est dressé.

Les principaux résultats du projet GRISPE sont repris ainsi que les conditions d'utilisation d'une méthode de dimensionnement. Cette méthode de dimensionnement porte sur des TAN assemblées sur appui selon diverses configurations : simple recouvrement, recouvrement double et profil en continuité avec renfort local sur appui. Ces technologies induisent un apport conséquent de résistance supplémentaire autorisant par exemple de considérer deux profils isostatiques assemblés comme un seul et même profil en continuité (cas des recouvrements simples et doubles).

Des exemples de calculs sont présentés en dernière partie afin d'illustrer l'application de cette méthode de dimensionnement.

1 | INTRODUCTION CONTEXTUELLE

Le dimensionnement de TAN couvertes par la norme [1] utilisées pour la réalisation de toitures plates ou à faible pente avec isolation et étanchéité, conformément aux recommandations données par les Eurocodes, permet de traiter les cas courants. Ceux-ci correspondent à une TAN posée et fixée sur plusieurs appuis qui doit résister notamment à l'application de charges uniformément réparties. Le dimensionnement d'une trame de toiture constituée de plusieurs travées, ellesmêmes recevant plusieurs TAN, est alors décomposé en une succession de calculs. Chaque calcul consiste à analyser la résistance de chaque TAN et l'effet de continuité potentiellement induit par le recouvrement de deux TAN successives sur un appui n'est ainsi pas retenu. La meilleure configuration de résistance pour la TAN, généralement en pose hyperstatique sur 3 appuis, sera dès lors privilégiée.

Les sorties de toitures et de dômes, en nombre croissant respectivement pour le désenfumage notamment et pour l'éclairage naturel, inhérent à l'évolution réglementaire en matière de sécurité incendie et thermique, créent des discontinuités dans le profil des charges appliquées qui peuvent être amplifiées par l'effet combiné de la neige et du vent. Cette situation est également typique en rive de toiture en présence d'un acrotère. En outre, il peut arriver que, pour des raisons diverses et variées, ces sorties de toitures ou dômes soient rajoutées en cours de chantier et donc après le dimensionnement initial de la trame de la structure et des TAN.

L'ingénieur qui a mené son calcul sur la base d'une pose hyperstatique d'une TAN sur 2 travées peut donc quotidiennement être amené à revoir sa copie. C'est le cas lorsque cette TAN doit résister à une accumulation de charge dans l'une des deux travées car se situant à proximité d'un acrotère ou d'un dôme. C'est également le cas lorsque cette TAN, initialement sur 2 travées, se retrouve en pose isostatique car une sortie de toiture est implantée sur la deuxième travée. Il n'est donc pas rare que le choix initial de la TAN soit remis en question et que sa résistance doive être améliorée via l'augmentation de son épaisseur.

La norme [2] ne traite pas le dimensionnement de la continuité d'une TAN sur appui en configuration de chantier dans le cas de profils transportés en deux parties puis assemblés sur appui afin de recréer une continuité du profil par recouvrement ou dans le cas de résolution d'un problème de flèche excessive entre appuis.

Afin d'apporter à l'ingénieur des solutions évitant une augmentation d'épaisseur, les projets GRISPE et GRISPE PLUS ont été réalisés. Ils permettent de proposer des dispositions technologiques d'assemblages de TAN qui conduisent à optimiser la résistance mécanique. Des guides de dimensionnement ont été rédigés et des amendements, qui seront étudiés dans le cadre de la révision de l'Eurocode 3 partie 1-3 [2], ont été proposés.

La figure 1 ci-après présente les différentes solutions pratiques étudiées.



Figure 1 – Assemblages de TAN sur appui intermédiaire.

L'objectif principal du projet GRISPE PLUS est la promotion, la diffusion, la valorisation et l'utilisation pratique des conclusions et des résultats obtenus sur plusieurs familles de profils en acier étudiées dans le cadre du projet n°RFSR-CT-2013-0018 « Guidelines and Recommendations for Integrating Specific Profiled steel sheets in the Eurocodes » (GRISPE), financé partiellement par le RFCS. Le projet GRISPE PLUS a, quant à lui, reçu également un soutien financier du Fonds de recherche du charbon et de l'acier (RFCS) de la Communauté Européenne au titre de la convention de subvention n°754092. Le projet GRISPE PLUS a été coordonné par l'Enveloppe métallique du bâtiment (EMB).

2 | NOTATIONS

j	Inclinaison de l'âme des nervures [3] [4] (degré)
$\sum F_{V,Rd}$	Somme des résistances de calcul au cisaillement des fixations constituant les connexions dans les âmes d'une nervure [6] (kN)
а	Longueur de recouvrement [3] [4] (m)
a _{min}	Longueur minimale de recouvrement (m)
Ь	Largeur de plage [2] (mm)
b _r	Pas ou entraxe des nervures [3] [4] (m)
b _u	Largeur du support central de l'essai d'appui intermédiaire [5] [6] (mm)
d	Diamètre des perçages [3] [4] (mm)
h	Hauteur d'une tôle d'acier nervurée [2] (mm)
l ou L	Travée, distance entre appuis [3] (m)
l a,B	Largeur de l'appui intermédiaire [6] (mm)
Р	Entraxe des fixations de connexion [3] [4] (mm)
t	Épaisseur d'acier de calcul [2] (mm)
$F_{_{\mathrm{Ed}}}$	Effort agissant linéaire induit par la connexion par couturage [6] (kN/m)
F _{v,Rd}	Résistance de calcul au cisaillement d'une fixation [6] (kN)
К	Plus grande valeur des deux efforts passant dans les connexions 1 et 2 [3] [4] (kN)
K _i	Effort passant dans la connexion i [3] [4] (kN)
K ₁	Effort passant dans la connexion 1 située au droit de l'appui [3] [4] (kN)
K ₂	Effort passant dans la connexion 2 située en extrémité d'assemblage [3] [4] (kN)
$K_{_{Ed}}$	Effort agissant maximal passant dans les connexions d'assemblage [6] (kN)
L _v	Longueur hors-tout de la maquette d'essai [5] [6] (m)
$M_{I,Ed}$	Moment appliqué de flexion en extrémité du recouvrement à gauche de l'appui [6] (m.kN/m)
M _{II,Ed}	Moment appliqué de flexion en extrémité du recouvrement à droite de l'appui [6] (m.kN/m)
M _B	Moment de flexion sur appuis [3] [4] (m.kN/m)
$M_{\mathrm{B,Ed}}$	Moment appliqué de flexion au droit de l'appui intermédiaire [6] (m.kN/m)
M _{B,Rd}	Résistance de calcul à la flexion sur appui [2] [6] (m.kN/m)
$M_{_{Ed}}$	Moment appliqué sur appui [2) (m.kN/m)
R _{B,Ed}	Réaction d'appui intermédiaire [6] (kN/m)

R _{w,Rd,B}	Résistance de calcul à la réaction d'appui intermédiaire [6] (kN/m)
$R_{w,Rd,B,la=160}$	Résistance de calcul à la réaction d'un appui intermédiaire de largeur 160 mm [6] (kN/m)
V_{Ed}	Effort appliqué de cisaillement [2] (kN/m)
V	Effort tranchant à l'appui [3] [4] (kN/m)
$V_{L,Ed}$	Effort maximal appliqué de cisaillement [6] (kN/m)
V _R	Effort de cisaillement passant dans la connexion d'extrémité d'assemblage [4] (kN/m)
V _{w,Rd}	Résistance de calcul au cisaillement [2] [6] (kN/m)

3 | ÉTAT DE L'ART NORMATIF

Les normes [3] et [4] fournissent une solution pour les recouvrements des profils. Ceux-ci sont autorisés uniquement aux appuis. Dans la zone de recouvrement, la résistance ainsi obtenue est celle d'un profil en continuité.

Les deux configurations d'assemblage simples sont représentées aux figures 2 et 3 ci-dessous :



Fiqure 2 – Profils avec recouvrement conformément à la norme [4] avec l'extrémité du profil en porte-à-faux en-dessous.



Figure 3 – Profils avec recouvrement conformément à la norme [4] avec l'extrémité du profil en porte-à-faux au-dessus.

Dans les deux assemblages, 2 connexions sont réalisées par âme de nervure : la connexion 1 est localisée au droit de l'appui et la connexion 2 est proche de l'extrémité du porte-à-faux.

Un maximum de 2 fixations peut être implanté horizontalement et verticalement pour chaque connexion (4 fixations maximum au total). La pince et l'entraxe requis, voir figure 4 ci-après, doivent vérifier les conditions suivantes :

- pince dans la direction de l'effort : \geq 3d et \geq 20 mm;
- pince horizontale : ≥ 30 mm;
- entraxe p : \geq 4d et \geq 40 mm et \leq 10d.



Figure 4 – Implantation des fixations conformément à la norme [4] pour un assemblage efficace.

Pour que l'assemblage entre TAN soit pleinement efficace, la capacité de résistance en cisaillement de l'ensemble des fixations disposées à chaque connexion (4 dans le cas de la Figure 4), doit être supérieure à l'effort qui y passe. La norme [3] prescrit de vérifier les connexions en considérant la plus grande valeur K des deux efforts K_1 et K_2 passant respectivement par les connexions 1 et 2 des Figures 2 et 3 :

$$K_{Ed} = maxK_i = \frac{|M_{B,Ed}|}{2 * a * \sin \varphi} * b_R$$
 (Figure 2)

(1)

$$K_{Ed} = maxK_i = \frac{\left|\frac{M_{B,Ed}}{a} + V_{L,Ed}\right|}{2 * \sin\varphi} * b_R$$
 (Figure 3)

(2)

4 | PRINCIPAUX RÉSULTATS DU PROJET GRISPE

Pour confirmer la procédure décrite dans la norme [3], une série d'essais d'appui intermédiaire, dont la figure 6 présente le principe, a été menée sur des assemblages avec recouvrement simple. Des essais complémentaires, toujours selon la figure 6, ont été réalisés sur des assemblages présentant des doubles recouvrements ainsi que sur des profils en continuité recevant un renfort local au droit d'un appui.

Deux types de profils (135/310 and 158/250), représentatifs de l'ensemble de la gamme en regard de l'inclinaison des nervures, ont été sélectionnés et fournis en 2 épaisseurs de fabrication pour les essais comme le montre la figure 5 ci-après.



Figure 5 – Profils trapézoïdaux testés.

Au total, la campagne représente 128 essais d'appuis intermédiaires conformément à [2] afin d'étudier la capacité résistante de plusieurs configurations d'assemblages (figures 6 et 7). À chaque configuration correspond un type d'assemblage (figure 6), un type de profil (figure 5), une épaisseur de profil, une largeur d'appui intermédiaire b. (figure 6, 2 largeurs étudiées durant le projet GRISPE) et une portée d'essai (2 au total). Chaque configuration fait l'objet de 2 essais.

L'ensemble de ces essais a été complété par des tests de traction sur éprouvettes normalisées. Les essais réalisés sur les assemblages conformes à [3] ont servi à vérifier les règles de calcul prescrites par cette même norme [3], notamment concernant les fixations. Les essais réalisés sur des TAN simples en continuité, non assemblées, ont, eux, servi de cas de référence.



configurations sur chantier

Figure 6 – Principe schématique de l'essai d'appui intermédiaire



Figure 7 – Exemple de ruine d'assemblage à l'issue d'un essai d'appui intermédiaire

L'analyse et l'interprétation des essais qui ont été réalisées sur les différents assemblages ont fait l'objet des documents [5] et [6], et leur comparaison s'est basée sur des diagrammes d'interaction entre le moment résistant sur appui (M) et la résistance à la réaction d'appui (R). Ces diagrammes sont établis selon A.5.2.3 de la norme [2] et consistent à reporter pour chaque portée d'essai la valeur du moment (M) correspondant à une valeur de réaction (R). Le résultat final est un graphique comportant autant de point que de portées testées. La figure A.8 de la norme [2] présente le cas de 3 portées d'essai, le projet GRISPE étant basé sur 2 portées d'essai par configuration étudiée, le graphique se présente sous la forme de la figure 8.



Figure 8 – Exemple de diagramme d'interaction obtenu à partir de 2 essais d'appui intermédiaire.

La droite d'interaction, qui passe par les deux points associés à des portées d'essai, permet de déterminer le moment résistant sur appui et la réaction pour toute portée intermédiaire. Les valeurs maximales du moment résistant sur appui et de la réaction sont respectivement illustrées par le segment horizontal « Limit $M_{_{C,Rk,B}}$ » et vertical « Limit $R_{_{W,Rk,B}}$ » (Figure 8) qui représentent respectivement les valeurs maximales en moment et en résistance obtenues pour un couple d'essai.

Des méthodes de calcul ont été fournies dans le cadre du projet GRISPE [6] pour tous les types d'assemblage comprenant notamment une étape de décomposition du moment de flexion en deux efforts d'égale intensité mais de sens opposé ; ces efforts étant transmis aux assemblages par les fixations fixées dans les âmes et travaillant en cisaillement.

En effet, les observations menées durant la campagne d'essais ont révélé que le phénomène dimensionnant la connexion entre TAN était une ruine par cisaillement.

Deux autres conclusions ont été tirées du projet GRISPE :

Dans les cas de l'assemblage avec recouvrement de part et d'autre de l'appui et du profil continu avec renfort local, la combinaison des résistances des deux profils ne correspond pas exactement à l'addition algébrique de l'ensemble mais représente au maximum 1,8 x M_{B,Rd} avec M_{B,Rd} la résistance en flexion d'un profil ;

■ Un mode de ruine spécifique peut apparaître en extrémité d'assemblage (voir figure 7) lorsque la longueur de recouvrement des profils est trop courte (a<L/10). Il convient ainsi de vérifier que la moitié de la réaction d'appui ultime du profil posé à l'envers (sens « négatif » en opposition au sens usuel de pose du profil), sur un appui intermédiaire de largeur maximale admise, en général $l_{a,B} = 160$ mm, équilibre au minimum l'effort agissant linéaire passant en extrémité de l'assemblage (connexion par couturage) : 0,5 R_{wRd,B} ≥ F_{rd}.

5 | AVANT-PROPOS À LA MÉTHODE DE DIMENSIONNEMENT

La méthode de dimensionnement décrite dans la suite de cet article propose uniquement un moyen de déterminer les résistances de calcul M_{B'Rd} et R_{w,Rd,B} d'un assemblage de profils couverts par la norme [1], conformément à la norme [7], son amendement [8] et corrigendum [9]. Les valeurs de calcul des effets des actions doivent être évaluées en conformité avec 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]. Cette méthode 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].

Notons que les normes nationales de certains pays peuvent être utilisées sous condition de suivre les principes généraux de dimensionnement définis par [7].

Cette méthode est établie dans un domaine de dispositions technologiques minimales, voir paragraphe 6, et ne traite pas des dispositions de charges de montage et d'entretien. Elle n'est valable que si les tolérances des produits formés à froid se conforment à la norme [2] et à la norme [21].

Les domaines suivants ne sont pas traités par la méthode de dimensionnement :

- la justification en situation d'incendie, pour lequel il convient de se référer aux règlementations nationales en accord avec [22] et [23];
- la justification à l'aléa séismique pour lequel il convient de se référer aux règlementations nationales en accord avec [24];
- les aspects environnementaux pour lesquels il convient de se référer aux règlementations nationales ;
- la thermique pour laquelle il convient de se référer aux règlementations nationales en accord avec [25] ;
- et l'acoustique pour laquelle il convient de se référer aux règlementations nationales.

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

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, les charges d'exploitation uniformes ou ponctuelles et autres actions imposées,
- [12] à [14] pour les actions de neige,
- [15] à [17] pour les actions de vent.

6 | DISPOSITIONS TECHNOLOGIQUES MINIMALES

La TAN doit reposer sur 3 appuis, ou plus, présentant une largeur minimale de repos (appui) de 60 mm, en acier ou en bois. Le contact direct de la TAN avec du béton n'est pas admis et tout support béton devra présenter un insert métallique correctement ancré dans le béton.

Les TAN doivent avoir une épaisseur nominale constante, sur la totalité de leur longueur, dans les tolérances admises, et doivent présenter une section transversale uniforme sur leur longueur. Les sections transversales des TAN comprennent essentiellement un nombre d'éléments plans joints par des rayons d'arrondi et leurs dimensions satisfont aux exigences générales mentionnées dans la norme [2], section 1.5.3.

Les dispositions relatives au dimensionnement par calcul fournies ici, ne peuvent pas être appliquées à une section transversale dont les proportions géométriques sont en dehors des ratios largeur/épaisseur b/t et h/t mentionnés à la figure 9 ci-dessous, extraite du tableau 5.1 de la norme [2].

1 11



Figure 9 – Panel de proportions géométriques.

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. L'épaisseur nominale minimale est 0,75 mm.

La TAN ne doit pas être perforée. Sa section droite est un profil de grande hauteur présentant des raidisseurs en plage haute et dans l'âme, voir figure 10.



Figure 10 – Géométries types de TAN

Le nombre et l'espacement des fixations sont ceux décrits au paragraphe 2 (voir figure 4).

La longueur de recouvrement « a » recommandée est L/10, L étant la distance entre appuis, avec une valeur minimale a_{min} de 0,50 m.

Les travées successives pour lesquelles la continuité est recrée par assemblage de TAN peuvent être égales ou inégales.

Les charges appliquées sont des charges réparties et la trame de la structure supportant les TAN est constituée de travées égales.

7 | EXIGENCES TECHNOLOGIQUES DE BASE ET PRORIÉTÉS DES MATÉRIAUX

Les appuis sont conformes aux références [18] à [20] pour l'acier ou aux références [26] à [29] pour le bois. Les TAN sont marquées CE selon la norme [1] et leurs propriétés « matériau » doivent satisfaire aux exigences formulées par la norme [2], section 3, avec une nuance d'acier minimale S 320 GD + Z. Les propriétés « matériau » constituant les fixations doivent satisfaire aux exigences formulées par la norme [2], section 8. Les coefficients partiels de la norme [2], section 2 doivent être appliqués.

8 | BASES DE CALCUL

Cette nouvelle méthode de calcul est fournie pour :

- déterminer la résistance de 4 types d'assemblage à la combinaison d'un moment de flexion et d'une réaction sur appui ;
- vérifier la connexion entre deux TAN.

Elle est dédiée aux TAN assemblées par recouvrements, au droit d'appuis intermédiaires, conformément à l'une des 4 solutions illustrées à la figure 1 [6].

Les TAN doivent avoir la même épaisseur de calcul et être assemblées tel qu'illustré à la figure 4.

Un maximum de 4 fixations, disposées en carré dans chaque âme, peut être utilisé à chaque connexion pour assembler les TAN. Leur implantation suit les prescriptions de la norme [4] reprises au paragraphe 3.

9 | PROCÉDURE DE DIMENSIONNEMENT DES ASSEMBLAGES

9.1 | TAN ASSEMBLÉES PAR RECOUVREMENT SIMPLE AVEC PORTE-À-FAUX PAR-DESSUS

La procédure de dimensionnement de TAN assemblées par recouvrement simple avec porte-à-faux par-dessus (voir figure 2) se décompose en 3 étapes [6].

Étape 1 - Vérification de la résistance de l'assemblage

La vérification de la résistance de l'assemblage à l'axe de l'appui est menée à partir des valeurs de résistance de calcul ($M_{B,Rd}$ et $R_{w,Rd,B}$) d'un profil continu, de même épaisseur de calcul, et tenant compte de l'influence de la réaction d'appui (interaction M-R) dans le cas de charges descendantes ou de l'interaction M-V dans le cas de charges ascendantes [6].

 $M_{B,Rd}$ et $R_{w,Rd,B}$ peuvent être déterminés par calcul conformément aux paragraphes 6.1.4 et 6.1.7 de la norme [2] et l'interaction M-R conformément au paragraphe 6.1.11 de cette même norme.

Ainsi, pour des charges descendantes, il convient de vérifier :

$rac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} \leq 1.0$;	(3)
$rac{R_{B,Ed}}{R_{w,Rd,B}} \leq 1.0$;	(4)
$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{R_{B,Ed}}{R_{w,Rd,B}} \le 1,25.$	(5)

13

Et pour des charges ascendantes :

 $\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} \le 1,0;$ $\frac{V_{L,Ed}}{V_{w,Rd}} \le 1,0;$ $M_{B,Ed} = V_{V,Ed}$ (6)
(7)

$$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{V_{L,Ed}}{V_{w,Rd}} \le 1,25.$$
(8)

Étape 2 - Vérification de la résistance locale de l'âme

Dans le cas de charges descendantes, la résistance locale de l'âme à l'extrémité du porte-à-faux doit être vérifiée par l'expression :

$$F_{Ed} < F_{Rd} \tag{9a}$$

Avec :

$$F_{Ed} = M_{B,Ed}/a \tag{9b}$$

Et :

 $F_{Rd} = 0.5 \cdot R_{w,Rd,B}$

Avec : $R_{w,Rd,B}$ la réaction d'appui ultime du profil posé à l'envers (sens « négatif » en opposition au sens usuel de pose du profil) sur un appui intermédiaire de largeur maximale admise, en général $l_{a,B} = 160$ mm, exprimée en kN.m/m ; et M_{B,Ed}, le moment appliqué de flexion au droit de l'appui intermédiaire [6] (m.kN/m).

En se basant sur le sens normal du profil tel que celui de la Figure 10, une pose à l'envers du profil correspond au sens « négatif » pour lequel la plus grande plage (plage haute de la Figure 10) est en contact avec l'appui.

Dans le cas de charges ascendantes, la résistance locale de l'âme est prise en compte dans la vérification des formules 7 et 8.

Étape 3 - Vérification de la connexion K_{Ed}

La vérification, menée pour chaque onde, peut être effectuée avec :

$$\frac{K_{Ed}}{\sum F_{V,Rd}} \le 1,0\tag{10}$$

Et :

$$K_{Ed} = \max K_i = \frac{|(M_{B,Ed}/a) + V_{L,Ed}|}{(2 \cdot \sin \varphi)} \cdot b_R$$
⁽¹¹⁾

Avec : \sum_{v} , la résistance au cisaillement de l'ensemble des vis à chaque connexion (4 vis dans le cas de la Figure 4).

9.2 | TAN ASSEMBLÉES PAR RECOUVREMENT SIMPLE AVEC PORTE-À-FAUX EN DESSOUS

La procédure de dimensionnement de TAN assemblées par recouvrement simple avec porte-à-faux en dessous (voir figure 3) se décompose également en 3 étapes [6].

Étape 1 - Vérification de la résistance de l'assemblage

La vérification de la résistance de l'assemblage à l'axe de l'appui est menée à partir des valeurs de résistance de calcul $(M_{B,Rd} \text{ et } R_{w,Rd,B})$ d'un profil continu, de même épaisseur de calcul, et tenant compte de l'influence de la réaction d'appui (interaction M-R) dans le cas de charges descendantes ou de l'interaction M-V dans le cas de charges ascendantes [6].

 $M_{B,Rd}$ et $R_{w,Rd,B}$ peuvent être déterminés par calcul conformément aux paragraphes 6.1.4 et 6.1.7 de la norme [2] et l'interaction M-R conformément au paragraphe 6.1.11 de cette même norme.

(9c)

Ainsi, pour des charges descendantes, il convient de vérifier :

, and, pour des charges descendances, it contrent de vermer :	
$rac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} \leq 1,0$;	(12)
$\frac{R_{B,Ed}}{R_{w,Rd,B}} \le 1.0;$	(13)
$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{R_{B,Ed}}{R_{w,Rd,B}} \le 1,25.$	(14)
Et pour des charges ascendantes : $\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} \leq 1,0$;	(15)
$rac{V_{L,Ed}}{V_{w,Rd}} \leq 1.0$;	(16)
$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{V_{L,Ed}}{V_{w,Rd}} \le 1,25.$	(17)

Étape 2 - Vérification de la résistance locale de l'âme

La vérification de la résistance locale de l'âme est prise en compte dans la vérification des formules 13 et 14 sous charges descendantes et des formules 16 et 17 en charges ascendantes.

Étape 3 - Vérification de la connexion en cisaillement K_{Ed}

La vérification, menée pour chaque onde, peut être effectuée avec :

$$\frac{K_{Ed}}{\sum F_{V,Rd}} \le 1,0$$
(18)

Et :

$$K_{Ed} = \max K_i = \frac{|M_{B,Ed}|}{(2 \cdot a \cdot \sin \varphi)} \cdot b_R$$
(19)

Avec : $\sum F_{V,Rd}$ la résistance au cisaillement de l'ensemble des vis à chaque connexion (4 vis dans le cas de la Figure 4).

9.3 | TAN ASSEMBLÉES PAR RECOUVREMENT DOUBLE

La procédure de dimensionnement de T.A.N. assemblées par recouvrement double se décompose en 5 étapes [6].



Figure 11 – Recouvrement double.

Étape 1 - Condition préalable

La distribution des moments de flexion sous charges de calcul, comme pour les TAN continues, doit être déterminée afin d'évaluer $M_{B,Ed}$, $M_{I,Ed}$, $M_{II,Ed}$ et $R_{Ed,B}$.

Étape 2 - Vérification de la résistance de l'assemblage à l'axe de l'appui

La vérification de la résistance de l'assemblage à l'axe de l'appui est menée avec 90 % des valeurs de résistance de calcul $(M_{_{B,Rd}} \text{ et } R_{_{w,Rd,B}})$ de chaque profil, de même épaisseur de calcul, comme suit [6] :

$$M_{B,Ed} \le 0.9 \cdot \sum M_{B,Rd}$$
;
 $R_{B,Ed} \le 0.9 \cdot \sum R_{w,Rd,B}$.
(20)

Il convient également de considérer l'interaction M-R conformément au paragraphe 6.1.11 de la norme [2], et l'interaction M-V conformément au projet GRISPE [6].

Ainsi, pour des charges descendantes en complément des relations 20 et 21 ci-avant :

$$\frac{M_{B,Ed}}{0.9 \cdot \sum M_{B,Rd}} + \frac{R_{B,Ed}}{0.9 \cdot \sum R_{w,Rd,B}} \le 1,25.$$
(22)

Et pour des charges ascendantes :

$$\frac{M_{B,Ed}}{0.9 \cdot \sum M_{B,Rd}} \le 1.0;$$
(23)

$$\frac{V_{L,Ed}}{0.9 \cdot \sum V_{w,Rd}} \le 1.0;$$
(24)

$$\frac{M_{B,Ed}}{0.9 \cdot \sum M_{B,Rd}} + \frac{V_{L,Ed}}{0.9 \cdot \sum V_{w,Rd}} \le 1,25.$$
(25)

Étape 3 - Vérification de la résistance de l'assemblage aux extrémités du recouvrement

Cette vérification, de la continuité de l'assemblage, est menée à partir des moments de flexion $M_{I,Ed}$ ou $M_{II,Ed}$ et des efforts linéaires correspondant induits par les connexions K_i :

$$F_{Ed} = \frac{M_{B,Ed}}{2 \cdot a} \tag{26}$$

L'effort linéaire F_{Ed} est déterminé pour l'ensemble des cas de charges (descendantes et ascendantes).

Dans le cas de charges descendantes, F_{Ed} agit comme un effort de traction dans les âmes des profils continus et la vérification se décompose comme suit :

$$\frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} \le 1.0$$
; (27)

$$\frac{M_{II,Ed}}{M_{B,Bd}} \le 1.0$$
; (28)

$$\frac{F_{Ed}}{V_{w,Rd}} \le 1.0;$$
⁽²⁹⁾

Avec l'interaction M-V conformément au projet GRISPE [6] aux extrémités du recouvrement par :

$$\frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{V_{w,Rd}} \le 1,25;$$
(30)

$$\frac{M_{II,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{V_{w,Rd}} \le 1,25.$$
(31)

Dans le cas de charges ascendantes, F_{Ed} agit comme un effort de compression dans les âmes des profils continus et la vérification se décompose comme suit :

$$\frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} \le 1.0$$
; (32)

$$\frac{M_{II,Ed}}{M_{B,Rd}} \le 1,0;$$
(33)
$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd,B}} \le 1,0;$$
(34)

Avec l'interaction M-R conformément au paragraphe 6.1.11 de la norme [2] aux extrémités du recouvrement par :

$$\frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd,B}} \le 1,25;$$

$$\frac{M_{II,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd,B}} \le 1,25.$$
(35)
(36)

Pour l'ensemble de ces cas de charges (vérifications), les valeurs de résistance sont celles des profils posés en sens « négatif » (à l'envers) sur appuis intermédiaires.

Étape 4 - Vérification de la résistance locale de l'âme

Sous charges descendantes, la déformation locale de l'âme aux extrémités des porte-à-faux doit être vérifiée par l'expression :

$$F_{Ed} < F_{Rd} \tag{37a}$$

Avec :

$$F_{Ed} = M_{B,Ed}/a$$
Et : (37b)

$$F_{Rd} = 0.5 \cdot R_{w,Rd,B}$$
 (37c)

Avec : $R_{w,Rd,B}$ la réaction d'appui ultime du profil posé à l'envers (sens « négatif ») sur un appui intermédiaire de largeur maximale admise, en général $l_{a,B}$ = 160 mm , exprimée en kN.m/m ; et M_{B,Ed}, le moment appliqué de flexion au droit de l'appui intermédiaire [6] (m.kN/m).

Dans le cas de charges ascendantes, la résistance locale de l'âme est prise en compte dans la vérification des formules (24) et (25).

Étape 5 - Vérification de la connexion K_{Ed}

La vérification, menée pour chaque onde, peut être effectuée avec :

$$\frac{K_{Ed}}{\sum F_{V,Rd}} \le 1,0$$
Et : (38)

$$K_{Ed} = \max K_i = \frac{|M_{B,Ed}|}{(4 \cdot a \cdot \sin \varphi)} \cdot b_R$$
(39)

Avec : $\sum_{k} F_{V,Rd}$ la résistance au cisaillement de l'ensemble des vis à chaque connexion (4 vis dans le cas de la Figure 4).

La vérification de la connexion doit être menée pour l'ensemble des cas de charges (descendantes et ascendantes).

9.4 | PROFIL CONTINU AVEC RENFORT LOCAL

La procédure de dimensionnement de TAN continues avec renfort local sur appui intermédiaire se décompose également en 5 étapes [6].





Figure 12 – Profil continu avec renforcement local.

Étape 1 - Condition préalable

La distribution des moments de flexion sous charges de calcul, comme pour les TAN continues, doit être déterminée afin d'évaluer $M_{B,Ed}$, $M_{I,Ed}$, $M_{II,Ed}$ et $R_{Ed,B}$.

Étape 2 - Vérification de la résistance de l'assemblage à l'axe de l'appui

La vérification de la résistance de l'assemblage à l'axe de l'appui est menée avec 90 % des valeurs de résistance de calcul $(M_{_{BRd}} \text{ et } R_{_{w,Rd,B}})$ de chaque profil, de même épaisseur de calcul, comme suit [6] :

$$M_{B,Ed} \le 0.9 \cdot \sum_{m} M_{B,Rd};$$

$$(40)$$

$$R_{B,Ed} \leq 0.9 \cdot \sum R_{w,Rd,B}$$
 ;

Il convient également de considérer l'interaction M-R conformément au paragraphe 6.1.11 de la norme [2], et l'interaction M-V conformément au projet GRISPE [6].

Ainsi, pour des charges descendantes en complément des relations 40 et 41 ci-avant :

$$\frac{M_{B,Ed}}{0.9 \cdot \sum M_{B,Rd}} + \frac{R_{B,Ed}}{0.9 \cdot \sum R_{w,Rd,B}} \le 1,25.$$
 (42)

Et pour des charges ascendantes :

$$\frac{M_{B,Ed}}{0.9 \cdot \sum M_{B,Rd}} \le 1.0;$$
(43)

$$\frac{V_{L,Ed}}{0.9 \cdot \sum V_{w,Rd}} \le 1.0;$$
(44)

$$\frac{M_{B,Ed}}{0.9 \cdot \sum M_{B,Rd}} + \frac{V_{L,Ed}}{0.9 \cdot \sum V_{w,Rd}} \le 1,25.$$
(45)

Étape 3 - Vérification de la résistance de l'assemblage aux extrémités du recouvrement

Cette vérification, de la continuité de l'assemblage, est menée à partir des moments de flexion $M_{I,Ed}$ ou $M_{II,Ed}$ et des efforts linéaires correspondant induits par les connexions K_i :

$$F_{Ed} = \frac{M_{B,Ed}}{2 \cdot a} \tag{46}$$

L'effort linéaire F_{Ed} est déterminé pour l'ensemble des cas de charges (descendantes et ascendantes).



(41)

Dans le cas de charges descendantes, F_{Ed} agit comme un effort de traction dans les âmes des profils continus et la vérification se décompose comme suit :

$$\frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} \le 1,0$$
; (47)

$$\frac{M_{II,Ed}}{M_{B,Rd}} \le 1,0; \tag{48}$$

$$\frac{F_{Ed}}{V_{w,Rd}} \le 1.0; \tag{49}$$

Avec l'interaction M-V conformément au projet GRISPE [6] aux extrémités du recouvrement par :

$$\frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{V_{w,Rd}} \le 1,25;$$
(50)

$$\frac{M_{II,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{V_{w,Rd}} \le 1,25.$$
(51)

Dans le cas de charges ascendantes, F_{Ed} agit comme un effort de compression dans les âmes des profils continus et la vérification se décompose comme suit :

$$\frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} \le 1,0$$
; (52)

$$\frac{M_{II,Ed}}{M_{B,Rd}} \le 1,0;$$
(53)

$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd,B}} \le 1,0;$$
⁽⁵⁴⁾

Avec l'interaction M-R conformément au paragraphe 6.1.11 de la norme [2] aux extrémités du recouvrement par :

$$\frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd,B}} \le 1,25;$$
(55)
$$\frac{M_{II,Ed}}{R_{II,Ed}} + \frac{F_{Ed}}{R_{Ed}} \le 1,25.$$
(56)

 $\frac{1}{M_{B,Rd}} + \frac{1}{R_{w,Rd,B}} \le 1,25.$

Pour l'ensemble de ces cas de charges (vérifications), les valeurs de résistance sont celles des profils posés en sens « négatif » (à l'envers) sur appuis intermédiaires.

Étape 4 - Vérification de la résistance locale de l'âme

Sous charges descendantes, la résistance locale de l'âme aux extrémités des porte-à-faux doit être vérifiée par l'expression :

$$F_{Ed} < F_{Rd} \tag{57a}$$

(57b)

19

Avec :

 $F_{Ed} = M_{B,Ed}/a$

Et :

$$F_{Rd} = 0.5 \cdot R_{w,Rd,B} \tag{57c}$$

Avec : $R_{w,Rd,B}$ la réaction d'appui ultime du profil posé à l'envers (sens « négatif ») sur un appui intermédiaire de largeur maximale admise, en général $l_{a,B}$ = 160 mm , exprimée en kN.m/m ; et M_{B,Ed}, le moment appliqué de flexion au droit de l'appui intermédiaire [6] (m.kN/m).

Dans le cas de charges ascendantes, la résistance locale de l'âme est prise en compte dans la vérification des formules (44) et (45).

Étape 5 - Vérification de la connexion K_{Ed}

La vérification, menée pour chaque onde, peut être effectuée avec :

$$\frac{K_{Ed}}{\sum F_{V,Rd}} \le 1.0$$
(58)

Et :

 $K_{Ed} = \max_{M} K_i = \frac{|M_{B,Ed}|}{(4 \cdot a \cdot \sin \varphi)} \cdot b_R$ Avec : $\sum F_{V,Rd}$ la résistance au cisaillement de l'ensemble des vis à chaque connexion (4 vis dans le cas de la Figure 4). La vérification de la connexion doit être menée pour l'ensemble des cas de charges (descendantes et ascendantes).

10 | EXEMPLES DE DIMENSIONNEMENT

10.1 GÉNÉRALITÉS

Les deux exemples de cet article sont repris des guides de dimensionnement consultables sur le site www.grispeplus.eu. Les principales étapes sont ici présentées et il conviendra de consulter ces guides pour les détails des calculs.

Ces exemples traitent de procédés de toiture avec étanchéité de deux ouvrages pour lesquels la structure porteuse métallique est constituée de pannes laminées à chaud IPE 330 (160 mm de largeur de semelle) espacées de 5 m 45 ; et de la vérification d'assemblages localisés en zones H et I en référence au paragraphe 7.2.3 de [15].

Les deux toitures sont constituées de TAN, d'une isolation en laine minérale et d'une étanchéité. Le poids propre total de l'isolation et de l'étanchéité g, s'élève à 0,25 kN/m² dans le cas du bâtiment n° 1 et à 1,00 kN/m² dans le cas du bâtiment 2 (présence d'un complexe d'étanchéité lourd).

Les deux bâtiments de 16 m de hauteur sont situés dans une zone industrielle proche d'Ostende (Belgique) et présentent tous deux un acrotère de 80 cm de haut sur toute la périphérie de leur toiture.

La valeur de base de la vitesse de référence du vent v_{b,0} est de 26 m.s⁻¹ et la catégorie de terrain est une catégorie 0. Le coefficient de direction c_{dir} et celui de saison c_{season} sont considérés à 1, tout comme le coefficient d'orographie $c_0(z)$ et le facteur de turbulence k. Pour la masse volumique de l'air ρ , la valeur recommandée de [15] est appliquée, à savoir : $\rho = 1,25$ kg/m³.

Les deux bâtiments sont localisés sur un site balayé par les vents avec un C_a de 0,8 selon [12] et un coefficient de forme de toiture pour la disposition de charge de neige μ_i de 0,8.

La TAN présente une section trapézoïdale 137-310-930 comme suit :



Figure 13 – profil 137-310-930 en sens positif (sens normal d'utilisation).

Le pas du profil b, est de 310 mm. L'angle de l'âme de nervure $\varphi = 66^{\circ}$. Le profil est en acier de nuance S 320 GD + Z 275 de 0,75mm d'épaisseur nominale. Son poids propre g_0 s'élève à 0,097 kN/m².

Les valeurs de calcul de la résistance de ce profil sont déterminées par calcul conformément à [2], [21] et [31] à [33] et considérant un coefficient partiel γ_{m1} de 1,10 :

- Résistance de calcul à la flexion sur appui pour le sens normal d'utilisation du profil, sous charges descendantes : $M_{B,Rd} = 8,17/1,1 = 7,42$ [kNm/m];
- Résistance de calcul à la flexion sur appui et aux extrémités du recouvrement pour le sens inverse d'utilisation du profil, sous charges descendantes :

 $M_{B,Rd} = 9,66/1,1 = 8,78 \,[\text{kNm/m}];$

- Résistance de calcul à la flexion sur appui pour le sens d'utilisation normal du profil, sous charges ascendantes : $M_{B,Rd} = 9,66/1,1 = 8,78 \text{ [kNm/m]};$
- Résistance de calcul à la flexion sur appui pour le sens inverse d'utilisation, sous charges ascendantes : $M_{B,Rd} = 8,30/1,1 = 7,54$ [kNm/m];
- Résistance de calcul à la réaction d'appui intermédiaire, pour le sens normal d'utilisation du profil (160 mm de largeur d'appui):

 $R_{w,Rd,B} = 22,82/1,1 = 20,74 \,[\text{kN/m}];$

Résistance de calcul à la réaction d'appui intermédiaire, pour le sens inverse d'utilisation du profil (160 mm de largeur d'appui):

 $R_{w,Rd,B,la=160} = 22,89/1,1 = 20,80 \text{ [kN/m]};$

Résistance de calcul au cisaillement : $V_{w,Rd} = 28,49/1,1 = 25,9 \text{ [kN/m]}.$

Les fixations, conformes à la section 8 de [2], sont des vis de diamètre 6,3 mm pour lesquelles la résistance de calcul au cisaillement fait l'objet d'un ATE. La résistance de calcul au cisaillement de chaque vis, considérant deux épaisseurs d'acier de 0,75 mm, est $F_{V,Rd} = 0,875$ kN et donc :

$$\sum F_{V,Rd} = 3,50 \text{ kN}.$$

Chaque groupe de 4 vis est distant de 30 mm de l'extrémité du recouvrement ainsi que de la plage haute des profils ; pour un entraxe entre vis de 30 mm.

La toiture du bâtiment 1 est réalisée avec des TAN assemblées par simple recouvrement avec débord en porte-à-faux alternativement par-dessus et en-dessous. La longueur de recouvrement (a) est de 0,80 m. La toiture du bâtiment 2 est décomposée en 2 zones : l'une réalisée avec des TAN assemblées par double recouvrement et l'autre avec des TAN continues avec renforts locaux. La longueur des recouvrements est la même que ci-avant : a = 0,80 m.

Les présents exemples de calcul ne traitent pas des charges de montage. En phase de service, les charges sont inhérentes aux effets du vent et aux poids propres.

10.2 | Hypothèses de chargement

L'action de la neige est négligée devant les autres actions du fait de la valeur caractéristique de neige au sol au niveau de la mer de 0.2kN/m² selon [12] et d'un facteur de combinaison Y₀ de 0.5 conformément à l'annexe nationale belge de la norme [12].

En application de [15] à [17], les charges de vent W_{50}^{+} = 0,69 kN/m² en pression et de W_{50}^{-} = - 1,24 kN/m² en dépression.

Dans le cas du bâtiment 1, la combinaison la plus sévère pour l'effet de pression, au sens de [8] [9] et de l'ANB de [8], donne $Q^+ = 1,50 \text{ kN/m}^2$. Pour la dépression, la combinaison la plus sévère donne $Q^- = -1,51 \text{ kN/m}^2$.

Dans le cas du bâtiment 2, la combinaison la plus sévère pour l'effet de pression aboutit à $Q^+ = 2,51 \text{ kN/m}^2$. Pour la dépression, la combinaison la plus sévère aboutit à $Q^- = -0,76 \text{ kN/m}^2$.

10.3 | VÉRIFICATION DES ASSEMBLAGES POUR LE BÂTIMENT 1 – EXEMPLE 1

10.3.1 | Application du chargement

Il est considéré une configuration de 2 travées égales L, de 5,45 m, avec un chargement uniformément réparti.

Pour l'effet de pression de vent, l'application de la combinaison d'actions induit un moment appliqué sur appui intermédiaire :

 $M_{B,Ed} = 5,57 \text{ kNm/m}$;

Une réaction d'appui intermédiaire de :

 $R_{B.Ed} = 10,22 \text{ kN/m}$



et un effort maximal de cisaillement de :

 $V_{L,Ed} = 5,11 \text{ kN/m}.$

En dépression de vent, l'application de la combinaison d'actions induit un moment appliqué sur appui intermédiaire :

 $M_{B,Ed} = 5,61 \text{ kNm/m};$

une réaction d'appui intermédiaire de :

 $R_{B,Ed} = 10,29 \text{ kN/m}$

et un effort maximal de cisaillement de :

 $V_{L,Ed} = 5,14$ kN/m.

10.3.2 | TAN assemblées par recouvrement simple avec débord en porte-à-faux par-dessus

Les 3 étapes de la procédure de dimensionnement sont détaillées comme suit.

Étape 1 - Vérification de la résistance de l'assemblage :

Sous charges descendantes

Pour le moment sur appui intermédiaire :

$$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} = \frac{5,57}{7,42} = 0.751 < 1,0;$$

Pour la résistance sur appui :

$$rac{R_{B,Ed}}{R_{w,Rd,B}} = rac{10,22}{20,74} = 0.493 < 1.0$$
 ;

Et pour l'interaction moment-réaction d'appui :

$$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{R_{B,Ed}}{R_{w,Rd,B}} = 1,244 < 1,25.$$

Avec charges ascendantes

Pour le moment sur appui intermédiaire :

$$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} = \frac{5.61}{8.78} = 0.638 < 1.03$$

Pour la vérification au cisaillement :

$$\frac{V_{L,Ed}}{V_{w,Rd}} = \frac{5,14}{25,90} = 0.199 < 1,0;$$

Et pour l'interaction moment-effort tranchant :

$$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{V_{L,Ed}}{V_{w,Rd}} = 0,837 < 1,25.$$

Étape 2 - Vérification de la déformation locale de l'âme :

Pour les charges ascendantes, la vérification de la déformation locale de l'âme n'est pas requise et sous charges descendantes :

$$\frac{M_{B,Ed}}{\left(a \cdot 0.5 \cdot R_{w,Rd,B,la=160}\right)} = \frac{5.57}{\left(0.8 \cdot 0.5 \cdot 20.80\right)} = 0.670 < 1.0.$$

Étape 3 - Vérification de la connexion K_{Ed} :

$$K_{Ed} = \frac{|(5,57/0,8) + 5,11|}{(2 \cdot \sin(66^\circ))} \cdot 0,31 = 2,05 \text{ kN et}$$
$$\frac{K_{Ed}}{\sum F_{V,Rd}} = \frac{2,05}{3,50} = 0,585 < 1,0$$



Notons que 3 vis suffisent à la vérification seule de la connexion :

$$\frac{2,05}{(3\cdot0,875)} = 0,78 < 1$$

10.3.3 | TAN assemblées par recouvrement simple avec débord en porte-à-faux en-dessous

Les 3 étapes de la procédure de dimensionnement sont détaillées comme suit.

Étape 1 - Vérification de la résistance de l'assemblage :

Sous charges descendantes

- - -

11

Pour le moment sur appui intermédiaire :

$$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} = \frac{5.57}{7,42} = 0.751 < 1,0;$$
Pour la résistance sur appui :

$$\frac{R_{B,Ed}}{R_{w,Rd,B}} = \frac{10,22}{20,74} = 0.493 < 1,0;$$

Et pour l'interaction moment-réaction d'appui :

$$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{R_{B,Ed}}{R_{w,Rd,B}} = 1,244 < 1,25.$$

Avec charges ascendantes

Pour le moment sur appui intermédiaire :

$$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} = \frac{5,61}{8,78} = 0.638 < 1,0;$$

Pour la vérification au cisaillement :

$$\frac{V_{L,Ed}}{V_{w,Rd}} = \frac{5,14}{25,90} = 0.199 < 1,0;$$

Et pour l'interaction moment-effort tranchant :

$$\frac{M_{B,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{V_{L,Ed}}{V_{w,Rd}} = 0,837 < 1,25.$$

Étape 2 - Vérification de la déformation locale de l'âme

Pour l'ensemble des cas de charges, aucune vérification de la déformation locale de l'âme n'est requise (voir paragraphe 8.2).

Étape 3 - Vérification de la connexion K_{Ed} :

$$K_{Ed} = \frac{|5,57|}{(2 \cdot 0.8 \cdot \sin(66^\circ))} \cdot 0.31 = 1.18 \text{ kN et}$$
$$\frac{K_{Ed}}{\sum F_{V,Rd}} = \frac{1.18}{3.50} = 0.338 < 1.0$$

Ici également, un nombre réduit de vis suffit à la vérification seule de la connexion. Avec 2 vis :

$$\frac{1,18}{(2\cdot0,875)} = 0,67 < 1$$

. . .

> / 23

10.4 | VÉRIFICATION DES ASSEMBLAGES DU BÂTIMENT 2 – EXEMPLE 2

10.4.1 | Application du chargement

Il est considéré une configuration de 2 travées égales L, de 5,45 m, avec un chargement uniformément réparti.

Pour l'effet de pression de vent, l'application de la combinaison d'actions induit un moment appliqué sur appui intermédiaire :

 $M_{B,Ed} = 9,33 \text{ kNm/m};$

une réaction d'appui intermédiaire de :

$$R_{B,Ed} = 17,12 \text{ kN/m};$$

un effort maximal de cisaillement de :

 $V_{L,Ed} = 8,56 \text{ kN/m}$

et un moment appliqué à l'extrémité du recouvrement de 3,29 kNm/m ($M_{l,Ed} = M_{l,Ed}$).

En dépression de vent, l'application de la combinaison d'actions induit un moment appliqué sur appui intermédiaire :

$$M_{B,Ed} = 2,82$$
 kNm/m;

une réaction d'appui intermédiaire de :

$$R_{B.Ed} = 5,18$$
 kN/m;

un effort maximal de cisaillement de :

$$V_{L.Ed} = 2,59$$
 kN/m

et un moment appliqué à l'extrémité du recouvrement de 0,99 kNm/m ($M_{I,Ed} = M_{II,Ed}$).

10.4.2 | TAN assemblées par double recouvrement

Les 5 étapes de la procédure de dimensionnement sont détaillées comme suit.

Étape 1 – Condition préalable :

voir paragraphe 9.3 et 10.4.1

Étape 2 - Vérification de la résistance de l'assemblage à l'axe de l'appui intermédiaire :

Sous charges descendantes

Pour le moment sur appui intermédiaire :

$$\frac{M_{B,Ed}}{0.9 \cdot \sum M_{B,Rd}} = \frac{9,33}{0.9 \cdot 2 \cdot 7,42} = 0,699 < 1.0;$$

Pour la résistance sur appui :

$$\frac{R_{B,Ed}}{0.9 \cdot \sum R_{w,Rd,B}} = \frac{17,12}{0.9 \cdot 2 \cdot 20,74} = 0,459 < 1,0;$$

Et pour l'interaction moment-réaction :

$$\frac{M_{B,Ed}}{0.9 \cdot \sum M_{B,Rd}} + \frac{R_{B,Ed}}{0.9 \cdot \sum R_{w,Rd,B}} = 1,158 < 1,25.$$

Pour les charges ascendantes

Pour le moment sur appui intermédiaire :

$$\frac{M_{B,Ed}}{0.9 \cdot \sum M_{B,Rd}} = \frac{2.82}{0.9 \cdot 2 \cdot 8.78} = 0.178 < 1.0;$$

Pour la vérification au cisaillement :

$$\frac{V_{L,Ed}}{0.9 \cdot \sum V_{w,Rd}} = \frac{2.59}{0.9 \cdot 2 \cdot 25.90} = 0.056 < 1.0;$$

Et pour l'interaction moment-effort tranchant :

$$\frac{M_{B,Ed}}{0.9 \cdot \sum M_{B,Rd}} + \frac{V_{L,Ed}}{0.9 \cdot \sum V_{w,Rd}} = 0.234 < 1.25.$$

Étape 3 - Vérification de la résistance de l'assemblage aux extrémités du recouvrement :

Pour les charges descendantes, La charge linéaire est

$$F_{Ed} = \frac{M_{B,Ed}}{2 \cdot a} = \frac{9.33}{2 \cdot 0.8} = 5.83 \text{ kN/m},$$

et la vérification se décompose comme suit :

$$\frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} = \frac{M_{II,Ed}}{M_{B,Rd}} = \frac{3,29}{7,54} = 0,436 < 1,0;$$

$$\frac{F_{Ed}}{V_{w,Rd}} = \frac{5,83}{25,90} = 0,225 < 1,0$$

$$\operatorname{et} \frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{V_{w,Rd}} = 0,599 < 1,25.$$

Pour les charges ascendantes, la charge linéaire est

$$F_{Ed} = \frac{M_{B,Ed}}{2 \cdot a} = \frac{2,82}{2 \cdot 0.8} = 1,76 \text{ kN/m}$$

et la vérification se décompose comme suit :
$$\frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} = \frac{M_{II,Ed}}{M_{B,Rd}} = \frac{0,99}{8,78} = 0,113 < 1,0 \text{ ;}$$
$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd,B}} = \frac{1,76}{20,80} = 0,085 < 1,0$$

et
$$\frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd,B}} = 0,198 < 1,25.$$

Étape 4 - Vérification de la déformation locale de l'âme :

Dans le cas de charges ascendantes, la vérification de la déformation locale de l'âme n'est pas requise et sous charges descendantes :

$$\frac{M_{B,Ed}}{\left(2 \cdot a \cdot 0.5 \cdot R_{w,Rd,B,la=160}\right)} = \frac{9.33}{\left(2 \cdot 0.8 \cdot 0.5 \cdot 20.80\right)} = 0.561 < 1.0$$

Étape 5 - Vérification de la connexion K_{Ed} :

Sous charges descendantes :

$$K_{Ed} = \frac{9,33}{(4 \cdot 0,8 \cdot \sin(66))} \cdot 0,31 = 0,99 \text{ kN}$$

$$\operatorname{et} \frac{K_{Ed}}{\sum F_{V,Rd}} = \frac{0,99}{3,50} = 0,283 < 1,0$$

Pour les charges ascendantes :

$$K_{Ed} = \frac{2,82}{(4 \cdot 0,8 \cdot \sin(66))} \cdot 0,31 = 0,30 \text{ kN}$$

$$\operatorname{et} \frac{K_{Ed}}{\sum F_{V,Rd}} = \frac{0,30}{3,50} = 0,085 < 1,0$$

À cette étape du calcul, 2 vis sont suffisantes pour satisfaire à la vérification de la connexion :

$$0,99/(2 \cdot 0,875) = 0,566 < 1;$$

Reconstitution de la continuité de tôles d'acier nervurées sur appuis intermédiaires par assemblage de profils – Justification par calculs selon les Eurocode Thibault RENAUX, Rainer HOLZ et Christian FAUTH > / 25

Et si la longueur de recouvrement est augmentée à 0,95 m alors 1 seule vis suffit à satisfaire la connexion puisque K_{Ed} se réduit à 0,83. Ainsi, la surconsommation de 2 x 0,15 m de TAN est à contrebalancer par une économie de 50 % sur le nombre de vis à mettre en œuvre (et le temps induit).

10.4.3 | Profil continu avec renfort local

Les 5 étapes de la procédure de dimensionnement sont détaillées comme suit.

Étape 1 – Condition préalable :

voir paragraphe 9.4 et 10.4.1

Étape 2 - Vérification de la résistance de l'assemblage à l'axe de l'appui intermédiaire :

Sous charges descendantes

Pour le moment sur appui intermédiaire :

$$\begin{split} \frac{M_{B,Ed}}{0,9\cdot\sum M_{B,Rd}} &= \frac{9,33}{0,9\cdot2\cdot7,42} = 0,699 < 1,0 \ ; \\ \text{pour la résistance sur appui :} \\ \frac{R_{B,Ed}}{0,9\cdot\sum R_{w,Rd,B}} &= \frac{17,12}{0,9\cdot2\cdot20,74} = 0,459 < 1,0 \ ; \\ \text{Et pour l'interaction moment-réaction :} \\ \frac{M_{B,Ed}}{0,9\cdot\sum M_{B,Rd}} + \frac{R_{B,Ed}}{0,9\cdot\sum R_{w,Rd,B}} = 1,158 \ < 1,25. \end{split}$$

Pour les charges ascendantes

Pour le moment sur appui intermédiaire :

 $\frac{M_{B,Ed}}{0,9 \cdot \sum M_{B,Rd}} = \frac{2,82}{0,9 \cdot 2 \cdot 8,78} = 0,178 < 1,0;$ Pour la vérification au cisaillement : $\frac{V_{L,Ed}}{0,9 \cdot \sum V_{w,Rd}} = \frac{2,59}{0,9 \cdot 2 \cdot 25,90} = 0,056 < 1,0;$ Et pour l'interaction moment-effort tranchant : $\frac{M_{B,Ed}}{0,9 \cdot \sum M_{B,Rd}} + \frac{V_{L,Ed}}{0,9 \cdot \sum V_{w,Rd}} = 0,234 < 1,25.$

Étape 3 - Vérification de la résistance de l'assemblage aux extrémités du recouvrement :

Pour les charges descendantes, la charge linéaire est :

$$F_{Ed} = \frac{M_{B,Ed}}{2 \cdot a} = \frac{9,33}{2 \cdot 0,8} = 5,83 \text{ kN}$$

et la vérification se décompose comme suit :

$$\frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} = \frac{M_{II,Ed}}{M_{B,Rd}} = \frac{3,29}{7,54} = 0,436 < 1,0 ;$$

$$\frac{F_{Ed}}{V_{w,Rd}} = \frac{5,83}{25,90} = 0,225 < 1,0 ;$$

$$\operatorname{et} \frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{V_{w,Rd}} = 0,661 < 1,25.$$

Pour les charges ascendantes, la charge linéaire est :

$$F_{Ed} = \frac{M_{B,Ed}}{2 \cdot a} = \frac{2,82}{2 \cdot 0,8} = 1,76 \text{ kN/m}$$

et la vérification se décompose comme suit :

$$\frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} = \frac{M_{II,Ed}}{M_{B,Ed}} = \frac{0.99}{8.78} = 0.113 < 1;$$

$$\frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd,B}} = \frac{1,76}{20,80} = 0,085 < 1,0;$$

et $\frac{M_{I,Ed}}{M_{B,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd,B}} = 0,198 < 1,25.$

Étape 4 - Vérification de la déformation locale de l'âme :

Dans le cas de charges ascendantes, la vérification de la déformation locale de l'âme n'est pas requise et sous charges descendantes :

$$\frac{M_{B,Ed}}{\left(2 \cdot a \cdot 0.5 \cdot R_{w,Rd,B,la=160}\right)} = 0.561 < 1.0$$

Étape 5 - Vérification de la connexion K_{Ed} :

Sous charges descendantes :

$$K_{Ed} = \frac{9,33}{(4 \cdot 0,8 \cdot \sin(66))} \cdot 0,31 = 0,99 \text{ kN}$$

et $\frac{K_{Ed}}{\sum F_{V,Rd}} = 0,283 < 1,0.$
Pour les charges ascendantes :
 $K_{Ed} = \frac{2,82}{(4 \cdot 0,8 \cdot \sin(66))} \cdot 0,31 = 0,30 \text{ kN}$
et $\frac{K_{Ed}}{\sum F_{V,Rd}} = 0,085 < 1,0.$

Notons que sous charges descendantes, 2 vis satisfont à la connexion et qu'une seule vis est nécessaire pour le cas des charges ascendantes.

10.5 OUTIL LOGICIEL DE CALCUL

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

11 | CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Les méthodes détaillées dans cet article permettent le dimensionnement de dispositions technologiques, jusqu'à présent non référencées par les Eurocodes, qui visent à recréer ou renforcer la continuité d'une TAN par un assemblage sur appui. Les types d'assemblages proposés présentent un recouvrement entre TAN simple (d'un seul côté de l'appui), ou double (de part et d'autre de l'appui).

L'assemblage de deux TAN isostatiques avec recouvrement simple conduit à rétablir la continuité sur appui. Les assemblages doubles de TAN isostatiques et l'assemblage d'un tronçon de renfort sur une TAN hyperstatique apportent un bénéfice sur le comportement de la continuité qui présente alors une résistance correspondant à 80 % de la somme algébrique des résistances des produits assemblés. Au-delà du respect des vérifications à mener et de l'implantation des organes de fixations, l'attention de l'ingénieur en charge de la conception de ces assemblages devra également porter sur des longueurs de recouvrements inhibant la ruine par effort tranchant en extrémité d'assemblage.

L'interaction entre moment de flexion sur appui et réaction d'appui peut conduire à une ruine par écrasement de nervure. En général, ce mode de ruine est caractéristique d'une réaction à l'appui se présentant sous la forme d'un effort de compression dans les âmes des nervures.

Concernant les vérifications relatives à l'interaction entre moment de flexion et effort de cisaillement ; la procédure du présent article aurait pu s'appuyer sur la clause 6.1.10 de [2] qui propose une relation $V_{Ed}/V_{Rd} \le 0.5$ qui, lorsqu'elle est satisfaite exempte d'appliquer l'équation 6.27 de [2]. Néanmoins, lorsque cette relation n'est pas satisfaite, l'application de l'équation 6.27 devient ardue car les valeurs des moments résistants plastiques ne sont pas connues. Une solution plaçant en sécurité consiste alors à simplifier l'équation 6.27 en la réduisant à : $M_{Ed}/M_{B,Rd} + (2 \cdot V_{Ed}/V_{w,Rd} - 1)^2 \le 1$.

/ 27

Rappelons que les valeurs caractéristiques à la flexion, au cisaillement et à la réaction d'appui des TAN peuvent être déterminées par essais conformément à [2], établies éventuellement sous tierce partie et être mentionnées au sein de fiches techniques du fabricant.

Dans certains pays comme l'Allemagne, la caractérisation expérimentale permet d'établir une formule d'interaction M-R qui peut être linéaire ou parabolique selon les résultats des essais et pouvant ainsi se différencier de l'équation fournie par la clause 6.1.11 de [2]. Cette procédure s'inscrit alors dans une démarche globale de caractérisation d'une TAN, contenant notamment l'application de la clause 6.1.10 mentionnée ci-avant, et qui fait ainsi l'objet de valeurs caractéristiques déclarées, vérifiées et exploitables pour le dimensionnement de la TAN sur la base des formules d'interaction et des recommandations mentionnées sur la fiche technique.

La méthode de dimensionnement de la continuité par reconstitution de TAN de cet article représente un fort intérêt pour des applications en toiture. Or, en France, hormis les coffrages collaborants en acier et les produits de bardage couverts par les règles RAGE [30], les TAN dédiées aux toitures ne font pas encore l'objet de recommandations techniques pour l'obtention de valeurs caractéristiques « Eurocodes », que ce soit par voie expérimentale ou par calcul. De tels documents permettraient de compléter l'arsenal d'outils et de solutions de tout ingénieur en charge du dimensionnement de toitures métalliques et confronté à des problématiques réelles inhérentes au chantier dans le cas où, conformément aux pièces du marché, le référentiel Eurocode s'applique tant pour la partie agissante que pour la partie résistante.

12 | 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 18807-3:1987 Trapezoidal sheeting in building Trapezoidal steel sheeting Structural analysis and design, Berlin, 1987.
- [4] CEN, EN 1090-4:2018 Execution of steel structures and aluminium structures Part 4: Technical requirements for thin-gauge, cold-formed steel elements and structures for roof, ceiling, floor and wall applications.
- [5] C. FAUTH, GRISPE WP2: Assembled Profiles D2.3 Test report, 2016.
- [6] R. HOLZ, GRISPE WP2: Assembled Profiles D2.4 Test analysis and interpretation, 2016.
- [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, selfweight, 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] AFNOR, NF EN 1991-1-2:2003 Eurocode 1: Actions sur les structures Partie 1-2: actions générales Actions sur les structures exposées au feu, 2003.
- [23] AFNOR, NF EN 1993-1-2:2005 Eurocode 3: Calcul des structures en acier Partie 1-2: règles générales Calcul du comportement au feu, 2005.
- [24] AFNOR, NF EN 1998-1:2005 Eurocode 8: Calcul des structures pour leur résistance aux séismes Partie 1 : règles générales, actions sismiques et règles pour les bâtiments, 2005.
- [25] CEN, EN 1991-1-5:2003 Eurocode 1: Actions on structures Part 1-5: General actions Thermal actions, 2003.
- [26] CEN, EN 1995-1-1:2005 Eurocode 5: Design of timber structures Part 1-1: General Common rules and rules for buildings, Brussels, 2005.
- [27] 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.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] AQC, Recommandations professionnelles Bardages en acier protégé et en acier inoxydables Conception et mise en œuvre, Juillet 2014..
- [31] CEN, EN 1993-1-5:2007 Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-5: General rules Plated structural elements, Brussels, 2007.
- [32] CEN, EN 1993-1-5:2007/AC:2009 Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-5: General rules Plated structural elements Corrigendum, Brussels, 2009.
- [33] CEN, EN 1993-1-5:2006/A1:2017 Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-5: General rules Plated structural elements Amendment A1, Brussels, 2017.

