ICS: 91.010.30

norme belge enregistrée

NBN EN 1993-1-3

2e éd., mai 2007

Indice de classement: B 51

Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 1-3: Règles générales - Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid

Eurocode 3 - Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-3: Algemene regels - Aanvullende regels voor koudgevormde dunwandige profielen en platen

Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting

Autorisation de publication: 19 décembre 2006

La présente norme européenne EN 1993-1-3:2006 a le statut d'une norme belge.

La présente norme européenne existe en trois versions officielles (allemand, anglais, français).

La présente norme européenne EN 1993-1-3:2006 a le statut d'une norme belge. La présente norme européenne existe en trois versions officielles (allemand, anglais, français). Cette norme européenne est diffusée par le NBN dans les délais imposés par le CEN. Cette norme ne peut être utilisée en Belgique qu'en combinaison avec son Annexe Nationale (ANB) qui fixe principalement la valeur des paramètres à déterminer au niveau national.

standards for .be

Bureau de Normalisation - Avenue de la Brabançonne 29 - 1000 Bruxelles - Belgique
Tél: +32 2 738 01 12 - Fax: +32 2 733 42 64 - E-mail: info@nbn.be - NBN Online: www.nbn.be
Banque 000-3255621-10 IBAN BE41 0003 2556 2110 BIC BPOT BEB1 TVA: BE 0880.857.592

© NBN 2007

Prix: groupe 31

ICS: 91.010.30

Geregistreerde Belgische norm

NBN EN 1993-1-3

2e uitg., mei 2007

Normklasse: B 51

Eurocode 3 - Ontwerp en berekening van staalconstructies - Deel 1-3: Algemene regels - Aanvullende regels voor koudgevormde dunwandige profielen en platen

Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 1-3: Règles générales - Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid

Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting

Toelating tot publicatie: 19 december 2006

Deze Europese norm EN 1993-1-3:2006 heeft de status van een Belgische norm.

Deze Europese norm bestaat in drie officiële versies (Duits, Engels, Frans).

Deze Europese norm EN 1993-1-3:2006 heeft de status van een Belgische norm. Deze Europese norm bestaat in drie officiële versies (Duits, Engels, Frans). Deze Europese norm is door het NBN verspreid binnen de door de CEN opgelegde termijnen. Deze norm mag in België slechts samen met haar Nationale Bijlage (ANB) worden toegepast. Deze laatste legt hoofdzakelijk de waarden van de parameters vast die op nationaal vlak te bepalen zijn.

standards for .be

Bureau voor Normalisatie Brabançonnelaan 29 B-1000 Brussel België
Tel: +32 2 738 01 12 - Fax: +32 2 733 42 64 - E-mail: info@nbn.be - NBN Online: www.nbn.be
Bank 000-3255621-10 IBAN BE41 0003 2556 2110 BIC BPOT BEB1 BTW: BE 0880.857.592

© NBN 2007

Prijsgroep: 31

NORME EUROPÉENNE

EUROPÄISCHE NORM

EUROPEAN STANDARD

EN 1993-1-3

Octobre 2006

ICS 91.010.30

Remplace ENV 1993-1-3:1996

Version Française

Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 1-3: Règles générales - Règles supplémentaires pour les profilés et plaques formés à froid

Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten - Teil 1-3: Allgemeine Regeln - Ergänzende Regeln für kaltgeformte dünnwandige Bauteile und Bleche

Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting

La présente Norme européenne a été adoptée par le CEN le 16 janvier 2006.

Les membres du CEN sont tenus de se soumettre au Règlement Intérieur du CEN/CENELEC, qui définit les conditions dans lesquelles doit être attribué, sans modification, le statut de norme nationale à la Norme européenne. Les listes mises à jour et les références bibliographiques relatives à ces normes nationales peuvent être obtenues auprès du Centre de Gestion du CEN ou auprès des membres du CEN.

La présente Norme européenne existe en trois versions officielles (allemand, anglais, français). Une version dans une autre langue faite par traduction sous la responsabilité d'un membre du CEN dans sa langue nationale et notifiée au Centre de Gestion du CEN, a le même statut que les versions officielles.

Les membres du CEN sont les organismes nationaux de normalisation des pays suivants: Allemagne, Autriche, Belgique, Chypre, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, Suède et Suisse.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION
EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION

Centre de Gestion: rue de Stassart, 36 B-1050 Bruxelles

© 2006 CEN Tous droits d'exploitation sous quelque forme et de quelque manière que ce soit réservés dans le monde entier aux membres nationaux du CEN.

Réf. n° EN 1993-1-3:2006 F

Sommaire

Page

Avant-propos 4

1 Introduction 5
1.1 Domaine d'application 5
1.2 Références normatives 5
1.3 Termes et définitions 7
1.4 Symboles 8
1.5 Terminologie et conventions pour les dimensions 8

2 Base de calcul 12

3 Matériaux 13
3.1 Généralités 13
3.2 Acier de construction 16
3.3 Dispositifs d'assemblage 18

4 Durabilité 19

5 Analyse structurale 19
5.1 Influence des arrondis 19
5.2 Proportions géométriques 22
5.3 Modélisation structurale en vue de l'analyse 23
5.4 Déformation transversale de la semelle 24
5.5 Flambement local et flambement par distorsion 25
5.6 Flambement entre fixations 46

6 Etats limites ultimes 46
6.1 Résistance des sections transversales 46
6.2 Résistance au flambement 64
6.3 Flexion et traction 68

7 Etats limites de service 68
7.1 Généralités 68
7.2 Déformation plastique 69
7.3 Flèches 69

8 Calcul des assemblages 69
8.1 Généralités 69
8.2 Assemblages de continuité et d'extrémité de barres comprimées 69
8.3 Assemblages avec éléments de fixation mécaniques 70
8.4 Soudures par points 78
8.5 Soudures à clin 79

9 Dimensionnement assisté par des essais 83

10 Considérations particulières pour les pannes, les plateaux et les plaques nervurées 84
10.1 Poutres maintenues par des plaques nervurées 84
10.2 Plateaux maintenus par des plaques nervurées 103
10.3 Dimensionnement avec collaboration de paroi 107
10.4 Plaques nervurées perforées 111

Annexe A (normative) **Méthodes d'essai** 113
A.1 Généralités 113
A.2 Essais sur plaques nervurées et plateaux 113
A.3 Essais sur profilés formés à froid 118
A.4 Essais sur les structures et parties de structures 122
A.5 Essais sur poutres maintenues en torsion 124

A.6 Evaluation des résultats d'essai **129**

Annexe B (informative) **Durabilité des fixations** **134**

Annexe C (informative) **Propriétés des sections transversales à paroi mince** **136**
C.1 Sections transversales ouvertes **136**
C.2 Propriétés des sections transversales ouvertes avec « branches » **139**
C.3 Inertie de torsion et centre de cisaillement d'une section transversale avec partie fermée **139**

Annexe D (informative) **Méthode mixte largeur efficace/épaisseur efficace pour les parois en débord** **141**

Annexe E (Informative) **Calcul simplifié des pannes** **143**

Avant-propos

Le présent document (EN 1993-1-3:2006) a été élaboré par le Comité Technique CEN/TC 250 “Eurocodes structuraux”, dont le secrétariat est tenu par BSI.

Cette Norme européenne devra recevoir le statut de norme nationale, soit par publication d'un texte identique, soit par entérinement, au plus tard en avril 2007, et toutes les normes nationales en contradiction devront être retirées au plus tard en mars 2010.

Le présent document remplace l’ ENV 1993-1-3:.

Selon le Règlement Intérieur du CEN/CENELEC, les instituts de normalisation nationaux des pays suivants sont tenus de mettre cette Norme européenne en application : Allemagne, Autriche, Belgique, Chypre, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, Suède et Suisse.

Annexe Nationale pour l'EN 1993-1-3

La présente norme propose des alternatives concernant des procédures, des valeurs et donne des recommandations de classes au moyen de notes indiquant les cas où des choix nationaux peuvent être opérés. Par conséquent, il convient de doter la Norme Nationale transposant l'EN 1993-1-3 d’une Annexe Nationale comprenant tous les Paramètres Déterminés au niveau National à utiliser pour le calcul des structures en acier devant être construites dans le pays concerné.

Un choix national est autorisé dans l'EN 1993-1-3 aux paragraphes suivants :

- 2(3)P
- 2(5)
- 3.1(3)
- 3.2.4(1)
- 5.3(4)
- 8.3(5)
- 8.3(13) Tableau 8.1
- 8.3(13) Tableau 8.2
- 8.3(13) Tableau 8.3
- 8.3(13) Tableau 8.4
- 8.4(5)
- 8.5.1(4)
- 9(2)
- 10.1.1(1)
- 10.1.4.2(1)
- A.1(1) NOTE 2
- A.1(1) NOTE 3
- A.6.4(4)
- E(1)

1 Introduction

1.1 Domaine d'application

(1) L'EN 1993-1-3 définit des exigences de calcul relatives aux profilés et plaques nervurées à parois minces formés à froid. Elle s'applique aux produits en acier formés à froid par des procédés tels que le profilage aux galets ou le pliage à la presse plieuse, à partir de tôles ou bandes d'acier laminées à chaud ou à froid, de faible épaisseur, revêtues ou non revêtues. Elle peut également être utilisée pour le calcul des tôles profilées en acier destinées aux dalles mixtes acier-béton en phase de coulage, voir EN 1994. L'exécution des structures en acier constituées de profilés et de plaques nervurées à parois minces formés à froid est couverte par l'EN 1090.

NOTE Les règles définies dans la présente partie complètent les règles définies dans les autres parties de l'EN 1993-1.

(2) La présente norme donne également des méthodes de calcul pour la conception des structures, tenant compte de la collaboration de paroi, en utilisant des plaques nervurées en acier comme diaphragme.

(3) La présente partie ne s'applique pas aux profils creux de construction circulaires et rectangulaires formés à froid fournis suivant l'EN 10219, pour lesquels il convient de se reporter à l'EN 1993-1-1 et à l'EN 1993-1-8.

(4) L'EN 1993-1-3 donne des méthodes pour le dimensionnement par calcul et pour le dimensionnement assisté par des essais. Les méthodes de dimensionnement par calcul ne s'appliquent que dans des gammes bien définies de caractéristiques de matériaux et de proportions géométriques pour lesquelles on dispose d'une expérience suffisante et d'une validation par essais. Ces limitations ne s'appliquent pas au dimensionnement assisté par des essais.

(5) L'EN 1993-1-3 ne couvre pas la prise en compte des charges d'essais relatifs aux phases d'exécution et d'entretien.

(6) Les règles de calcul données dans la présente norme ne sont applicables que si les tolérances des profilés formés à froid sont conformes à l'EN 1090-2.

1.2 Références normatives

Cette Norme Européenne incorpore par référence datée ou non datée des dispositions d'autres publications. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés dans le texte et les publications sont énumérées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou les révisions ultérieurs de l'une quelconque de ces publications ne s'appliquent à cette Norme Européenne que s'ils y ont été incorporés par amendement ou révision. Pour les références non datées, la dernière édition de la publication à laquelle il est fait référence s'applique.

EN 1993 *Eurocode 3 : Calcul des structures en acier*
Parties 1-1 à 1-12

EN 10002 *Matériaux métalliques – Essai de traction*
Partie 1 : méthode d'essai à température ambiante ;

EN 10025-1 *Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 1 : Conditions techniques générales de livraison*

EN 10025-2 *Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 2 : Conditions techniques de livraison des aciers de construction non alliés ;*

EN 10025-3 *Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 3 : Conditions techniques de livraison des aciers de construction soudables à grains fins à l'état normalisé/laminage normalisant ;*

EN 10025-4 *Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 4 : Conditions techniques de livraison des aciers de construction soudables à grains fins obtenus par laminage thermomécanique ;*

EN 10025-5 *Produits laminés à chaud en aciers de construction - Partie 5 : Conditions techniques de livraison des aciers de construction à résistance améliorée à la corrosion atmosphérique* ;

EN 10143 *Tôles et bandes en acier revêtues d'un métal en continu par immersion à chaud – Tolérances sur les dimensions et la forme ;*

EN 10149 *Produits plats laminés à chaud en aciers à haute limite d'élasticité pour le formage à froid*
Partie 2 : Conditions de livraison des aciers obtenus par laminage thermomécanique ;
Partie 3 : Conditions de livraison des aciers à l'état normalisé ou laminage normalisant ;

EN 10204 *Produits métalliques – Types de documents de contrôle ;*

EN 10268 *Produits plats laminés à froid en aciers micro-alliés soudables à haute limite d'élasticité pour formage à froid – Conditions techniques de livraison ;*

EN 10292 *Bandes et tôles en aciers à haute limite d'élasticité revêtues en continu par immersion à chaud pour formage à froid – Conditions techniques de livraison* ;

EN 10326 *Bandes et tôles en aciers de construction doux revêtues en continu par immersion à chaud - Conditions techniques de livraison*

EN 10327 *Bandes et tôles en acier doux revêtues en continu par immersion à chaud pour formage à froid - Conditions techniques de livraison*

EN ISO 12944-2 *Peintures et vernis – Anticorrosion des structures en acier par systèmes de peinture*
Partie 2 : Classification des environnements ;

EN 1090-2 *Exécution des structures en acier et des structures en aluminium ;*
Partie 2 : exigences techniques pour l'exécution des structures en acier ;

EN 1994 *Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier-béton* ;

EN ISO 1478 *Filetage de vis à tôle ;*

EN ISO 1479 *Vis à tôle à tête hexagonale* ;

EN ISO 2702 *Vis à tôle en acier traité thermiquement – Caractéristiques mécaniques ;*

EN ISO 7049 *Vis à tôle à tête cylindrique bombée large à empreinte cruciforme* ;

EN ISO 10684 *Éléments de fixation - Revêtements de galvanisation à chaud*

ISO 4997 *Tôles en acier de construction laminées à froid ;*

EN 508-1 *Produits de couverture en tôle métallique – Spécification pour les plaques de couverture en tôle d'acier, d'aluminium ou d'acier inoxydable – Partie 1 : acier ;*

FEM 10.2.02 Fédération Européenne de la manutention, Section X, Equipements et procédés de stockage ; Fédération Européenne de la manutention, Conception des rayonnages statiques en acier à palettes, Code de calcul des rayonnages – Avril 2001, Version 1.02 ;

1.3 Termes et définitions

Pour les besoins de la présente partie 1.3 de l'EN 1993, les termes et définitions suivants s'appliquent, en plus de ceux contenus dans l'EN 1993-1-1 :

1.3.1
matériau de base
tôle d'acier à partir de laquelle les profilés et les plaques nervurées sont formés à froid

1.3.2
limite d'élasticité de base
limite d'élasticité en traction du matériau de base

1.3.3
effet diaphragme
comportement structural faisant intervenir un effet de cisaillement dans le plan de plaques nervurées

1.3.4
plateau
tôle profilée raidie sur ses bords, conçue pour s'imbriquer avec les plateaux adjacents afin de former un plan nervuré capable de supporter un plan parallèle de plaques nervurées disposées perpendiculairement au sens de la portée des plateaux

1.3.5
maintien partiel
limitation du déplacement latéral ou de rotation, ou de la déformation par torsion ou par gauchissement, d'une barre ou d'une paroi grâce à laquelle on augmente sa résistance à l'instabilité comme le ferait un appui élastique, mais de façon moins importante que ne le ferait un appui rigide

1.3.6
élancement relatif
rapport d'élancement réduit normalisé

1.3.7
maintien total
empêchement du déplacement latéral ou de rotation, ou de la déformation par torsion ou par gauchissement, d'une barre ou d'une paroi grâce auquel on augmente sa résistance à l'instabilité comme le ferait un appui rigide

1.3.8
dimensionnement avec collaboration de paroi
méthode de calcul tenant compte de la contribution de l'effet diaphragme, à la rigidité et à la résistance d'une structure

1.3.9
appui
section dans laquelle une barre transmet une force ou un moment à une fondation, à une autre barre ou à un autre élément de la structure

1.3.10
épaisseur nominale
épaisseur moyenne cible y compris les revêtements de zinc et autres revêtements métalliques présents lors du profilage et définis par le fournisseur d'acier (t_{nom} exclut les revêtements organiques)

1.3.11
épaisseur de métal nu
épaisseur nominale de laquelle on a soustrait l'épaisseur des revêtements de zinc et autres revêtements métalliques (t_{cor})

1.3.12
épaisseur de calcul
épaisseur de métal nu de calcul conformément au 1.5.3(6) et au 3.2.4

1.4 Symboles

(1) Outre ceux donnés dans l'EN 1993-1-1, les principaux symboles suivants sont utilisés :

f_y limite d'élasticité

f_{ya} limite d'élasticité moyenne

f_{yb} limite d'élasticité de base

t épaisseur de calcul de l'acier nu avant formage à froid, à l'exclusion des revêtements métalliques et organiques

t_{nom} épaisseur nominale après formage à froid, incluant le revêtement de zinc ou autres revêtements métalliques, et excluant les revêtements organiques

t_{cor} épaisseur nominale diminuée de l'épaisseur du revêtement de zinc ou autres revêtements métalliques

K rigidité élastique en translation

C rigidité élastique en rotation

(2) D'autres symboles sont définis lors de leur première utilisation.

(3) Dans la présente partie, un symbole peut avoir différentes significations.

1.5 Terminologie et conventions pour les dimensions

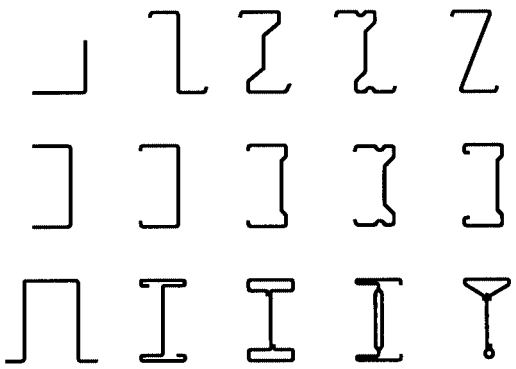
1.5.1 Types de sections

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

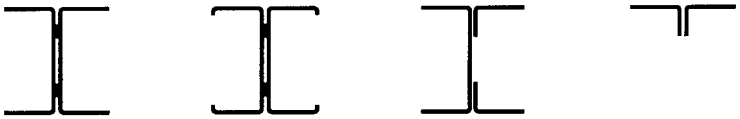
(2) Les sections transversales des profilés et plaques nervurées formés à froid sont composées pour l'essentiel de parois planes reliées par des éléments courbes.

(3) Des formes habituelles de profilés formés à froid sont présentées à la Figure 1.1.

NOTE Les méthodes de calcul définies dans la présente partie 1-3 de l'EN 1993 ne couvrent pas tous les cas présentés dans les Figures 1.1et 1.2.



a) Profils ouverts simples



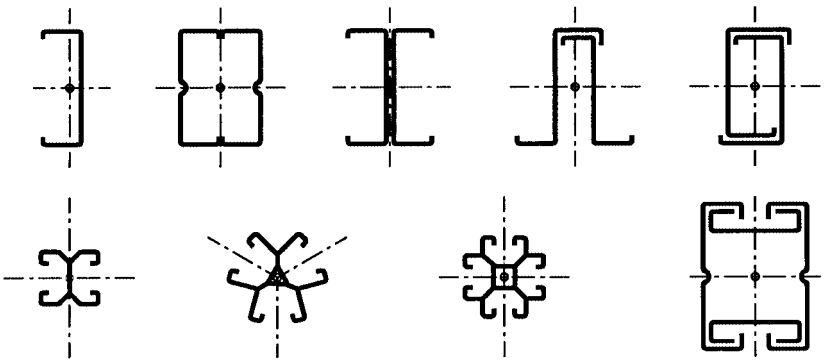
b) Profils ouverts reconstitués

c) Profils fermés reconstitués

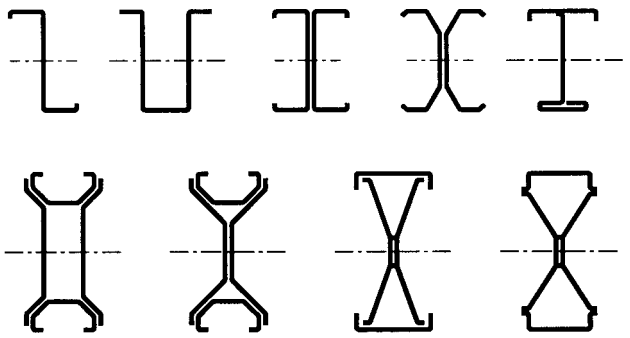
Figure 1.1 - Formes habituelles de profilés formés à froid

(4) Des exemples de sections transversales de profilés et plaques nervurées formés à froid sont illustrés à la Figure 1.2.

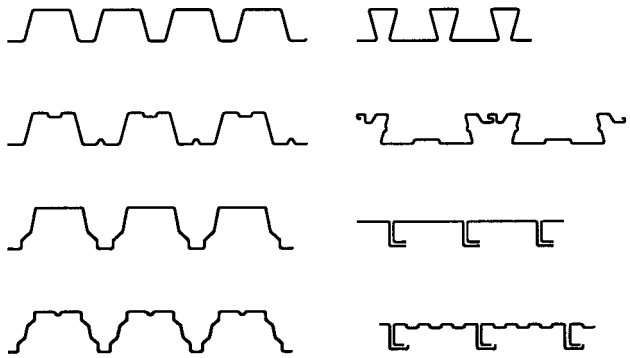
NOTE Toutes les règles définies dans la présente partie 1-3 de l'EN 1993 font référence aux propriétés définies par rapport aux axes principaux y-y et z-z pour les profilés symétriques et aux axes u-u et v-v pour les profilés non symétriques, tels que par exemple les cornières et les profilés Zed. Dans certains cas, l'axe de flexion est imposé par la présence d'éléments structuraux liés, que la section transversale soit symétrique ou non.



a) Barres comprimées et barres tendues



b) Poutres et autres barres fléchies



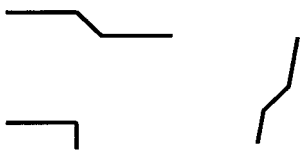
c) Plaques nervurées et plateaux

Figure 1.2 - Exemples de profilés et plaques nervurées formés à froid

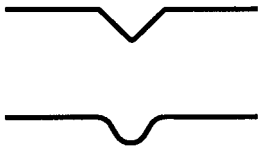
(5) Les sections transversales des profilés et des plaques nervurées formés à froid peuvent être non raidies ou comporter des raidisseurs longitudinaux de leurs âmes, de leurs semelles ou des deux.

1.5.2 Types de raidisseurs

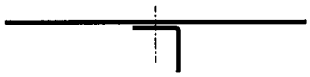
(1) Des formes usuelles de raidisseurs de profilés et de plaques nervurées formés à froid sont présentées à la Figure 1.3.



a) Plis et bords tombés



b) Nervures intermédiaires en V ou en U



c) Raidisseur en cornière boulonnée

Figure 1.3 - Formes usuelles de raidisseurs pour profilés et plaques nervurées formés à froid

(2) Les raidisseurs longitudinaux de semelles peuvent être soit des raidisseurs de bord, soit des raidisseurs intermédiaires.

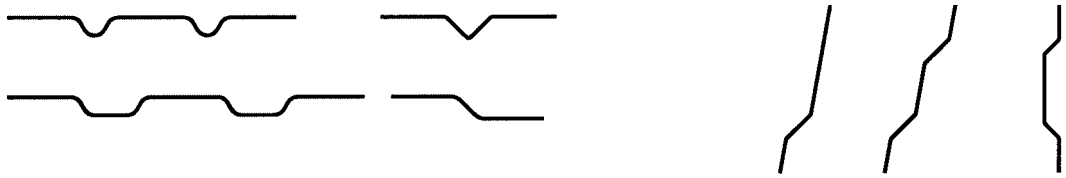
(3) Des raidisseurs de bord de formes habituelles sont présentés à la Figure 1.4.

a) Raidisseurs de bord à simple pli

b) Raidisseurs de bord à double pli

Figure 1.4 - Raidisseurs de bord de formes habituelles

(4) Les raidisseurs longitudinaux intermédiaires typiques sont illustrés à la Figure 1.5.



a) Raidisseurs intermédiaires de semelle

b) Raidisseurs intermédiaires d'âme

Figure 1.5 - Raidisseurs longitudinaux intermédiaires de formes habituelles

1.5.3 Dimensions des sections transversales

(1) Les dimensions hors tout des profilés et plaques nervurées formés à froid, dont la largeur hors tout *b*, la hauteur hors tout *h*, le rayon interne de pliage *r* et les autres dimensions notées par des symboles sans indices, tels que *a*, *c* ou *d*, sont mesurées face de tôle à face de tôle, sauf mention contraire, tel qu'illustré à la Figure 1.6.

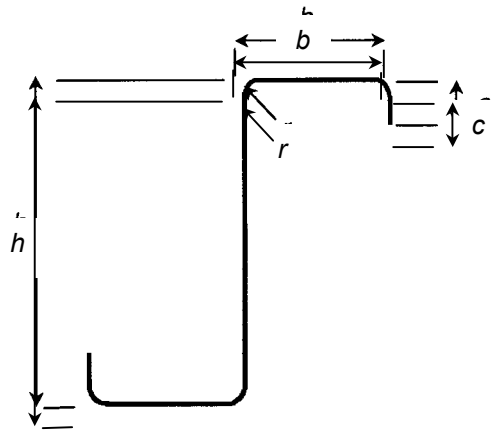


Figure 1.6 - Dimensions d'une section transversale usuelle

(2) Sauf mention contraire, les autres dimensions de la section transversale des profilés et plaques nervurées formés à froid, notées par des symboles indicés, tels que b_d, h_w ou s_w, sont mesurées à la fibre moyenne de la tôle ou au point médian de l'arrondi.

(3) Dans le cas de parois inclinées, comme les âmes des plaques nervurées, la hauteur d'âme *s* est mesurée suivant la pente. La pente est alignée entre les points d'intersection des semelles et de l'âme.

(4) La largeur développée d'une âme est mesurée le long de sa ligne moyenne, y compris les raidisseurs.

(5) La largeur développée d'une semelle est considérée le long de sa fibre moyenne, y compris les raidisseurs intermédiaires.

(6) L'épaisseur *t* est l'épaisseur de calcul de l'acier (épaisseur de métal nu moins la tolérance éventuelle exigée, comme spécifié au 3.2.4), sauf indication contraire.

1.5.4 Convention pour les axes des barres

(1) En règle générale, les conventions relatives aux profilés sont celles utilisées dans la partie 1-1 de l'EN 1993 : voir Figure 1.7.

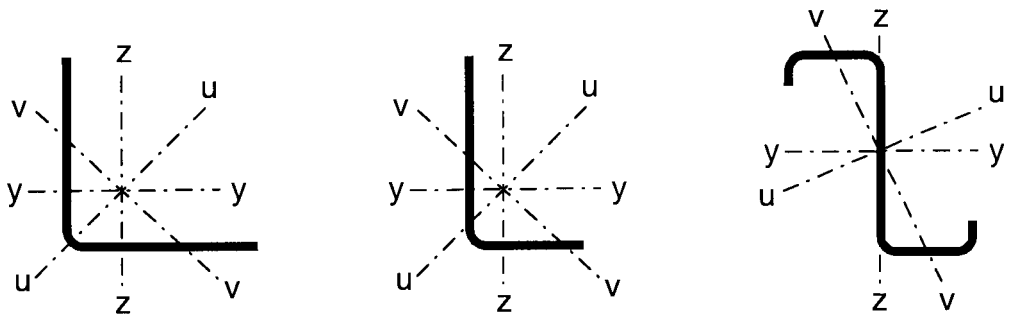


Figure 1.7 - Convention pour les axes

(2) La convention suivante est utilisée pour les axes des plaques nervurées et des plateaux :

- y - y axe parallèle au plan des plaques ;

- z - z axe perpendiculaire au plan des plaques.

2 Base de calcul

(1) Il convient de calculer les profilés et plaques nervurées formés à froid conformément aux règles générales données dans l'EN 1990 et l'EN 1993-1-1. Pour une approche générale par des méthodes FE (ou autres méthodes), voir l'EN 1993-1-5, Annexe C.

(2) P Des coefficients partiels appropriés doivent être adoptés pour les états limites ultimes et pour les états limites de service.

(3) P Pour les vérifications par le calcul aux états limites ultimes, le coefficient partiel γ_M doit être pris égal aux valeurs suivantes :

— résistance des sections transversales à une plastification excessive compte tenu du flambement local et par distorsion: γ_{M0}

— résistance des profilés et plaques nervurées lorsque la ruine est due à un flambement global : γ_{M1}

— résistance des sections nettes au niveau des trous des éléments de fixation : γ_{M2}

NOTE Les valeurs numériques de γ_{Mi} peuvent être définies dans l'Annexe Nationale. Les valeurs numériques suivantes sont recommandées pour la construction des bâtiments :

γ_{M0} = 1,00 ;

γ_{M1} = 1,00 ;

γ_{M2} = 1,25.

(4) Pour les valeurs de γ_M concernant la résistance des assemblages, voir Section 8.

(5) Pour les vérifications aux états limites de service, il convient d'utiliser le coefficient partiel $\gamma_{M,ser}$.

NOTE La valeur numérique de $\gamma_{M,ser}$ peut être définie dans l'Annexe Nationale. Pour les bâtiments, la valeur numérique suivante est recommandée :

$\gamma_{M,ser}$ = 1,00 .

(6) Pour le calcul des structures constituées de profilés et de plaques nervurées formés à froid, il convient de différencier des "classes de construction" associées aux conséquences d'une ruine, conformément à l'EN 1990 – Annexe B et définies comme suit :

Classe de construction I : Construction dans laquelle des profilés et plaques nervurées formés à froid sont calculés pour contribuer à la résistance et à la stabilité globales d'une structure ;

Classe de construction II : Construction dans laquelle des profilés et plaques nervurées formés à froid sont calculés pour contribuer à la résistance et à la stabilité d'éléments structuraux individuels ;

Classe de construction III : Construction dans laquelle les plaques nervurées formées à froid sont utilisées comme élément assurant uniquement un transfert de charges à la structure.

NOTE 1 Différentes classes de construction peuvent être retenues au cours de différentes phases de la construction.

NOTE 2 Pour les exigences relatives à l'exécution des plaques nervurées, voir l'EN 1090.

3 Matériaux

3.1 Généralités

(1) Il convient, pour réaliser les profilés et plaques nervurées formés à froid, d'utiliser des aciers aptes au formage à froid et au soudage, si nécessaire. Il convient également d'utiliser des aciers aptes à la galvanisation pour réaliser les profilés et plaques nervurées destinés à être galvanisés..

(2) Il convient d'adopter les valeurs nominales des propriétés des matériaux données dans la présente Section, comme valeurs caractéristiques dans les calculs.

(3) La présente partie de l'EN 1993 couvre le calcul des profilés et plaques nervurées formés à froid, constitués d'aciers dont les nuances sont listées dans le Tableau 3.1a.

Tableau 3.1.a - Valeurs nominales de la limite d'élasticité de base f_{yb} et de la résistance ultime à la traction f_u

Type d'acier	Norme	Nuance	f_{yb} N/mm^2	f_u N/mm^2
Produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés. Partie 2 : Conditions techniques de livraison pour les aciers de construction non alliés	EN 10025: Partie 2	S 235	235	360
		S 275	275	430
		S 355	355	510
Produits laminés à chaud en aciers de construction. Partie 3 : Conditions techniques de livraison pour les aciers de construction soudables à grains fins à l'état normalisé / laminage normalisant	EN 10025: Partie 3	S 275 N	275	370
		S 355 N	355	470
		S 420 N	420	520
		S 460 N	460	550
		S 275 NL	275	370
		S 355 NL	355	470
		S 420 NL	420	520
		S 460 NL	460	550
Produits laminés à chaud en aciers de construction. Partie 4 : Conditions techniques de livraison pour les aciers de construction soudables à grains fins obtenus par laminage thermomécanique	EN 10025: Partie 4	S 275 M	275	360
		S 355 M	355	450
		S 420 M	420	500
		S 460 M	460	530
		S 275 ML	275	360
		S 355 ML	355	450
		S 420 ML	420	500
		S 460 ML	460	530

NOTE 1 : Pour les aciers suivant l'EN 100025, dans le cas où la largeur de la tôle avant profilage est supérieure ou égale à 600 mm, la valeur caractéristique à retenir est égale à 0,9 fois la valeur donnée au Tableau 3.1.a

NOTE 2 : Pour les autres matériaux et produits en acier, voir l'Annexe Nationale. Des exemples de nuances d'acier susceptibles d'être conformes aux exigences de la présente Norme sont donnés dans le Tableau 3.1b.

Tableau 3.1b - Valeurs nominales de la limite d'élasticité de base f_{yb} et de la résistance ultime à la traction f_u

Type d'acier	Norme	Nuance	f_{yb} N/mm^2	f_u N/mm^2
Tôles en acier de construction laminées à froid	ISO 4997	CR 220 CR 250 CR 320	220 250 320	300 330 400
Tôles en aciers de construction galvanisées à chaud en continu	EN 10326	S220GD+Z S250GD+Z S280GD+Z S320GD+Z S350GD+Z	220 250 280 320 350	300 330 360 390 420
Produits plats laminés à chaud en aciers à haute limite d'élasticité pour formage à froid. Partie 2 : Conditions de livraison des aciers obtenus par laminage thermomécanique	EN 10149: Partie 2	S 315 MC S 355 MC S 420 MC S 460 MC S 500 MC S 550 MC S 600 MC S 650 MC S 700 MC	315 355 420 460 500 550 600 650 700	390 430 480 520 550 600 650 700 750
	EN 10149: Partie 3	S 260 NC S 315 NC S 355 NC S 420 NC	260 315 355 420	370 430 470 530
Produits plats laminés à froid en aciers micro-alliés à haute limite d'élasticité pour formage à froid	EN 10268	H240LA H280LA H320LA H360LA H400LA	240 280 320 360 400	340 370 400 430 460
Bandes et tôles en aciers à haute limite d'élasticité revêtues en continu par immersion à chaud pour formage à froid	EN 10292	H260LAD H300LAD H340LAD H380LAD H420LAD	240 2) 280 2) 320 2) 360 2) 400 2)	340 2) 370 2) 400 2) 430 2) 460 2)
Bandes et tôles en acier revêtues à chaud en continu d'alliage zinc-aluminium (ZA)	EN 10326	S220GD+ZA S250GD+ZA S280GD+ZA S320GD+ZA S350GD+ZA	220 250 280 320 350	300 330 360 390 420
Bandes et tôles en acier revêtues d'alliage aluminium-zinc (AZ) à chaud en continu	EN 10326	S220GD+AZ S250GD+AZ S280GD+AZ S320GD+AZ S350GD+AZ	220 250 280 320 350	300 330 360 390 420
Bandes et tôles en aciers doux galvanisées à chaud et en continu pour formage à froid	EN 10327	DX51D+Z DX52D+Z DX53D+Z	140 1) 140 1) 140 1)	270 1) 270 1) 270 1)

1) Les valeurs minimales de la limite d'élasticité et de la résistance ultime à la traction ne sont pas données dans la norme. Pour toutes les nuances d'acier, une valeur minimale de 140 N/mm^2 pour la limite d'élasticité et de 270 N/mm^2 pour la résistance ultime à la traction peuvent être supposées.

2) Les valeurs de la limite d'élasticité données par les désignations des différents matériaux correspondent à une traction transversale. Les valeurs relatives à la traction longitudinale sont données dans le Tableau.

3.2 Acier de construction

3.2.1 Propriétés du matériau de base

(1) Il convient de déterminer les valeurs nominales de la limite d'élasticité f_{yb} ou de la résistance à la traction f_u

a) soit en adoptant les valeurs $f_y = R_{eh}$ ou $R_{p0,2}$ et $f_u = R_m$ fournies directement par les normes de produits,

b) soit en utilisant les valeurs données dans les Tableaux 3.1.a et b,

c) soit en effectuant des essais appropriés.

(2) Lorsque les valeurs caractéristiques sont déterminées à partir d'essais, il convient de les réaliser conformément à l'EN 10002-1. Il convient d'utiliser au moins 5 éprouvettes, ces éprouvettes étant prélevées sur un lot de la manière suivante :

1. Bobines : a. Pour un lot de production donné (un creuset d'acier en fusion), au moins une éprouvette par bobine sur 30% des bobines du lot ;

   b. Pour un lot de différentes productions, au moins une éprouvette par bobine ;

2. Bandes : Au moins une éprouvette pour 2 000 kg prélevés du même lot de production.

Il convient de prélever les éprouvettes au hasard sur le lot d'acier concerné et de les disposer dans le sens de la longueur de l'élément de construction. Il convient de déterminer les valeurs caractéristiques sur la base d'une évaluation statistique conformément à l'EN 1990, Annexe D.

(3) On peut supposer que les caractéristiques de l'acier en compression sont identiques à celles de l'acier en traction.

(4) Il convient de respecter les exigences de ductilité fixées au 3.2.2 de l'EN 1993-1-1.

(5) Il convient de retenir comme valeurs de calcul des coefficients applicables aux matériaux celles données au 3.2.6 de l'EN 1993-1-1

(6) Les propriétés des matériaux à températures élevées sont données dans l'EN 1993-1-2.

3.2.2 Propriétés des matériaux constituant les profilés et plaques nervurées formés à froid

(1) Lorsque la limite d'élasticité est désignée par le symbole f_y, la limite d'élasticité moyenne f_{ya} peut être utilisée si (4) à (8) s'appliquent. Dans les autres cas, il convient d'utiliser la limite d'élasticité de base f_{yb}. Lorsque la limite d'élasticité est désignée par le symbole f_{yb}, il convient d'utiliser la limite d'élasticité de base f_{yb}.

(2) La limite d'élasticité moyenne f_{ya} d'une section transversale, après formage à froid, peut être déterminée à partir de résultats d'essais à l'échelle 1.

(3) De manière alternative, la limite d'élasticité moyenne augmentée f_{ya} peut être calculée à l'aide de la formule suivante :

$$f_{ya} = f_{yb} + \left(f_u - f_{yb}\right)\frac{knt^2}{A_g} \quad \text{avec} \quad f_{ya} \le \frac{\left(f_u + f_{yb}\right)}{2} \tag{3.1}$$

où :

A_g est l'aire de la section transversale brute ;

k est un coefficient numérique dépendant du type de formage, comme suit :

- k = 7 pour le profilage ;
- k = 5 pour les autres méthodes de formage ;

n est le nombre de plis à 90° de la section transversale avec un rayon interne $r \leq 5t$ (il convient de tenir compte des fractions de plis à 90° comme des fractions de *n*) ;

t est l'épaisseur de calcul de l'acier nu avant formage à froid, à l'exclusion des revêtements métalliques et organiques, voir 3.2.4.

(4) La limite d'élasticité augmentée par le formage à froid peut être prise en compte de la façon suivante :

— pour les barres soumises à une charge axiale et dont l'aire efficace de section transversale A_{eff} est égale à l'aire brute A_g ;

— pour la détermination de A_{eff}, il convient de prendre la limite d'élasticité f_y égale à f_{yb}.

(5) La limite d'élasticité moyenne f_{ya} peut être utilisée pour déterminer :

— la résistance de section transversale d'une barre soumise à une charge axiale de traction;

— la résistance de section transversale ainsi que la résistance au flambement d'une barre soumise à une charge axiale de compression, si sa section transversale est pleinement efficace ;

— le moment résistant d'une section transversale comportant des semelles pleinement efficaces.

(6) Pour déterminer le moment résistant d'une section transversale comportant des semelles pleinement efficaces, la section transversale peut être subdivisée en *m* parois nominales, telles que les semelles. L'expression (3.1) peut ensuite être utilisée pour obtenir des valeurs de limite d'élasticité augmentée $f_{y,i}$ séparément pour chaque paroi nominale *i*, à condition que :

$$\frac{\sum_{i=1}^{m} A_{g,i} f_{y,i}}{\sum_{i=1}^{m} A_{g,i}} \leq f_{ya} \tag{3.2}$$

où :

$A_{g,i}$ est l'aire de la section transversale brute de la paroi nominale *i*,

et pour calculer la limite d'élasticité augmentée $f_{y,i}$ à l'aide de l'expression (3.1), il convient de compter chaque pli d'extrémité de la paroi *i* comme un angle moitié de l'angle réel du pli.

(7) Il convient de ne pas utiliser l'augmentation de limite d'élasticité due au formage à froid pour les profilés soumis après formage à un traitement thermique à une température supérieure à 580° C pendant plus d'une heure.

NOTE Pour de plus amples informations, voir l'EN 1090, Partie 2.

(8) Il convient d'accorder une attention toute particulière au fait que certains traitements thermiques (particulièrement le recuit) peuvent provoquer l'abaissement de la limite d'élasticité à une valeur inférieure à celle de la limite d'élasticité de base f_{yb} .

NOTE Pour le soudage dans des sections formées à froid, voir également l'EN 1993-1-8.

3.2.3 Ténacité à la rupture

(1) Voir EN 1993-1-1 et EN 1993-1-10.

3.2.4 Epaisseur et tolérances d'épaisseur

(1) Les dispositions données dans la présente Partie 1.3 de l'EN 1993 pour le dimensionnement par le calcul peuvent être utilisées pour des plages données de métal nu t_{cor} :

NOTE Les plages d'épaisseur de métal nu t_{cor} pour les plaques nervurées et les profilés peuvent être données dans l'Annexe Nationale. Les valeurs suivantes sont recommandées :

— pour les plaques nervurées et les profilés : 0,45 mm ≤ t_{cor} ≤ 15 mm

— pour les assemblages : 0,45 mm ≤ t_{cor} ≤ 4 mm , voir 8.1(2)

(2) Des matériaux plus minces ou plus épais peuvent également être utilisés, à condition que la capacité portante soit déterminée par un dimensionnement assisté par des essais.

(3) Il convient d'utiliser l'épaisseur de métal nu t_{cor} comme épaisseur de calcul, où :

$$t = t_{\mathrm{cor}} \qquad \text{si } tol \leq 5\% \tag{3.3a}$$

$$t = t_{\mathrm{cor}} \frac{100 - tol}{95} \qquad \text{si } tol > 5\% \tag{3.3b}$$

Avec $t_{\mathrm{cor}} = (t_{\mathrm{nom}} - t_{\text{revêtement métallique}})$ (3.3c)

où *tol* est la tolérance inférieure en %.

NOTE Pour le revêtement courant de zinc Z 275, t_{zinc} = 0,04 mm.

(4) Pour les profilés et les plaques nervurées, revêtus d'un métal en continu par immersion à chaud, fournis avec des tolérances négatives inférieures ou égales aux "tolérances réduites (S)" données dans l'EN 10143, l'épaisseur de calcul suivant équation (3.3a) peut être utilisée. Lorsque la tolérance négative ne relève pas des "tolérances réduites (S)" données dans l'EN 10143, l'épaisseur de calcul suivant équation (3.3b) peut alors être utilisée.

(5) t_{nom} est l'épaisseur nominale après formage à froid. Elle peut être prise égale à l'épaisseur t_{nom} de la plaque d'origine, si l'écart entre les sections transversales calculées avant et après le formage à froid n'est pas supérieur à 2% ; il convient dans les autres cas de modifier les dimensions théoriques.

3.3 Dispositifs d'assemblage

3.3.1 Assemblages par boulons

(1) Il convient d'utiliser des boulons, écrous et rondelles répondant aux exigences de l'EN 1993-1-8.

3.3.2 Autres types de fixations mécaniques

(1) Les autres types de fixations mécaniques, telles que :

— les vis autotaraudeuses par déformation ou par enlèvement de matière ou les vis autoperçeuses,

— les clous à scellement,

— les rivets aveugles

peuvent être utilisés lorsqu'ils sont conformes à la spécification européenne de produit pertinente.

(2) La résistance caractéristique au cisaillement $F_{v,Rk}$ et la résistance caractéristique minimale à la traction $F_{t,Rk}$ des fixations mécaniques peuvent être tirées de : norme de produit EN, ou ETAG, ou ETA.

3.3.3 Consommables de soudage

(1) Il convient d'utiliser des consommables de soudage répondant aux exigences de l'EN 1993-1-8.

4 Durabilité

(1) Pour les exigences de base, voir Section 4 de l'EN 1993-1-1.

NOTE L'EN 1090 donne en 9.3.1 la liste des facteurs qui affectent l'exécution et doivent être spécifiés lors du calcul.

(2) Il convient d'apporter une attention particulière aux cas dans lesquels différents matériaux agissent de manière combinée, si ces matériaux sont tels que des phénomènes électrochimiques peuvent créer des conditions favorisant la corrosion.

NOTE 1 Pour la résistance à la corrosion des fixations, pour une classe environnementale définie suivant l'EN ISO 12944-2, voir l'Annexe B

NOTE 2 Pour les produits de couverture, voir l'EN 508-1.

NOTE 3 Pour les autres produits, voir partie 1-1 de l'EN 1993.

NOTE 4 Pour les fixations galvanisées, voir l'EN ISO 10684

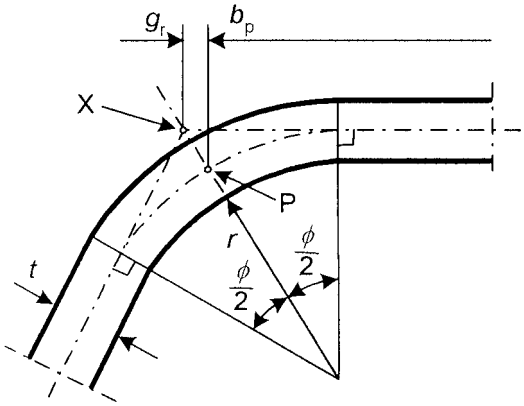
5 Analyse structurale

5.1 Influence des arrondis

(1) Dans les sections transversales comportant des arrondis, Il convient de mesurer les largeurs de référence des parois b_p à partir des points médians des plis adjacents, comme indiqué à la Figure 5.1.

(2) Dans les sections comportant des arrondis, il convient de calculer les caractéristiques de section à partir de la géométrie nominale de la section transversale.

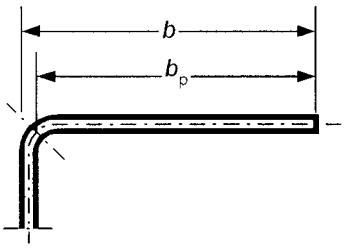
(3) A moins que des méthodes plus précises ne soient utilisées pour déterminer les caractéristiques de section, le mode opératoire approximatif suivant peut être employé. L'influence des arrondis sur la résistance des sections transversales peut être négligée si les rayons internes $r \leq 5\ t$ et $r \leq 0{,}10\ b_p$; la section transversale est alors assimilée à une section constituée des parois planes à angles vifs (selon la Figure 5.2, noter l'utilisation de la valeur b_p pour toutes les parois planes, y compris les parois soumises à la traction). Pour les propriétés de rigidité des sections transversales, il convient toujours de prendre en compte l'influence des arrondis.

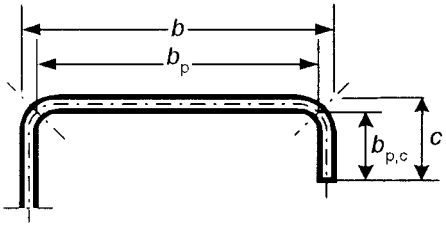


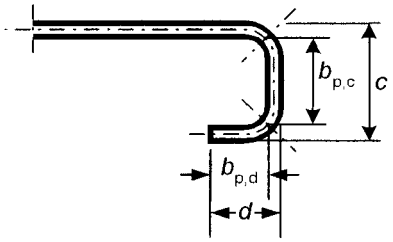
(a) Point médian d'arrondi ou de pli
X est l'intersection des lignes médianes
P est le point médian de l'arrondi

$$r_m = r + t/2$$

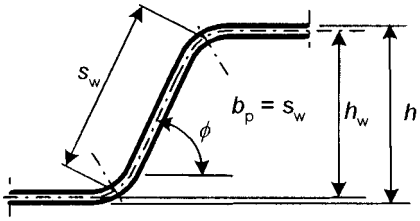
$$g_r = r_m\left(\tan(\frac{\phi}{2}) - \sin(\frac{\phi}{2})\right)$$



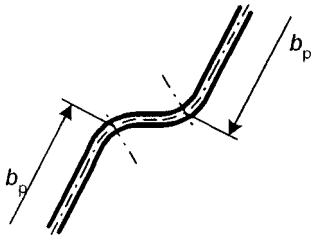




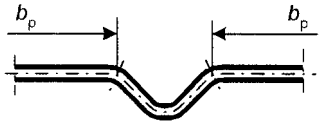
(b) Largeur de référence b_p des parois constituant une semelle



(c) Largeur de référence b_p d'une âme
(b_p = largeur s_w)



(d) Largeur de référence b_p des parois adjacentes à un raidisseur d'âme



(e) Largeur de référence b_p des parois adjacentes à un raidisseur de semelle

Figure 5.1 - Largeurs de référence des sections transversales de parois b_p tenant compte des rayons d'arrondi

(4) L'influence des arrondis sur les caractéristiques de section peut être prise en compte en réduisant les caractéristiques calculées pour une section transversale similaire comportant des angles vifs, voir Figure 5.2, à l'aide des approximations suivantes :

$$A_g \approx A_{g,sh}\,(1 - \delta) \tag{5.1a}$$

$$I_g \approx I_{g,sh}\,(1 - 2\delta) \tag{5.1b}$$

$$I_w \approx I_{w,sh}\,(1 - 4\delta) \tag{5.1c}$$

avec :

$$\delta = 0{,}43 \frac{\sum_{j=1}^{n} r_j \frac{\phi_j}{90°}}{\sum_{i=1}^{m} b_{p,i}} \tag{5.1d}$$

où :

A_g est l'aire de la section transversale brute ;

$A_{g,sh}$ est la valeur de A_g pour la section transversale à angles vifs ;

$b_{p,i}$ est la largeur de référence de la paroi i de la section transversale à angles vifs ;

I_g est le moment d'inertie de flexion de la section transversale brute ;

$I_{g,sh}$ est la valeur de I_g pour la section transversale à angles vifs ;

I_w est le moment d'inertie de gauchissement de la section transversale brute ;

$I_{w,sh}$ est la valeur de I_w pour la section transversale à angles vifs ;

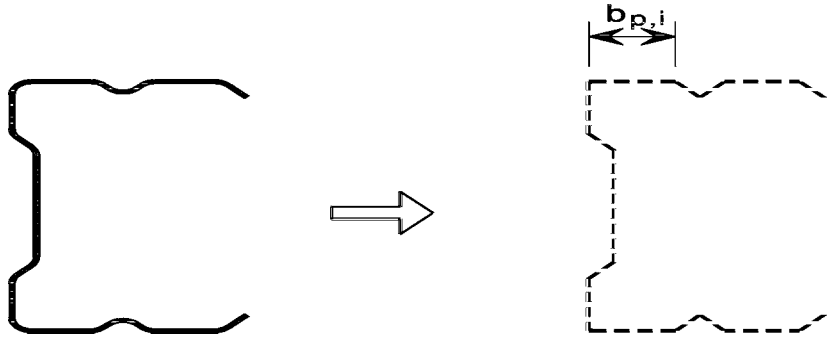
ϕ est l'angle entre deux parois planes ;

m est le nombre de parois planes ;

n est le nombre de plis ;

r_j est le rayon interne de l'arrondi j.

(5) Les réductions données par l'expression (5.1) peuvent également être appliquées lors du calcul des caractéristiques de section efficace A_{eff}, $I_{y,eff}$, $I_{z,eff}$ et $I_{w,eff}$, à condition que les largeurs de référence des parois soient mesurées entre les points d'intersection de leurs lignes médianes.



Section transversale réelle **Section transversale idéalisée**

Figure 5.4 - Prise en compte approchée des arrondis

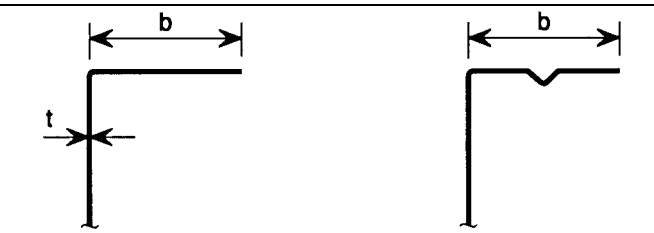
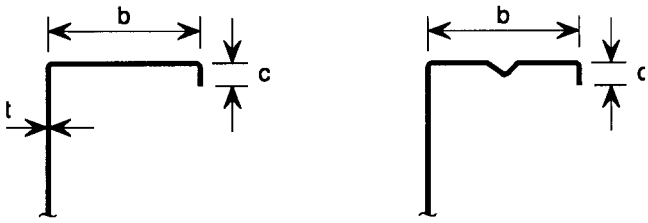
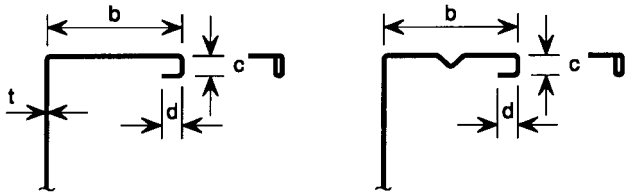
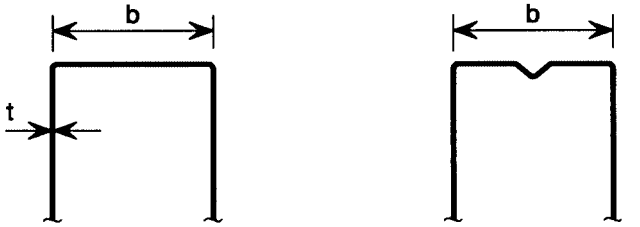
(6) Lorsque le rayon interne $r > 0{,}04\ t\ E\ /\ f_y$, il convient alors de déterminer la résistance de la section transversale par des essais.

5.2 Proportions géométriques

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

NOTE Les limites b / t, h / t, c / t et d / t données dans le Tableau 5.1 représentent le domaine pour lequel–une expérience suffisante et une vérification par des essais existent déjà. Les sections transversales présentant des rapports largeur sur épaisseur plus élevés peuvent également être utilisées, à condition que leur résistance aux états limites ultimes et leur comportement aux états limites de service soient vérifiés par des essais, et/ou des calculs lorsque les résultats sont confirmés par un nombre approprié d'essais.

Table 5.1 - Rapports maximum largeur sur épaisseur

Paroi de la section transversale	Valeur maximale
	$b / t \leq 50$
	$b / t \leq 60$ $c / t \leq 50$
	$b / t \leq 90$ $c / t \leq 60$ $d / t \leq 50$
	$b / t \leq 500$
	$45° \leq \phi \leq 90°$ $h / t \leq 500 \sin\phi$

(2) Afin de garantir une rigidité suffisante du raidisseur et d'éviter son flambement , il convient de retenir des dimensions de raidisseurs dans les gammes suivantes :

$$0{,}2 \leq c / b \leq 0{,}6 \qquad (5.2a)$$

$$0{,}1 \leq d / b \leq 0{,}3 \qquad (5.2b)$$

avec les dimensions *b*, *c* et *d* telles qu'indiquées dans le Tableau 5.1.

Si $c / b < 0{,}2$ ou $d / b < 0{,}1$, il convient d'ignorer le raidisseur de bord (c = 0 ou d = 0).

NOTE 1 Lorsque les caractéristiques de section transversale efficace sont déterminées par des essais et par des calculs, ces limites ne s'appliquent pas.

NOTE 2 Le bord tombé *c* est mesuré perpendiculairement à la semelle si l'angle entre ces parois n'est pas droit.

NOTE 3 Pour les méthodes de calcul par éléments finis, voir l'Annexe C de l'EN 1993-1-5.

5.3 Modélisation structurale en vue de l'analyse

(1) A moins que ne soient utilisés des modèles plus appropriés suivant l'EN 1993-1-5, les différentes parois constituant une section transversale peuvent être modélisées comme indiqué dans le Tableau 5.2.

(2) Il convient de tenir compte de l'influence simultanée de plusieurs raidisseurs.

(3) Il convient de retenir les imperfections de flambement par flexion et par flexion-torsion définies au Tableau 5.1 de l'EN 1993-1-1

NOTE Voir également 5.3.4 de l'EN 1993-1-1.

(4) Pour les imperfections relatives au déversement, on peut retenir une imperfection initiale en arc e_0 de l'axe faible du profil, sans tenir compte simultanément d'une torsion initiale.

NOTE La grandeur de l'imperfection peut être définie dans l'Annexe Nationale. Les valeurs recommandées pour des sections auxquelles on associe la courbe de déversement a selon 6.3.2.2 de l'EN 1993-1-1 sont :

e_0/L = 1/600 pour une analyse élastique

e_0/L = 1/500 pour une analyse plastique ;

Tableau 5.2 - Modélisation des parois d'une section transversale

Type de paroi	Modèle	Type de paroi	Modèle

5.4 Déformation transversale de la semelle

(1) Il convient de tenir compte de l'effet de la déformation transversale des semelles de grande largeur (courbure vers l'intérieur, vers le plan moyen) sur la capacité portante d'un profil fléchi,, ou de la déformation de la semelle d'un profil en arc également fléchi et dont le côté concave est comprimé, à moins que ladite déformation transversale ne soit inférieure à 5% de la hauteur du profil. Lorsque la déformation transversale est plus importante, il convient de tenir compte de la réduction de la capacité portante, due notamment à la diminution du bras de levier d'une part des semelles de grande largeur, et à l'effet possible de la flexion des âmes.

NOTE Pour les plateaux, cet effet est pris en compte au 10.2.2.2.

(2) La déformation transversale peut être calculée comme suit. Les formules s'appliquent aux semelles comprimées et aux semelles tendues, avec ou sans raidisseurs, mais sans raidisseurs transversaux rapprochés dans les semelles.

Pour un profil rectiligne avant l'application d'un chargement (voir Figure 5.3),

$$u = 2\frac{\sigma_a^{\ 2}}{E^2}\frac{b_s^{\ 4}}{t^2 z} \tag{5.3a}$$

Pour une poutre en arc :

$$u = 2\frac{\sigma_a}{E}\frac{b_s^{\ 4}}{t^2 r} \tag{5.3b}$$

où :

u est la flexion de la semelle en direction de l'axe neutre (déformation transversale), voir Figure 5.3 ;

b_s est la mi-distance entres les âmes des profilés en caisson et en oméga, ou la largeur de semelle en débord d'une âme, voir Figure 5.3 ;

t est l'épaisseur de la semelle ;

z est la distance entre la semelle considérée et l'axe neutre ;

r est le rayon de courbure de la poutre en arc ;

σ_a est la contrainte moyenne exercée sur la semelle, calculée sur la section brute. Lorsque la contrainte a été calculée sur la section transversale efficace, la contrainte moyenne est obtenue en multipliant la contrainte calculée sur la section transversale efficace par le rapport de la section efficace de semelle à la section brute de semelle.

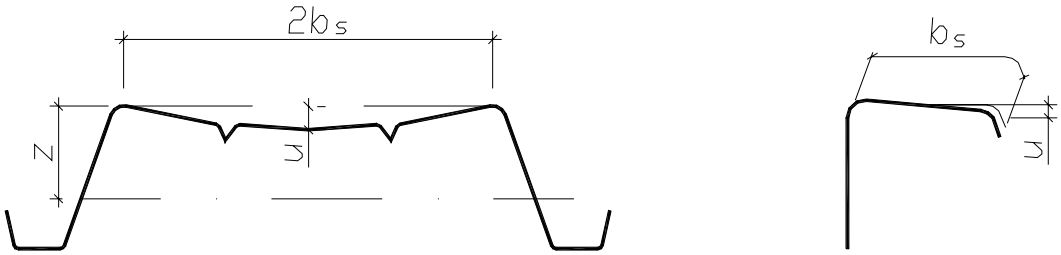


Figure 5.5 - Déformation transversale de section

5.5 Flambement local et flambement par distorsion

5.5.1 Généralités

(1) Il convient de prendre en compte les effets du flambement local et par distorsion pour la détermination de la résistance et de la rigidité des profilés et plaques nervurées formés à froid.

(2) Les effets du flambement local peuvent être pris en compte en utilisant les caractéristiques de section transversale efficace, calculées sur la base des largeurs efficaces, voir EN 1993-1-5.

(3) Pour la détermination de la résistance au flambement local, il convient de considérer la limite d'élasticité f_y égale à f_{yb} pour le calcul des largeurs efficaces des parois comprimées selon l'EN 1993-1-5.

NOTE Pour la résistance, voir 6.1.3(1).

(4) Pour les vérifications aux états limites de service, il convient de calculer la largeur efficace d'une paroi comprimée à partir de la contrainte de compression $\sigma_{com,Ed,ser}$ s'exerçant sur la paroi sous l'effet des charges à l'état limite de service considéré.

(5) Le flambement par distorsion des parois avec raidisseurs de bord ou intermédiaires, comme indiqué à la Figure 5.4(d), est étudié au 5.5.3.

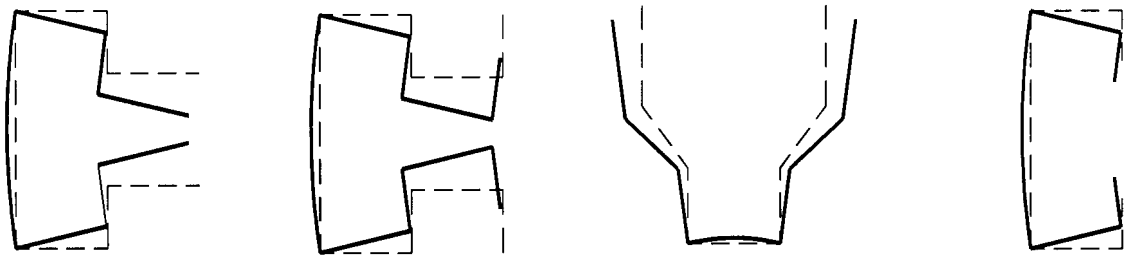


Figure 5.4 - Exemples de modes de flambement par distorsion

(6) Il convient de tenir compte des effets du flambement par distorsion dans les cas indiqués aux Figures 5.4(a), (b) et (c). Dans ce type de cas, il y a lieu de déterminer les effets du flambement par distorsion en effectuant une analyse linéaire (voir 5.5.1(7)) ou non-linéaire (voir EN 1993-1-5) de flambement, au moyen de méthodes numériques ou d'essais de compression sur tronçons courts.

(7) A moins que ne soit utilisée la procédure simplifiée décrite au 5.5.3, lorsque la contrainte par flambement élastique est obtenue par analyse linéaire, la procédure suivante peut être appliquée :

1) Identifier les modes de flambement avec une longueur d'onde inférieure ou égale à la longueur de la barre étudiée et calculer les contraintes de flambement élastique correspondantes : voir Figure 5.5a.

2) Calculer la (les) largeur(s) efficace(s) suivant 5.5.2 pour les parois de la section transversale soumises au flambement local, sur la base de la contrainte de flambement local minimale, voir Figure 5.5a.

3) Calculer l'épaisseur réduite (voir 5.5.3.1(7)) des raidisseurs de bord et intermédiaires ou des autres éléments de section transversale soumis à un flambement par distorsion, sur la base de la contrainte minimale de flambement par distorsion, voir Figure 5.5b.

4) Calculer la résistance au flambement global conformément au 6.2 (flambement par flexion, distorsion ou déversement selon le mode de flambement) pour la longueur réelle de la barre étudiée et sur la base de la section transversale efficace, à partir de 2) et 3).

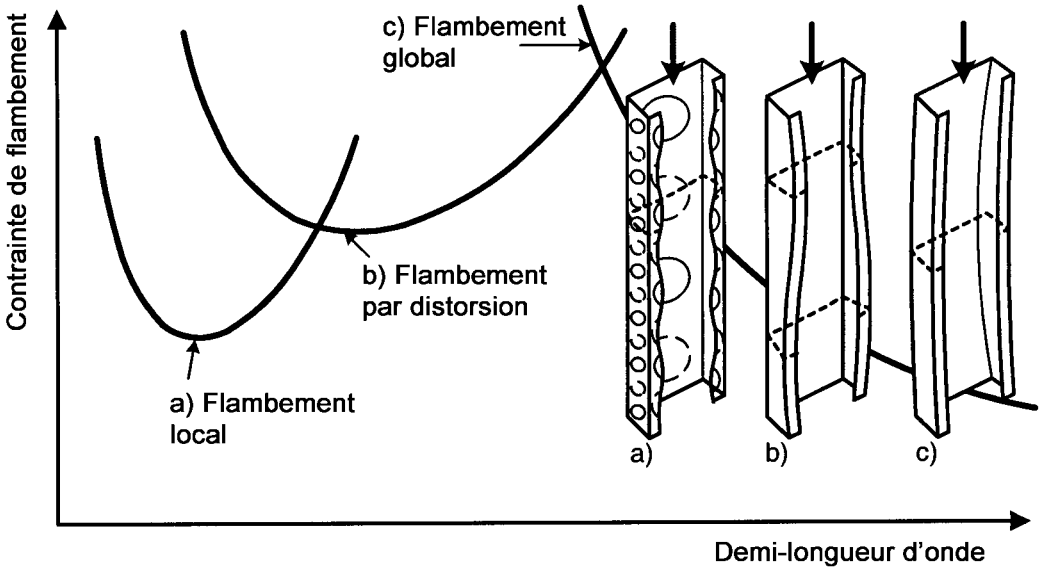


Figure 5.5a - Exemple de représentation de la contrainte critique élastique pour divers modes de flambement en fonction de la demi-longueur d'onde - Exemples de modes de flambement

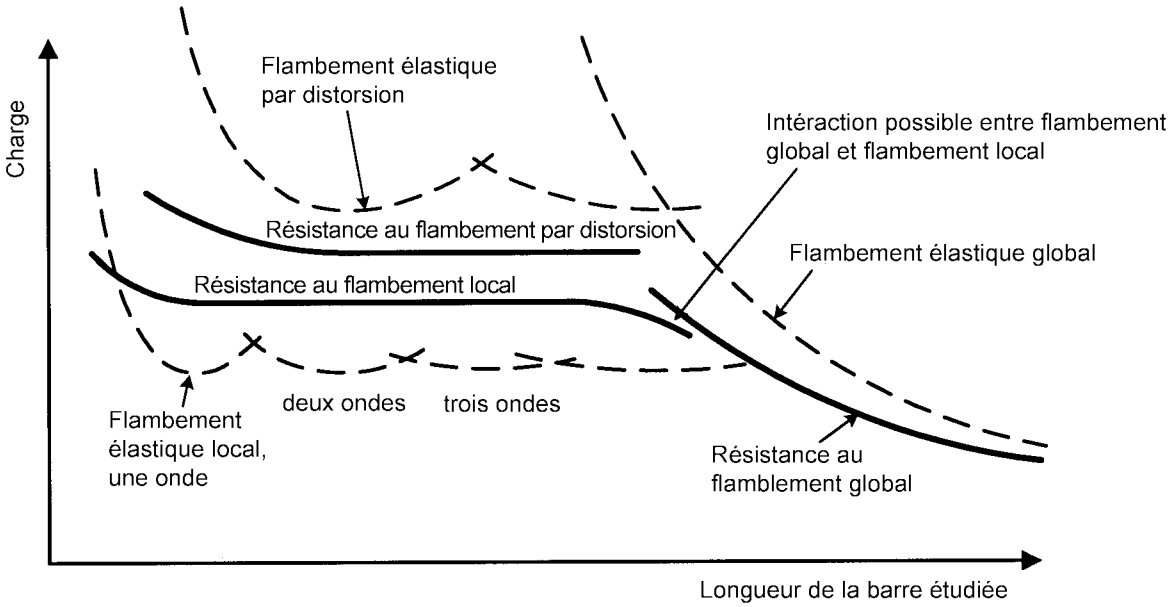


Figure 5.5b – Exemple de représentation de la charge critique de flambement élastique et de la résistance au flambement en fonction de la longueur de la barre étudiée

5.5.2 Parois sans raidisseurs

(1) Il convient de déterminer la largeur efficace des parois non raidies suivant l'EN 1993-1-5 avec $\bar{b}$ égale à la largeur de référence b_p, en utilisant les facteurs de réduction de voilement calculés pour l'élancement de plaque λ_p.

(2) Il convient de déterminer la largeur de référence d'une paroi b_p comme spécifié à la Figure 5.1 du 5.1.4. Dans le cas des éléments constitutifs d'une âme inclinée, il convient d'utiliser la largeur appropriée suivant la pente.

NOTE Pour les parois avec un bord libre, une méthode plus précise permettant de calculer les largeurs efficaces est donnée à l'Annexe D.

(3) Pour appliquer la méthode décrite dans l'EN 1993-1-5, la procédure suivante peut être utilisée:

— Le rapport de contraintes ψ, mentionné dans les Tableaux 4.1 et 4.2, utilisé pour déterminer la largeur efficace des semelles d'une section soumise à un gradient de contrainte, peut être calculé à partir des caractéristiques de la section brute.

— Le rapport de contraintes ψ, mentinné dans les Tableaux 4.1 et 4.2, utilisé pour déterminer la largeur efficace de l'âme, peut être obtenu en utilisant l'aire efficace de la semelle comprimée et l'aire brute de l'âme.

— Les caractéristiques de section efficace peuvent être affinées en utilisant le rapport de contraintes ψ calculé à partir de la section transversale efficace déjà trouvée, substituée à la section transversale brute. Le calcul itératif relatif au gradient de contraintes comprend au minimum deux pas.

— La méthode simplifiée donnée au 5.5.3.4 peut être employée dans le cas des âmes de plaques à nervures trapézoïdales soumises à un gradient de contraintes.

5.5.3 Parois planes avec raidisseurs de bord ou intermédiaires

5.5.3.1 Généralités

(1) Il convient de baser le calcul des parois comprimées munies de raidisseurs de bord ou intermédiaires sur l'hypothèse selon laquelle le raidisseur se comporte comme une barre comprimée avec un maintien partiel continu, dont la rigidité de ressort dépend des conditions aux limites et de la rigidité de flexion des parois adjacentes.

(2) Il convient de déterminer la rigidité du ressort associé à un raidisseur par l'application d'une charge unitaire par unité de longueur u comme illustré à la Figure 5.6. La rigidité K du ressort, par unité de longueur, peut être déterminée à partir de :

$$K = u / \delta \tag{5.9}$$

où :

δ est la flèche du raidisseur sous l'effet de la charge unitaire u agissant au centre de gravité (b_1) de sa section efficace.

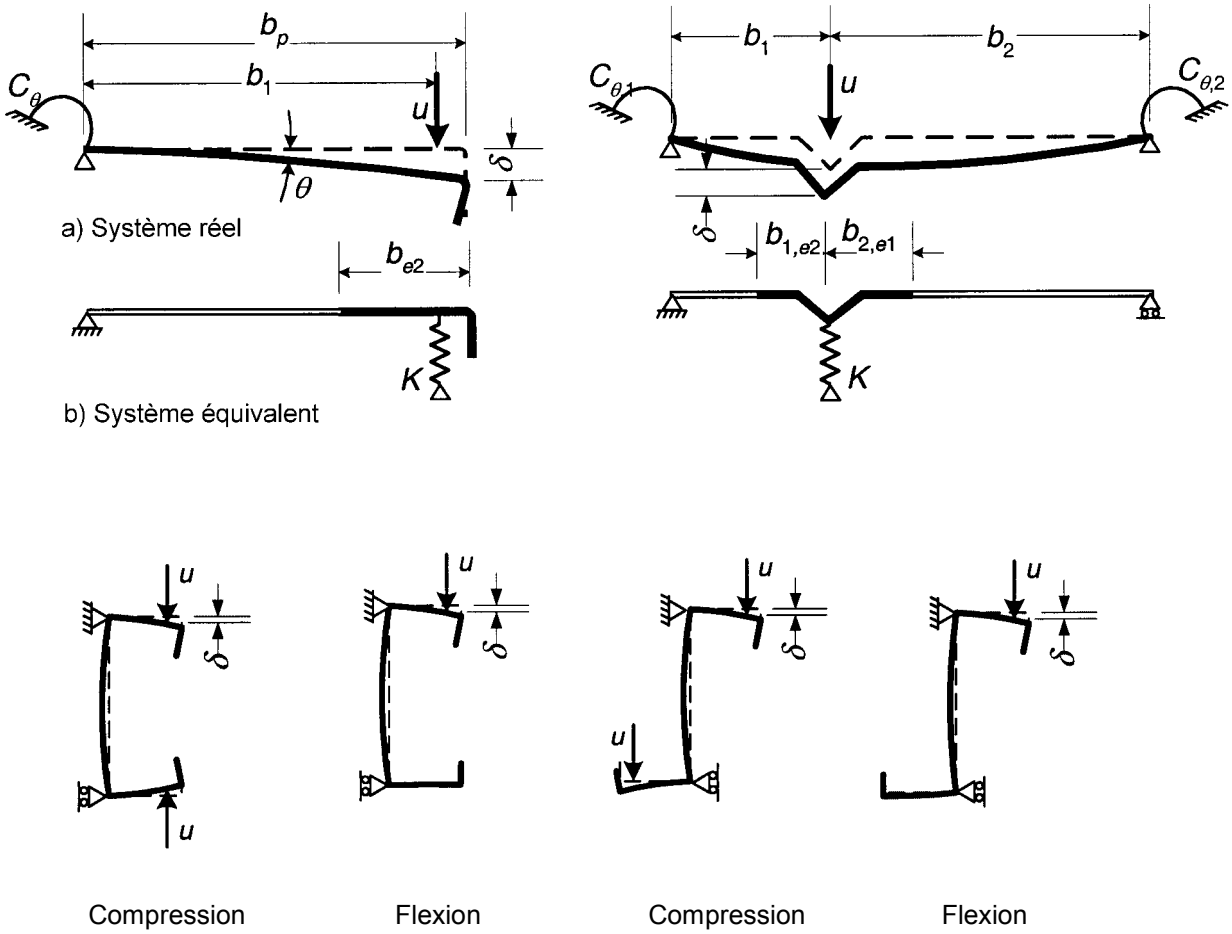


Figure 5.6 - Détermination de la rigidité du ressort

(3) Pour déterminer la rigidité des ressorts en rotation C_θ, $C_{\theta,1}$ et $C_{\theta,2}$ en fonction de la géométrie de la section transversale, il convient de tenir compte des effets éventuels d'autres raidisseurs existant sur la même paroi, ou sur toute autre paroi comprimée de la section transversale.

(4) Pour un raidisseur de bord, il convient de calculer la flèche δ par :

$$\delta = \theta\, b_\mathrm{p} + \frac{u b_\mathrm{p}^{\,3}}{3} \cdot \frac{12\left(1-\nu^2\right)}{E t^3} \tag{5.10}$$

avec :

$\theta = u\, b_\mathrm{p} / C_\theta$

(5) Dans le cas des raidisseurs de bord de profils en C et en Z, il convient de déterminer C_θ avec la charge unitaire u appliquée comme indiqué à la Figure 5.6(c). Ceci conduit à l'expression suivante pour la rigidité de ressort K_1 pour la semelle 1 :

$$K_1 = \frac{E\, t^3}{4\,(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2\, h_\mathrm{w} + b_1^3 + 0{,}5\, b_1\, b_2\, h_\mathrm{w}\, k_\mathrm{f}} \tag{5.10b}$$

où :

b_1 est la distance entre la jonction âme-semelle et le centre de gravité de l'aire efficace du raidisseur de bord de la semelle 1 (y compris la partie efficace b_{e2} de la semelle), voir Figure 5.6(a) ;

b_2 est la distance entre la jonction âme-semelle et le centre de gravité de l'aire efficace du raidisseur de bord de la semelle 2 (y compris la partie efficace de la semelle);

h_w est la hauteur d'âme ;

$k_f = 0$ si la semelle 2 est tendue (par exemple pour une poutre soumise à une flexion par rapport à l'axe y-y) ;

$k_f = \frac{A_{S2}}{A_{S1}}$ si la semelle 2 est également comprimée (par exemple pour une poutre soumise à une compression axiale) ;

$k_f = 1$ pour une section symétrique comprimée.

A_{S1} et A_{S2} sont l'aire efficace du raidisseur de bord (y compris la partie efficace b_{e2} de la semelle, voir Figure 5.6(b)) de la semelle 1 et de la semelle 2 respectivement.

(6) Pour un raidisseur intermédiaire, une alternative plaçant en sécurité peut consister à prendre la rigidité des ressorts en rotation $C_{\theta,1}$ et $C_{\theta,2}$ égale à zéro ; la flèche δ peut alors être obtenue par :

$$\delta = \frac{u b_1^{\,2} b_2^{\,2}}{3(b_1 + b_2)} \cdot \frac{12(1 - v^2)}{E t^3} \tag{5.11}$$

(7) Il convient de déterminer le coefficient de réduction χ_d pour la résistance au flambement par distorsion (flambement par flexion d'un raidisseur) à partir de l'élancement réduit $\bar{\lambda}_d$ obtenu de façon-suivante :

$$\chi_d = 1{,}0 \qquad \text{si } \bar{\lambda}_d \le 0{,}65 \tag{5.12a}$$

$$\chi_d = 1{,}47 - 0{,}723\bar{\lambda}_d \qquad \text{si } 0{,}65 < \bar{\lambda}_d < 1{,}38 \tag{5.12b}$$

$$\chi_d = \frac{0{,}66}{\bar{\lambda}_d} \qquad \text{si } \bar{\lambda}_d \ge 1{,}38 \tag{5.12c}$$

où :

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb} / \sigma_{cr,s}} \tag{5.12d}$$

où :

$\sigma_{cr,s}$ est la contrainte critique élastique pour le(s) raidisseur(s) défini(s) au 5.5.3.2, 5.5.3.3 ou 5.5.3.4.

(8) La contrainte critique élastique de flambement $\sigma_{cr,s}$ peut également être obtenue à partir d'une analyse numérique de flambement élastique au premier ordre (voir 5.5.1(7)).

(9) Dans le cas d'une paroi avec raidisseur(s) de bord et intermédiaire(s), et en l'absence d'une méthode plus précise, l'effet du (des) raidisseur(s) intermédiaire(s) peut être négligé.

5.5.3.2 Parois munies de raidisseurs de bord

(1) La méthode suivante s'applique à un raidisseur de bord si les exigences définies au 5.2 sont satisfaites et si l'angle entre le raidisseur et la paroi est compris entre 45° et 135°.

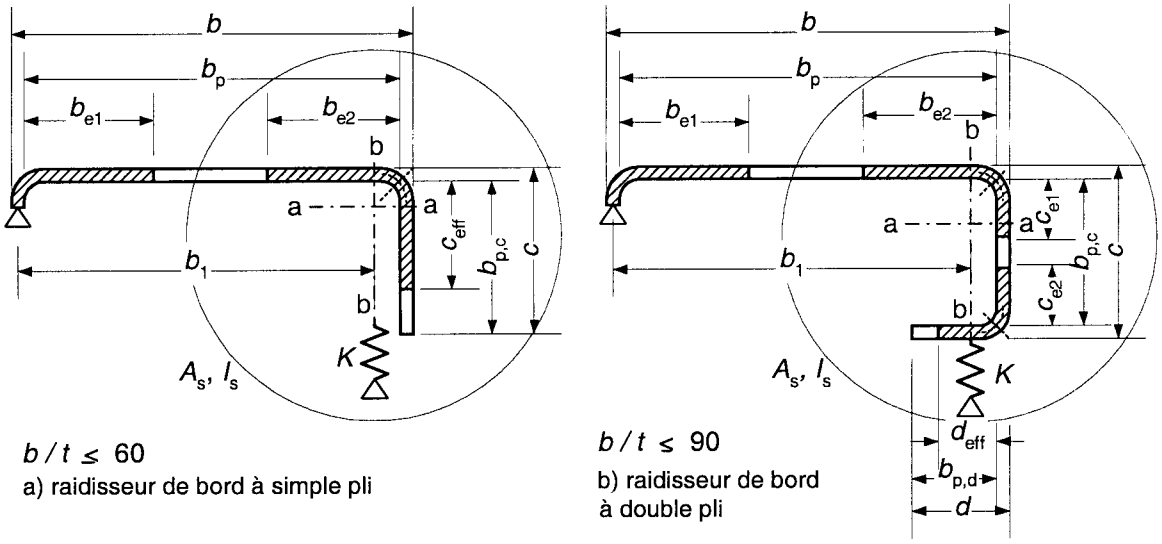


Figure 5.7 - Raidisseurs de bord

(2) Il convient de retenir comme section transversale d'un raidisseur de bord les parties efficaces du raidisseur, paroi *c* ou parois *c* et *d* comme indiqué à la Figure 5.7, augmentées de la partie efficace adjacente de la paroi plane b_p.

(3) Il convient de suivre les étapes ci-dessous pour appliquer la méthode illustrée à la Figure 5.8 :

- **Etape 1 :** Obtenir une section transversale efficace initiale pour le raidisseur en utilisant les largeurs efficaces déterminées en considérant que le raidisseur confère un maintien total et que $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M0}$, voir (4) et (5) ;
- **Etape 2 :** Utiliser la section transversale efficace initiale du raidisseur pour déterminer le coefficient de réduction pour le flambement par distorsion (flambement par flexion du raidisseur), en tenant compte du maintien élastique continu, voir (6), (7) et (8) ;
- **Etape 3 :** Facultativement, procéder par itération pour affiner la valeur du coefficient de réduction pour le flambement du raidisseur, voir (9) et (10).

(4) Il convient de déterminer les valeurs initiales des largeurs efficaces b_{e1} et b_{e2} indiquées à la Figure 5.7 à partir du 5.5.2 en prenant pour hypothèse que la paroi b_p est une paroi sur deux appuis, voir Tableau 4.1 de l'EN 1993-1-5.

(5) Il convient d'obtenir les valeurs initiales des largeurs efficaces c_{eff} et d_{eff} indiquées à la Figure 5.7 de la façon suivante :

a) pour un raidisseur de bord à simple pli :

$$c_{eff} = \rho \, b_{p,c} \tag{5.13a}$$

avec ρ obtenu d'après 5.5.2, en utilisant toutefois une valeur du coefficient de flambement k_σ donnée par les expressions suivantes :

- si $b_{p,c} / b_p \leq 0,35$:

$$k_\sigma = 0,5 \tag{5.13b}$$

- si $0,35 < b_{p,c} / b_p \leq 0,6$:

$$k_\sigma = 0,5 + 0,83 \sqrt[3]{\left(b_{p,c} / b_p - 0,35 \right)^2} \tag{5.13c}$$

b) pour un raidisseur de bord à double pli :

$$c_{eff} = \rho \, b_{p,c} \tag{5.13d}$$

avec ρ obtenu d'après 5.5.2 a*vec* un coefficient de flambement k_σ pour une paroi sur deux appuis, pris dans le Tableau 4.1 de l'EN 1993-1-5 ;

$$d_{eff} = \rho \, b_{p,d} \tag{5.13e}$$

a*vec* ρ obtenu d'après 5.5.2 a*vec* un coefficient de flambement k_σ pour une paroi appuyée sur un seul bord, pris dans le Tableau 4.1 de l'EN 1993-1-5.

(6) Il convient de déterminer l'aire de la section transversale efficace du raidisseur de bord A_s à partir des équations suivantes :

$$A_s = t\,(b_{e2} + c_{eff}) \quad \text{ou} \tag{5.14a}$$

$$A_s = t\,(b_{e2} + c_{e1} + c_{e2} + d_{eff}) \tag{5.14b}$$

respectivement.

NOTE Il convient de tenir compte des arrondis, si il y a lieu, voir 5.1.

(7) Il convient de déterminer la contrainte critique de flambement élastique $\sigma_{cr,s}$ pour un raidisseur de bord, à partir de l'équation suivante :

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \sqrt{K E I_s}}{A_s} \tag{5.15}$$

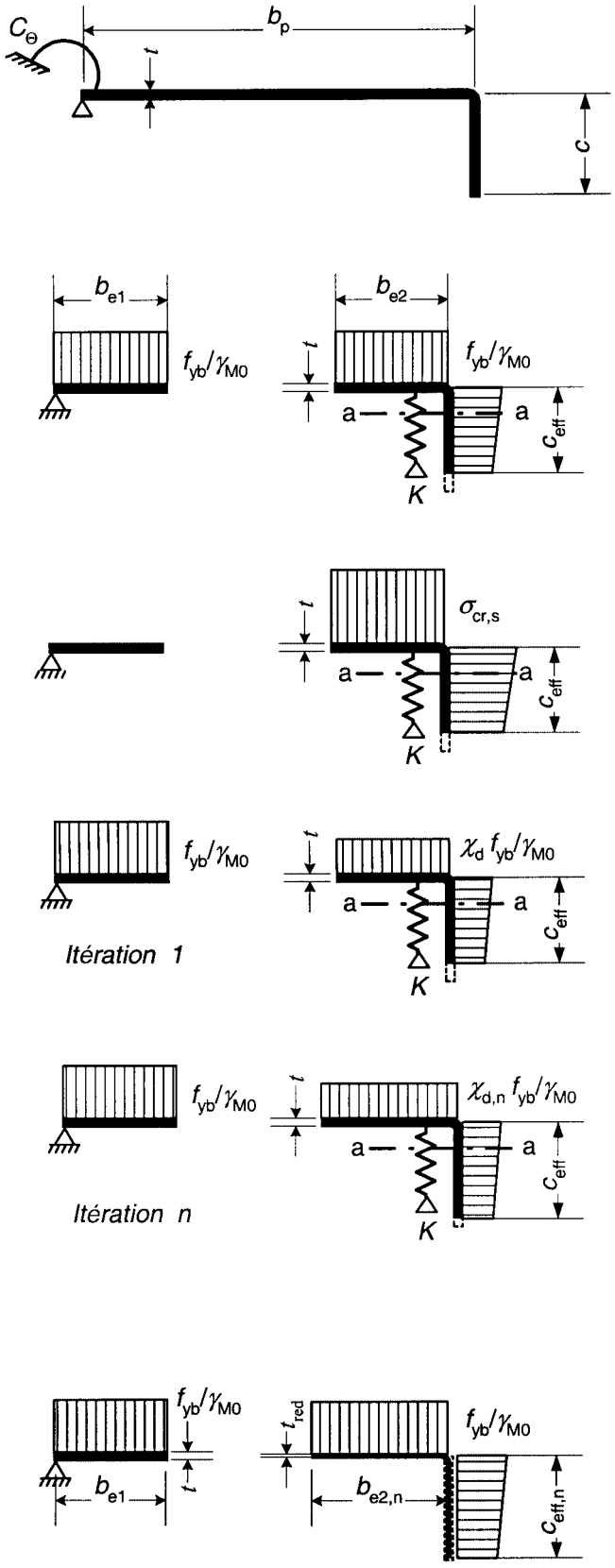
où :

K est la rigidité du ressort par unité de longueur, voir 5.5.3.1(2).

I_s est le moment d'inertie de la section efficace du raidisseur, pris égal à celui de son aire efficace A_s par rapport à l'axe neutre a - a de sa section efficace, voir Figure 5.7.

(8) La contrainte de flambement critique élastique $\sigma_{cr,s}$ peut également être obtenue à partir d'une analyse numérique de flambement élastique au premier ordre, voir 5.5.1(7).

(9) Il convient de déterminer le coefficient de réduction χ_d pour la résistance au flambement par distorsion d'un raidisseur de bord (flambement par flexion du raidisseur) à partir de la valeur de $\sigma_{cr,s}$ à l'aide de la méthode donnée au 5.5.3.1(7).



a) Section transversale brute et conditions de bords

b) **Etape 1** : Section transversale efficace pour $K = \infty$ basée sur $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M0}$

c) **Etape 2** : Contrainte critique élastique $\sigma_{cr,s}$ pour l'aire efficace du raidisseur A_s résultant de l'étape 1

d) Résistance réduite $\chi_d f_{yb} / \gamma_{M0}$ pour l'aire efficace du raidisseur A_s , tenant compte du coefficient de réduction χ_d basé sur $\sigma_{cr,s}$

e) **Etape 3** : Facultativement, répéter l'étape 1 en calculant la largeur efficace avec une contrainte de compression réduite $\sigma_{com,Ed,i} = \chi_d f_{yb} / \gamma_{M0}$ avec χ_d obtenue par l'itération précédente, en poursuivant jusqu'à $\chi_{d,n} \approx \chi_{d,(n-1)}$ mais $\chi_{d,n} \leq \chi_{d,(n-1)}$.

f) Adopter une section transversale efficace avec b_{e2} , c_{eff} et l'épaisseur réduite t_{red} correspondant à $\chi_{d,n}$

Figure 5.8 - Résistance à la compression d'une semelle munie d'un raidisseur de bord

(10)si $\chi_d < 1$, il peut être affiné par itération, avec des valeurs initiales de ρ obtenues par 5.5.2(5) avec $\sigma_{com,Ed,i}$ égal à $\chi_d f_{yb} / \gamma_{M0}$, de sorte que :

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d} \tag{5.16}$$

(11) Il convient de retenir, pour l'aire efficace réduite du raidisseur $A_{s,red}$, en tenant compte du flambement par flexion :

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_{yb}/\gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} \quad \text{mais } A_{s,red} [A_s \tag{5.17}$$

où

$\sigma_{com,Ed}$ est la contrainte de compression au droit de l'axe neutre du raidisseur, calculée sur la base de la section transversale efficace.

(12)Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de prendre en compte l'aire efficace réduite $A_{s,red}$ par l'utilisation d'une épaisseur réduite $t_{red} = t\ A_{s,red} / A_s$ pour toutes les parois incluses dans A_s .

5.5.3.3 Parois munies de raidisseurs intermédiaires

(1) La méthode suivante s'applique à un ou deux raidisseurs intermédiaires identiques formés par des plis à condition de calculer toutes les parois selon 5.5.2.

(2) Il convient de considérer que la section transversale d'un raidisseur intermédiaire comprend le raidisseur lui-même et les parties efficaces adjacentes des parois adjacentes $b_{p,1}$ et $b_{p,2}$ comme montré à la Figure 5.9.

(3) Il convient de suivre les étapes ci-dessous pour appliquer la méthode illustrée à la Figure 5.10 :

- **Etape 1 :** Obtenir une section transversale efficace initiale pour le raidisseur avec les largeurs efficaces déterminées en considérant que le raidisseur confère un maintien total et que $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M0}$, voir (4) et (5) ;
- **Etape 2 :** Utiliser la section transversale efficace initiale du raidisseur pour déterminer le coefficient de réduction pour le flambement par distorsion (flambement par flexion du raidisseur intermédiaire), en tenant compte des effets du maintien élastique continu, voir (6), (7) et (8) ;
- **Etape 3 :** Facultativement, procéder par itération pour affiner la valeur du coefficient de réduction pour le flambement du raidisseur, voir (9) et (10).

(4) Il convient de déterminer les valeurs initiales des largeurs efficaces $b_{1,e2}$ et $b_{2,e1}$ indiquées à la Figure 5.9 suivant 5.5.2 en prenant comme hypothèse que les parois $b_{p,1}$ et $b_{p,2}$ sont des parois sur deux appuis, voir Tableau 4.1 de l'EN 1993-1-5.

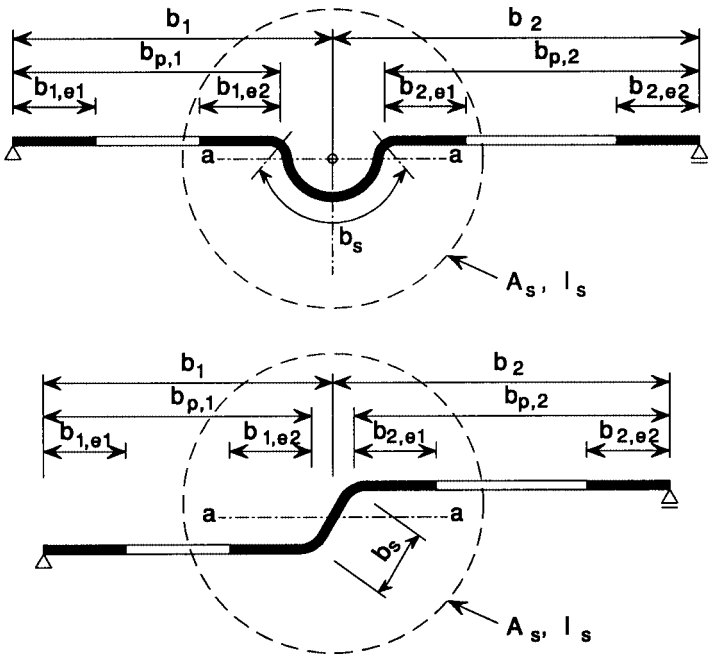


Figure 5.9 - Raidisseurs intermédiaires

(5) Il convient de déterminer l'aire de la section transversale efficace d'un raidisseur intermédiaire A_s à partir de l'équation suivante :

$$A_s = t\,(b_{1,e2} + b_{2,e1} + b_s) \tag{5.18}$$

dans laquelle la largeur du raidisseur b_s est telle qu'indiquée à la Figure 5.9.

NOTE Il convient de tenir compte des arrondis, si il y a lieu, voir 5.1.

(6) Il convient de déterminer la contrainte critique de flambement $\sigma_{cr,s}$ pour un raidisseur intermédiaire, à partir de l'équation suivante :

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{KEI_s}}{A_s} \tag{5.19}$$

où :

K est la rigidité du ressort par unité de longueur, voir 5.5.3.1(2).

I_s est le moment d'inertie de la section efficace du raidisseur, pris égal à celui de son aire efficace A_s par rapport à l'axe neutre a - a de sa section transversale efficace, voir Figure 5.9.

(7) La contrainte de flambement critique élastique $\sigma_{cr,s}$ peut également être obtenue à partir d'une analyse numérique de flambement élastique au premier ordre, voir 5.5.1(7).

(8) Il convient de déterminer le coefficient de réduction χ_d pour la résistance au flambement par distorsion (flambement par flexion du raidisseur intermédiaire) à partir de la valeur de $\sigma_{cr,s}$ à l'aide de la méthode donnée au 5.5.3.1(7).

(9) Si $\chi_d < 1$, il peut être affiné par itération, avec des valeurs initiales de ρ obtenues à partir de 5.5.2(5) avec $\sigma_{com,Ed,i}$ égal à $\chi_d f_{yb}/\gamma_{M0}$, de sorte que :

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d} \tag{5.20}$$

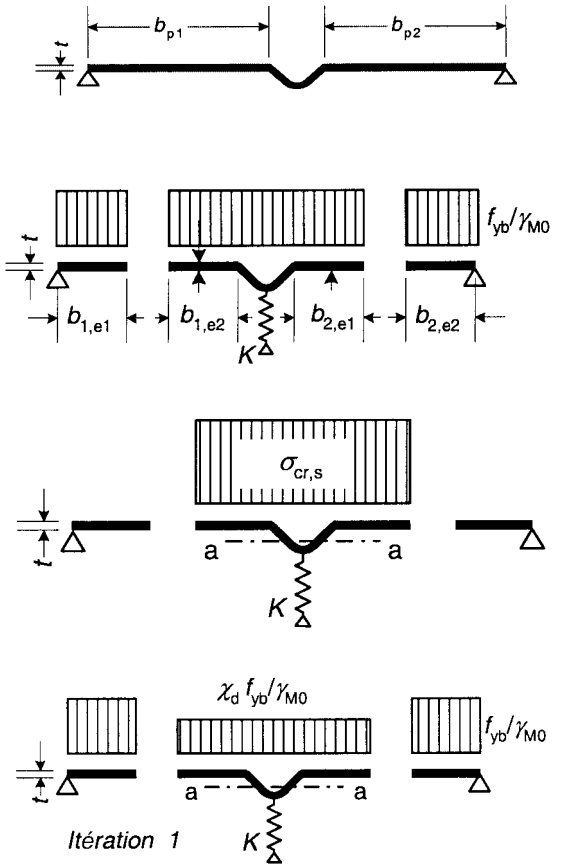
(10)Il convient de retenir pour l'aire efficace réduite du raidisseur $A_{s,red}$ tenant compte du flambement par distorsion (flambement par flexion du raidisseur) :

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_{yb}/\gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} \quad \text{mais} \quad A_{s,red} \leq A_s \tag{5.21}$$

où

$\sigma_{com,Ed}$ est la contrainte de compression au droit de l'axe neutre du raidisseur calculée sur la base de la section transversale efficace.

(11)Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de prendre en compte l'aire efficace réduite $A_{s,red}$ par l'utilisation d'une épaisseur réduite $t_{red} = t\, A_{s,red} / A_s$ pour toutes les parois incluses dans A_s.

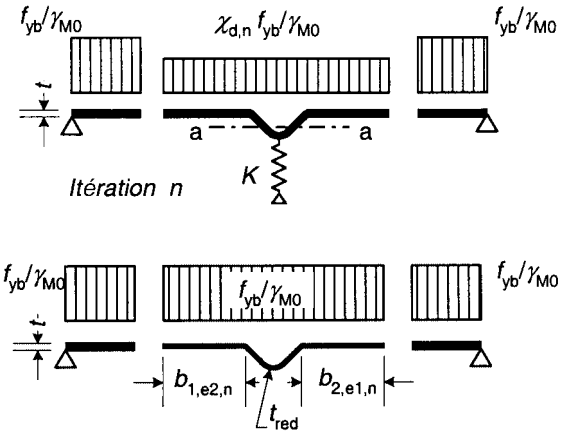


a) Section transversale brute et conditions de bords

b) **Etape 1** : Section transversale efficace pour $K = \infty$ basée sur $\sigma_{com,Ed} = f_{yb}/\gamma_{M0}$

c) **Etape 2** : Contrainte critique élastique $\sigma_{cr,s}$ pour l'aire efficace du raidisseur A_s résultant de l'étape 1

d) Résistance réduite $\chi_d f_{yb}/\gamma_{M0}$ pour l'aire efficace du raidisseur A_s, tenant compte du coefficient de réduction χ_d basé sur $\sigma_{cr,s}$



e) **Etape 3** : Facultativement, répéter l'étape 1 en calculant la largeur efficace avec une contrainte de compression réduite $\sigma_{com,Ed,i} = \chi_d f_{yb} / \gamma_{M0}$ avec χ_d obtenu par l'itération précédente, en poursuivant jusqu'à $\chi_{d,n} \approx \chi_{d,(n-1)}$ mais $\chi_{d,n} \leq \chi_{d,(n-1)}$.

f) Adopter une section transversale efficace avec $b_{1,e2}$, $b_{2,e1}$ et l'épaisseur réduite t_{red} correspondant à $\chi_{d,n}$

Figure 5.10 - Résistance à la compression d'une semelle munie d'un raidisseur intermédiaire

5.5.3.4 Plaques nervurées avec raidisseurs intermédiaires

5.5.3.4.1 Généralités

(1) Il convient d'utiliser le présent paragraphe 5.5.3.4 pour les plaques nervurées, en association avec 5.5.3.3 pour les semelles munies de raidisseurs intermédiaires et avec 5.5.3.3 pour les âmes munies de raidisseurs intermédiaires.

(2) Il convient également de prendre en compte l'interaction entre le flambement des raidisseurs intermédiaires de semelles et celui des raidisseurs intermédiaires d'âme en utilisant la méthode donnée au 5.5.3.4.4.

5.5.3.4.2 Semelles munies de raidisseurs intermédiaires

(1) Dans le cas où la semelle munie de raidisseurs intermédiaires est soumise à une compression uniforme, il convient de considérer que sa section transversale efficace est composée des aires efficaces réduites $A_{s,red}$ des raidisseurs, incluant deux bandes de largeur 0,5 b_{eff} (ou 15 t, voir Figure 5.11) adjacentes au raidisseur.

(2) Pour un raidisseur de semelle unique, en position centrale,, il convient de déterminer la contrainte critique de flambement élastique $\sigma_{cr,s}$ à partir de l'équation suivante :

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4{,}2\, k_w E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s \; t^3}{4\, b_p^2 \left(2\, b_p + 3\, b_s \right)}} \tag{5.22}$$

où :

b_p est la largeur de référence de la paroi, indiquée à la Figure 5.11 ;

b_s est la largeur développée du raidisseur (mesurée le long du périmètre), voir Figure 5.11 ;

A_s, I_s sont l'aire et le moment d'inertie de la section transversale du raidisseur suivant Figure 5.11 ;

k_w est un coefficient tenant compte du maintien partiel en rotation de la semelle raidie par les âmes ou par les autres parois adjacentes, voir (5) et (6). Pour le calcul de la section transversale efficace soumise à une compression axiale, prendre k_w = 1,0.

L'équation 5.22 peut être utilisée pour les nervures de grande dimension, à condition que la partie plane du raidisseur soit réduite du fait du flambement local et que b_p dans l'équation 5.22 soit remplacée par la plus grande valeur entre b_p et $0{,}25(3b_p+b_r)$, voir Figure 5.11. Une méthode similaire est valable pour une semelle avec deux nervures ou plus de grande dimension.

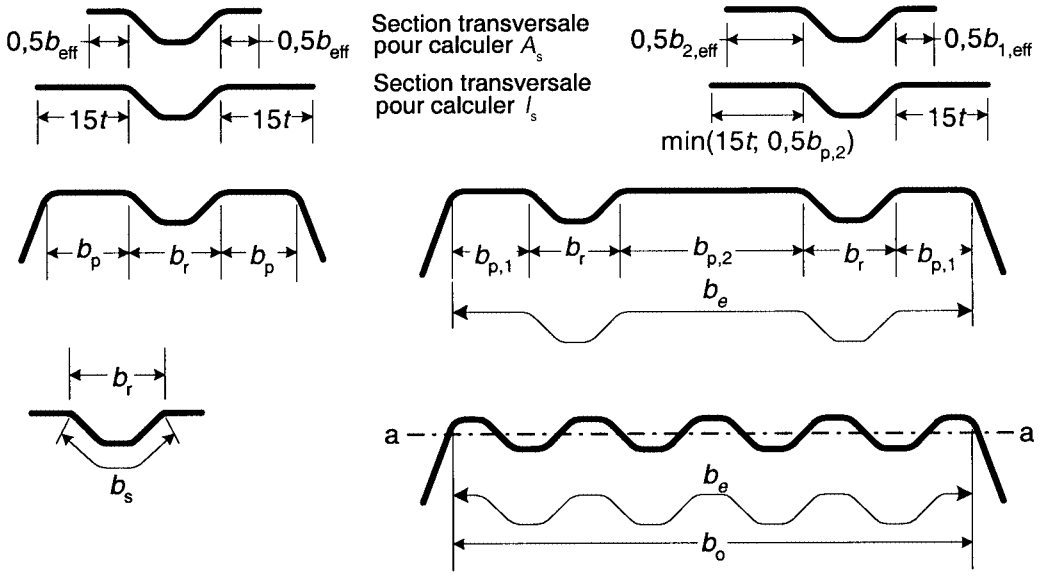


Figure 5.11 - Semelle comprimée munie d'un, de deux ou de plusieurs raidisseurs

(3) Pour deux raidisseurs situés symétriquement sur la semelle, Il convient de déterminer la contrainte critique de flambement élastique $\sigma_{cr,s}$ à partir de l'équation suivante :

$$\sigma_{cr,s} = \frac{4{,}2\ k_w\ E}{A_s} \sqrt{\frac{I_s\ t^3}{8\ b_1^2\ (3\ b_e - 4\ b_1)}} \tag{5.23a}$$

avec :

$b_e = 2b_{p,1} + b_{p,2} + 2b_s$

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

où :

$b_{p,1}$ est la largeur de référence d'une paroi plane de rive, comme indiqué à la Figure 5.11 ;

$b_{p,2}$ est la largeur de référence de la paroi centrale, comme indiqué à la Figure 5.11 ;

b_r est la largeur hors tout d'un raidisseur, voir Figure 5.11 ;

A_s, I_s sont l'aire et le moment d'inertie de la section transversale du raidisseur suivant Figure 5.11.

(4) Pour une semelle munie de plusieurs raidisseurs (trois raidisseurs identiques ou plus), l'aire efficace de la semelle entière est :

$$A_{\mathrm{eff}} = \rho b_{\mathrm{e}} t \tag{5.23b}$$

où ρ est le coefficient de réduction calculé suivant l'Annexe E de l'EN 1993-1-5 pour l'élancement $\overline{\lambda}_{\mathrm{p}}$ basé sur la contrainte de flambement élastique

$$\sigma_{\mathrm{cr,s}} = 1{,}8E\sqrt{\frac{I_{\mathrm{s}}\, t}{b_{\mathrm{o}}^2 b_{\mathrm{e}}^3}} + 3{,}6\frac{Et^2}{b_{\mathrm{o}}^2} \tag{5.23c}$$

où :

I_{s} est la somme des moments d'inertie des raidisseurs par rapport à l'axe a-a, en négligeant les termes d'épaisseur en $bt^3/12$;

b_{o} est la largeur de la semelle comme montré à la Figure 5.11 ;

b_{e} est la largeur développée de la semelle comme montré à la Figure 5.13.

(5) La valeur de k_{w} peut être calculée à partir de la longueur d'onde de flambement de la semelle comprimée l_{b} de la manière suivante :

- si $l_{\mathrm{b}} / s_{\mathrm{w}} \geq 2$:

$$k_{\mathrm{w}} = k_{\mathrm{wo}} \tag{5.24a}$$

- si $l_{\mathrm{b}} / s_{\mathrm{w}} < 2$:

$$k_{\mathrm{w}} = k_{\mathrm{wo}} - (k_{\mathrm{wo}} - 1)\left[\frac{2l_{\mathrm{b}}}{s_{\mathrm{w}}} - \left(\frac{l_{\mathrm{b}}}{s_{\mathrm{w}}}\right)^2\right] \tag{5.24b}$$

où :

s_{w} est la hauteur de l'âme mesurée suivant la pente, voir Figure 5.1(c).

(6) En alternative plaçant en sécurité, le coefficient de maintien en rotation k_{w} peut être pris égal à 1,0 ce qui correspond à une condition d'appui articulé.

(7) Les valeurs de l_{b} et k_{wo} peuvent être déterminées à partir des expressions suivantes :

- pour une semelle comprimée munie d'un seul raidisseur intermédiaire :

$$l_{\mathrm{b}} = 3{,}07\sqrt[4]{\frac{I_{\mathrm{s}}\, b_{\mathrm{p}}^2\,(2\, b_{\mathrm{p}} + 3\, b_{\mathrm{s}})}{t^3}} \tag{5.25}$$

$$k_{\mathrm{wo}} = \sqrt{\frac{s_{\mathrm{w}} + 2\, b_{\mathrm{d}}}{s_{\mathrm{w}} + 0{,}5\, b_{\mathrm{d}}}} \tag{5.26}$$

avec :

$$b_d = 2b_p + b_s$$

- pour une semelle comprimée munie de deux raidisseurs intermédiaires :

$$l_b = 3{,}65 \sqrt[4]{I_s \, b_1^2 \, (3\, b_e - 4\, b_1) / t^3} \tag{5.27}$$

$$k_{wo} = \sqrt{\frac{(2\, b_e + s_w)(3\, b_e - 4\, b_1)}{b_1 (4\, b_e - 6\, b_1) + s_w (3\, b_e - 4\, b_1)}} \tag{5.28}$$

(8) Il convient de prendre l'aire efficace réduite du raidisseur $A_{s,red}$ tenant compte du flambement par distorsion (flambement par flexion du raidisseur intermédiaire), égale à :

$$A_{s.red} = \chi_d \, A_s \frac{f_{yb} / \gamma_{M0}}{\sigma_{com,ser}} \quad \text{mais } A_{s,red} \leq A_s \tag{5.29}$$

(9) Si les âmes ne sont pas raidies, il convient de déterminer le coefficient de réduction χ_d directement en fonction de $\sigma_{cr,s}$ par la méthode donnée au 5.5.3.1(7).

(10) Si les âmes sont également raidies, il convient de déterminer le coefficient de réduction χ_d par la méthode donnée au 5.5.3.1(7), en fonction de la contrainte critique élastique modifiée $\sigma_{cr,mod}$ donnée au 5.5.3.4.4.

(11) Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de tenir compte de l'aire efficace réduite $A_{s,red}$ par l'utilisation d'une épaisseur réduite $t_{red} = t\, A_{s,red} / A_s$ pour toutes les parois incluses dans A_s.

(12)Il convient de baser les caractéristiques de section efficace aux états limites de service sur l'épaisseur de calcul t.

5.5.3.4.3 Ames avec au plus deux raidisseurs intermédiaires

(1) Il convient de considérer que la section transversale efficace de la zone comprimée d'une âme (ou d'une autre paroi d'une section transversale soumise à un gradient de contraintes) comme composée des aires efficaces réduites $A_{s,red}$ de deux raidisseurs intermédiaires au plus, d'une bande adjacente à la semelle comprimée, et d'une bande adjacente à l'axe neutre de la section transversale efficace, voir Figure 5.12.

(2) Comme montré à la Figure 5.12, il convient de considérer que la section transversale efficace d'une âme est composée de :

a) une bande de largeur $s_{eff,1}$ adjacente à la semelle comprimée ;

b) l'aire efficace réduite $A_{s,red}$ de chaque raidisseur d'âme, jusqu'à deux raidisseurs au maximum ;

c) une bande de largeur $s_{eff,n}$ adjacente à l'axe neutre de la section efficace ;

d) la partie tendue de l'âme.

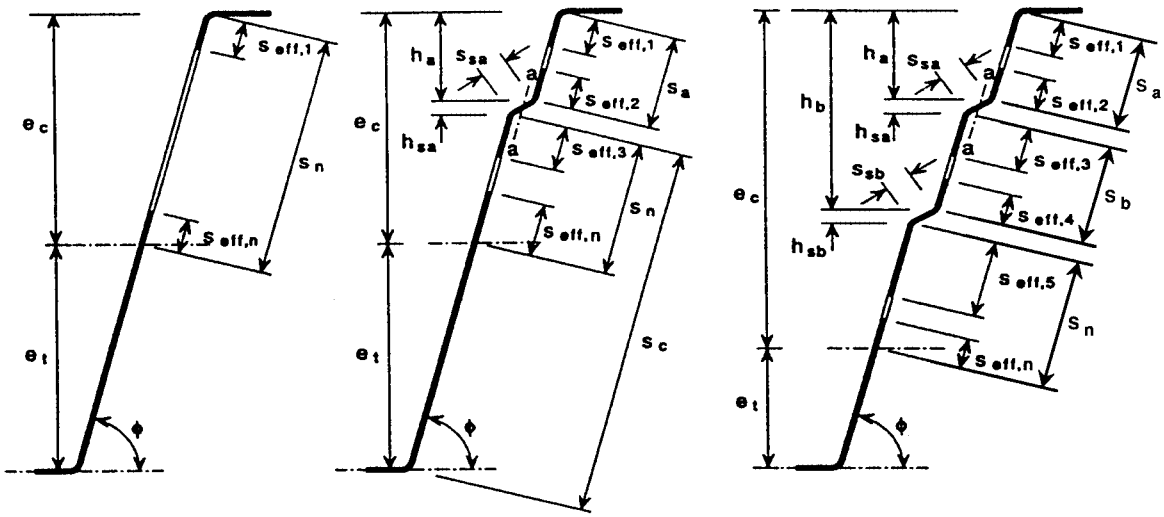


Figure 5.12 - Section transversale efficace d'âmes de plaques nervurées

(3) Il convient de déterminer les aires efficaces des raidisseurs de la façon suivante :

- pour un raidisseur unique, ou pour le raidisseur le plus proche de la semelle comprimée :

$$A_{sa} = t\,(s_{eff,2} + s_{eff,3} + s_{sa}) \tag{5.30}$$

- pour un deuxième raidisseur :

$$A_{sb} = t\,(s_{eff,4} + s_{eff,5} + s_{sb}) \tag{5.31}$$

dans lesquelles les dimensions $s_{eff,1}$ à $s_{eff,n}$, s_{sa} et s_{sb} sont définies sur la Figure 5.12.

(4) Il convient, dans un premier temps, de déterminer la position de l'axe neutre de la section efficace à partir sections transversales efficaces des semelles et des sections transversales brutes des âmes. Dans cette situation, il convient de déterminer la largeur efficace de base $s_{eff,0}$ par l'équation suivante :

$$s_{eff,0} = 0{,}76\,t\,\sqrt{E\,/\left(\gamma_{M0}\,\sigma_{com,Ed}\right)} \tag{5.32}$$

où :

$\sigma_{com,Ed}$ est la contrainte dans la semelle comprimée lorsque la résistance de la section transversale est atteinte.

(5) Si l'âme n'est pas pleinement efficace, il convient de déterminer les dimensions $s_{eff,1}$ à $s_{eff,n}$ comme suit :

$$s_{eff,1} = s_{eff,0} \tag{5.33a}$$

$$s_{eff,2} = (1 + 0{,}5h_a / e_c)\,s_{eff,0} \tag{5.33b}$$

$$s_{eff,3} = [1 + 0{,}5(h_a + h_{sa})/ e_c]\,s_{eff,0} \tag{5.33c}$$

$$s_{eff,4} = (1 + 0{,}5h_b / e_c)\,s_{eff,0} \tag{5.33d}$$

$$s_{eff,5} = [1 + 0{,}5(h_b + h_{sb})/ e_c]\,s_{eff,0} \tag{5.33e}$$

$$s_{\mathrm{eff,n}} = 1{,}5 s_{\mathrm{eff,0}} \tag{5.33f}$$

où :

e_c est la distance entre l'axe neutre de la section efficace et la ligne d'épure de la semelle comprimée, voir Figure 5.12 ;

et les dimensions h_a , h_b , h_{sa} et h_{sb} sont telles que définies à la Figure 5.12.

(6) Après avoir déterminé les dimensions $s_{\mathrm{eff,1}}$ à $s_{\mathrm{eff,n}}$ d'après (5), il convient de les corriger si la paroi concernée est pleinement efficace, à l'aide des indications suivantes :

- pour une âme non raidie, si $s_{\mathrm{eff,1}} + s_{\mathrm{eff,n}} \geq s_n$, la totalité de l'âme est efficace, et la correction doit s'effectuer alors comme suit :

$$s_{\mathrm{eff,1}} = 0{,}4 s_n \tag{5.34a}$$

$$s_{\mathrm{eff,n}} = 0{,}6 s_n \tag{5.34b}$$

- pour une âme raidie, si $s_{\mathrm{eff,1}} + s_{\mathrm{eff,2}} \geq s_a$, la totalité de s_a est efficace, et la correction doit s'effectuer alors comme suit :

$$s_{\mathrm{eff,1}} = \frac{s_a}{2 + 0{,}5 h_a / e_c} \tag{5.35a}$$

$$s_{\mathrm{eff,2}} = s_a \frac{\left(1 + 0{,}5 h_a / e_c\right)}{2 + 0{,}5 h_a / e_c} \tag{5.35b}$$

- pour une âme munie d'un seul raidisseur, si $s_{\mathrm{eff,3}} + s_{\mathrm{eff,n}} \geq s_n$, la totalité de s_n est efficace, et la correction doit s'effectuer alors comme suit :

$$s_{\mathrm{eff,3}} = s_n \frac{\left[1 + 0{,}5\left(h_a + h_{sa}\right)/e_c\right]}{2{,}5 + 0{,}5\left(h_a + h_{sa}\right)/e_c} \tag{5.36a}$$

$$s_{\mathrm{eff,n}} = \frac{1{,}5 s_n}{2{,}5 + 0{,}5\left(h_a + h_{sa}\right)/e_c} \tag{5.36b}$$

- pour une âme munie de deux raidisseurs :

  - si $s_{\mathrm{eff,3}} + s_{\mathrm{eff,4}} \geq s_b$, la totalité de s_b est efficace, et la correction doit s'effectuer alors comme suit :

$$s_{\mathrm{eff,3}} = s_b \frac{1 + 0{,}5\left(h_a + h_{sa}\right)/e_c}{2 + 0{,}5\left(h_a + h_{sa} + h_b\right)/e_c} \tag{5.37a}$$

$$s_{\mathrm{eff,4}} = s_b \frac{1 + 0{,}5 h_b / e_c}{2 + 0{,}5\left(h_a + h_{sa} + h_b\right)/e_c} \tag{5.37b}$$

  - si $s_{\mathrm{eff,5}} + s_{\mathrm{eff,n}} \geq s_n$, la totalité de s_n est efficace, et la correction doit s'effectuer alors comme suit :

$$s_{\mathrm{eff,5}} = s_{\mathrm{n}} \frac{1 + 0{,}5(h_{\mathrm{b}} + h_{\mathrm{sb}})/e_{\mathrm{c}}}{2{,}5 + 0{,}5(h_{\mathrm{b}} + h_{\mathrm{sb}})/e_{\mathrm{c}}} \tag{5.38a}$$

$$s_{\mathrm{eff,n}} = \frac{1{,}5 s_{\mathrm{n}}}{2{,}5 + 0{,}5(h_{\mathrm{b}} + h_{\mathrm{sb}})/e_{\mathrm{c}}} \tag{5.38b}$$

(7) Pour un raidisseur unique, ou pour le raidisseur le plus proche de la semelle comprimée dans les âmes munies de deux raidisseurs, il convient de déterminer la contrainte critique de flambement élastique $\sigma_{\mathrm{cr,sa}}$ par l'expression suivante :

$$\sigma_{\mathrm{cr,sa}} = \frac{1{,}05\ k_{\mathrm{f}}\ E \sqrt{I_{\mathrm{s}}\ t^3\ s_1}}{A_{\mathrm{sa}}\ s_2\ (s_1 - s_2)} \tag{5.39a}$$

dans laquelle s_1 est donnée par les équations suivantes :

- pour un raidisseur unique :

$$s_1 = 0{,}9\,(s_{\mathrm{a}} + s_{\mathrm{sa}} + s_{\mathrm{c}}) \tag{5.39b}$$

- pour le raidisseur le plus proche de la semelle comprimée, dans les âmes munies de deux raidisseurs :

$$s_1 = s_{\mathrm{a}} + s_{\mathrm{sa}} + s_{\mathrm{b}} + 0{,}5(s_{\mathrm{sb}} + s_{\mathrm{c}}) \tag{5.39c}$$

avec :

$$s_2 = s_1 - s_{\mathrm{a}} - 0{,}5 s_{\mathrm{sa}} \tag{5.39d}$$

où :

k_{f} est le coefficient tenant compte du maintien partiel en rotation de l'âme raidie, par les semelles ;

I_{s} est le moment d'inertie de la section efficace du raidisseur comprenant la largeur de pli s_{sa} et deux bandes adjacentes, chacune d'une largeur $s_{\mathrm{eff,1}}$, par rapport à son axe neutre parallèle aux parois d'âme, voir Figure 5.13. Pour le calcul de I_{s}, il est possible de négliger la différence éventuelle de pente entre les parois d'âme de part et d'autre du raidisseur.

s_{c} comme défini Figure 5.12.

(8) En l'absence d'une étude plus détaillée, le coefficient de maintien en rotation k_{f} peut être pris, dans le sens de la sécurité, égal à 1,0 ce qui correspond à une condition d'appui articulé.

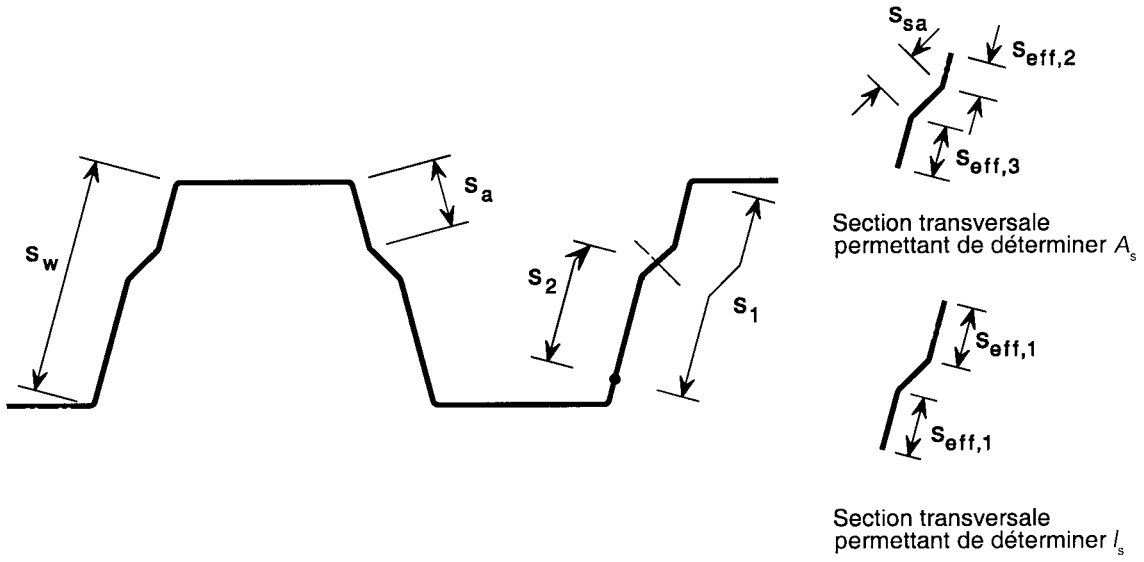


Figure 5.13 - Raidisseurs d'âmes de plaques nervurées

(9) Pour un raidisseur unique comprimé, ou pour le raidisseur le plus proche de la semelle comprimée dans les âmes munies de deux raidisseurs, il convient de déterminer l'aire efficace réduite $A_{sa,red}$ à partir de l'équation suivante :

$$A_{sa,red} = \frac{\chi_d \, A_{sa}}{1-(h_a + 0{,}5h_{sa})/e_c} \quad \text{mais } A_{sa,red} \le A_{sa} \tag{5.40}$$

(10) Si les semelles ne sont pas raidies, il convient de déterminer le coefficient de réduction χ_d en fonction de $\sigma_{cr,sa}$ par la méthode donnée au 5.5.3.1(7).

(11) Si les semelles sont, elles aussi raidies, il convient de déterminer le coefficient de réduction χ_d par la méthode donnée au 5.5.3.1(7), en fonction de la contrainte critique élastique modifiée $\sigma_{cr,mod}$ donnée au 5.5.3.4.4.

(12) Pour un raidisseur unique tendu, il convient de prendre l'aire efficace réduite $A_{sa,red}$ égale à A_{sa} .

(13) Pour les âmes munies de deux raidisseurs, il convient de prendre l'aire efficace réduite $A_{sb,red}$ du second raidisseur, égale à A_{sb} .

(14) Pour la détermination des caractéristiques de section efficace, il convient de tenir compte de l'aire efficace réduite $A_{sa,red}$ par l'utilisation d'une épaisseur réduite $t_{red} = \chi_d \, t$ pour toutes les parois incluses dans A_{sa}

(15) Il convient de baser les caractéristiques de section efficace aux états limites de service sur l'épaisseur de calcul t.

(16) Eventuellement, les caractéristiques de section efficace peuvent être affinées de manière itérative en déterminant la position de l'axe neutre efficace en fonction des sections transversales efficaces des âmes calculées à l'itération précédente et des sections transversales efficaces des semelles déterminées à l'aide de l'épaisseur réduite t_{red} pour toutes les parois incluses dans les aires de raidisseur de semelle A_s . Il convient de baser ce calcul itératif sur une largeur efficace augmentée $s_{eff,0}$ obtenue par l'équation suivante :

$$s_{eff,0} = 0{,}95\, t \sqrt{\frac{E}{\gamma_{M0}\, \sigma_{com,Ed}}} \tag{5.41}$$

5.5.3.4.4 Plaques nervurées munies de raidisseurs de semelle et de raidisseurs d'âme

(1) Dans le cas de plaques nervurées munies de raidisseurs intermédiaires dans les semelles et dans les âmes, voir Figure 5.14, il convient de prendre en compte l'interaction entre le flambement par distorsion (flambement par flexion des raidisseurs de semelle et des raidisseurs d'âme) en utilisant une contrainte critique élastique modifiée $\sigma_{\mathrm{cr,mod}}$ pour les deux types de raidisseurs, obtenue par l'équation suivante :

$$\sigma_{\mathrm{cr,mod}} = \frac{\sigma_{\mathrm{cr,s}}}{\sqrt[4]{1+\left[\beta_{\mathrm{s}}\dfrac{\sigma_{\mathrm{cr,s}}}{\sigma_{\mathrm{cr,sa}}}\right]^4}} \tag{5.42}$$

où :

$\sigma_{\mathrm{cr,s}}$ est la contrainte critique élastique d'un raidisseur de semelle intermédiaire, voir 5.5.3.4.2(2) pour une semelle avec un seul raidisseur ou 5.5.3.4.2(3) pour une semelle avec deux raidisseurs ;

$\sigma_{\mathrm{cr,sa}}$ est la contrainte critique élastique d'un raidisseur d'âme unique, ou du raidisseur le plus proche de la semelle comprimée dans les âmes munies de deux raidisseurs, voir 5.5.3.4.3(7) ;

A_{s} est l'aire de la section transversale efficace d'un raidisseur intermédiaire de semelle;

A_{sa} est l'aire de la section transversale efficace d'un raidisseur intermédiaire d'âme;

β_{s} = 1 - (h_{a} + 0,5 h_{ha}) / e_{c} pour un profilé fléchi ;

β_{s} = 1 pour un profilé comprimé

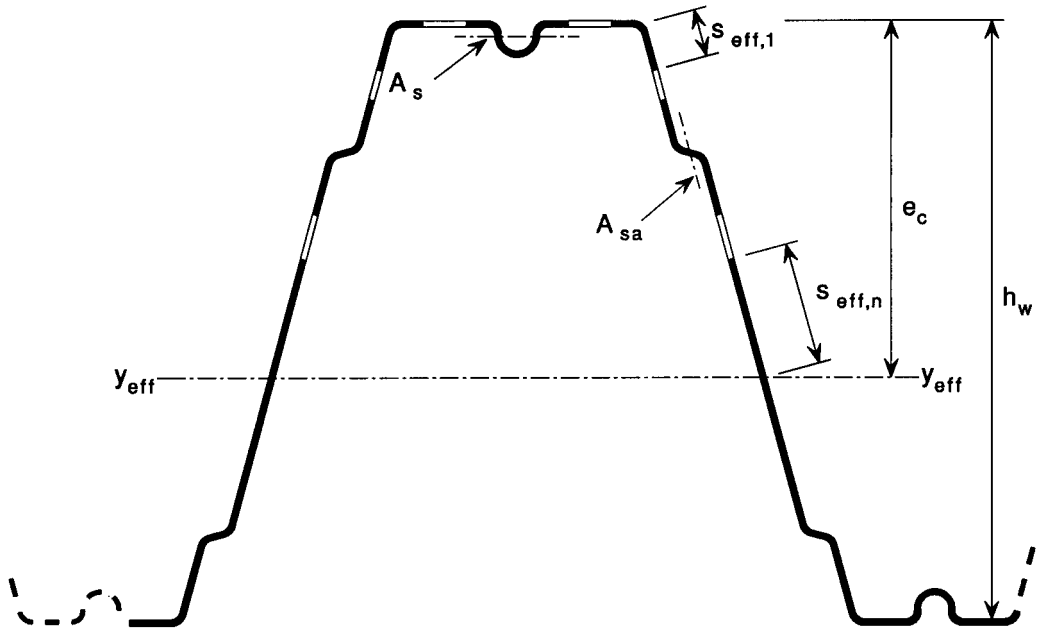


Figure 5.14 - Plaque nervurée munie de raidisseurs de semelle et de raidisseurs d'âme

5.6 Flambement entre fixations

(1) Il convient de vérifier le flambement entre fixations pour les éléments composés de plaques nervurées assemblées par des fixations mécaniques, voir Tableau 3.3 de l'EN 1993-1-8.

6 Etats limites ultimes

6.1 Résistance des sections transversales

6.1.1 Généralités

(1) L'évaluation de toute résistance en section peut résulter de l'exploitation d'essais en remplacement du calcul.

NOTE Le dimensionnement assisté par des essais est particulièrement avantageux pour les sections transversales présentant des rapports b_p / t relativement élevés, du fait notamment de leur comportement non élastique, des déformations locales de leur âme ou du traînage de cisaillement.

(2) Pour le dimensionnement par le calcul, il convient de prendre en compte les effets du flambement local par l'utilisation de caractéristiques de section efficace déterminées comme spécifié au 5.5.

(3) Il convient de vérifier la résistance des barres au flambement comme spécifié au 6.2.

(4) Pour les barres dont les sections transversales sont sensibles à la distorsion, il convient de prendre en compte la possibilité de flambement latéral des semelles comprimées et de façon générale, la flexion latérale des semelles, voir 5.5 et 10.1.

6.1.2 Traction axiale

(1) Il convient de déterminer la résistance de calcul d'une section transversale à la traction uniforme $N_{t,Rd}$ à partir de :

$$N_{t,Rd} = \frac{f_{ya} A_g}{\gamma_{M0}} \quad \text{mais} \quad N_{t,Rd} \leq F_{n,Rd} \tag{6.1}$$

où :

A_g est l'aire brute de la section transversale ;

$F_{n,Rd}$ est la résistance de la section nette d'après 8.4 pour le type approprié d'élément de fixation;

f_{ya} est la limite d'élasticité moyenne, voir 3.2.3.

(2) Il convient de déterminer la résistance à la traction uniforme d'une cornière attachée par une seule aile, ou d'autres types de profilés attachés sur une paroi en débord, selon 3.6.3 de l'EN 1993-1-8.

6.1.3 Compression axiale

(1) Il convient de déterminer la résistance de calcul d'une section transversale à la compression $N_{c,Rd}$ de la façon suivante :

- si l'aire efficace A_{eff} est inférieure à l'aire brute A_g (section avec réduction due à un flambement local et/ou par distorsion)

$$N_{c,Rd} = A_{eff}\, f_{yb} / \gamma_{M0} \tag{6.2}$$

- si l'aire efficace A_{eff} est égale à l'aire brute A_g (section sans réduction due à un flambement local et/ou par distorsion)

$$N_{c,Rd} = A_g\left(f_{yb} + (f_{ya} - f_{yb})4(1 - \bar{\lambda}_e / \bar{\lambda}_{e0})\right) / \gamma_{M0} \text{ sans être supérieure à } A_g\, f_{ya} / \gamma_{M0} \tag{6.3}$$

où

A_{eff} est l'aire efficace de la section transversale, obtenue d'après 5.5 en prenant pour hypothèse une contrainte de compression uniforme égale à f_{yb} / γ_{M0} ;

f_{ya} est la limite d'élasticité moyenne, voir 3.2.2 ;

f_{yb} est la limite d'élasticité de base ;

$\bar{\lambda}_{e\max}$ est l'élancement de la paroi qui correspond à la plus grande valeur de $\bar{\lambda}_e / \bar{\lambda}_{e0}$;

Pour les parois planes $\bar{\lambda}_e = \bar{\lambda}_p$ et $\bar{\lambda}_{e0} = 0{,}673$, voir 5.5.2 ;

Pour les parois raidies $\bar{\lambda}_e = \bar{\lambda}_d$ et $\bar{\lambda}_{e0} = 0{,}65$, voir 5.5.3.

(2) L'effort normal dans une barre est généralement pris comme agissant au droit du centre de gravité de sa section transversale brute. Il s'agit d'une hypothèse prudente pouvant toutefois être utilisée sans analyse supplémentaire. Une analyse plus fine peut conduire à une répartition plus réaliste des efforts internes, par exemple dans le cas d'une concentration uniforme de l'effort normal dans la paroi comprimée.

(3) La résistance de calcul à la compression d'une section transversale fait référence à la charge axiale agissant au centre de gravité de sa section transversale efficace. Si ce dernier ne coïncide pas avec le centre de gravité de sa section transversale brute, il convient de prendre en compte le déplacement e_N de l'axe neutre (voir Figure 6.1), en utilisant la méthode donnée au 6.1.9. Lorsque le déplacement de l'axe neutre est favorable lors du contrôle du critère de contrainte, il convient alors de négliger ce déplacement uniquement s'il a été calculé à la limite d'élasticité et non sous contraintes de compression réelles.

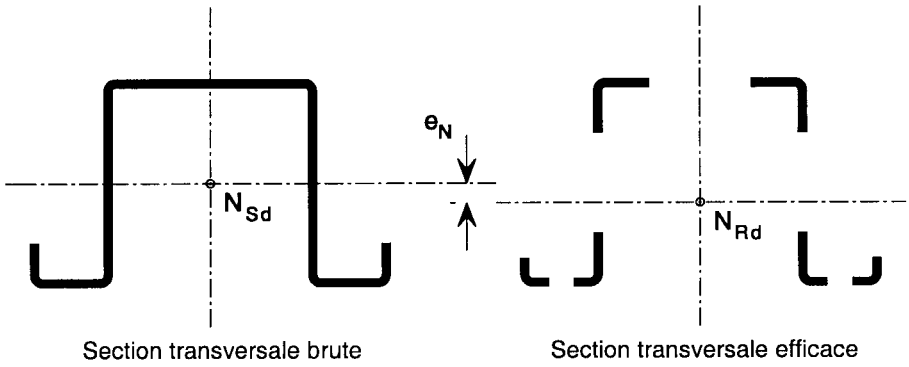


Figure 6.1 - Section transversale efficace en compression

6.1.4 Moment fléchissant

6.1.4.1 Résistance élastique et résistance élasto-plastique avec plastification de la semelle comprimée

(1) Le moment résistant de calcul d'une section transversale soumise à la flexion par rapport à un axe principal $M_{c,Rd}$ est déterminé comme suit (voir Figure 6.2) :

- si le module d'inertie de la section efficace W_{eff} est inférieur au module d'inertie élastique de la section brute W_{el}

$$M_{c,Rd} = W_{eff} f_{yb} / \gamma_{M0} \tag{6.4}$$

- si le module d'inertie de la section efficace W_{eff} est égal au module d'inertie élastique de la section brute W_{el}

$$M_{c,Rd} = f_{yb}\left(W_{el} + (W_{pl} - W_{el})4(1 - \bar{\lambda}_{e\max} / \bar{\lambda}_{e0})\right) / \gamma_{M0} \text{ sans toutefois être supérieur à } W_{pl} f_{yb} / \gamma_{M0} \tag{6.5}$$

où

$\bar{\lambda}_{e\max}$ est l'élancement de la paroi qui correspond à la plus grande valeur de $\bar{\lambda}_e / \bar{\lambda}_{e0}$;

Pour les parois planes sur deux appuis $\bar{\lambda}_e = \bar{\lambda}_p$ et $\lambda_{e0} = 0{,}5 + \sqrt{0{,}25 - 0{,}055(3+\psi)}$ où ψ est le rapport de contraintes, voir 5.5.2 ;

Pour les parois en débord $\bar{\lambda}_e = \bar{\lambda}_p$ et $\bar{\lambda}_{e0} = 0{,}673$, voir 5.5.2 ;

Pour les parois raidies $\bar{\lambda}_e = \bar{\lambda}_d$ et $\lambda_{e0} = 0{,}65$, voir 5.5.3.

La résistance au moment de flexion qui en résulte en fonction de l'élancement de la paroi critique est illustrée à la Figure 6.2.

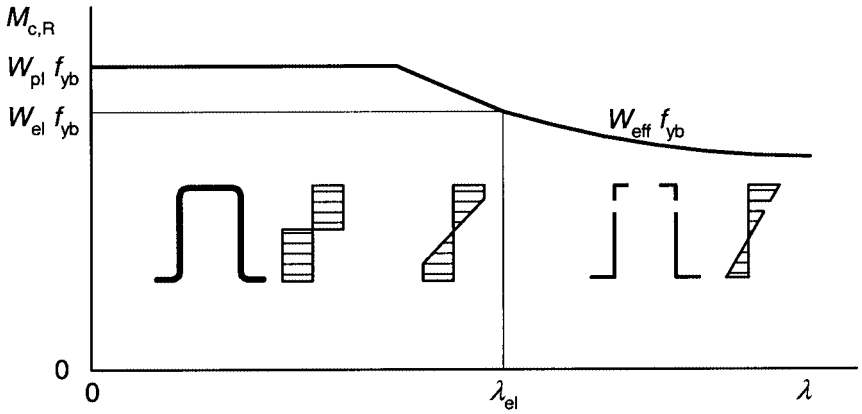


Figure 6.2 - Moment résistant de flexion en fonction de l'élancement

(2) L'expression (6.5) peut être utilisée sous réserve de satisfaire aux conditions suivantes :

a) le moment fléchissant est appliqué uniquement autour d'un axe principal de la section transversale ;

b) la barre n'est pas soumise à une torsion, ni sujette au flambement par torsion, ou par flexion-torsion, ou par distorsion;

c) l'angle ϕ entre l'âme et la semelle (voir Figure 6.5) est supérieur à 60°.

(3) Si (2) n'est pas satisfait, l'expression suivante peut être utilisée :

$$M_{\mathrm{c,Rd}} = W_{\mathrm{el}} f_{\mathrm{ya}} / \gamma_{\mathrm{M0}} \tag{6.6}$$

(4) Il convient de déterminer le module d'inertie de la section efficace W_{eff} à partir d'une section transversale efficace soumise uniquement à un moment fléchissant par rapport à l'axe principal approprié, avec une contrainte maximale $\sigma_{\mathrm{max,Ed}}$ égale à $f_{\mathrm{yb}} / \gamma_{\mathrm{M0}}$, en tenant compte des effets du flambement local et par distorsion, tels que spécifiés au 5.5. Lorsque le traînage de cisaillement se développe, il convient également de prendre ses effets en compte.

(5) Le rapport de contraintes $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ utilisé pour la détermination des parties efficaces de l'âme peut être obtenu en utilisant l'aire efficace de la semelle comprimée, et l'aire brute de l'âme, voir Figure 6.3.

(6) Si la plastification survient en premier lieu sur la fibre extrême comprimée de la section transversale, sans que les conditions données au 6.1.4.2 soient satisfaites il convient de déterminer la valeur de W_{eff} à partir d'une répartition linéaire des contraintes dans la section transversale.

(7) Pour la flexion bi-axiale, le critère suivant peut être utilisé :

$$\frac{M_{\mathrm{y,Ed}}}{M_{\mathrm{cy,Rd}}} + \frac{M_{\mathrm{z,Ed}}}{M_{\mathrm{cz,Rd}}} \leq 1 \tag{6.7}$$

où :

$M_{\mathrm{y,Ed}}$ est le moment fléchissant par rapport à l'axe principal de forte inertie ;

$M_{\mathrm{z,Ed}}$ est le moment fléchissant par rapport à l'axe principal de faible inertie ;

$M_{\mathrm{cy,Rd}}$ est la résistance de la section transversale lorsqu'elle est uniquement soumise à un moment par rapport à l'axe principal y – y ;

$M_{\mathrm{cz,Rd}}$ est la résistance de la section transversale lorsqu'elle est uniquement soumise à un moment par rapport à l'axe principal z – z.

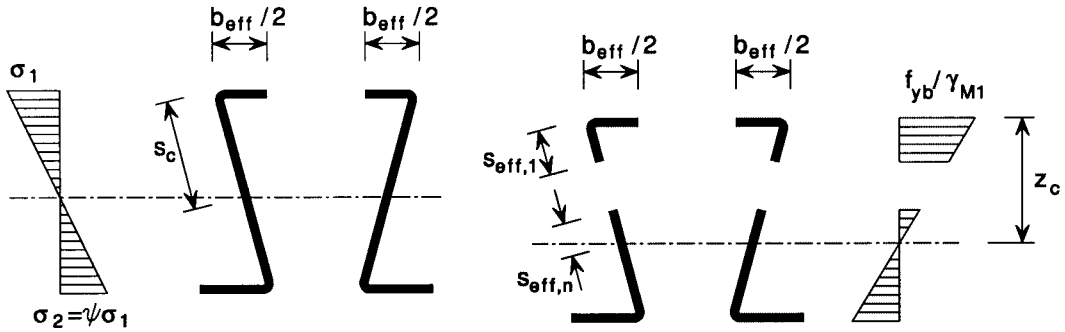


Figure 6.3 - Section transversale efficace pour la résistance aux moments fléchissants

(8) Si l'analyse globale plastique prend en compte une redistribution des moments fléchissants, il convient de démontrer, à partir des résultats d'essais effectués conformément à la Section 9, que les dispositions indiquées au 7.2 sont satisfaites.

6.1.4.2 Résistance élastique et résistance élasto-plastique avec plastification de la seule semelle tendue

(1) A condition que le moment fléchissant soit appliqué autour d'un seul axe principal de la section transversale, et sous réserve que la plastification survienne en premier lieu sur la fibre extrême tendue, il est possible d'utiliser les réserves plastiques de la zone tendue sans aucune limite de déformation jusqu'à ce que la contrainte de compression maximale $\sigma_{com,Ed}$ atteigne f_{yb} / γ_{M0}. Le présent paragraphe traite uniquement de la flexion simple. Pour la flexion composée, il convient de se reporter à 6.1.8 ou 6.1.9.

(2) Dans ce cas, il convient de déterminer le module d'inertie partiellement plastique de la section efficace $W_{pp,eff}$ à partir d'une répartition des contraintes bilinéaire dans la zone tendue mais linéaire dans la zone comprimée.

(3) En l'absence d'une analyse plus détaillée, la largeur efficace b_{eff} d'une paroi soumise à un gradient de contraintes peut être obtenue à l'aide de 5.5.2 en basant le calcul de b_c sur la répartition bilinéaire des contraintes (voir Figure 6.4), en supposant que $\psi = -1$.

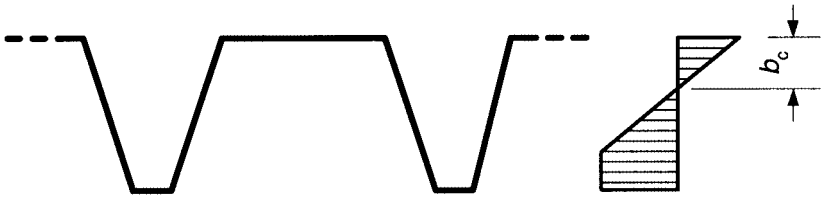


Figure 6.4 - Distance b_c pour la détermination de la largeur efficace

(4) Si l'analyse globale plastique prend en compte une redistribution des moments fléchissants, il convient de démontrer, à partir de résultats d'essais effectués conformément à la Section 9, que les dispositions indiquées au 7.2 sont satisfaites.

6.1.4.3 Effets du traînage de cisaillement

(1) Il convient de prendre en compte les effets du traînage de cisaillement conformément à l'EN 1993-1-5.

6.1.5 Effort de cisaillement

(1) Il convient de déterminer la résistance au cisaillement $V_{b,Rd}$ à partir de :

$$V_{b,Rd} = \frac{\dfrac{h_w}{\sin\phi} t f_{bv}}{\gamma_{M0}} \tag{6.8}$$

où :

f_{bv} est la résistance au cisaillement compte tenu du voilement conformément au Tableau 6.1 ;

h_w est la hauteur d'âme entre les fibres moyennes des semelles, voir Figure 5.1(c) ;

ϕ est l'angle d'inclinaison de l'âme par rapport aux semelles, voir Figure 6.5.

Tableau 6.1 - Résistance au voilement de cisaillement

Elancement relatif de l'âme	Ame sans raidissage au droit de l'appui	Ame avec raidissage au droit de l'appui [1)]
$\bar{\lambda}_w \leq 0{,}83$	0,58 f_{yb}	0,58 f_{yb}
$0{,}83 < \bar{\lambda}_w < 1{,}40$	$0{,}48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$	$0{,}48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \geq 1{,}40$	$0{,}67 f_{yb} / \bar{\lambda}_w^2$	$0{,}48 f_{yb} / \bar{\lambda}_w$

[1)] Raidissage au droit de l'appui (par exemple : par échantignole) mis en œuvre de manière à empêcher la déformation de l'âme et calculé pour résister à la réaction d'appui.

(2) Il convient de déterminer l'élancement relatif de l'âme $\bar{\lambda}_w$ de la façon suivante :

- pour les âmes sans raidisseurs longitudinaux :

$$\bar{\lambda}_w = 0{,}346 \frac{s_w}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} \tag{6.10a}$$

- pour les âmes avec des raidisseurs longitudinaux, voir Figure 6.5 :

$$\bar{\lambda}_w = 0{,}346 \frac{s_d}{t} \sqrt{\frac{5{,}34}{k_\tau} \frac{f_{yb}}{E}} \quad \text{mais} \quad \bar{\lambda}_w \geq 0{,}346 \frac{s_p}{t} \sqrt{\frac{f_{yb}}{E}} \tag{6.10b}$$

avec :

$$k_\tau = 5{,}34 + \frac{2{,}10}{t} \left(\frac{\Sigma I_s}{s_d} \right)^{1/3}$$

où :

I_s est le moment d'inertie du raidisseur longitudinal isolé, comme défini au 5.5.3.4.3(7), par rapport à l'axe a – a comme indiqué à la Figure 6.5 ;

s_d est la largeur développée totale de l'âme, comme indiqué à la Figure 6.5 ;

s_p est la largeur de la plus grande paroi plane de l'âme, voir Figure 6.5 ;

s_w est la largeur d'âme, telle qu'indiquée à la Figure 6.5, entre les points médians des arrondis, voir Figure 5.1(c).

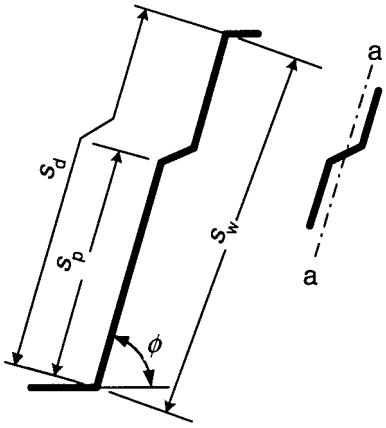


Figure 6.5 - Ame raidie longitudinalement

6.1.6 Moment de torsion

(1) Lorsque des charges sont appliquées de façon excentrée par rapport au centre de cisaillement de la section transversale, il convient de prendre en compte les effets de la torsion.

(2) Il convient d'utiliser, pour déterminer les effets du moment de torsion, l'axe neutre, le centre de cisaillement et le centre de rotation imposé, de la section transversale brute.

(3) Il convient de calculer les contraintes normales dues l'effort axial N_{Ed} ainsi qu'aux moments fléchissants $M_{y,Ed}$ et $M_{z,Ed}$ à partir des caractéristiques efficaces de la section transversale respectivement données en 6.1.2 à 6.1.4. Il convient de calculer les contraintes de cisaillement dues à l'effort tranchant et à la torsion uniforme (St. Venant) ainsi que les contraintes normales et de cisaillement dues à la torsion non uniforme (gauchissement) à partir des caractéristiques de la section transversale brute.

(4) Dans les sections transversales soumises à la torsion, il convient de satisfaire les conditions suivantes (en tenant compte de la limite d'élasticité moyenne, voir 3.2.2 :

$$\sigma_{tot,Ed} \leq f_{ya} / \gamma_{M0} \tag{6.11a}$$

$$\tau_{tot,Ed} \leq \frac{f_{ya} / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} \tag{6.11b}$$

$$\sqrt{\sigma_{tot,Ed}^2 + 3\,\tau_{tot,Ed}^2} \leq 1{,}1 \frac{f_{ya}}{\gamma_{M0}} \tag{6.11c}$$

où :

$\sigma_{tot,Ed}$ est la contrainte normale totale, calculée sur la section transversale efficace appropriée ;

$\tau_{tot,Ed}$ est la contrainte totale de cisaillement, calculée sur la section transversale brute.

(5) Il convient d'obtenir la contrainte normale totale $\sigma_{tot,Ed}$ et la contrainte totale de cisaillement $\tau_{tot,Ed}$ de la façon suivante :

$$\sigma_{tot,Ed} = \sigma_{N,Ed} + \sigma_{My,Ed} + \sigma_{Mz,Ed} + \sigma_{w,Ed} \tag{6.12a}$$

$$\tau_{tot,Ed} = \tau_{Vy,Ed} + \tau_{Vz,Ed} + \tau_{t,Ed} + \tau_{w,Ed} \quad (6.12b)$$

où :

$\sigma_{My,Ed}$ est la contrainte normale résultant du moment fléchissant $M_{y,Ed}$ (en utilisant la section transversale efficace) ;

$\sigma_{Mz,Ed}$ est la contrainte normale résultant du moment fléchissant $M_{z,Ed}$ (en utilisant la section transversale efficace) ;

$\sigma_{N,Ed}$ est la contrainte normale résultant de l'effort axial N_{Ed} (en utilisant la section transversale efficace) ;

$\sigma_{w,Ed}$ est la contrainte normale résultant de la torsion non uniforme (en utilisant la section transversale brute) ;

$\tau_{Vy,Ed}$ est la contrainte de cisaillement résultant de l'effort tranchant $V_{y,Ed}$ (en utilisant la section transversale brute) ;

$\tau_{Vz,Ed}$ est la contrainte de cisaillement résultant de l'effort tranchant $V_{z,Ed}$ (en utilisant la section transversale brute) ;

$\tau_{t,Ed}$ est la contrainte de cisaillement résultant de la torsion uniforme (St. Venant) (en utilisant la section transversale brute) ;

$\tau_{w,Ed}$ est la contrainte de cisaillement résultant de la torsion non uniforme (en utilisant la section transversale brute).

6.1.7 Charges transversales localisées

6.1.7.1 Généralités

(1) P Pour éviter l'écrasement, l'enfoncement local ou le flambement d'une âme soumise à une réaction d'appui ou à une autre charge transversale localisée, appliquée par l'intermédiaire de la semelle, la charge transversale F_{Ed} doit satisfaire :

$$F_{Ed} \leq R_{w,Rd} \quad (6.13)$$

où :

$R_{w,Rd}$ est la résistance transversale locale de l'âme.

(2) Il convient d'obtenir la résistance transversale locale d'une âme $R_{w,Rd}$ de la façon suivante :

a) pour une âme non raidie :

- pour une section transversale ne comprenant qu'une seule âme : selon 6.1.7.2 ;

- pour tout autre cas, y compris les plaques nervurées: selon 6.1.7.3 ;

b) pour une âme raidie : selon 6.1.7.4.

(3) Lorsque la charge locale ou la réaction d'appui est appliquée par l'intermédiaire d'une pièce disposée de manière à empêcher la déformation de l'âme, calculée pour résister à la charge transversale localisée, il n'est pas nécessaire de se préoccuper de la résistance transversale locale de l'âme..

(4) Dans les poutres en I constituées de deux profils en U, ou présentant une section transversale similaire dans laquelle deux pièces sont assemblées par leurs âmes, il convient de positionner les liaisons entre les âmes aussi près que possible des semelles de la poutre.

6.1.7.2 Sections transversales comportant une seule âme non raidie

(1) Pour une section transversale comportant une seule âme non raidie, voir Figure 6.6, la résistance transversale locale de l'âme peut être déterminée comme spécifié en (2), à condition que la section transversale satisfasse les critères suivants :

$$h_w / t \leq 200 \quad (6.14a)$$

$$r / t \leq 6 \quad (6.14b)$$

$$45° \leq \phi \leq 90° \quad (6.14c)$$

où :

h_w est la hauteur d'âme entre les fibres moyennes des semelles ;

r est le rayon intérieur des arrondis ;

ϕ est l'angle d'inclinaison de l'âme par rapport aux semelles [degrés].

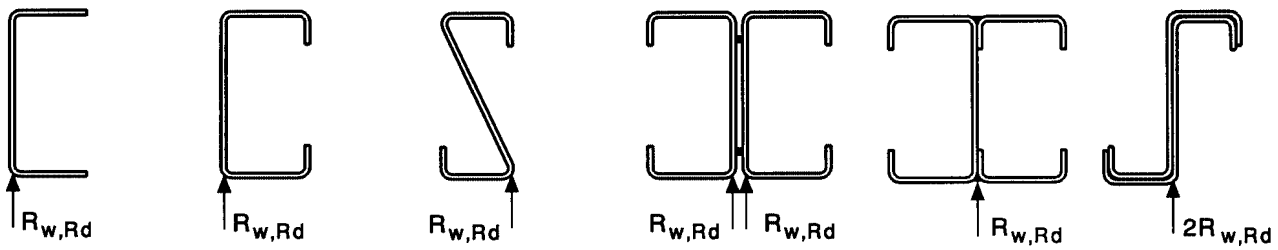


Figure 6.6 - Exemples de sections transversales comportant une seule âme

(2) Pour les sections transversales qui satisfont les critères spécifiés en (1), la résistance transversale locale d'une âme $R_{w,Rd}$ peut être déterminée comme représenté à la Figure 6.7.

(3) Il convient de déterminer les coefficients k_1 à k_5 de la manière suivante :

$k_1 = 1{,}33 - 0{,}33\,k$

$k_2 = 1{,}15 - 0{,}15\,r/t$ mais $k_2 \geq 0{,}50$ et $k_2 \leq 1{,}0$

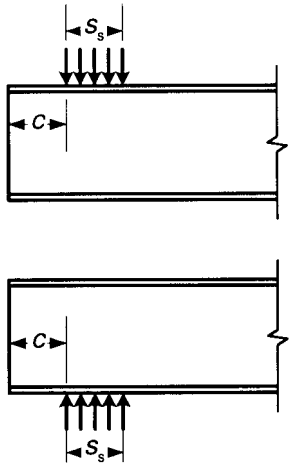
$k_3 = 0{,}7 + 0{,}3\,(\phi / 90)^2$

$k_4 = 1{,}22 - 0{,}22\,k$

$k_5 = 1{,}06 - 0{,}06\,r/t$ mais $k_5 \leq 1{,}0$

où :

$k = f_{yb} / 228$ [avec f_{yb} en N/mm^2] .



a) Pour une seule charge localisée ou réaction d'appui

i) $c \leq 1{,}5\ h_w$ par rapport à l'extrémité libre :

- pour une section transversale avec semelles raidies :

$$R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[9{,}04 - \frac{h_w/t}{60}\right]\left[1 + 0{,}01\frac{s_s}{t}\right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \qquad (6.15a)$$

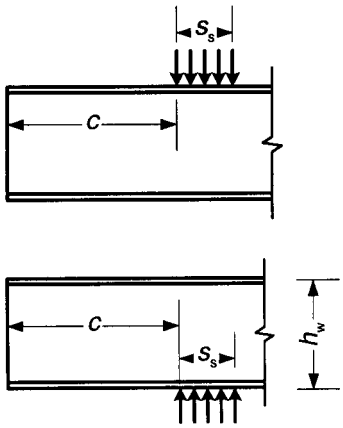
- pour une section transversale avec semelles non raidies :

- si $s_s/t \leq 60$:

$$R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[5{,}92 - \frac{h_w/t}{132}\right]\left[1 + 0{,}01\frac{s_s}{t}\right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \qquad (6.15b)$$

- si $s_s/t > 60$:

$$R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[5{,}92 - \frac{h_w/t}{132}\right]\left[0{,}71 + 0{,}015\frac{s_s}{t}\right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \qquad (6.15c)$$



ii) $c > 1{,}5\ h_w$ par rapport à l'extrémité libre :

- si $s_s/t \leq 60$:

$$R_{w,Rd} = \frac{k_3 k_4 k_5 \left[14{,}7 - \frac{h_w/t}{49{,}5}\right]\left[1 + 0{,}007\frac{s_s}{t}\right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \qquad (6.15d)$$

- si $s_s/t > 60$:

$$R_{w,Rd} = \frac{k_3 k_4 k_5 \left[14{,}7 - \frac{h_w/t}{49{,}5}\right]\left[0{,}75 + 0{,}011\frac{s_s}{t}\right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \qquad (6.15e)$$

Figure 6.7a) - Charges localisées et appuis — Sections transversales avec une seule âme

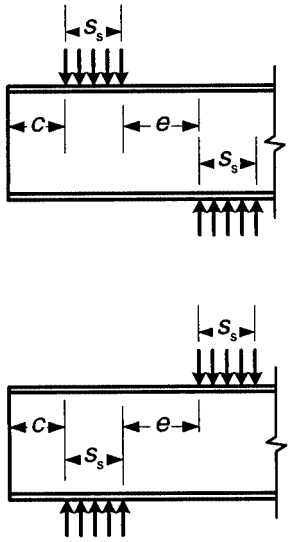
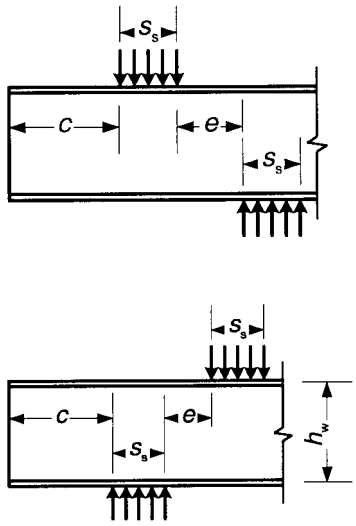
	b) Pour deux charges localisées opposées dont l'écartement *e* est inférieur à 1,5 h_w : i) c < 1,5 h_w par rapport à l'extrémité libre : $$R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[6{,}66 - \frac{h_w/t}{64}\right]\left[1 + 0{,}01\frac{s_s}{t}\right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (6.15f)$$
	ii) c > 1,5 h_w par rapport à l'extrémité libre : $$R_{w,Rd} = \frac{k_3 k_4 k_5 \left[21{,}0 - \frac{h_w/t}{16{,}3}\right]\left[1 + 0{,}0013\frac{s_s}{t}\right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (6.15g)$$

Figure 6.7b) - Charges localisées et appuis — Sections transversales avec une seule âme

(4) Lorsque la rotation de l'âme est empêchée par un maintien approprié ou par la géométrie des profilés (par exemple poutres en I, voir les quatrième et cinquième exemples de la Figure 6.6 en partant de la gauche), la résistance transversale locale de cette âme $R_{w,Rd}$ peut être déterminée comme suit :

a) pour une seule charge ou réaction d'appui

i) c < 1,5 h_w (à proximité ou au droit de l'extrémité libre)

pour une section transversale avec semelles raidies ou non

$$R_{w,Rd} = \frac{k_7 \left[8{,}8 + 1{,}1\sqrt{\frac{s_s}{t}}\right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (6.16a)$$

ii) c > 1,5 h_w (à distance de l'extrémité libre)

pour une section transversale avec semelles raidies ou non

$$R_{\mathrm{w,Rd}} = \frac{k_5^* k_6 \left[13{,}2 + 2{,}87\sqrt{\frac{s_s}{t}} \right] t^2 f_{\mathrm{yb}}}{\gamma_{\mathrm{M1}}} \tag{6.16b}$$

b) pour des charges ou des réactions opposées

i) c < 1(5 h_w (à proximité ou au droit de l'extrémité libre)

pour une section transversale avec semelles raidies ou non

$$R_{\mathrm{w,Rd}} = \frac{k_{10} k_{11} \left[8{,}8 + 1{,}1\sqrt{\frac{s_s}{t}} \right] t^2 f_{\mathrm{yb}}}{\gamma_{\mathrm{M1}}} \tag{6.16c}$$

ii) c > 15 h_w (charges ou réactions à distance de l'extrémité libre)

pour une section transversale avec semelles raidies ou non

$$R_{\mathrm{w,Rd}} = \frac{k_8 k_9 \left[13{,}2 + 2{,}87\sqrt{\frac{s_s}{t}} \right] t^2 f_{\mathrm{yb}}}{\gamma_{\mathrm{M1}}} \tag{6.16d}$$

où il convient de déterminer les valeurs des constantes k_5^* à k_{11} de la manière suivante :

k_5^* = 1,49 - 0,53 k mais k_5^* < 0,6

k_6 = 0,88 - 0,12 t /1,9

k_7 = 1 + s_s / t / 750 lorsque s_s / t < 150 ; k_7 = 1,20 lorsque s_s / t > 150

k_8 = 1 / k lorsque s_s / t < 66,5 ; k_8 = (1,10 - s_s / t / 665) / k lorsque s_s / t > 66,5

k_9 = 0,82 + 0,15 t /1,9

k_{10} = (0,98 - s_s / t / 865) / k

k_{11} = 0,64 + 0,31 t /1,9

où :

k = f_{yb} / 228 [avec f_{yb} en N/mm^2] ;

s_s est la longueur effective d'appui rigide.

Dans le cas de 2 charges locales égales et opposées appliquées sur des longueurs inégales, il convient d'utiliser la plus petite valeur de s_s.

6.1.7.3 Sections transversales avec au moins deux âmes non raidies

(1) Dans les sections transversales avec au moins deux âmes, y compris les plaques nervurées (voir Figure 6.8), il convient de déterminer la résistance transversale locale d'une âme non raidie comme spécifiée en (2), sous réserve de satisfaire aux deux conditions suivantes :

- la distance libre *c* entre la zone d'application de la réaction d'appui ou de la charge localisée et une extrémité libre, voir Figure 6.9, est d'au moins 40 mm ;

- la section transversale satisfait les critères suivants :

$r/t \leq 10$ (6.17a)

$h_w/t \leq 200 \sin \phi$ (6.17b)

$45° \leq \phi \leq 90°$ (6.17c)

où :

h_w est la hauteur d'âme entre les fibres moyennes des semelles ;

r est le rayon intérieur des arrondis ;

ϕ est l'angle d'inclinaison de l'âme par rapport aux semelles [degrés].

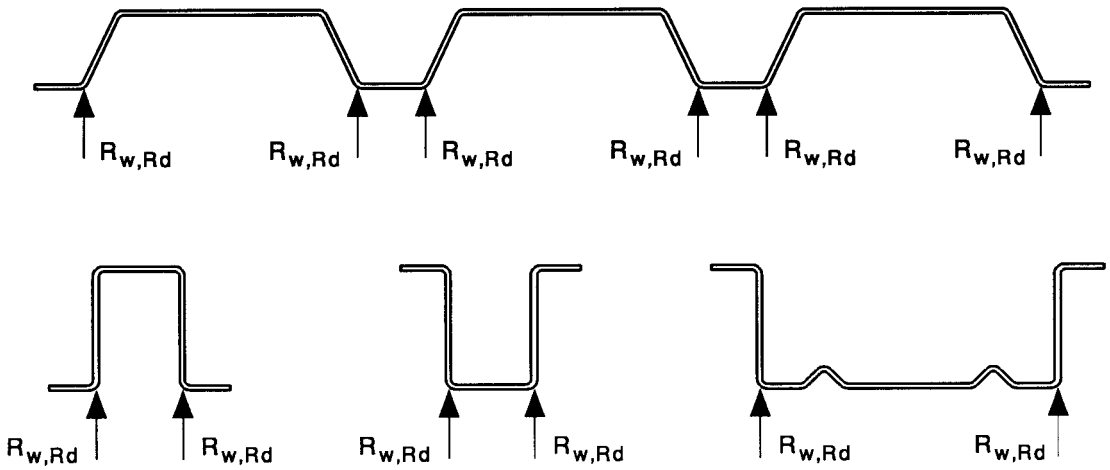


Figure 6.8 - Exemples de sections transversales avec deux âmes ou plus

(2) Lorsque les deux conditions spécifiées en (1) sont satisfaites, il convient de déterminer la résistance transversale locale $R_{w,Rd}$ pour chaque âme de la section transversale à partir de :

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

où :

l_a est la longueur d'appui effective pour la catégorie de chargement appropriée, voir (3) ;

α est un coefficient dépendant de la catégorie de chargement, voir (3).

(3) Il convient de déterminer les valeurs de l_a et de α d'après (4) et (5) respectivement. La valeur de calcul maximale de l_a est 200 mm. Lorsque l'appui est un profilé formé à froid avec une âme unique ou un tube rond, il convient de prendre une valeur de 10 mm pour s_s . Il convient de déterminer la catégorie de chargement appropriée (1 ou 2) en fonction de la distance libre *e* entre la charge localisée et l'appui le plus proche, ou de la distance libre *c* entre la réaction d'appui ou la charge localisée et une extrémité libre, voir Figure 6.9.

(4) Il convient de déterminer la longueur d'appui effective l_a de la façon suivante :

a) pour la catégorie 1 : l_a = 10 mm ... (6.19a)

b) pour la catégorie 2 :

- $\beta_V \leq 0{,}2$: $l_a = s_s$ ... (6.19b)

- $\beta_V \geq 0{,}3$: l_a = 10 mm ... (6.19c)

- $0{,}2 < \beta_V < 0{,}3$: interpoler linéairement entre les valeurs de l_a pour 0,2 et 0,3

avec :

$$\beta_v = \frac{|V_{Ed,1}| - |V_{Ed,2}|}{|V_{Ed,1}| + |V_{Ed,2}|}$$

où $|V_{Ed,1}|$ et $|V_{Ed,2}|$ sont les valeurs absolues des efforts tranchants de part et d'autre de la charge localisée ou de la réaction d'appui, avec $|V_{Ed,1}| \geq |V_{Ed,2}|$, et où s_s est la longueur réelle de l'appui rigide.

(5) Il convient de déterminer la valeur du coefficient α de la manière suivante :

a) pour la catégorie de chargement 1 :

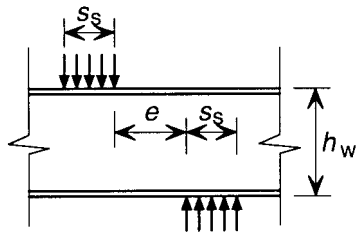
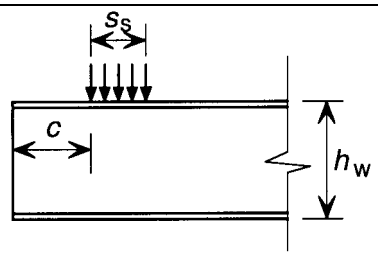
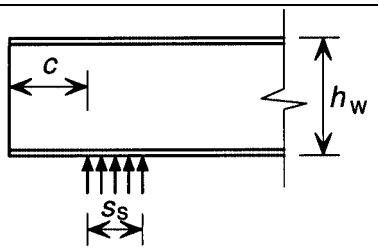
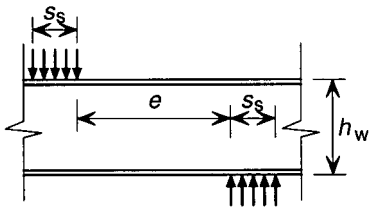
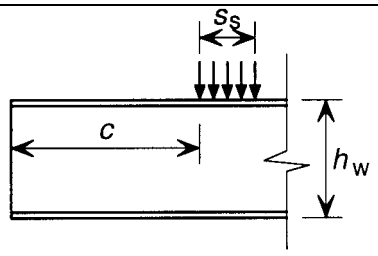
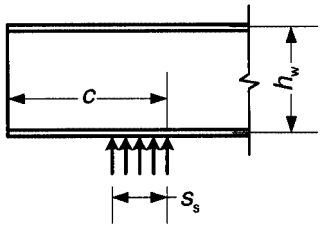
- pour les plaques nervurées: α = 0,075 ... (6.20a)

- pour les plateaux et les profilés en oméga : α = 0,057 ... (6.20b)

b) pour la catégorie de chargement 2 :

- pour les plaques nervurées: α = 0,15 ... (6.20c)

- pour les plateaux et les profilés en oméga : α = 0,115 ... (6.20d)

	Catégorie 1
	Catégorie 1 - charge locale appliquée à une distance $c \leq 1{,}5\ h_w$ de l'extrémité libre ;
	Catégorie 1 - réaction d'un l'appui d'extrémité avec $c \leq 1{,}5\ h_w$ par rapport à l'extrémité libre.
	Catégorie 2 - charge locale appliquée à une distance $e > 1{,}5\ h_w$ de l'appui le plus proche ;
	Catégorie 2 - charge locale appliquée à une distance $c > 1{,}5\ h_w$ de l'extrémité libre ;
	Catégorie 2 - réaction d'un appui d'extrémité avec $c > 1{,}5\ h_w$ par rapport à l'extrémité libre.

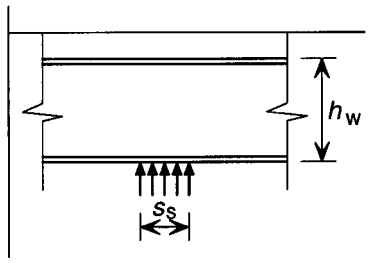
	Catégorie 2 - réaction d'un appui intermédiaire.

Figure 6.9 - Charges localisées et appuis — Catégories de chargement pour les sections transversales avec deux âmes ou plus

6.1.7.4 Ames raidies

(1) La résistance transversale locale d'une âme raidie peut être déterminée comme spécifié en (2) pour les sections transversales comportant des raidisseurs d'âme longitudinaux pliés de telle façon que les deux plis de l'âme se trouvent de part et d'autre de la ligne d'épure de l'âme joignant les points d'intersection de la fibre moyenne de l'âme avec la fibre moyenne des semelles, voir figure 6.10, à condition que ces sections transversales soient telles que :

$$2 < \frac{e_{\max}}{t} < 12 \qquad (6.21)$$

où :

e_{max} est la plus grande excentricité des plis par rapport à la ligne d'épure de l'âme.

(2) Pour les sections transversales comportant des âmes raidies satisfaisant les conditions énoncées en (1), la résistance transversale locale d'une âme raidie peut être déterminée en multipliant la valeur correspondante pour une âme non raidie similaire, obtenue d'après 6.1.7.2 ou 6.1.7.3 selon le cas, par le coefficient $\kappa_{a,s}$ donné par :

$$\kappa_{a,s} = 1{,}45 - 0{,}05\, e_{max} / t \qquad \text{mais} \quad \kappa_{a,s} \leq 0{,}95 + 35\,000\, t^2\, e_{min} / (b_d^2\, s_p) \qquad \text{... (6.22)}$$

où :

b_d est la largeur développée de la semelle chargée, voir Figure 6.10 ;

e_{min} est la plus petite excentricité des plis par rapport à la ligne d'épure de l'âme ;

s_p est la largeur de la paroi d'âme la plus proche de la semelle chargée, voir Figure 6.10.

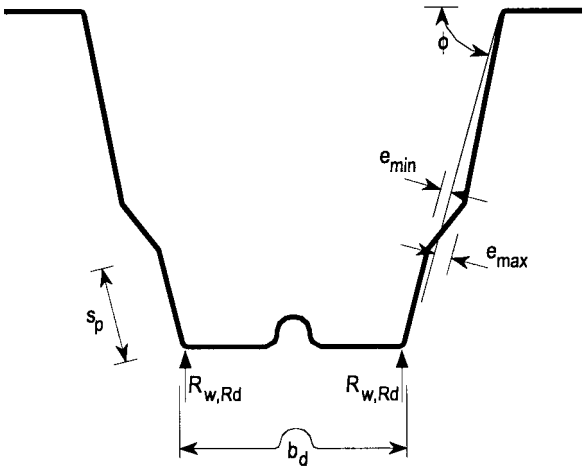


Figure 6.10 - Ames raidies

6.1.8 Traction et flexion combinées

(1) Il convient de vérifier que les sections transversales soumises à l'action combinée d'une traction axiale N_{Ed} et de moments fléchissants $M_{y,Ed}$ et $M_{z,Ed}$ satisfont le critère suivant :

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd,ten}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,ten}} \leq 1 \tag{6.23}$$

où :

$N_{t,Rd}$ est la résistance de calcul de la section transversale soumise à une traction uniforme (6.1.2) ;

$M_{cy,Rd,ten}$ est le moment résistant de calcul de la section transversale associé à la contrainte de traction maximale lorsque cette section est soumise uniquement à un moment par rapport à l'axe y - y (6.1.4) ;

$M_{cz,Rd,ten}$ est le moment résistant de calcul de la section transversale associé à la contrainte de traction maximale lorsque cette section est soumise uniquement à un moment par rapport à l'axe z - z (6.1.4).

(2) Si $M_{cy,Rd,com} \leq M_{cy,Rd,ten}$ ou $M_{cz,Rd,com} \leq M_{cz,Rd,ten}$ (où $M_{cy,Rd,com}$ et $M_{cz,Rd,com}$ sont les moments résistants associés à la contrainte de compression maximale dans la section transversale soumise uniquement à un moment par rapport à l'axe approprié), il convient également de vérifier le critère suivant :

$$\frac{M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd.com}} + \frac{M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,com}} - \frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1 \tag{6.24}$$

6.1.9 Compression et flexion combinées

(1) Il convient de vérifier que les sections transversales soumises à l'action combinée d'une compression axiale N_{Ed} et de moments fléchissants $M_{y,Ed}$ et $M_{z,Ed}$ satisfont le critère suivant :

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd,com}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,com}} \leq 1 \tag{6.25}$$

où $N_{c,Rd}$ est tel que défini au 6.1.3, $M_{cy,Rd,com}$ et $M_{cz,Rd,com}$ sont tels que définis au 6.1.8.

(2) Il convient de prendre les moments supplémentaires $\Delta M_{y,Ed}$ et $\Delta M_{z,Ed}$ dus aux déplacements des axes neutres égaux à :

$$\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed}\, e_{Ny}$$

$$\Delta M_{z,Ed} = N_{Ed}\, e_{Nz}$$

où e_{Ny} et e_{Nz} sont les déplacements des axes neutres y-y et z-z dus aux efforts axiaux, voir 6.1.3(3).

(3) Si $M_{cy,Rd,ten} \leq M_{cy,Rd,com}$ ou $M_{cz,Rd,ten} \leq M_{cz,Rd,com}$, il convient de vérifier également le critère suivant :

$$\frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd,ten}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd,ten}} - \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1 \qquad (6.26)$$

où $M_{cy,Rd,ten}$, $M_{cz,Rd,ten}$ sont définis au 6.1.8.

6.1.10 Effort de cisaillement, effort axial et moment fléchissant combinés

(1) Pour les sections transversales soumises à l'action combinée d'un effort axial N_{Ed}, d'un moment fléchissant M_{Ed} et d'un effort de cisaillement V_{Ed} il n'est pas nécessaire de tenir compte d'une réduction de capacité due à l'effort de cisaillement dès lors que $V_{Ed} \leq 0{,}5\ V_{w,Rd}$.. Si l'effort de cisaillement est supérieur à la moitié de la résistance à l'effort de cisaillement, il convient de satisfaire à l'équation suivante :

$$\frac{N_{Ed}}{N_{Rd}} + \frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} + (1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}})(\frac{2\,V_{Ed}}{V_{w,Rd}} - 1)^2 \leq 1{,}0 \qquad (6.27)$$

où :

N_{Rd} est la résistance de calcul de la section transversale à la traction ou la compression uniforme donnée au 6.1.2 ou 6.1.3 ;

$M_{y,Rd}$ est le moment résistant de calcul de la section transversale donné au 6.1.4 ;

$V_{w,Rd}$ est la résistance de calcul au cisaillement de l'âme donnée au 6.1.5(1) ;

$M_{f,Rd}$ est le moment résistant plastique de calcul d'une section transversale comprenant uniquement la partie efficace des semelles, voir EN 1993-1-5 ;

$M_{pl,Rd}$ est le moment résistant plastique de la section transversale, voir EN 1993-1-5.

Pour les barres et les plaques nervurées comprenant au moins deux âmes $V_{w,Rd}$ est la somme des résistances des âmes. Voir également l'EN 1993-1-5.

6.1.11 Moment fléchissant combiné avec une charge concentrée ou une réaction d'appui

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

$$M_{Ed} / M_{c,Rd} \leq 1 \qquad (6.28a)$$

$$F_{Ed} / R_{w,Rd} \leq 1 \qquad (6.28b)$$

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{F_{Ed}}{R_{w,Rd}} \leq 1{,}25 \qquad (6.28c)$$

où :

$M_{c,Rd}$ est le moment résistant de la section transversale donné au 6.1.4.1(1) ;

$R_{w,Rd}$ est la valeur appropriée de la résistance transversale locale de l'âme, donnée au 6.1.7.

Le moment fléchissant M_{Ed} dans l'équation (6.2.8c) peut être calculé au bord de l'appui. Pour les barres et les plaques nervurées comprenant au moins deux âmes, $R_{w,Rd}$ est la somme des résistances transversales locales des âmes individuelles.

6.2 Résistance au flambement

6.2.1 Généralités

(1) Pour les barres dont les sections transversales sont sujettes à la distorsion, il convient de tenir compte de la possibilité de flambement latéral des semelles comprimées et de la flexion latérale des semelles en général, voir 6.2.4.

(2) Il convient de prendre en compte les effets du flambement local et par distorsion comme spécifié au 5.5.

6.2.2 Flambement par flexion

(1) Il convient de déterminer la résistance de calcul au flambement $N_{b,Rd}$ pour le flambement par flexion suivant l'EN 1993-1-1 à l'aide de la courbe de flambement appropriée définie au Tableau 6.3 selon le type de section transversale, l'axe de flambement et la limite d'élasticité utilisés, voir (3).

(2) La courbe de flambement pour une section transversale ne figurant pas dans le Tableau 6.3 peut être obtenue par analogie.

(3) Il convient de déterminer la résistance au flambement d'une barre de section transversale fermée reconstituée par l'un des moyens suivants :

— courbe de flambement b associée à la limite d'élasticité de base f_{yb} du matériau constituant la tôle ayant servi à fabriquer le profilé par formage à froid ;

— courbe de flambement c associée à la limite d'élasticité moyenne f_{ya} du profilé après formage à froid, comme définie au 3.2.3, à condition que $A_{eff} = A_g$.

6.2.3 Flambement par torsion et flambement par flexion-torsion

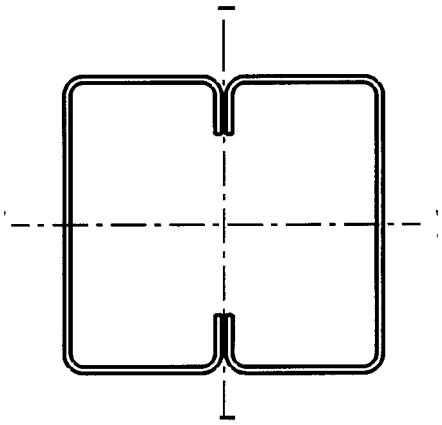
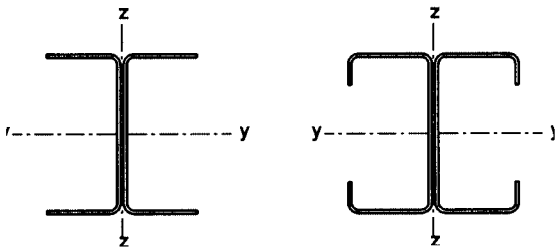
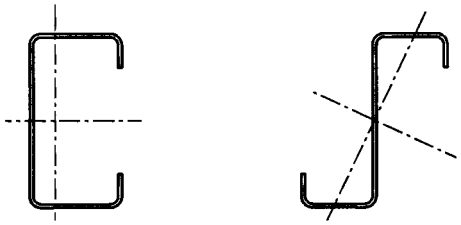
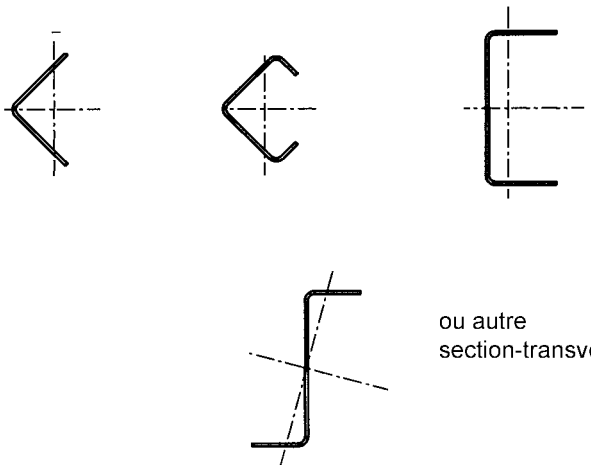
(1) Pour les profilés à section transversale ouverte antisymétrique (par exemple panne type Z avec semelles égales), il convient de tenir compte du fait que la résistance de la barre au flambement par torsion peut être inférieure à sa résistance au flambement par flexion.

(2) Pour les profilés à section transversale ouverte comportant un seul axe de symétrie, voir Figure 6.12, il convient de tenir compte du fait que la résistance de la barre au flambement par flexion-torsion peut être inférieure à sa résistance au flambement par flexion.

(3) Pour les profilés à section transversale ouverte non symétrique, il convient de tenir compte du fait que la résistance de la barre au flambement par torsion ou flexion-torsion peut être inférieure à sa résistance au flambement par flexion.

(4) Il convient de déterminer la résistance de calcul au flambement $N_{b,Rd}$ pour le flambement par torsion ou par flexion-torsion selon 6.3.1.1 de l'EN 1993-1-1 au moyen de la courbe de flambement appropriée pour le flambement par rapport à l'axe z-z donnée dans le Tableau 6.3 .

Tableau 6.3 - Courbe de flambement appropriée pour divers types de section transversale

Type de section transversale		Flambement par rapport à l'axe	Courbe de flambement
	Si f_{yb} est utilisée	quelconque	b
	si f_{ya} est utilisée *)	quelconque	c
		y - y z - z	a b
		quelconque	b
		quelconque	c

*) Il convient de n'utiliser la limite d'élasticité moyenne f_{ya} que si $A_{eff} = A_g$

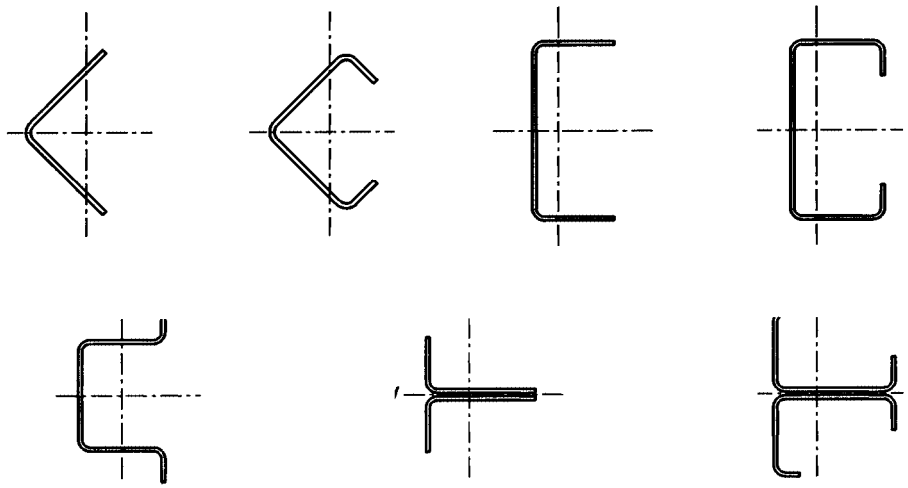


Figure 6.12 - Sections transversales mono-symétriques sujettes au flambement par flexion-torsion

(5) Il convient de déterminer la force critique élastique $N_{cr,T}$ pour le flambement par torsion d'une poutre sur deux appuis simples à partir de :

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_o^{\,2}}\left(G\,I_t + \frac{\pi^2 E\,I_w}{l_T^2}\right) \tag{6.33a}$$

avec :

$$i_o^{\,2} = i_y^{\,2} + i_z^{\,2} + y_o^{\,2} + z_o^{\,2} \tag{6.33b}$$

où :

G est le module de cisaillement ;

I_t est le moment d'inertie de torsion de la section transversale brute ;

I_w est le moment d'inertie sectoriel de la section transversale brute ;

i_y est le rayon de giration de la section transversale brute par rapport à l'axe y - y ;

i_z est le rayon de giration de la section transversale brute par rapport à l'axe z - z ;

l_T est la longueur de flambement de la barre pour le flambement par torsion ;

y_o, z_o sont les coordonnées du centre de cisaillement par rapport au centre de gravité de la section transversale brute.

(6) Pour les sections transversales à double symétrie (c'est à dire $y_o = z_o = 0$), il convient de déterminer la force critique élastique $N_{cr,TF}$ pour le flambement par flexion-torsion à partir de :

$$N_{cr,TF} = N_{cr,T} \tag{6.34}$$

à condition que $N_{cr,T} < N_{cr,y}$ et $N_{cr,T} < N_{cr,z}$.

(7) Pour les sections transversales symétriques par rapport à l'axe y - y (c'est à dire $z_o = 0$), il convient de déterminer la force critique élastique $N_{cr,TF}$ pour le flambement par flexion-torsion à partir de :

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2\beta}\left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}\right)^2 + 4\left(\frac{y_o}{i_o}\right)^2 \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}}\right] \tag{6.35}$$

avec :

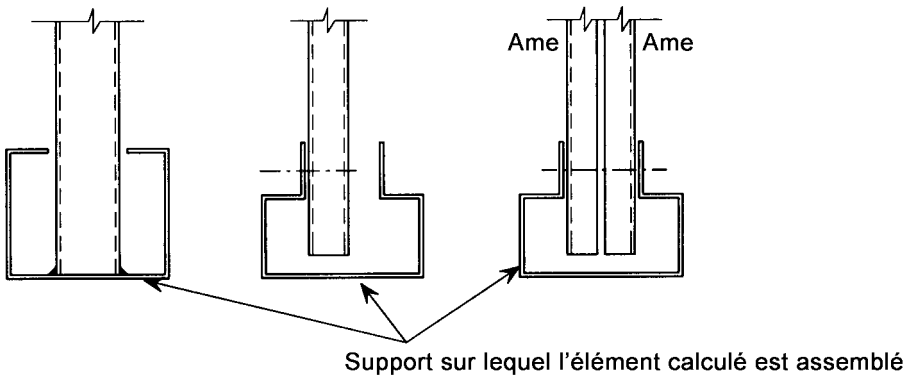
$$\beta = 1 - \left(\frac{y_o}{i_o}\right)^2 .$$

(8) Il convient de déterminer la longueur de flambement l_T pour le flambement par torsion ou par flexion-torsion en tenant compte du degré de maintien à la torsion et au gauchissement à chaque extrémité de la longueur d'épure L_T .

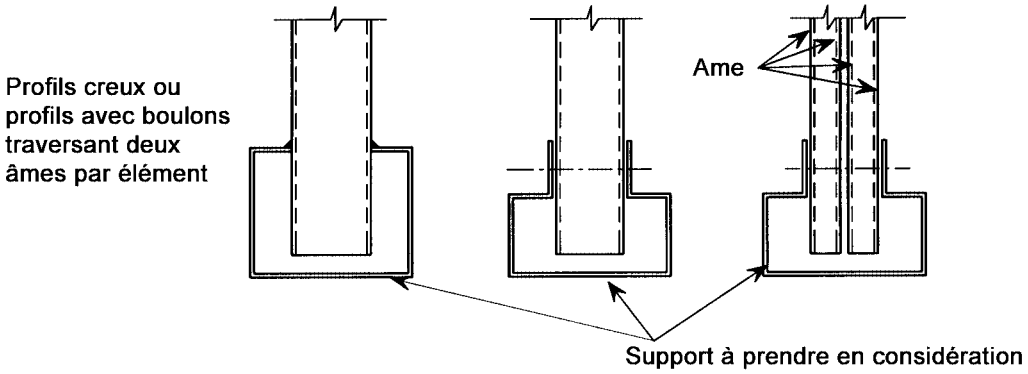
(9) Pour des dispositifs courants d'assemblages à chaque extrémité, la valeur de l_T / L_T peut être prise égale à :

— 1,0 pour les assemblages assurant un maintien partiel à la torsion et au gauchissement, voir Figure 6.13(a) ;

— 0,7 pour les assemblages assurant un maintien significatif à la torsion et au gauchissement, voir Figure 6.13(b) ;



a) assemblages capables d'assurer un maintien partiel à la torsion et au gauchissement



b) assemblages capables d'assurer un maintien significatif à la torsion et au gauchissement

Figure 6.13 - Assemblages capables d'assurer un maintien à la torsion et au gauchissement

6.2.4 Déversement des barres fléchies

(1) Il convient de déterminer le moment résistant d'une barre sujette au déversement suivant 6.3.2.2 de l'EN 1993-1-1, en retenant la courbe de flambement latéral appropriée a ou b.

(2) Il convient de ne pas utiliser cette méthode pour les profilés qui présentent un angle significatif entre les axes principaux de la section transversale efficace, et ceux de la section transversale brute.

6.2.5 Flexion et compression

(1) L'interaction entre effort normal et moment fléchissant peut être évaluée par une analyse au second ordre de la barre, comme spécifié dans l'EN 1993-1-1, sur la base des caractéristiques de la section transversale efficace définie au 5.5. Voir également 5.3.

(2) Comme alternative, la formule d'interaction (6.38) peut être utilisée.

$$\left(\frac{N_{\mathrm{Ed}}}{N_{\mathrm{b,Rd}}}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_{\mathrm{Ed}}}{M_{\mathrm{b,Rd}}}\right)^{0,8} \leq 1,0 \qquad (6.38)$$

où :

$N_{\mathrm{b,Rd}}$ est la résistance de calcul au flambement d'une barre comprimée selon 6.2.2 (flambement par flexion, torsion ou flexion-torsion)

$M_{\mathrm{b,Rd}}$ est le moment résistant de calcul à la flexion selon 6.2.4

M_{Ed} inclut les effets du déplacement de l'axe neutre, si nécessaire

6.3 Flexion et traction

(1) L'équation d'interaction flexion - compression donnée en 6.2.5 est applicable.

7 Etats limites de service

7.1 Généralités

(1) Il convient d'appliquer les règles concernant les états limites de service définis à la Section 7 de l'EN 1993-1-1 aux profilés et plaques nervurées formés à froid.

(2) Il convient d'utiliser les caractéristiques de la section transversale efficace selon 5.1 dans tous les calculs aux états limites de service pour les profilés et les plaques nervurées formés à froid.

(3) Une méthode alternative pour calculer le moment d'inertie est l'interpolation suivante entre la section transversale brute et la section transversale efficace :

$$I_{\mathrm{fic}} = I_{\mathrm{gr}} - \frac{\sigma_{\mathrm{gr}}}{\sigma}(I_{\mathrm{gr}} - I(\sigma)_{\mathrm{eff}}) \qquad (7.1)$$

où

I_{gr} est le moment d'inertie de la section transversale brute ;

σ_{gr} est la contrainte maximale de compression par flexion à l'état limite de service, sur la base de la section transversale brute (positive dans la formule) ;

$I(\sigma)_{eff}$ est le moment d'inertie de la section transversale efficace, tenant compte du flambement local, calculée pour une contrainte maximale σ / σ_{gr}, égale à la plus grande valeur absolue des contraintes sur la longueur de calcul considérée.

(4) Le moment d'inertie efficace I_{eff} (ou I_{fic}) peut être considéré comme variable sur la longueur de la travée. Une valeur uniforme peut également être utilisée, calculée sur la base du moment maximal en travée (en valeur absolue) résultant de l'application des charges de service.

7.2 Déformation plastique

(1) Dans le cas d'une analyse globale plastique, il convient de sassurer que la combinaison moment - réaction sur un appui intermédiaire n'excède pas 0,9 fois la résistance de calcul combinée, déterminée en prenant en compte $\gamma_{M,ser}$, voir 2(5).

(2) La résistance de calcul combinée peut être déterminée d'après 6.1.11, mais en utilisant la section transversale efficace pour les états limites de service et en prenant en compte $\gamma_{M,ser}$.

7.3 Flèches

(1) Les flèches peuvent être calculées en posant l'hypothèse d'un comportement élastique.

(2) Il convient de prendre en compte l'influence du glissement au droit des assemblages (par exemple dans le cas de poutres continues avec éclissages ou emboîtements) dans le calcul des flèches, des forces et des moments.

8 Calcul des assemblages

8.1 Généralités

(1) Pour les hypothèses et les exigences relatives au calcul des assemblages, voir l'EN 1993-1-8.

(2) Les règles suivantes s'appliquent aux âmes d'épaisseur $t_{cor} \leq 4$ mm, non couvertes par l'EN 1993-1-8.

8.2 Assemblages de continuité et d'extrémité de barres comprimées

(1) Il convient de dimensionner les assemblages de continuité et d'extrémité de barres comprimées de sorte qu'ils présentent au moins la même résistance que la section transversale de la barre, ou de les calculer pour qu'ils résistent à un moment fléchissant supplémentaire résultant des effets de second ordre dans la barre, en plus de l'effort normal de compression N_{Ed} et des moments fléchissants $M_{y,Ed}$ et $M_{z,Ed}$ obtenus par l'analyse globale.

(2) En l'absence d'une analyse au second ordre de la barre, il convient de considérer que ce moment supplémentaire ΔM_{Ed} agit suivant l'axe de la section transversale qui donne la plus petite valeur du coefficient de réduction χ pour le flambement par flexion, voir 6.2.2.1(2), et que sa valeur est :

$$\Delta M_{Ed} = N_{Ed} \left(\frac{1}{\chi} - 1 \right) \frac{W_{eff}}{A_{eff}} \sin \frac{\pi a}{l} \tag{8.1a}$$

où :

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

a est la distance entre le joint de continuité ou l'assemblage d'extrémité et le point d'inflexion le plus proche ;

l est la longueur de flambement de la barre entre points d'inflexion, pour le flambement selon l'axe approprié ;

W_{eff} est le module de résistance de la section transversale efficace pour la flexion par rapport à l'axe approprié.

Il convient de calculer les assemblages de continuité et d'extrémité de manière à ce qu'ils résistent à un effort tranchant supplémentaire

$$\Delta V_{\text{Ed}} = \frac{\pi N_{\text{Ed}}}{l}\left(\frac{1}{\chi} - 1\right)\frac{W_{\text{eff}}}{A_{\text{eff}}} \tag{8.1b}$$

(3) Il convient de concevoir les assemblages de continuité et d'extrémité de manière à ce qu'ils transmettent les charges appliquées aux parties efficaces de la section transversale.

(4) Si les dispositions constructives aux extrémités d'un profilé sont tels que la ligne d'action de l'effort normal ne peut pas être clairement identifiée, il convient de considérer une excentricité appropriée et de prendre en compte les moments en résultant dans le calcul de la barre, des assemblages d'extrémité ainsi que de l'assemblage de continuité s'il existe.

8.3 Assemblages avec éléments de fixation mécaniques

(1) Il convient de donner aux assemblages avec éléments de fixation mécaniques une forme compacte. Il convient de disposer les éléments de fixation de manière à offrir un espace suffisant pour un montage et un entretien satisfaisants.

NOTE Pour de plus amples informations, voir partie 1-8 de l'EN 1993.

(2) Les efforts de cisaillement s'exerçant sur des éléments de fixation mécaniques individuelles au sein d'un assemblage peuvent être considérés comme égaux, à condition que :

— les fixations présentent une ductilité suffisante ;

— leur cisaillement ne constitue pas le mode de ruine critique.

(3) Dans le cadre d'un dimensionnement par le calcul, il convient de déterminer les résistances des éléments de fixation mécaniques soumises à des charges à prédominance statique, à partir :

— du Tableau 8.1 pour les rivets aveugles ;

— du Tableau 8.2 pour les vis autotaraudeuses ;

— du Tableau 8.3 pour les clous à scellement ;

— du Tableau 8.4 pour les boulons.

NOTE Pour la détermination de la résistance des éléments de fixation mécaniques par essai, voir 9(4).

(4) Dans les Tableaux 8.1 à 8.4, les symboles suivants sont utilisés :

A est l'aire de la section transversale brute d'un élément de fixation ;

A_s est l'aire de la section résistante en traction d'un élément de fixation ;

A_{net} est l'aire de la section transversale nette de la pièce assemblée ;

β_{Lf} est le coefficient de réduction pour assemblages de grande longueur conformément à l'EN 1993-1-8 ;

d est le diamètre nominal de l'élément de fixation ;

d_o est le diamètre nominal du trou ;

d_w est le diamètre de la rondelle ou de la tête de l'élément de fixation ;

e_1 est la pince longitudinale, distance mesurée entre le centre de l'élément de fixation et le bord adjacent de la pièce assemblée, dans la direction de l'effort transmis, voir Figure 8.1 ;

e_2 est la pince transversale, distance mesurée entre le centre de l'élément de fixation et le bord adjacent de la pièce assemblée, dans la direction perpendiculaire à celle de l'effort transmis, voir Figure 8.1 ;

f_{ub} est la résistance limite à la traction du matériau constituant l'élément de fixation ;

$f_{u,sup}$ est la résistance ultime à la traction de la pièce support dans laquelle une vis est fixée;

n est le nombre de tôles fixées sur la pièce support par la même vis ou le même clou ;

n_f est le nombre d'éléments de fixation dans un assemblage ;

p_1 est l'entraxe des fixations dans la direction de l'effort transmis, voir Figure 8.1 ;

p_2 est l'entraxe des fixations dans la direction perpendiculaire à celle de l'effort transmis, voir Figure 8.1 ;

t est l'épaisseur de la pièce ou de la tôle assemblée la plus mince ;

t_1 est l'épaisseur de la pièce ou de la tôle assemblée la plus épaisse ;

t_{sup} est l'épaisseur de la pièce support dans laquelle est fixé(e) une vis ou un clou.

(5) Il convient de prendre en compte un coefficient partiel γ_M égal à γ_{M2}pour déterminer les résistances de calcul des éléments de fixation :

NOTE La valeur γ_{M2} peut être donnée dans l'Annexe Nationale. La valeur γ_{M2} = 1,25 est recommandée.

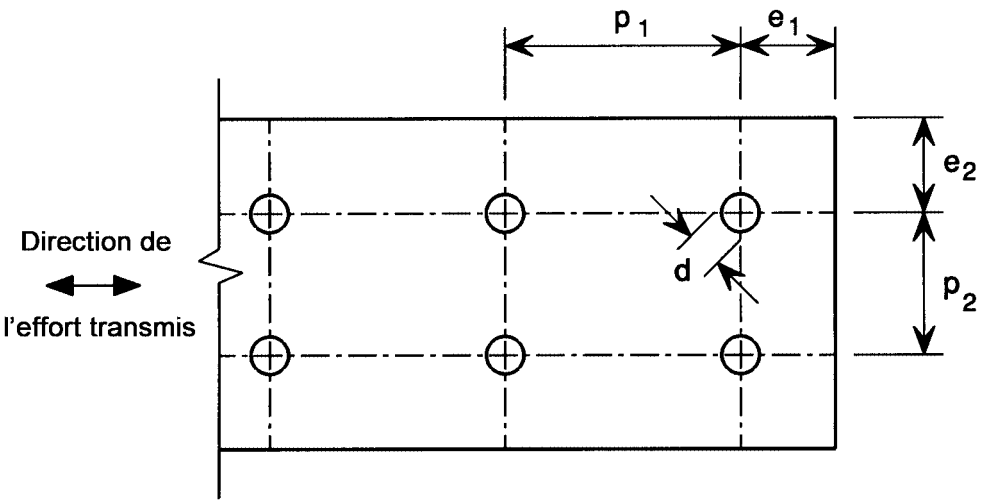


Figure 8.1 - Pince longitudinale, pince transversale et espacements des fixations et des soudures par points

(6) Si la résistance à l'arrachement $F_{o,Rd}$ d'une fixation est inférieure à sa résistance au poinçonnement $F_{p,Rd}$ il convient de déterminer la capacité de déformation à partir d'essais.

(7) Il convient de réduire les résistances au poinçonnement données dans les Tableaux 8.2 et 8.3 pour les vis autotaraudeuses et les clous à scellement si les fixations ne sont pas centrées sur les nervures. Pour une fixation par nervure implantée avec une excentricité du quart de la largeur de plage, il convient de réduire la résistance de calcul à $0{,}9F_{p,Rd,}$ et pour deux fixations par nervure implantées avec la même excentricité, il convient de prendre la résistance égale à $0{,}7F_{p,Rd}$ par fixation, voir Figure 8.2.

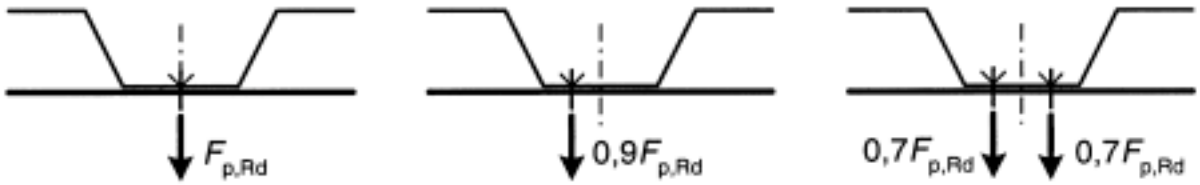


Figure 8.2 - Réduction de la résistance au poinçonnement en fonction de la position des fixations

(8) Pour une fixation sollicitée à la fois en cisaillement et en traction, sous réserve que $F_{t,Rd}$ et $F_{v,Rd}$ soient toutes deux déterminées suivant les Tableaux 8.1 à 8.4, la résistance de la fixation à la combinaison cisaillement - traction peut être vérifiée à l'aide de l'équation suivante :

$$\frac{F_{t,Ed}}{\min(F_{p,Rd}, F_{o,Rd})} + \frac{F_{v,Ed}}{\min(F_{b,Rd}, F_{n,Rd})} \leq 1 \qquad (8.2)$$

(9) La distorsion de la section brute peut être négligée si la résistance de calcul est obtenue à partir des Tableaux 8.1 à 8.4, à condition que la fixation traverse une semelle de largeur inférieure ou égale à 150 mm.

(10)Il convient de réaliser les trous pour les vis avec un diamètre conforme aux recommandations du fabricant. Ces recommandations reposent généralement sur les critères suivants :

— il convient que le couple appliqué soit juste supérieur au couple de taraudage ;

— il convient que le couple appliqué soit inférieur au couple d'arrachement du filetage ou couple de rupture par cisaillement de la tête ;

— il convient que le couple de taraudage soit inférieur à 2/3 du couple de rupture par cisaillement de la tête.

(11)Pour les assemblages de grande longueur, il convient de tenir compte d'un coefficient de réduction β_{Lf} conformément à l'EN 1993-1-8.

(12)Les règles de calcul applicables aux rivets aveugles ne sont valables que si le diamètre du trou n'est pas supérieur de plus de 0,1 mm au diamètre du rivet.

(13)Pour les boulons M12 et M14 avec des trous dont le diamètre est supérieur de 2 mm au diamètre de boulon, se reporter à l'EN 1993-1-8.

Tableau 8.1 - Résistances de calcul pour les rivets aveugles [1)]

Rivets sollicités en cisaillement :
Résistance à la pression diamétrale : $F_{b,Rd} = \alpha f_u d t / \gamma_{M2}$ mais $F_{b,Rd} < f_u e_1 t / (1{,}2\ \gamma_{M2})$ où α est donné par : - si $t = t_1$: $\alpha = 3{,}6\sqrt{t/d}$ mais $\alpha \leq 2{,}1$ - si $t_1 \geq 2{,}5\,t$: $\alpha = 2{,}1$ - si $t < t_1 < 2{,}5\,t$: obtenir α par interpolation linéaire. **Résistance de la section nette :** $F_{n,Rd} = A_{net} f_u / \gamma_{M2}$ **Résistance au cisaillement :** La résistance au cisaillement $F_{v,Rd}$ doit être déterminée par des essais *[1)] et $F_{v,Rd} = F_{v,Rk} / \gamma_{M2}$
Conditions : [4)] $F_{v,Rd} \geq 1{,}2\,F_{b,Rd} / (n_f\,\beta_{Lf})$ ou $\Sigma F_{v,Rd} \geq 1{,}2\,F_{n,Rd}$
Rivets sollicités en traction : [2)]
Résistance au poinçonnement : La résistance au poinçonnement $F_{p,Rd}$ doit être déterminée par essais *[1)]. Résistance à l'arrachement : Sans objet pour les rivets. Résistance à la traction : La résistance à la traction $F_{t,Rd}$ doit être déterminée par essais *[1)]
Conditions : $F_{t,Rd} \geq \Sigma F_{p,Rd}$
Domaine de validité [3)]
$e_1 \geq 1{,}5\,d$ $p_1 \geq 3\,d$ 2,6 mm $\leq d \leq$ 6,4 mm $e_2 \geq 1{,}5\,d$ $p_2 \geq 3\,d$ $f_u \leq 550$ MPa
[1)] Dans le présent Tableau, il est supposé que la tôle la plus mince est située du coté de la tête préformée du rivet aveugle. [2)] Les rivets aveugles ne sont généralement pas utilisés en traction. [3)] Les rivets aveugles peuvent être utilisés au-delà de ce domaine de validité si leur résistance est déterminée à partir de résultats d'essais. [4)] Il convient de satisfaire aux conditions mentionnées lorsque la capacité de déformation de l'assemblage est nécessaire. Lorsque ces conditions ne sont pas satisfaites, il convient de démontrer que la capacité de déformation requise est apportée par d'autres éléments de la structure.

NOTE : *[1)] L'Annexe Nationale peut fournir des informations supplémentaires concernant la résistance des rivets aveugles sollicités en cisaillement et la résistance au poinçonnement et à la traction des rivets aveugles sollicités en traction.

Tableau 8.2 - Résistances de calcul pour les vis autotaraudeuses [1)]

Vis sollicitées en cisaillement :
Résistance à la pression diamétrale : $F_{b,Rd} = \alpha f_u d t / \gamma_{M2}$ où α est donné par les équations suivantes : - si $t = t_1$: $\alpha = 3{,}2\sqrt{t/d}$ mais $\alpha \leq 2{,}1$ - si $t_1 \geq 2{,}5\,t$ et $t < 1{,}0$ mm : $\alpha = 3{,}2\sqrt{t/d}$ mais $\alpha \leq 2{,}1$ - si $t_1 \geq 2{,}5\,t$ et $t \geq 1{,}0$ mm : $\alpha = 2{,}1$ - si $t < t_1 < 2{,}5\,t$: obtenir α par interpolation linéaire. **Résistance de section nette :** $F_{n,Rd} = A_{net} f_u / \gamma_{M2}$ **Résistance au cisaillement :** La résistance au cisaillement $F_{v,Rd}$ doit être déterminée par des essais *[2)] $F_{v,Rd} = F_{v,Rk} / \gamma_{M2}$
Conditions : [4)] $F_{v,Rd} \geq 1{,}2\,F_{b,Rd}$ ou $\Sigma F_{v,Rd} \geq 1{,}2\,F_{n,Rd}$
Vis sollicitées en traction :
Résistance au poinçonnement : [2)] - pour les charges statiques : $F_{p,Rd} = d_w t f_u / \gamma_{M2}$ - pour les vis soumises à des charges de vent combinées ou non à des charges statiques: $F_{p,Rd} = 0{,}5\,d_w t f_u / \gamma_{M2}$ **Résistance à l'arrachement :** Si $t_{sup} / s < 1$: $F_{o,Rd} = 0{,}45\,d\,t_{sup} f_{u,sup} / \gamma_{M2}$ (s est le pas de filetage) Si $t_{sup} / s \geq 1$: $F_{o,Rd} = 0{,}65\,d\,t_{sup} f_{u,sup} / \gamma_{M2}$ **Résistance à la traction :** La résistance à la traction $F_{t,Rd}$ doit être déterminée par des essais *[2)].
Conditions : [4)] $F_{t,Rd} \geq \Sigma F_{p,Rd}$ ou $F_{t,Rd} \geq F_{o,Rd}$
Domaine de validité [3)]
En règle générale : $e_1 \geq 3\,d$ $p_1 \geq 3\,d$ $3{,}0$ mm $\leq d \leq 8{,}0$ mm $e_2 \geq 1{,}5\,d$ $p_2 \geq 3\,d$ **Pour la traction :** $0{,}5$ mm $\leq t \leq 1{,}5$ mm et $t_1 \geq 0{,}9$ mm $f_u \leq 550$ MPa
[1)] Dans le présent tableau, il est supposé que la tôle la plus mince est située du coté de la tête de la vis. [2)] Ces valeurs sont données en supposant que la rondelle a une rigidité suffisante qui l'empêche de se déformer de façon significative ou de passer au-dessus de la tête de la fixation. [3)] Les vis autotaraudeuses peuvent être utilisées au-delà de ce domaine de validité si leur résistance est déterminée à partir de résultats d'essais. [4)] Il convient de satisfaire aux conditions mentionnées lorsque la capacité de déformation de l'assemblage est nécessaire. Lorsque ces conditions ne sont pas satisfaites, il convient de démontrer que la capacité de déformation requise est apportée par d'autres éléments de la structure.

NOTE : *[2)] L'Annexe Nationale peut fournir des informations supplémentaires concernant la résistance des vis autotaraudeuses sollicitées en cisaillement et des vis autotaraudeuses sollicitées en traction.

Tableau 8.3 - Résistances de calcul pour les clous à scellement

Clous à scellement sollicités en cisaillement :
Résistance à la pression diamétrale : $F_{b,Rd} = 3{,}2\, f_u\, d\, t / \gamma_{M2}$ **Résistance de section nette :** $F_{n,Rd} = A_{net}\, f_u / \gamma_{M2}$ **Résistance au cisaillement :** La résistance au cisaillement $F_{v,Rd}$ doit être déterminée par des essais *[3)] $F_{v,Rd} = F_{v,Rk} / \gamma_{M2}$
Conditions : [3)] $F_{v,Rd} \geq 1{,}5\, \Sigma F_{b,Rd}$ ou $\Sigma F_{v,Rd} \geq 1{,}5\, F_{n,Rd}$
Clous sollicités en traction :
Résistance au poinçonnement : [1)] - pour les charges statiques : $F_{p,Rd} = d_w\, t\, f_u / \gamma_{M2}$ - pour les charges de vent combinées ou non à des charges statiques : $F_{p,Rd} = 0{,}5\, d_w\, t\, f_u / \gamma_{M2}$ **Résistance à l'arrachement :** La résistance à l'arrachement $F_{o,Rd}$ doit être déterminée par des essais *[3)] **Résistance à la traction :** La résistance à la traction $F_{t,Rd}$ doit être déterminée par des essais *[3)]
Conditions : [3)] $F_{o,Rd} \geq \Sigma F_{p,Rd}$ ou $F_{t,Rd} \geq F_{o,Rd}$
Domaine de validité [2)]

En règle générale :	$e_1 \geq 4{,}5\, d$	$3{,}7 \text{ mm} \leq d \leq 6{,}0 \text{ mm}$
	$e_2 \geq 4{,}5\, d$	pour $d = 3{,}7$ mm : $t_{sup} \geq 4{,}0$ mm
	$p_1 \geq 4{,}5\, d$	pour $d = 4{,}5$ mm : $t_{sup} \geq 6{,}0$ mm
	$p_2 \geq 4{,}5\, d$	pour $d = 5{,}2$ mm : $t_{sup} \geq 8{,}0$ mm
	$f_u \leq 550$ MPa	
Pour la traction :	$0{,}5 \text{ mm} \leq t \leq 1{,}5 \text{ mm}$	$t_{sup} \geq 6{,}0$ mm

[1)] Ces valeurs sont définies en supposant que la rondelle possède une rigidité suffisante pour l'empêcher de se déformer de façon significative ou de passer au-dessus de la tête de la fixation.

[2)] Les clous à scellement peuvent être utilisés au-delà de ce domaine de validité si leur résistance est déterminée à partir de résultats d'essais.

[3)] Il convient de satisfaire aux conditions mentionnées lorsque la capacité de déformation de l'assemblage est nécessaire. Lorsque ces conditions ne sont pas satisfaites, il convient de démontrer que la capacité de déformation requise est apportée par d'autres éléments de la structure.

NOTE : *[3)] L'Annexe Nationale peut fournir des informations supplémentaires concernant la résistance des clous à scellement soumis au cisaillement et la résistance à l'arrachement et à la traction des clous de scellement sollicités en traction.

Tableau 8.4 - Résistances de calcul pour les boulons

Boulons sollicités en cisaillement :

Résistance à la pression diamétrale : [2)]

$F_{b,Rd} = 2{,}5\alpha_b k_t f_u d t / \gamma_{M2}$ avec α_b la plus petite valeur de 1,0 ou e_1 / (3d) et
$k_t = (0{,}8\ t + 1{,}5) / 2{,}5$ pour 0,75 mm $\leq t \leq$ 1,25 mm; $k_t = 1{,}0$ pour $t >$ 1,25 mm

Résistance de section nette :

$F_{n,Rd} = (1 + 3\,r\,(d_o / u - 0{,}3))\,A_{net} f_u / \gamma_{M2}$ mais $F_{n,Rd} \leq A_{net} f_u / \gamma_{M2}$

avec : r = [nombre de boulons au droit de la section transversale]/[nombre total de boulons dans l'assemblage]

$u = 2\,e_2$ mais $u \leq p_2$

Résistance au cisaillement :

- pour les classes de résistance 4.6, 5.6 et 8.8 :

$F_{v,Rd} = 0{,}6\,f_{ub} A_s / \gamma_{M2}$

- pour les classes de résistance 4.8, 5.8, 6.8 et 10.9 :

$F_{v,Rd} = 0{,}5\,f_{ub} A_s / \gamma_{M2}$

Conditions : [3)] $F_{v,Rd} \geq 1{,}2\,\Sigma\,F_{b,Rd}$ ou $\Sigma F_{v,Rd} \geq 1{,}2\,F_{n,Rd}$

Boulons sollicités en traction :

Résistance au poinçonnement : La résistance au poinçonnement $F_{p,Rd}$ doit être déterminée par des essais *[4)].

Résistance à l'arrachement : Sans objet pour les boulons.

Résistance à la traction : $F_{t,Rd} = 0{,}9\,f_{ub} A_s / \gamma_{M2}$

Conditions : [3)] $F_{t,Rd} \geq \Sigma F_{p,Rd}$

Domaine de validité [1)]

$e_1 \geq 1{,}0\,d$	$p_1 \geq 3\,d$	3 mm > $t \geq$ 0,75 mm	Taille minimale de boulon : M 6
$e_2 \geq 1{,}5\,d$	$p_2 \geq 3\,d$		Classes de résistance : 4.6 - 10.9
$f_u \leq$ 550 N/mm^2			

[1)] Les boulons peuvent être utilisés au-delà de ce domaine de validité si leur résistance est déterminée à partir de résultats d'essais.

[2)] Pour une épaisseur supérieure ou égale à 3 mm, il convient d'appliquer les règles relatives aux boulons définies dans l'EN 1993-1-8.

[3)] Il convient de satisfaire aux conditions mentionnées lorsque la capacité de déformation de l'assemblage est nécessaire. Lorsque ces conditions ne sont pas satisfaites, il convient de démontrer que la capacité de déformation requise est apportée par d'autres éléments de la structure.

NOTE : *[4)] L'Annexe Nationale peut fournir des informations supplémentaires concernant la résistance au poinçonnement des boulons sollicités en traction.

8.4 Soudures par points

(1) Les soudures par points peuvent être utilisées pour les tôles brutes de laminage ou galvanisées d'une épaisseur pouvant atteindre 4,0 mm, à condition que l'épaisseur de la pièce assemblée la plus mince ne soit pas supérieure à 3,0 mm.

(2) Les soudures par points peuvent être des soudures par résistance ou des soudures par fusion.

(3) Il convient de déterminer la résistance de calcul $F_{v,Rd}$ d'une soudure par points sollicitée en cisaillement en utilisant le Tableau 8.5.

(4) Dans le Tableau 8.5, la signification des symboles est la suivante :

A_{net} est l'aire de la section transversale nette de la pièce assemblée ;

n_w est le nombre de soudures bouchons dans un assemblage ;

t est l'épaisseur de la pièce ou de la tôle assemblée la plus mince [mm] ;

t_1 est l'épaisseur de la pièce ou de la tôle assemblée la plus épaisse [mm];

et les pinces longitudinale et transversale e_1 et e_2 ainsi que les espacements p_1 et p_2 sont tels que définis au 8.3(5).

(5) Pour déterminer les résistances de calcul des soudures par points, il convient de prendre le coefficient partiel γ_M égal à γ_{M2}.

NOTE La valeur de γ_{M2} peut être donnée dans l'Annexe Nationale. La valeur γ_{M2} = 1,25 est recommandée.

Tableau 8.5 - Résistances de calcul pour les soudures par points

Soudures par points sollicitées en cisaillement :
Résistance à l'arrachement et en pression diamétrale : - si $t \le t_1 \le 2{,}5\,t$: $F_{tb,Rd} = 2{,}7\sqrt{t}\,d_s\,f_u/\gamma_{M2}$ [avec t en mm] - si $t_1 > 2{,}5\,t$: $F_{tb,Rd} = 2{,}7\sqrt{t}\,d_s\,f_u/\gamma_{M2}$ *mais* $F_{tb,Rd} \le 0{,}7\,d_s^2\,f_u/\gamma_{M2}$ et $F_{tb,Rd} \le 3{,}1\,t\,d_s\,f_u/\gamma_{M2}$ Résistance d'extrémité : $F_{e,Rd} = 1{,}4\,t\,e_1\,f_u/\gamma_{M2}$ Résistance de section nette : $F_{n,Rd} = A_{net}\,f_u/\gamma_{M2}$ Résistance au cisaillement : $F_{V,Rd} = \frac{\pi}{4}d_s^2\,f_u/\gamma_{M2}$
Conditions : $F_{v,Rd} \ge 1{,}25\,F_{tb,Rd}$ ou $F_{v,Rd} \ge 1{,}25\,F_{e,Rd}$ ou $\Sigma F_{v,Rd} \ge 1{,}25\,F_{n,Rd}$
Domaine de validité
$2\,d_s \le e_1 \le 6\,d_s$ $\quad$ $3\,d_s \le p_1 \le 8\,d_s$ $e_2 \le 4\,d_s$ $\quad$ $3\,d_s \le p_2 \le 6\,d_s$

(6) Il convient de déterminer le diamètre d'interface d_s d'une soudure par points comme suit :

- pour le soudage par fusion : $d_s = 0{,}5\,t + 5$ mm . (8.3a)

- pour le soudage par résistance : $d_s = 5\sqrt{t}$ [avec t en mm] .. (8.3b)

(7) Il convient de vérifier la valeur de d_s réellement obtenue par soudage par des essais de cisaillement conformes à la Section 9, en utilisant des éprouvettes d'essai à simple recouvrement telles qu'illustrées à la Figure 8.3. Il convient d'utiliser des éprouvettes dont l'épaisseur t est la même que celle mise en œuvre dans la pratique.

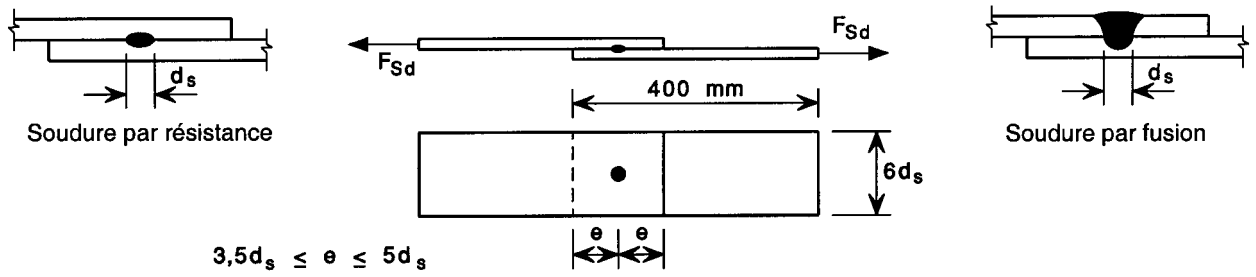


Figure 8.3 - Eprouvettes pour essais de cisaillement sur soudures par points

8.5 Soudures à clin

8.5.1 Généralités

(1) Il convient d'utiliser le présent paragraphe 8.5 pour le calcul de soudures à l'arc, à clin, exécutées sur un métal de base d'épaisseur inférieure ou égale à 4,0 mm. Pour une épaisseur plus importante du métal de base, Il convient de calculer les soudures à clin selon l'EN 1993-1-8.

(2) Il convient de choisir la dimension de la soudure de sorte que la résistance de l'assemblage soit régie par l'épaisseur de la pièce ou de la tôle assemblée, plutôt que par la soudure.

(3) L'exigence donnée en (2) peut être considérée comme satisfaite si la gorge de la soudure est au moins égale à l'épaisseur de la pièce ou de la tôle assemblée.

(4) Pour déterminer les résistances de calcul des soudures à clin, il convient de prendre le coefficient partiel γ_M égal à γ_{M2}.

NOTE La valeur de γ_{M2} peut être donnée dans l'Annexe Nationale. La valeur γ_{M2} = 1,25 est recommandée.

8.5.2 Soudures d'angle

(1) Il convient de déterminer la résistance de calcul $F_{w.Rd}$ d'un assemblage par soudure d'angle comme suit :

- pour un cordon latéral d'un ensemble de deux soudures d'angle latérales :

$$F_{w,Rd} = t L_{w,s} (0{,}9 - 0{,}45 L_{w,s} / b) f_u / \gamma_{M2} \qquad \text{si } L_{w,s} \leq b \qquad (8.4a)$$

$$F_{w,Rd} = 0{,}45 t b f_u / \gamma_{M2} \qquad \text{si } L_{w,s} > b \qquad (8.4b)$$

- pour un cordon frontal d'extrémité :

$$F_{w,Rd} = t L_{w,e} (1 - 0{,}3 L_{w,e} / b) f_u / \gamma_{M2} \text{ [pour une seule soudure et si } L_{w,s} \leq b] \qquad (8.4c)$$

où :

b est la largeur de la pièce ou de la tôle assemblée, voir Figure 8.4 ;

$L_{w,e}$ est la longueur efficace de la soudure d'angle frontale d'extrémité, voir Figure 8.4 ;

$L_{w,s}$ est la longueur efficace d'une soudure d'angle latérale, voir Figure 8.4.

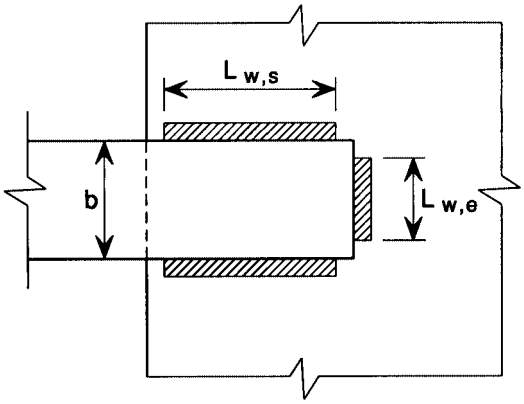


Figure 8.4 - Assemblage par soudures d'angle à clin

(2) Si on utilise une combinaison de soudures d'angle frontales d'extrémité et de soudures d'angle latérales dans un même assemblage, il convient de prendre sa résistance totale égale à la somme des résistances des soudures d'angle frontales d'extrémité et des soudures d'angle latérales. Il convient de prendre en compte la position de l'axe neutre ainsi qu'une hypothèse réaliste de la répartition des forces.

(3) Il convient de prendre la longueur efficace L_w d'une soudure d'angle égale à la longueur hors-tout du cordon entier, y compris les retours d'extrémité. Dès lors que la soudure présente une pleine section sur toute sa longueur, aucune réduction de la longueur efficace n'est nécessaire à l'origine ou à l'extrémité du cordon.

(4) Il convient de considérer que les cordons d'angle dont la longueur efficace est inférieure à 8 fois l'épaisseur de la pièce assemblée la plus mince ne transmettent pas d'effort.

8.5.3 Soudures bouchons à l'arc

(1) Il convient de n'utiliser les soudures bouchons à l'arc que pour transmettre des efforts de cisaillement.

(2) Il convient de n'utiliser les soudures bouchons à l'arc que pour des assemblages d'éléments ou de tôles dont l'épaisseur totale Σt est inférieure ou égale à 4 mm.

(3) Il convient de donner aux soudures bouchons à l'arc un diamètre d'interface d_s d'au moins 10 mm.

(4) Si l'épaisseur de la pièce ou de la tôle assemblée est inférieure à 0,7 mm, il convient d'utiliser une rondelle de soudage, voir Figure 8.5.

(5) Il convient de disposer les soudures bouchons à l'arc de sorte que les pinces longitudinale et transversale respectent les conditions suivantes :

(i) Il convient de s'assurer que la distance minimale mesurée parallèlement à l'effort transmis, entre l'axe d'une soudure bouchon à l'arc et le bord le plus proche d'une soudure adjacente ou le bord de la pièce assemblée vers lequel l'effort est transmis, n'est pas inférieure à la valeur de e_{min} donnée ci-dessous :

si $f_u / f_y < 1{,}15$

$$e_{min} = 1{,}8 \frac{F_{w,Sd}}{t f_u / \gamma_{M2}}$$

si f_u / f_y / 1,15

$$e_{\min} = 2{,}1 \frac{F_{w,Sd}}{t f_u / \gamma_{M2}}$$

(ii) Il convient de vérifier que la distance minimale entre l'axe d'une soudure bouchonà l'arc circulaire et les bords de la tôle assemblée n'est pas inférieure à $1{,}5 d_w$ où d_w est le diamètre visible de la soudure.

(iii) Il convient de vérifier que la distance libre minimale entre une soudure bouchon,à l'arc, oblongue et l'extrémité de la tôle, et entre la soudure et le bord de la tôle n'est pas inférieure à 1,0 d_w.

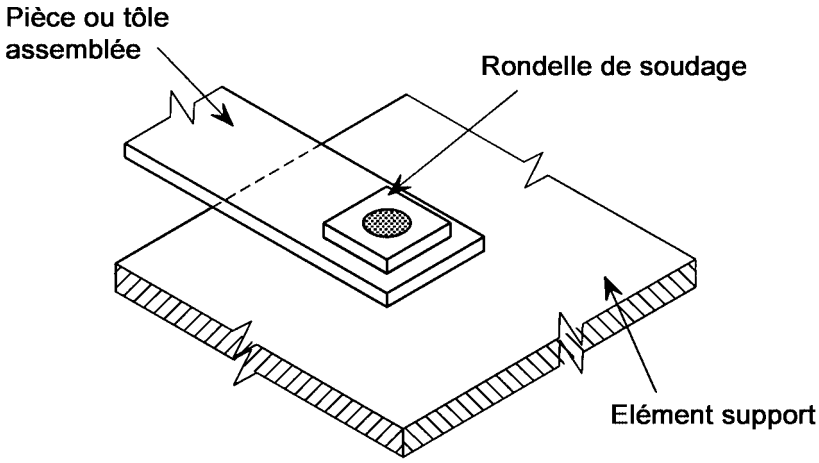


Figure 8.5 - Soudure bouchon à l'arc avec rondelle de soudage

(6) Il convient de déterminer la résistance de calcul au cisaillement $F_{w,Rd}$ d'une soudure circulaire bouchon à l'arc de la manière suivante :

$$F_{w,Rd} = (\pi/4)\, d_s^2 \times 0{,}625\, f_{uw} / \gamma_{M2} \qquad (8.5a)$$

où :

f_{uw} est la résistance ultime à la traction des électrodes ;

mais il convient de prendre $F_{w,Rd}$ au plus égale à la résistance déterminée comme suit :

- si $d_p / \Sigma t \leq 18\,(420 / f_u)^{0,5}$:

$$F_{w,Rd} = 1{,}5\, d_p \Sigma t\, f_u / \gamma_{M2} \qquad (8.5b)$$

- si $18\,(420 / f_u)^{0,5} < d_p / \Sigma t < 30\,(420 / f_u)^{0,5}$:

$$F_{w,Rd} = 27\,(420 / f_u)^{0,5}\,(\Sigma t)^2\, f_u / \gamma_{M2} \qquad (8.5c)$$

- si $d_p / \Sigma t \geq 30\,(420 / f_u)^{0,5}$:

$$F_{w,Rd} = 0{,}9\, d_p \Sigma t\, f_u / \gamma_{M2} \qquad (8.5d)$$

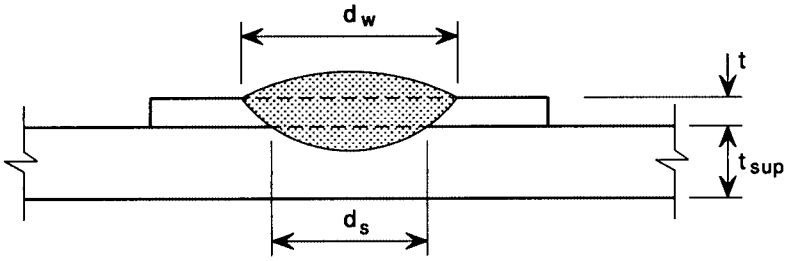
avec d_p selon (8)/

(7) Il convient de déterminer le diamètre d'interface d_s d'une soudure bouchon à l'arc, voir Figure 8.6, à partir de l'équation suivante :

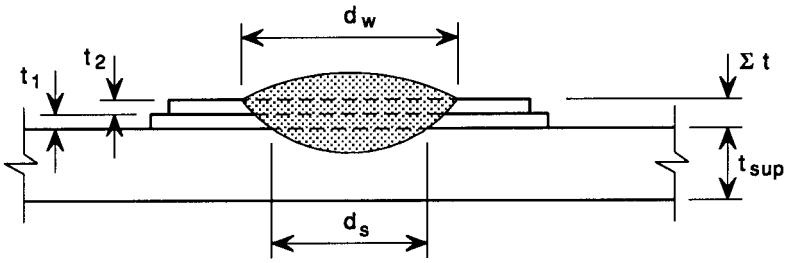
$$d_s = 0{,}7 d_w - 1{,}5 \Sigma t \quad \text{mais} \quad d_s \geq 0{,}55\, d_w \tag{8.6}$$

où :

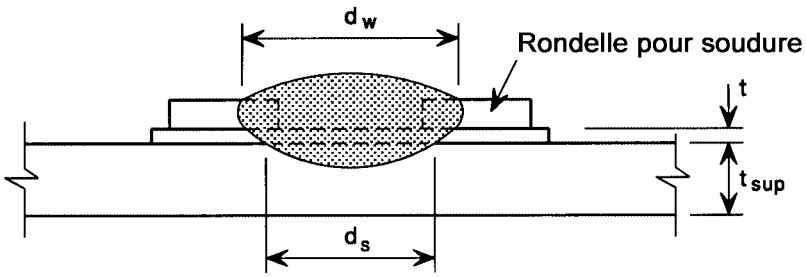
d_w est le diamètre visible de la soudure bouchon à l'arc, voir Figure 8.6.



a) Une seule tôle assemblée



b) Deux tôles assemblées



c) Une seule tôle assemblée avec rondelle de soudage

Figure 8.6 - Soudures bouchons à l'arc

(8) Il convient de déterminer le diamètre périphérique efficace d_p d'une soudure bouchon à l'arc de la façon suivante :

- pour une seule tôle ou pièce assemblée d'épaisseur t:

$$d_p = d_w - t \tag{8.7a}$$

- pour plusieurs tôles ou pièces assemblées d'une épaisseur totale Σt:

$$d_p = d_w - 2\,\Sigma t \tag{8.7b}$$

(9) Il convient de déterminer la résistance de calcul au cisaillement $F_{w,Rd}$ d'une soudure bouchon à l'arc oblongue à partir de l'équation suivante :

$$F_{w,Rd} = [\,(\pi/4)\,d_s^2 + L_w\,d_s\,] \times 0{,}625\,f_{uw}\,/\,\gamma_{M2} \tag{8.8a}$$

mais il convient de prendre $F_{w,Rd}$ au plus égale à la résistance périphérique donnée par :

$$F_{w,Rd} = (\,0{,}5\,L_w + 1{,}67\,d_p\,)\,\Sigma t\,f_u\,/\,\gamma_{M2} \tag{8.8b}$$

où :

L_w est la longueur de la soudure bouchon à l'arc oblongue, telle qu'indiquée à la Figure 8.7.

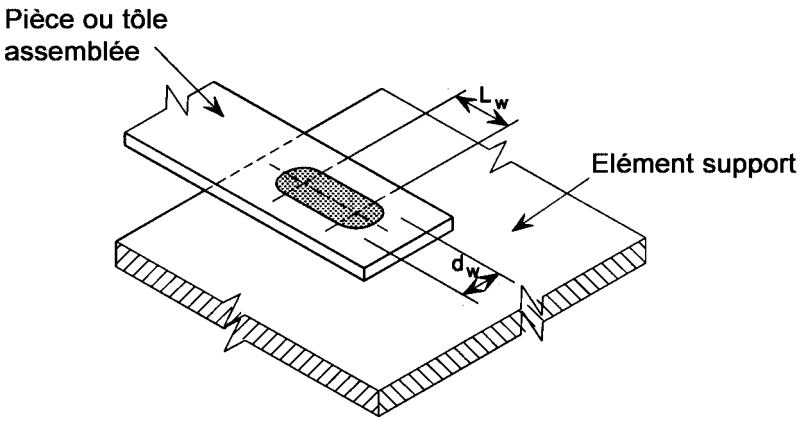


Figure 8.7 - Soudure bouchon à l'arc oblongue

9 Dimensionnement assisté par des essais

(1) La présente Section 9 peut être utilisée pour l'application des principes du dimensionnement assisté par des essais donnés dans l'EN 1990 et au 2.5. de l'EN 1993-1-1, auxquels s'ajoutent les exigences spécifiques relatives aux profilés et aux plaques nervurées formés à froid.

(2) Il convient de réaliser les essais en appliquant les principes donnés à l'annexe A.

NOTE L'Annexe Nationale peut fournir des informations concernant les essais, en complément de l'Annexe A.

NOTE L'annexe A fournit des modes opératoires normalisés pour :

— les essais sur les plaques nervurées et les plateaux profilés ;

— les essais sur les profilés formés à froid ;

— les essais sur les structures et parties de structures ;

— les essais sur les poutres maintenues en torsion par des plaques nervurées;

— l'évaluation des résultats d'essais afin de déterminer les valeurs de calcul.

(3) Il convient de réaliser les essais de traction de l'acier conformément à l'EN 10002-1. Il convient de réaliser les essais de détermination d'autres caractéristiques de l'acier conformément aux normes européennes appropriées.

(4) Il convient d'effectuer les essais sur éléments de fixation et assemblages conformément à la norme européenne ou à la norme internationale appropriée.

NOTE Dans l'attente de la disponibilité d'une norme européenne ou internationale appropriée, des informations concernant les méthodes d'essai relatives aux éléments de fixation sont fournies dans les ouvrages suivants :

Publication CECM N° 21 (1983) : *European recommendations for steel construction : the design and testing of Connections in steel sheeting and sections;*

Publication CECM N° 42 (1983) : *European recommendations for steel construction* : *mechanical fasteners for steel sheetings.*

10 Considérations particulières pour les pannes, les plateaux et les plaques nervurées

10.1 Poutres maintenues par des plaques nervurées

10.1.1 Généralités

(1) Les dispositions données dans le présent paragraphe 10.1 peuvent être appliquées aux poutres (désignées ici par le terme "pannes") ayant une section transversale de type *Z, C,* Σ, *U*, ou Oméga avec $h / t \leq 233$, $c / t \leq 20$ pour les bords tombés à pli simple et $d / t \leq 20$ pour les bords tombés à pli double.

NOTE Il est possible de dépasser ces limites si cela est justifié par des essais. L'Annexe Nationale peut fournir des informations concernant les essais. Des essais normalisés tels que donnés dans l'Annexe A sont recommandés.

(2) Ces dispositions peuvent s'appliquer aux systèmes d'empannage comportant des liernes, des continuités par éclissage ou emboîtement.

(3) Ces dispositions peuvent également être appliquées aux profilés formés à froid utilisés comme lisses, poutres de plancher et autres types de poutres similaires maintenus de manière analogue par des plaques nervurées.

(4) Les lisses peuvent être calculées en considérant que la pression du vent exerce sur elles une action similaire à la charge de gravité sur les pannes, et que la succion du vent agit sur elles de façon similaire au soulèvement sur les pannes.

(5) Un maintien latéral continu total peut être assuré par des plaques nervurées en acier ou autres plaques profilées en acier possédant une rigidité suffisante, assemblées de façon continue sur la semelle de la panne en creux d'ondes. La panne peut être considérée comme maintenue latéralement au niveau de sa liaison avec la plaque nervurée, si 10.1.1(6) est satisfait. Dans d'autres cas (par exemple, fixation en sommet de nervures des plaques), il convient de retenir un degré de maintien validé par l'expérience, ou déterminé à partir d'essais.

NOTE Pour les essais, voir l'Annexe A.

(6) Lorsque la plaque nervurée est assemblée à une panne et lorsque la condition exprimée par l'équation (10.1a) est satisfaite, la panne peut être considérée comme maintenue latéralement dans le plan de la plaque :

$$S \geq \left(EI_{\mathrm{w}} \frac{\pi^2}{L^2} + GI_{\mathrm{t}} + EI_{\mathrm{z}} \frac{\pi^2}{L^2} 0{,}25\, h^2 \right) \frac{70}{h^2} \tag{10.1a}$$

où

S est la rigidité partielle apportée à l'élément examiné par la plaque assemblée à chaque nervure (si la plaque est assemblée à la panne une nervure sur deux seulement, il convient alors de substituer 0,20 S à S) ;

I_{w} est le moment d'inertie de gauchissement de la panne ;

I_{t} est le moment d'inertie de torsion de la panne ;

I_{z} est le moment d'inertie de la section transversale par rapport à l'axe faible de la section transversale de la panne ;

L est la portée de la panne ;

h est la hauteur de la panne.

NOTE 1 L'équation (10.1a) peut également être utilisée pour déterminer la stabilité latérale des semelles d'éléments combinées à des types de couverture autres que les plaques nervurées, dès lors que la liaison semelle / couverture est correctement conçue.

NOTE 2 La rigidité au cisaillement S peut être calculée sur la base des Recommandations de la CECM (voir NOTE au 9.(4)) ou déterminée par des essais.

(7) A moins que d'autres dispositions soient justifiées à partir de résultats d'essais, il convient d'utiliser pour la panne des dispositifs d'appui, tels que des échantignoles, qui empêchent la rotation et le déplacement latéral au droit des appuis. Dans la conception et le calcul des détails d'appui, il convient de prendre en compte les efforts dans le plan des plaques nervurées, transmis aux appuis de panne.

(8) Il convient de modéliser le comportement d'une panne maintenue latéralement comme illustré à la Figure 10.1. L'assemblage de la panne sur les plaques de couverture peut être considéré comme maintenant partiellement la panne en rotation. Ce maintien partiel en rotation peut être représenté par un ressort de rotation avec une rigidité élastique C_{D}. Il convient alors de calculer les contraintes s'exerçant dans la semelle libre, non directement assemblée aux plaques, en superposant les effets de la flexion principale et les effets de la torsion, y compris la flexion latérale résultant de la distorsion de la section transversale. Il convient de déterminer le maintien en rotation conféré par la plaque nervurée suivant 10.1.5.

(9) Lorsque la semelle libre d'une panne sur deux appuis simples est comprimée sous l'effet du soulèvement, il convient également de tenir compte de l'amplification des contraintes due à la torsion et à la distorsion de la section transversale.

(10) La rigidité au cisaillement des plaques nervurées assemblées à la panne au droit de chaque nervure et couturées au droit de chaque recouvrement transversal, peut être calculée comme suit

$$S = 1000 \sqrt{t^3}\, (50 + 10 \sqrt[3]{b_{\mathrm{roof}}}\,) \frac{s}{h_{\mathrm{w}}} \qquad \text{(N),} \quad t \text{ et } b_{\mathrm{roof}} \text{ en mm} \tag{10.1b}$$

où t est l'épaisseur de calcul des plaques, b_{roof} est la largeur du toit, s est la distance entre pannes et h_{w} est la hauteur des nervures de plaques. Toutes les dimensions sont données en mm. Pour les plateaux, la rigidité au cisaillement est S_{v} fois la distance entre les pannes, où S_{v} est calculé selon 10.3.5(6).

10.1.2 Méthodes de calcul

(1) A moins qu'une analyse au second ordre ne soit effectuée, il convient d'utiliser la méthode donnée en 10.1.3 et 10.1.4 pour tenir compte de la tendance de la semelle libre à se déplacer latéralement (générant ainsi des contraintes supplémentaires) en la traitant comme une poutre soumise à une charge latérale $q_{h,Ed}$, voir Figure 10.1.

(2) Dans le cadre de cette méthode, il convient de remplacer le ressort en rotation par un ressort linéaire latéral équivalent de rigidité *K*. Pour la détermination de *K*, il convient également de prendre en compte les effets de la distorsion de la section transversale. Pour ce faire, la semelle libre peut être traitée comme une barre comprimée soumise à un effort axial non uniforme, avec un appui élastique latéral continu de rigidité *K*.

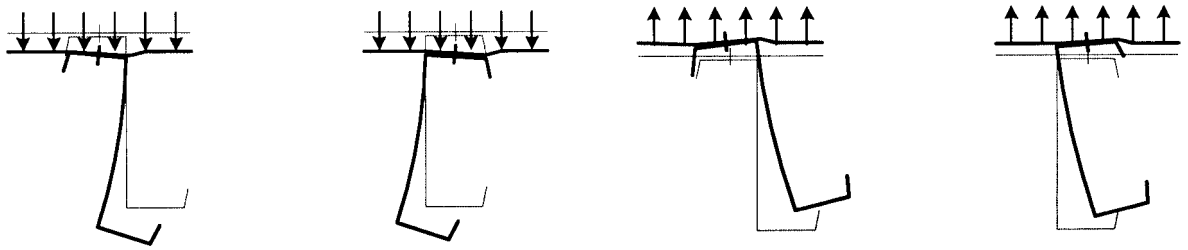
(3) Si la semelle libre d'une panne est comprimée par la flexion principale (par exemple à cause du soulèvement pour une panne sur deux appuis simples), il convient également de vérifier la résistance de la semelle libre au flambement latéral.

(4) Pour un calcul plus précis, il convient d'effectuer une analyse numérique en utilisant les valeurs de la rigidité du ressort en rotation C_D obtenues d'après 10.1.5.2. Il convient de tenir compte des effets d'une imperfection initiale en arc (e_o) de la semelle libre, définie au 5.3. Il convient de retenir une imperfection initiale compatible avec la forme du mode de flambement approprié, déterminée par les vecteurs propres résultant d'une analyse de flambement élastique de premier ordre.

(5) Une analyse numérique faisant appel à la rigidité du ressort en rotation C_D suivant 10.1.5.2 peut également être utilisée si le maintien latéral n'est pas défini ou si son efficacité ne peut être démontrée. Lorsqu'une analyse numérique est effectuée, il convient de tenir compte de la flexion dans deux directions, de la rigidité de torsion de St Venant et de la rigidité au gauchissement par rapport à l'axe de rotation imposé.

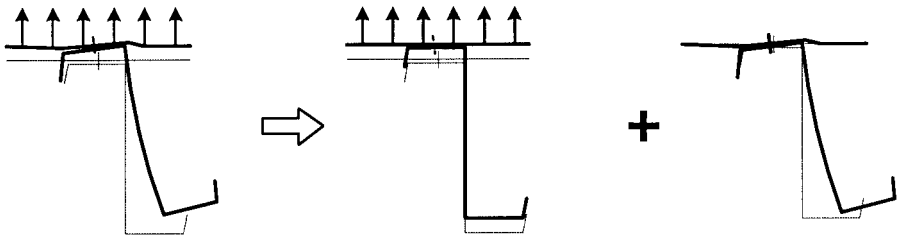
(6) Lorsqu'une analyse au second ordre est effectuée, il convient de tenir compte des sections et rigidité efficaces déterminées en tenant compte du voilement local.

NOTE Pour un calcul simplifié des pannes de type C-, Z- et Σ se reporter à l'Annexe E.



Charge de gravité Charge de soulèvement

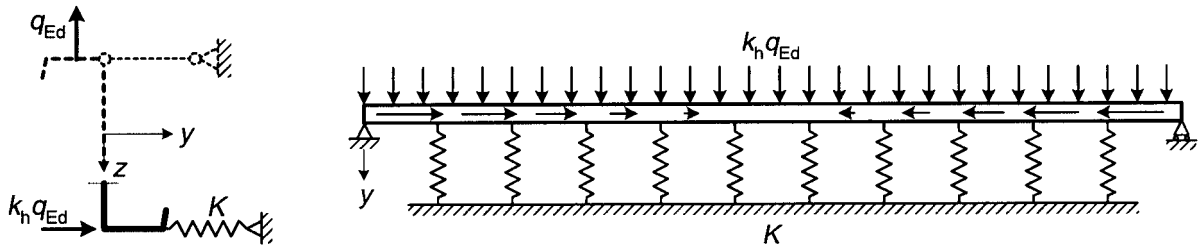
a) panne de section en Z ou en C dont la semelle supérieure est fixée aux plaques nervurées



Flexion principale Torsion et flexion latérale

b) La déformation totale se décompose en deux parties

c) Panne modélisée comme tenue latéralement avec maintien élastique en rotation C_D assuré par les plaques nervurées



d) par simplification, substituer un ressort latéral de rigidité K au ressort en rotation C_D

e) Semelle libre de la panne modélisée comme une poutre sur appui élastique. Modèle représentant les effets de la torsion et de la flexion latérale (y compris les effets de la distorsion de la section transversale) sur une panne sur deux appuis simples avec charge de soulèvement.

Figure 10.1 - Modélisation de pannes tenues latéralement et maintenues en rotation par des plaques nervurées

10.1.3 Critères de calcul

10.1.3.1 Pannes sur deux appuis simples

(1) Il convient de vérifier qu'une panne sur deux appuis simples, soumise à un chargement de gravité, satisfait les critères de résistance en section donnés en 10.1.4.1. Si elle est soumise à un effort normal de compression, il convient également de vérifier les critères de stabilité de la semelle libre donnés en 10.1.4.2.

(2) Il convient de vérifier qu'une panne sur deux appuis simples, soumise à une charge de soulèvement, satisfait les critères de résistance en section donnés en 10.1.4.1 ainsi que les critères de stabilité de la semelle libre donnés en 10.1.4.2.

10.1.3.2 Pannes continues à deux travées avec chargement de gravité

(1) Les moments dus à un chargement de gravité s'exerçant sur une panne physiquement continue sur deux travées sans emboîtement ni éclissage peuvent être déterminés soit par calcul, soit à partir de résultats d'essais.

(2) Si les moments sont déterminés par calcul, il convient qu'ils résultent d'une analyse globale élastique. Il convient de vérifier que la panne satisfait les critères de résistance en section donnés en 10.1.4.1. Sous l'effet du moment sur appui intermédiaire, il convient également de vérifier que les critères de stabilité de la semelle libre donnés en 10.1.4.2 sont satisfaits. Il convient encore de vérifier sur appui intermédiaire l'interaction moment fléchissant + réaction d'appui (voilement de l'âme en l'absence d'échantignole) et l'interaction moment fléchissant + effort tranchant selon le cas considéré.

(3) Comme alternative, les moments peuvent être déterminés à l'aide de résultats d'essais réalisés conformément à la Section 9 et à l'Annexe A.5, relatifs au comportement moment-rotation de la panne au droit de l'appui intermédiaire.

NOTE Des méthodes d'essais appropriées sont données à l'Annexe A.

(4) Il convient de déterminer la valeur de calcul du moment résistant sur appui $M_{sup,Rd}$ pour une valeur donnée de la charge par unité de longueur q_{Ed}, à l'intersection de deux courbes représentant les valeurs de calcul de :

— la caractéristique moment-rotation sur appui, obtenue par des essais conformes aux dispositions de la Section 9 et de l'Annexe A.5 ;

— la relation théorique entre le moment sur appui $M_{sup,Ed}$ et la rotation de rotule plastique correspondante ϕ_{Ed} dans la panne sur appui.

Afin de déterminer la valeur finale de calcul du moment sur appui $M_{sup,Ed}$, il convient de tenir compte de l'effet de la charge latérale sur la semelle libre et/ou de la stabilité au flambement de ladite semelle au droit de l'appui intermédiaire, dont l'essai spécifié en A.5.2 pour l'appui intermédiaire ne tient pas entièrement compte. Lorsque la semelle libre est physiquement continue sur l'appui et lorsque la distance entre ce dernier et la lierne la plus proche est supérieure à 0,5 *s*, il convient de tenir compte de la charge latérale $q_{h,Ed}$ suivant 10.1.4.2 lors de la vérification de la résistance sur appui intermédiaire . Des essais en vraie grandeur pour des pannes à deux ou plusieurs travées peuvent également être utilisés pour déterminer l'effet de la charge latérale sur la semelle libre et/ou la stabilité de celle-ci au voisinage de l'appui intermédiaire.

(5) Il convient alors de déterminer les moments en travée à partir de la valeur du moment sur appui.

(6) Les formules suivantes peuvent être utilisées pour une panne continue à deux travées égales :

$$\phi_{Ed} = \frac{L}{12 E I_{eff}} \left[q_{Ed} L^2 - 8 M_{sup,Ed} \right] \tag{10.2a}$$

$$M_{spn,Ed} = \frac{\left(q_{Ed} L^2 - 2 M_{sup,Rd} \right)^2}{8 q_{Ed} L^2} \tag{10.2b}$$

où :

I_{eff} est le moment d'inertie de la section efficace calculée pour le moment $M_{spn,Ed}$;

L est la portée ;

$M_{spn,Ed}$ est le moment maximum en travée.

(7) Pour les cas de pannes à deux travées inégales et/ou soumises à une charge non uniforme (par exemple accumulation de neige), et pour d'autres cas similaires, les formules (10.2a) et (10.2b) ne sont pas valables et il convient alors d'effectuer une analyse appropriée.

(8) Il convient de vérifier que les critères de résistance en section donnés au 10.1.4.1 sont satisfaits sous l'effet du moment maximum en travée $M_{spn,Ed}$. Le moment résistant en travée peut également être déterminé par essais. Un essai sur travée simple avec une portée voisine de la distance entre points d'inflexion de la travée peut être effectué.

10.1.3.3 Pannes continues à deux travées sous charge de soulèvement

(1) Il convient de déterminer les moments dans une panne physiquement continue à deux travées sans emboîtement ni éclissage, soumise à une charge de soulèvement, par une analyse globale élastique.

(2) Il convient de vérifier que les critères de résistance en section donnés au 10.1.4.1 sont satisfaits sous l'effet du moment sur appui intermédiaire. La réaction d'appui étant un effort de traction, il n'y a pas lieu de tenir compte de son interaction avec le moment sur appui. Il convient également de vérifier la section sur appui intermédiaire pour l'interaction moment fléchissant + effort tranchant.

(3) Il convient de vérifier que les critères de stabilité de la semelle libre donnés au 10.1.4.2 sont satisfaits sous l'effet des moments en travée.

10.1.3.4 Pannes avec semi-continuité par emboîtement ou éclissage

(1) Il convient de déterminer les moments dans les pannes dont la continuité sur deux ou plusieurs travées est réalisée par emboîtement ou éclissage au droit des appuis intermédiaires, en tenant compte des caractéristiques de section efficace et de l'incidence des emboîtements ou éclissages.

(2) Des essais peuvent être effectués sur les dispositifs d'appuis afin de déterminer :

— la rigidité de flexion de la partie emboîtée ou éclissée ;

— la caractéristique moment-rotation de la partie emboîtée ou éclissée. Noter que la redistribution plastique des moments fléchissants peut être utilisée pour les systèmes à emboîtement et à éclissage uniquement lorsque la ruine se produit sur appui avec échantignole ou dispositif similaire empéchant le déplacement latéral au droit de l'appui ;

— la résistance de la partie emboîtée ou éclissée à la combinaison de la réaction d'appui et du moment ;

— la résistance de la partie non emboîtée et non éclissée à la combinaison de l'effort tranchant et du moment fléchissant.

Les caractéristiques des dispositifs d'appui intermédiaire peuvent également être déterminées par des méthodes numériques validées par un nombre d'essais approprié.

(3) Sous charge de gravité, il convient de vérifier les critères suivants :

— sur appuis intermédiaires : résistance sous réaction d'appui et moment combinés, déterminée par exemple par des calculs assistés par des essais ;

— à proximité des appuis : résistance sous effort tranchant et moment fléchissant combinés, déterminée par exemple par des calculs assistés par des essais ;

— en travées : critères de résistance en section donnés au 10.1.4.1;

— si la panne est soumise à un effort normal de compression, : critères de stabilité de la semelle libre donnés au 10.1.4.2.

(4) Sous charge de soulèvement, il convient de vérifier les critères suivants :

— sur appuis intermédiaires : résistance sous réaction d'appui et moment combinés, déterminée par exemple par des calculs assistés par des essais, en tenant compte du fait que la réaction d'appui est un effort de traction dans ce cas ;

— à proximité des appuis : résistance sous effort tranchant et moment fléchissant combinés, déterminée par exemple par des calculs assistés par des essais ;

— en travées : critères de stabilité de la semelle libre donnés au 10.1.4.2 ;

— si la panne est soumise à un effort normal de compression : critères de stabilité de la semelle libre donnés au 10.1.4.2.

10.1.3.5 Critères d'aptitude au service

(1) Il convient également de satisfaire les critères d'aptitude au service applicables aux pannes.

10.1.4 Résistance de calcul

10.1.4.1 Résistance des sections transversales

(1) Pour une panne soumise à un effort normal et à une charge transversale (suivant axe zz), il convient de vérifier la résistance de la section transversale comme indiqué à la Figure 10.2 en superposant les contraintes dues :

— au moment fléchissant dans le plan $M_{y,Ed}$;

— à l'effort normal N_{Ed} ;

— à une charge latérale équivalente $q_{h,Ed}$ agissant sur la semelle libre, résultant de la torsion et de la flexion latérale, voir (3).

(2) Il convient de vérifier que les contraintes maximales dans la section transversale satisfont les critères suivants :

— pour la semelle maintenue :

$$\sigma_{\max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} \leq f_y / \gamma_M \tag{10.3a}$$

— pour la semelle libre :

$$\sigma_{\max,Ed} = \frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}} + \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq f_y / \gamma_M \tag{10.3b}$$

où :

A_{eff} est l'aire efficace de la section transversale soumise uniquement à une compression uniforme ;

f_y est la limite d'élasticité définie au 3.2.1(5) ;

$M_{fz,Ed}$ est le moment fléchissant dans la semelle libre dû à la charge latérale $q_{h,Ed}$, voir formule (10.4) ;

$W_{eff,y}$ est le module de résistance efficace de la section transversale soumise uniquement à une flexion par rapport à l'axe y - y ;

W_{fz} est le module de résistance élastique de la section brute de la semelle libre plus la partie participante de l'âme pour la flexion par rapport à l'axe z-z ; à défaut d'une analyse plus sophistiquée, la partie participante de l'âme peut être prise égale à 1/5 de la hauteur de l'âme à partir du point d'intersection âme-semelle pour les profilés en C ou Z et 1/6 de la hauteur de l'âme pour les profilés Σ, voir Figure 10-2;

et $\gamma_M = \gamma_{M0}$ si $A_{eff} = A_g$ ou si $W_{eff,y} = W_{el,y}$ et $N_{Ed} = 0$, sinon $\gamma_M = \gamma_{M1}$.

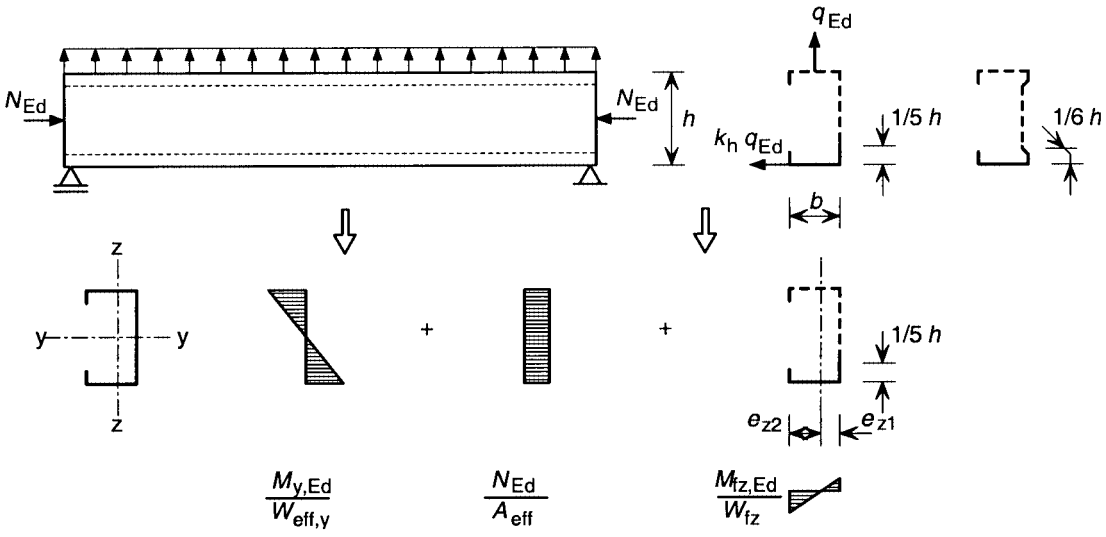
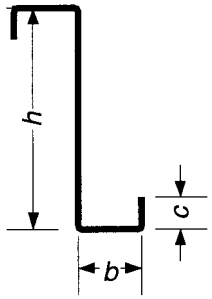


Figure 10.2 - Superposition des contraintes

(3) Il convient de déterminer la charge latérale équivalente $q_{h,Ed}$ agissant sur la semelle libre, résultant de la torsion et de la flexion latérale, à partir de l'équation suivante :

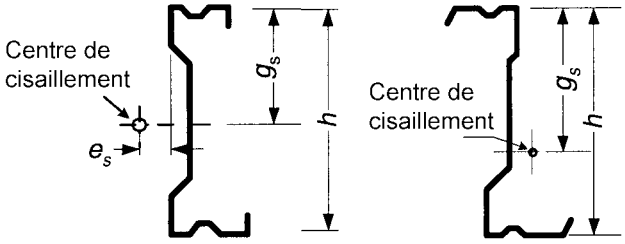
$$q_{h,Ed} = k_h\, q_{Ed} \tag{10.4}$$

(4) Il convient de déterminer le coefficient k_h comme indiqué à la Figure 10.3 pour les types courants de section transversale.



$$k_{h0} = \frac{ht(b^2 + 2cb - 2c^2 b / h)}{4I_y}$$

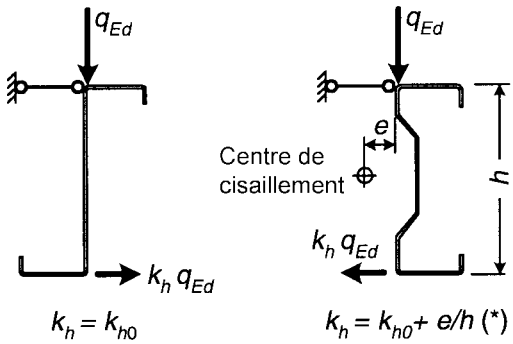
Section Z symétrique simple



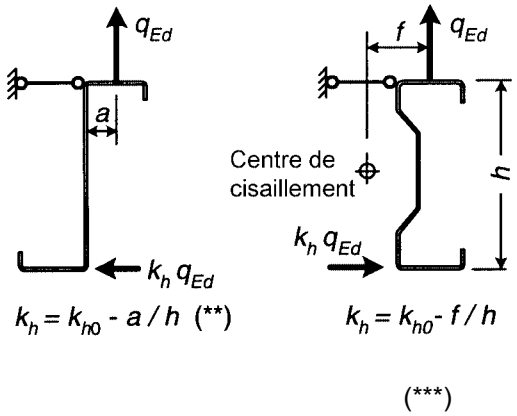
$$k_{h0} = \frac{I_{yz}}{I_y}\frac{g_s}{h}$$

sections Z, C ou Σ

a) k_{h0} facteur de charge latérale sur la semelle inférieure libre. (k_{h0} correspond à l'application d'une charge au droit du centre de cisaillement)



b) Charge de gravité



c) Charge de soulèvement

Centre de cisaillement

k_h Coefficient de charge latérale équivalente

(*) Si le centre de cisaillement se situe à droite de la charge q_{Ed}, la charge latérale agit dans le sens opposé.

(**) Si a/h > kh0, la charge latérale agit dans le sens opposé.

(***) La valeur de f est limitée par la position de la charge qEd entre les bords de la semelle supérieure.

Figure 10.3 - Conversion de la torsion et de la flexion latérale en une charge latérale équivalente $k_h\, q_{Ed}$

(5) Le moment fléchissant latéral $M_{fz,Ed}$ peut être déterminé à partir de l'expression (10.5), sauf dans le cas d'une poutre avec semelle libre en traction, pour laquelle, du fait de l'influence positive de la déformation transversale de la semelle et des effets de second ordre, le moment $M_{fz,Ed}$ peut être pris égal à zéro :

$$M_{fz,Ed} = \kappa_R\, M_{0,fz,Ed} \qquad (10.5)$$

où :

$M_{0,fz,Ed}$ est le moment de flexion latérale initial dans la semelle libre sans appui élastique ;

κ_R est un coefficient de correction pour tenir compte de l'appui élastique.

(6) Le moment de flexion latérale initial dans la semelle libre $M_{0,fz,Ed}$ peut être déterminé à l'aide du Tableau 10.1 pour les différentes sections d'intérêt de la travée, au droit des appuis, au droit des liernes et entre les liernes. La validité du Tableau 10.1 se limite à la plage $R \leq 40$.

(7) Le coefficient de correction κ_R correspondant à une section donnée et à des conditions aux limites données, peut être déterminé à partir du Tableau 10.1 (ou en utilisant la théorie des poutres sur des fondations élastiques), en retenant pour R, rigidité de l'appui élastique, la valeur suivante :

$$R = \frac{K L_a^4}{\pi^4 E I_{fz}} \tag{10.6}$$

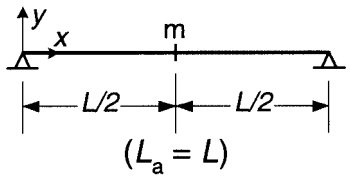
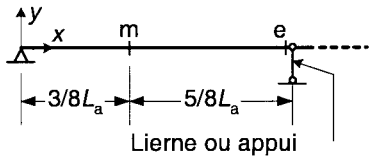
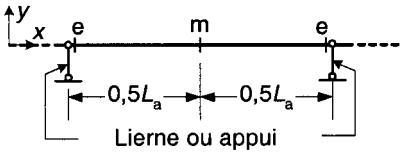
où :

I_{fz} est le moment d'inertie de la section brute de la semelle libre plus la partie partcipante de l'âme pour la flexion par rapport à l'axe z - z, voir 10.1.4.1(2) ; lorsqu'une analyse numérique est effectuée, voir 10.1.2(5) ;

K est la rigidité par unité de longueur de l'appui latéral élastique d'après 10.1.5.1 ;

L_a est la distance entre les liernes, ou en absence de liernes, la portée L de la panne.

Tableau 10.1 - Valeurs du moment initial $M_{0,fz,Ed}$ et du coefficient de correction κ_R

Système	Position	$M_{0,fz,Ed}$	κ_R
	m	$\frac{1}{8} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1-0{,}0225R}{1+1{,}013R}$
	m	$\frac{9}{128} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1-0{,}0141R}{1+0{,}416R}$
	e	$-\frac{1}{8} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1+0{,}0314R}{1+0{,}396R}$
	m	$\frac{1}{24} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1-0{,}0125R}{1+0{,}198R}$
	e	$-\frac{1}{12} q_{h,Ed} L_a^2$	$\kappa_R = \frac{1+0{,}0178R}{1+0{,}191R}$

10.1.4.2 Résistance au flambement de la semelle libre

(1) Si la semelle libre est comprimée, il convient de vérifier sa résistance au flambement comme suit :

$$\frac{1}{\chi_{LT}}\left(\frac{M_{y,Ed}}{W_{eff,y}}+\frac{N_{Ed}}{A_{eff}}\right) + \frac{M_{fz,Ed}}{W_{fz}} \leq f_{yb}/\gamma_{M1} \tag{10.7}$$

où χ_{LT} est le coefficient de réduction pour le déversement (flambement par flexion de la semelle libre)

NOTE La valeur de χ_{LT} peut être donnée dans l'Annexe Nationale. L'application de 6.3.2.3 de l'EN 1993-1-1. en utilisant la courbe de flambement b (α_{LT} = 0,34, $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0,4$, β= 0,75) est recommandée avec l'élancement relatif $\bar{\lambda}_{fz}$ donné en (2). En présence d'un effort normal de compression N_{Ed}, si le coefficient de réduction correspondant au flambement par rapport à l'axe fort est inférieur au coefficient de réduction correspondant au flambement latéral de la semelle, par exemple dans le cas d'un grand nombre de liernes, il convient également de vérifier ce mode de ruine suivant 6.2.2 et 6.2.4.

(2) Il convient de déterminer l'élancement relatif $\bar{\lambda}_{fz}$ pour le flambement par flexion de la semelle libre par :

$$\bar{\lambda}_{fz} = \frac{l_{fz}/i_{fz}}{\lambda_1} \tag{10.8}$$

avec :

$$\lambda_1 = \pi\left[E/f_{yb}\right]^{0,5}$$

où :

l_{fz} est la longueur de flambement de la semelle libre d'après (3) à (7) ;

i_{fz} est le rayon de giration de la section transversale brute de la semelle libre plus la partie participante de l'âme, pour la flexion par rapport à l'axe z - z, voir 10.1.4.1(2).

(3) Pour une charge de gravité, à condition que $0 \leq R \leq 200$, la longueur de flambement de la semelle libre sous compression variable tel qu'indiqué à la Figure 10.4 peut être prise égale à :

$$l_{fz} = \eta_1 L_a \left(1+\eta_2 R^{\eta_3}\right)^{\eta_4} \tag{10.9}$$

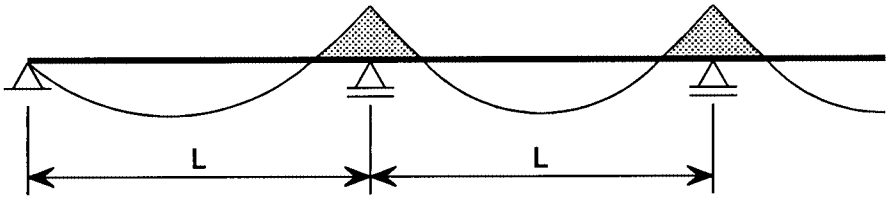
où :

L_a est la distance entre les liernes, ou en absence de liernes, l*a portée L* de la panne ;

R est défini au 10.1.4.1(7) ;

et η_1 à η_4 sont des coefficients qui dépendent du nombre de liernes, comme indiqué dans le Tableau 10.2a. Les Tableaux 10.2a et 10.2b sont valables uniquement pour les poutres soumises à une charge uniforme et à travées égales sans emboîtement ni éclissage, comprenant des liernes qui assurent un appui latéral rigide pour la semelle libre. Les Tableaux peuvent être utilisés pour des systèmes avec emboîtement ou éclissage à condition que le dispositif d'assemblage puisse être considéré comme réalisant une continuité complète. Dans les autres cas, il convient de déterminer la longueur de flambement au moyen de calculs plus appropriés ou d'utiliser les valeurs du Tableau 10.2a pour le cas de 3 liernes par travée, sauf pour les consoles.

NOTE : du fait de la rotation des assemblages par emboîtement ou éclissage, les moments en travées peuvent être nettement plus importants que dans le cas d'une continuité parfaite ; il en résulte également des longueurs de flambement plus importantes. Négliger la distribution réelle des moments fléchissants peut conduire à un dimensionnement insuffisant.



[Les zones grisées indiquent les parties comprimées]

Figure 10.4 - Variations de la contrainte de compression dans la semelle libre pour les cas de charge de gravité

Tableau 10.2.a - Coefficients η_i pour une charge descendante avec 0, 1, 2, 3, 4 liernes

Situation	Nombre de liernes	η_1	η_2	η_3	η_4
Travée d'extrémité	0	0.414	1.72	1.11	-0.178
Travée intermédiaire		0.657	8.17	2.22	-0.107
Travée d'extrémité	1	0.515	1.26	0.868	-0.242
Travée intermédiaire		0.596	2.33	1.15	-0.192
Travée d'extrémité et intermédiaire	2	0.596	2.33	1.15	-0.192
Travée d'extrémité et intermédiaire	3 et 4	0.694	5.45	1.27	-0.168

Tableau 10.2b - Coefficients η_i pour une charge de soulèvement avec 0, 1, 2, 3, 4 liernes

Situation	Nombre de liernes	η_1	η_2	η_3	η_4
Travée simple	0	0.694	5.45	1.27	-0.168
Travée d'extrémité		0.515	1.26	0.868	-0.242
Travée intermédiaire		0.306	0.232	0.742	-0.279
Travées simple et d'extrémité	1	0.800	6.75	1.49	-0.155
Travée intermédiaire		0.515	1.26	0.868	-0.242
Travée simple	2	0.902	8.55	2.18	-0.111
Travées d'extrémité et intermédiaire		0.800	6.75	1.49	-0.155
Travées simple et d'extrémité	3 et 4	0.902	8.55	2.18	-0.111
Travée intermédiaire		0.800	6.75	1.49	-0.155

(4) Pour des charges de gravité, il n'est pas nécessaire, en présence de plus de trois liernes également espacées et dans les conditions spécifiées en (3), de prendre une longueur de flambement supérieure à la valeur donnée pour deux liernes, avec $L_a = L/3$. Cette clause n'est valable qu'en absence d'effort normal de compression.

(5) Si la contrainte de compression sur la longueur L est presque constante, en raison de l'application d'un effort normal relativement important, il convient de déterminer la longueur de flambement à l'aide des valeurs de η_i prises dans le Tableau 10.2a pour le cas présenté avec plus de trois liernes par travée, mais avec l'espacement réel L_a.

(6) Pour des charges de soulèvement, en absence de liernes et à condition que $0 \leq R_0 \leq 200$, la longueur de flambement de la semelle libre sous compression variable sur la longueur L_0 tel qu'indiqué à la Figure 10.5, peut être prise égale à :

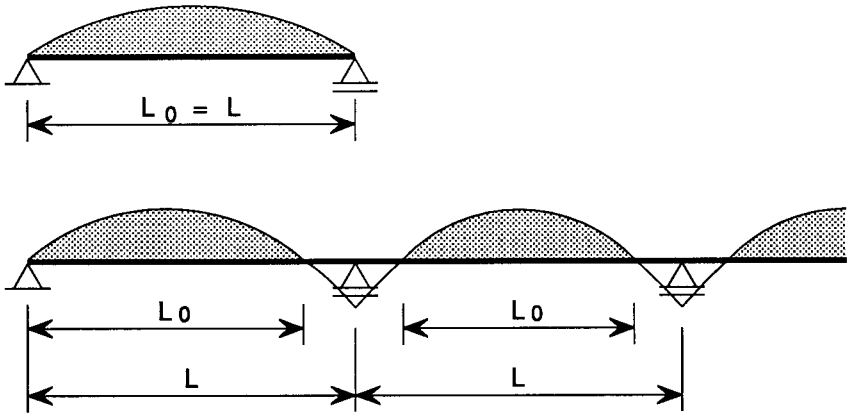
$$l_{fz} = 0{,}7\, L_0\, (1 + 13{,}1\, R_0^{1{,}6})^{-0{,}125} \tag{10.10a}$$

avec :

$$R_0 = \frac{K\, L_0^4}{\pi^4\, E\, I_{fz}} \tag{10.10b}$$

où l_{fz} et K sont telles que définies au 10.1.4.1(7). La longueur de flambement de la semelle libre peut également être déterminée à l'aide du Tableau 10.2b combiné à l'équation donnée au 10.1.4.2(3).

(7) Pour des charges de soulèvement, si la semelle libre est efficacement maintenue latéralement par des liernes, la longueur de flambement peut être prise, en se plaçant du côté de la sécurité, égale à celle utilisée pour un moment uniforme, déterminée comme décrit en (5). La formule (10.10a) peut être appliquée dans les conditions spécifiées en (3). En absence de calculs appropriés, il convient de faire référence au 10.1.4.2(5).



[Les zones grisées indiquent les parties comprimées]

Figure 10.5 - Variations de la contrainte de compression dans la semelle libre pour les cas de charge de soulèvement

10.1.5 Maintien en rotation assuré par les plaques nervurées

10.1.5.1 Rigidité de l'appui élastique latéral

(1) Il convient de modéliser l'appui élastique latéral conféré à la semelle libre de la panne par les plaques nervurées comme un ressort latéral agissant au niveau de la semelle libre, voir Figure 10.1. Il convient de déterminer la rigidité élastique latérale totale K par unité de longueur par :

$$\frac{1}{K} = \frac{1}{K_A} + \frac{1}{K_B} + \frac{1}{K_C} \tag{10.11}$$

où :

K_A est la rigidité latérale correspondant à la rigidité en rotation de l'assemblage entre la couverture et la panne ;

K_B est la rigidité latérale résultant de la distorsion de la section transversale de la panne ;

K_C est la rigidité latérale résultant de la rigidité de flexion des plaques nervurées.

(2) Il peut généralement être acceptable du point de vue de la sécurité de négliger $1/K_C$ étant donné que la valeur de K_C est très grande par rapport aux valeurs de K_A et K_B. Il convient alors de déterminer K par :

$$K = \frac{1}{\left(1/K_A + 1/K_B\right)} \tag{10.12}$$

(3) La valeur de $(1 / K_A + 1 / K_B)$ peut être déterminée soit par des essais, soit par le calcul.

NOTE Des méthodes d'essais appropriées sont données à l'Annexe A.

(4) La rigidité de l'appui élastique latéral K par unité de longueur peut être déterminée par le calcul à l'aide de l'équation suivante :

$$\frac{1}{K} = \frac{4\,(1-\nu^2)\;h^2\;(h_d + b_{mod})}{E\,t^3} + \frac{h^2}{C_D} \tag{10.13}$$

où la dimension b_{mod} est déterminée comme suit :

— pour les cas où l'effort latéral équivalent $q_{h,Ed}$ amène la panne en contact avec les plaques nervurées au droit de l'âme de la panne :

$b_{mod} = a$

— pour les cas où l'effort latéral équivalent $q_{h,Ed}$ amène la panne en contact avec les plaques nervurées au bord de la semelle de la panne :

$b_{mod} = 2a + b$

où :

t est l'épaisseur de la panne ;

a est la distance entre la fixation plaque-panne et l'âme de la panne, voir Figure 10.6 ;

b est la largeur de la semelle de la panne assemblée aux plaques nervurées, voir Figure 10.6 ;

C_D est la rigidité élastique totale en rotation d'après 10.1.5.2 ;

h est la hauteur hors-tout de la panne ;

h_d est la hauteur développée de l'âme de la panne, voir Figure 10.6.

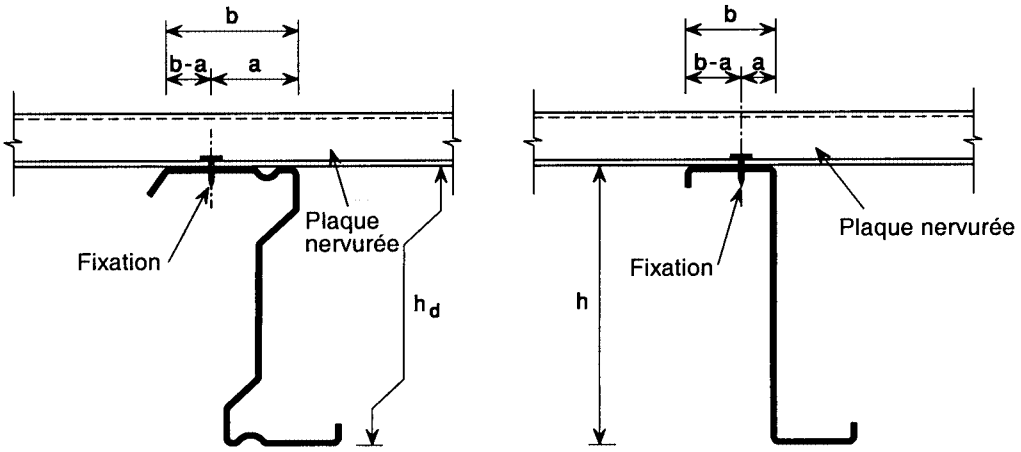


Figure 10.6 - Assemblage panne sur plaque nervurée

10.1.5.2 Rigidité élastique en rotation

(1) Il convient de modéliser l'encastrement en rotation conféré à la panne par une plaque nervurée fixée sur sa semelle supérieure, comme un ressort en rotation situé au niveau de la semelle supérieure de la panne, voir Figure 10.1. Il convient de déterminer la rigidité élastique totale en rotation C_D à partir de l'équation suivante :

$$C_D = \frac{1}{\left(1 / C_{D,A} + 1 / C_{D,C}\right)} \tag{10.14}$$

où :

$C_{D,A}$ est la rigidité en rotation de l'assemblage panne - couverture ;

$C_{D,C}$ est la rigidité en rotation correspondant à la rigidité de flexion de la plaque.

(2) En règle générale, $C_{D,A}$ peut être calculée comme indiqué en (5) et (7). Sa valeur peut également être déterminée par des essais, voir (9).

(3) On peut retenir pour $C_{D,C}$ le minimum des valeurs obtenues à partir des modèles de calcul représentés à la Figure 10.7, en tenant compte des rotations des pannes adjacentes et du degré de continuité des plaques nervurées, à l'aide de la relation suivante :

$$C_{D,C} = m / \theta \tag{10.15}$$

où :

m est le moment par unité de largeur de plaque, appliqué comme indiqué à la Figure 10.7 ;

θ est la rotation résultante, mesurée telle qu'indiquée à la Figure 10.7 [radians].

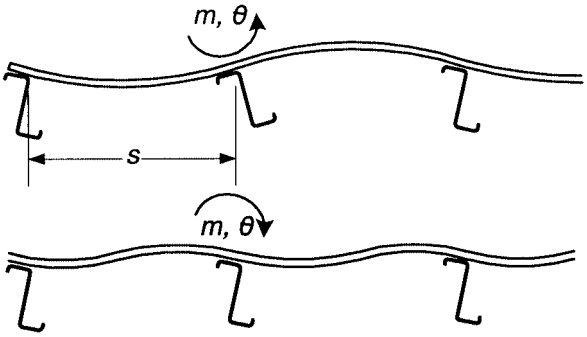


Figure 10.7 - Modèle pour le calcul de $C_{D,C}$

(4) Une valeur de $C_{D,C}$ plaçant en sécurité peut également être obtenue à l'aide de l'équation suivante :

$$C_{D,C} = \frac{k\ E\ I_{eff}}{s} \tag{10.16}$$

où k est un coefficient prenant les valeurs suivantes :

— Panne de rive, en haut de la Figure 10.7 $k = 2$;
— Panne de rive, en bas de la Figure 10.7 $k = 3$;
— Panne intermédiaire, en haut de la Figure 10.7 $k = 4$;
— Panne intermédiaire, en bas de la Figure 10.7 $k = 6$;

où :

I_{eff} est le moment d'inertie de la section efficace de la plaque nervurée

s est l'espacement des pannes.

(5) A condition que les fixations panne - couverture soient centrées sur la semelle de la panne, la valeur de $C_{D,A}$ pour des plaques à nervures trapézoïdales assemblées sur la semelle supérieure de la panne peut être déterminée comme suit (voir Tableau 10.3) :

$$C_{D,A} = C_{100} \cdot k_{ba} \cdot k_t \cdot k_{bR} \cdot k_A \cdot k_{bT} \tag{10.17}$$

où

$k_{ba} = (b_a / 100)^2$ si $b_a < 125\text{mm}$;

$k_{ba} = 1{,}25(b_a / 100)$ si $125\text{mm} \le b_a < 200\text{mm}$;

$k_t = (t_{nom} / 0{,}75)^{1{,}1}$ si $t_{nom} \ge 0{,}75\text{mm}$; position positive ;

$k_t = (t_{nom} / 0{,}75)^{1{,}5}$ si $t_{nom} \ge 0{,}75\text{mm}$; position négative ;

$k_t = (t_{nom} / 0{,}75)^{1{,}5}$ si $t_{nom} < 0{,}75\text{mm}$;

$k_{bR} = 1{,}0$ si $b_R \le 185\text{mm}$;

$k_{bR} = 185 / b_R$ si $b_R > 185\text{mm}$;

pour les charges de gravité :

$k_A = 1{,}0 + (A - 1{,}0) \cdot 0{,}08$ si $t_{nom} = 0{,}75\text{mm}$; position positive ;

$k_A = 1{,}0 + (A - 1{,}0) \cdot 0{,}16$ si $t_{nom} = 0{,}75\text{mm}$; position négative ;

$k_A = 1{,}0 + (A - 1{,}0) \cdot 0{,}095$ si $t_{nom} = 1{,}00\text{mm}$; position positive ;

$k_A = 1{,}0 + (A - 1{,}0) \cdot 0{,}095$ si $t_{nom} = 1{,}00\text{mm}$; position négative ;

- interpolation linéaire permise entre t = 0,75mm et t = 1mm ;.
- formules non valables pour t < 0,75mm.
- Pour t > 1mm : utiliser les formules données pour t = 1mm

pour les charges de soulèvement :

$k_A = 1{,}0$;

$k_{bT} = \sqrt{\dfrac{b_{T,max}}{b_T}}$ si $b_T > b_{T,max}$, sinon $k_{bT} = 1$;

A [kN/m] ≤ 12 kN/m : charge, transmise par la couverture à la panne ;

où :

b_a	est la largeur de la semelle de la panne [en mm] ;
b_R	est la largeur de nervure [en mm] ;
b_T	est la largeur de la semelle de la plaque nervurée dans laquelle la panne est fixée;
$b_{T,max}$	est donné au Tableau 10.3 ;
C_{100}	est un coefficient de rotation, représentant la valeur de $C_{D,A}$ si b_a = 100 mm.

(6) A condition qu'aucune isolation ne soit interposée entre pannes et couverture, la valeur du coefficient de rotation C_{100} peut être obtenue au Tableau 10.3.

(7) La valeur de $C_{D,A}$ peut, également, être prise égale à 130 *p* [Nm/m/rad], où *p* est le nombre de fixations panne - couverture par mètre linéaire de panne (mais pas plus d'une fixation par nervure), à condition que :

— la largeur de la semelle *b* de la plaque nervurée au travers de laquelle la panne est fixée ne soit pas supérieure à 120 mm ;

— l'épaisseur nominale *t* de la plaque nervurée soit d'au moins 0,66 mm ;

— la distance *a* ou *b* - *a* entre l'axe de la fixation et le centre de rotation de la panne (selon le sens de rotation), telle qu'indiquée à la Figure 10.6, soit d'au moins 25 mm.

(8) Si les effets de distorsion de la section transversale doivent être pris en compte, voir 10.1.5.1, il paraît réaliste de négliger $C_{D,C,}$ étant donné que la rigidité de l'appui élastique est principalement influencée par la valeur de $C_{D,A}$ et par la distorsion de la section transversale.

(9) Les valeurs de $C_{D,A}$ peuvent également être obtenues par une combinaison d'essais et de calcul.

(10)Si la valeur de (1 / K_A + 1 / K_B) est obtenue par des essais (en *mm/N* conformément au A.5.3(3)), il convient de déterminer les valeurs de $C_{D,A}$ pour les charges de gravité et pour les charges de soulèvement à partir de l'équation suivante :

$$C_{D,A} = \frac{h^2 / l_A}{(1/K_A + 1/K_B) - 4\,(1-\nu^2)\,h^2\,(h_d + b_{mod})/(E\,t^3\,l_B)} \qquad (10.18)$$

où b_{mod}, *h* et h_d sont définies au 10.1.5.1(4) et où l_A est la largeur modulaire de la plaque soumise à essai et l_B est la longueur de la poutre soumise à essai.

NOTE Pour les essais, voir l'Annexe A.5.3(3).

Tableau 10.3 - Coefficient de rotation C_{100} pour les plaques à nervures trapézoïdales

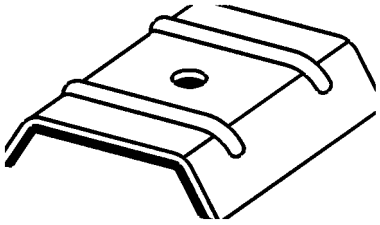
Positionnement de la plaque		Tôle fixée en		Espacement des fixations		Diamètre des rondelles [mm]	C_{100}	$b_{T,max}$
Positif 1)	Négatif 1)	fond de nervure	sommet de nervure	$e = b_R$	$e = 2b_R$		[kNm/m]	[mm]
Pour les charges de gravité :								
×		×		×		22	5,2	40
×		×			×	22	3,1	40
	×		×	×		K_a	10,0	40
	×		×		×	K_a	5,2	40
	×	×		×		22	3,1	120
	×	×			×	22	2,0	120
Pour les charges de soulèvement :								
×		×		×		16	2,6	40
×		×			×	16	1,7	40

Légende :

b_R est le pas des nervures ;

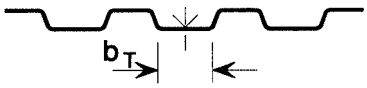
b_T est la largeur de la semelle de la nervure sur laquelle la panne est fixée.

K_a indique la présence de cavaliers en acier avec t ≥ 0,75 mm comme illustré ci-dessous

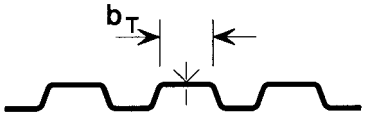


Tôle fixée :

- en fond de nervure :



- en sommet de nervure :



Les valeurs figurant dans ce tableau sont valables pour :

- des vis de fixation des tôles de diamètre : ϕ = 6,3 mm;
- des rondelles en acier d'épaisseur : $t_w \geq$ 1,0 mm.

1) La position des plaques est déclarée positive lorsque la semelle étroite (creux d'onde) est en contact avec la panne et est déclarée négative lorsque la semelle large (plage) est en contact avec la panne.

10.1.6 Forces exercées sur les fixations panne/couverture et réactions d'appui

(1) Il convient de vérifier que les fixations panne/couverture résistent à la combinaison d'un effort de cisaillement (q_s *e)*, parallèle à la semelle, et d'un effort de traction (q_t *e*) où q_s et q_t peuvent être calculés en utilisant le Tableau 10.4 et où *e* est l'espacement entre fixations. Il convient de tenir compte, dans le calcul de l'effort de cisaillement, de la part résultant de l'effet stabilisateur, voir EN 1993-1-1. Par ailleurs, il convient d'ajouter vectoriellement à q_s l'effort de cisaillement dû à l'effet diaphragme, agissant parallèlement à la semelle..

Tableau 10.4 - Efforts de cisaillement et de traction exercés sur les fixations le long de la poutre

Type de poutre et de chargement	Effort de cisaillement par unité de longueur q_s	Effort de traction par unité de longueur q_t
Poutre en Z, charge de gravité	$(1+\xi)k_h q_{Ed}$, peut être pris égal à 0	0
Poutre en Z, charge de soulèvement	$(1+\xi)(k_h - a/h)q_{Ed}$	$\lvert \xi k_h q_{Ed} h/a \rvert + q_{Ed}$ $(a \cong b/2)$
Poutre en C, charge de gravité	$(1-\xi)k_h q_{Ed}$	$\xi k_h q_{Ed} h/a$
Poutre en C, charge de soulèvement	$(1-\xi)(k_h - a/h)q_{Ed}$	$\xi k_h q_{Ed} h/(b-a) + q_{Ed}$

(2) Il convient de vérifier que les assemblages des pannes sur appuis sont aptes à transmettre la réaction d'appui R_w dans le plan de l'âme et les réactions d'appui transversales R_1 et R_2 dans le plan des semelles, voir Figure 10.8. Les forces R_1 et R_2 peuvent être calculées à l'aide du Tableau 10.5. Il convient d'inclure à la force R_2 la composante des charges parallèle à la toiture pour les toitures inclinées. Si R_1 est positive, aucun effort de traction ne s'exerce sur la fixation. Il convient de s'assurer que la force R_2 est transmise de la couverture à la semelle supérieure de la panne et au-delà, à la poutre principale par l'intermédiaire de l'assemblage panne/poutre principale (échantignole ou autres connecteurs particuliers), voire directement à un élément support ou autre élément similaire. Les réactions sur appui intermédiaire d'une panne continue peuvent être prises égales à 2,2 fois les valeurs données dans le Tableau 10.5.

NOTE Pour les toitures inclinées, les charges transversales appliquées aux pannes sont les composantes perpendiculaires (au plan de la toiture) des charges verticales, les composantes parallèles des charges verticales agissent dans le plan de la toiture.

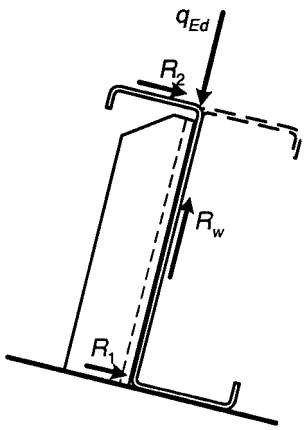


Figure 10.8 - Forces de réaction au droit de l'appui

Tableau 10.5 - Réactions d'appui pour une poutre sur deux appuis simples

Type de poutre et de chargement	Réaction R_1 au niveau de la semelle inférieure	Réaction R_2 au niveau de la semelle supérieure
Poutre en Z, charge de gravité	$(1-\varsigma)k_h q_{Ed} L/2$	$(1+\varsigma)k_h q_{Ed} L/2$
Poutre en Z, charge de soulèvement	$-(1-\varsigma)k_h q_{Ed} L/2$	$-(1+\varsigma)k_h q_{Ed} L/2$
Poutre en C, charge de gravité	$-(1-\varsigma)\,k_h q_{Ed} L/2$	$(1-\varsigma)\,k_h q_{Ed} L/2$
Poutre en C, charge de soulèvement	$(1-\varsigma)\,k_h q_{Ed} L/2$	$-(1-\varsigma)\,k_h q_{Ed} L/2$

(3) Le coefficient ζ peut être pris égal à $\zeta = \sqrt[3]{\kappa_R}$, où κ_R est le coefficient de correction donné au Tableau 10.1, et le coefficient ξ peut être pris égal à $\xi = \sqrt[3]{\zeta}$.

10.2 Plateaux maintenus par des plaques nervurées

10.2.1 Généralités

(1) Il convient d'utiliser des plateaux de section en large U, avec deux semelles étroites, deux âmes et une plage, en général comme illustré à la Figure 10.9. Il convient de maintenir latéralement les deux semelles étroites au moyen de plaques nervurées en acier.

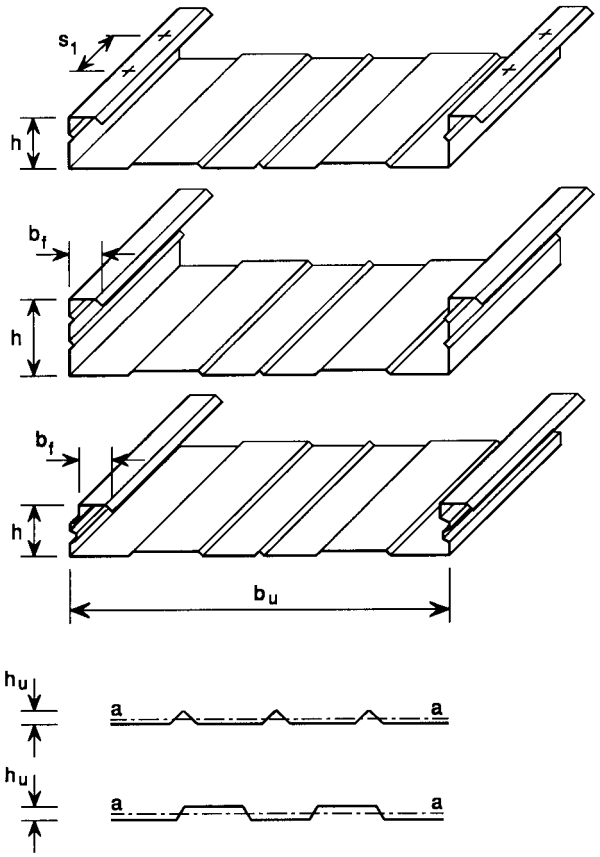


Figure 10.9 - Géométrie typique des plateaux

(2) Il convient de déterminer la résistance des âmes des plateaux aux efforts de cisaillement et aux forces transversales locales à l'aide des paragraphes 6.1.5 à 6.1.11, en utilisant la valeur de $M_{c,Rd}$ donnée par (3) ou (4).

(3) Le moment résistant $M_{c,Rd}$ d'un plateau peut être obtenu par 10.2.2 à condition que :

— les caractéristiques géométriques se situent dans le domaine indiqué au Tableau 10.6 ;

— la profondeur h_u des nervures de la plage ne dépasse pas $h/8$, où h est la hauteur hors-tout du plateau.

(4) Le moment résistant d'un plateau peut également être déterminé par des essais à condition de s'assurer que le comportement local du plateau n'est pas affecté par le dispositif d'essai.

NOTE Des méthodes d'essais appropriées sont données à l'Annexe A.

Tableau 10.6 - Domaine de validité de 10.2.2

0,75 mm ≤	t_{nom}	≤	1,5 mm
30 mm ≤	b_f	≤	60 mm
60 mm ≤	h	≤	200 mm
300 mm ≤	b_u	≤	600 mm
	I_a / b_u	≤	10 mm^4 / mm
	s_1	≤	1000 mm

10.2.2 Moment résistant

10.2.2.1 Plage comprimée

(1) Il convient de déterminer le moment résistant d'un plateau dont la plage est comprimée à l'aide de la méthode pas à pas illustrée à la Figure 10.10 de la manière suivante :

Etape 1 : Déterminer les aires efficaces de tous les éléments comprimés de la section transversale, sur la base des valeurs du rapport de contraintes $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ obtenues en utilisant les largeurs efficaces des semelles comprimées et les aires brutes des âmes ;

- **Etape 2** : Déterminer le centre de gravité de la section transversale efficace, puis calculer le moment résistant $M_{c,Rd}$ par :

$$M_{c,Rd} = 0{,}8\, W_{eff,min}\, f_{yb} / \gamma_{M0} \qquad (10.19)$$

avec :

$W_{eff,min} = I_{y,eff} / z_c$ mais $W_{eff,min} \leq I_{y,eff} / z_t$;

où z_c et z_t sont tels qu'indiqués à la Figure 10.10.

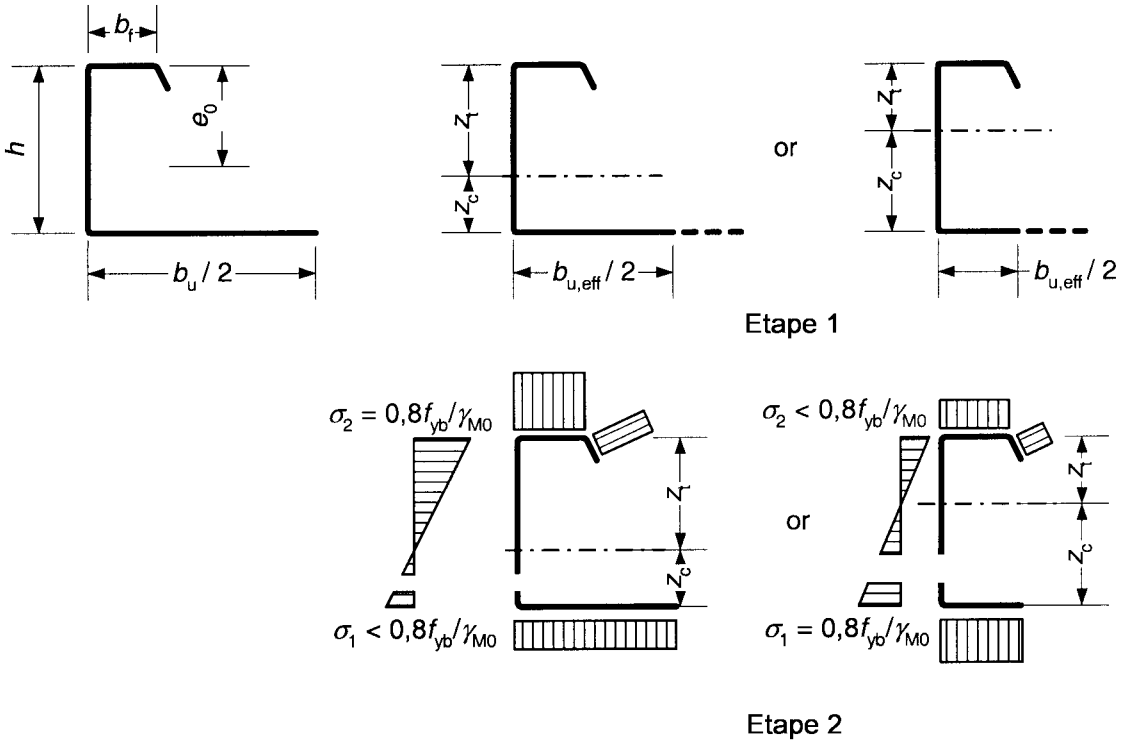


Figure 10.10 - Détermination du moment résistant — plage comprimée

10.2.2.2 Plage tendue

(1) Il convient de déterminer le moment résistant d'un plateau dont la plage est tendue à l'aide de la méthode pas à pas illustrée à la Figure 10.11 de la manière suivante :

Etape 1 : Déterminer le centre de gravité de la section transversale brute ;

Etape 2 : Calculer la largeur efficace de la plage $b_{u,eff}$, en tenant compte de sa déformation transversale, à l'aide de l'équation suivante :

$$b_{u,eff} = \frac{53,3 \cdot 10^{10}\, e_o^{\,2}\, t^3\, t_{eq}}{h\, L\, b_u^{\,3}} \tag{10.20}$$

où :

b_u est la largeur hors-tout de la plage ;

e_o est la distance entre l'axe neutre de la section transversale brute et l'axe neutre des semelles étroites ;

h est la hauteur hors-tout du plateau ;

L est la portée du plateau ;

t_{eq} est l'épaisseur équivalente de la plage, donnée par :

$$t_{eq} = (12\, I_a / b_u)^{1/3}$$

I_a est le moment d'inertie de la plage, par rapport à son propre axe neutre, voir Figure 10.9.

Etape 3 : Déterminer les aires efficaces de tous les éléments comprimés, sur la base des valeurs du rapport de contraintes $\psi = \sigma_2 / \sigma_1$ obtenues en utilisant les largeurs efficaces des semelles et les aires brutes des âmes ;

-**Etape 4** : Déterminer le centre de gravité de la section transversale efficace, puis calculer le moment résistant de flambement $M_{b,Rd}$ à l'aide de l'équation suivante :

$$M_{b,Rd} = 0{,}8\, \beta_b\, W_{eff,com}\, f_{yb} / \gamma_{M0} \quad \text{mais} \quad M_{b,Rd} \leq 0{,}8\, W_{eff,t}\, f_{yb} / \gamma_{M0} \tag{10.21}$$

avec :

$W_{eff,com} = I_{y,eff} / z_c$

$W_{eff,t} = I_{y,eff} / z_t$

où le coefficient de corrélation β_b est donné par les équations suivantes :

- si $s_1 \leq 300$ mm :

$\beta_b = 1{,}0$

- si 300 mm $\leq s_1 \leq$ 1000 mm :

$$\beta_b = 1{,}15 - (s_1 / 2000)$$

où :

s_1 est l'espacement longitudinal entre fixations conférant un maintien latéral aux semelles, voir Figure 10.9.

(2) Il n'est pas nécessaire de tenir compte des effets du traînage de cisaillement si $L / b_{u,eff} \geq 25$. Dans les autres cas, il convient de déterminer une valeur réduite de ρ comme spécifié au 6.1.4.3.

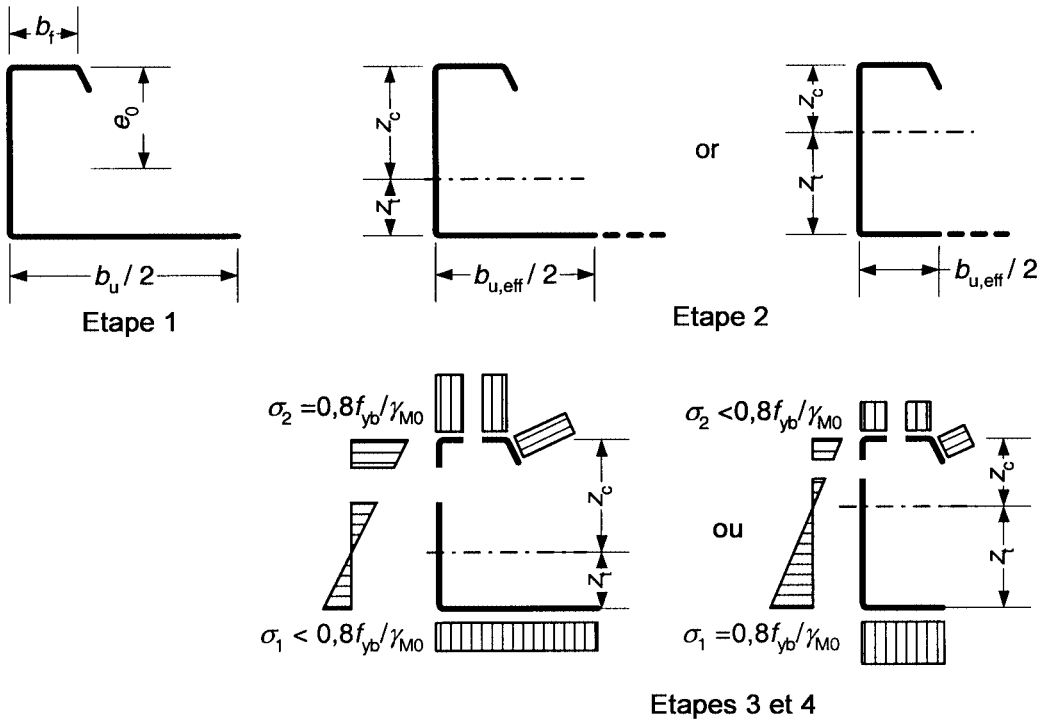


Figure 10.11 - Détermination du moment résistant — plage tendue

(3) Il n'est pas nécessaire de tenir compte des déformations transversales de la plage pour la détermination des flèches aux états limites de service.

(4) Comme alternative simplifiée, le moment résistant d'un plateau comportant une plage non raidie peut être approché par le calcul en prenant pour la plage tendue la même aire efficace que celle des deux semelles étroites comprimées combinées.

10.3 Dimensionnement avec collaboration de paroi

10.3.1 Généralités

(1) L'interaction entre les éléments de structure et les plaques nervurées, conçus pour constituer un système structural combiné, peut être prise en compte comme décrit dans le présent paragraphe 10.3.

(2) Il convient d'appliquer les dispositions données dans le présent paragraphe aux seuls diaphragmes constitués de tôles d'acier.

(3) Les diaphragmes peuvent être constitués de plaques nervurées utilisées en couverture ou en bardage, ou pour des planchers. Ils peuvent également être constitués par un système de couverture ou de bardage à base de plateaux.

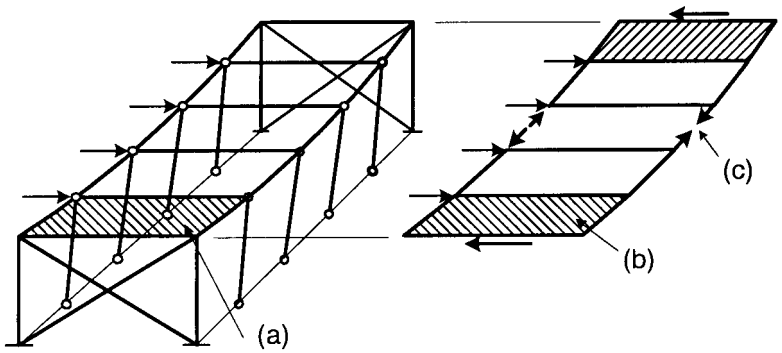
NOTE Des informations concernant la vérification de tels diaphragmes sont disponibles dans le document suivant : Publication CECM N° 88 (1995) : *European recommendations for the application of metal sheeting acting as a diaphragm.*

10.3.2 Effet diaphragme

(1) Dans le dimensionnement avec collaboration de paroi, il peut être tiré avantage de la contribution que les diaphragmes constitués par les plaques nervurées utilisées en couverture, bardage ou plancher apportent à la rigidité et à la résistance générales de l'ossature en raison de leur rigidité et de leur résistance au cisaillement.

(2) Les toitures et les planchers peuvent être considérés comme des poutres horizontales reconstituées de grande profondeur portant sur toute la longueur d'un bâtiment, résistant aux charges appliquées dans leur plan et les transmettant aux pignons d'extrémité ou à des structures intermédiaires raidies. Le panneau constitué par les plaques nervurées peut être considéré comme une âme qui résiste en cisaillement aux charges appliquées dans son plan,, les profilés de rive agissant comme des semelles qui sollicitées par un effort normal de traction et de compression, voir Figures 10.12 et 10.13.

(3) De façon similaire, les panneaux rectangulaires de façades peuvent être considérés comme des éléments de contreventement en diaphragme qui résistent en cisaillement aux efforts appliqués dans leur plan.



(a) Plaques nervurées
(b) Champ de cisaillement dans le diaphragme
(c) Efforts dans les profilés de rive jouant le rôle de semelle

Figure 10.12 - Effet diaphragme dans un bâtiment à toit plat

10.3.3 Conditions nécessaires

(1) Les méthodes de dimensionnement avec collaboration de paroi qui confèrent aux plaques nervurées un rôle structurel ne peuvent être utilisées que dans les conditions suivantes :

— la fonction des plaques nervurées, en plus de leur fonction de base, est limitée à la constitution de diaphragmes de cisaillement s'opposant au déplacement de la structure dans leur plan;

— les diaphragmes sont munis de profilés de rive longitudinaux destinés à résister aux « efforts de semelle » générés par l'effet diaphragme ;

— les efforts de diaphragme dans le plan d'une toiture ou d'un plancher sont transmis aux fondations au moyen de structures contreventées, d'autres diaphragmes, ou d'autres systèmes de contreventement ;

— des assemblages appropriés sont mis en oeuvre pour transmettre les efforts de diaphragme à la structure principale et pour solidariser les profilés de rive jouant le rôle de semelles ;

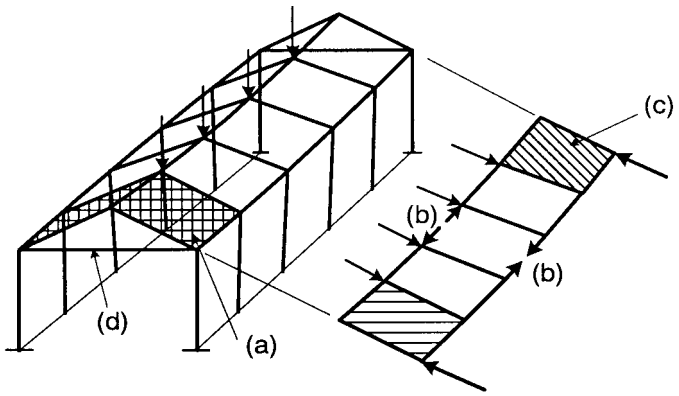
— les plaques nervurées sont considérées comme un composant de la structure qui ne peut être déposé sans étude préalable ;

— le cahier des charges du projet, visant notamment l'élaboration des calculs et des plans, attire l'attention sur le fait que le bâtiment est dimensionné en utilisant l'effet diaphragme;

— lorsque les plaques ont leurs nervures orientées dans le sens longitudinal de la toiture, les « efforts de semelles » résultant de l'effet diaphragme peuvent être repris par les plaques.

(2) Le dimensionnement avec collaboration de paroi peut être utilisé de préférence dans les bâtiments de faible hauteur ou dans les planchers et façades des bâtiments de grande hauteur.

(3) L'effet diaphragmes peut être utilisé de préférence pour résister aux charges de vent, aux charges de neige et aux autres charges appliquées par l'intermédiaire des plaques nervurées elles-mêmes. Ils peuvent également être utilisés pour résister à de faibles charges transitoires, comme les charges horizontales résultant d'appareils de levage légers se déplaçant sur des poutres de roulement, mais ils peuvent ne pas être utilisés pour résister à des charges externes permanentes, comme celles d'une installation industrielle.



(a) Plaques nervurées

(b) Efforts de semelle dans les profilés de rive

(c) Champ de cisaillement dans la plaque nervurée

(d) Tirant de pignon requis pour résister aux efforts exercés sur les plaques de couverture

Figure 10.13 - Effet de collaboration de paroi dans un bâtiment à toit incliné

10.3.4 Diaphragmes constitués de plaques nervurées

(1) Dans un diaphragme constitué de plaques nervurées, voir Figure 10.14, il convient de fixer les deux extrémités des plaques aux profilés porteurs au moyen de vis autotaraudeuses, de clous à scellement, de soudures, de boulons, ou autres éléments de fixation d'un type qui ne présente pas de risque de déserrage en service, d'arrachement, ou de rupture par cisaillement avant d'entraîner le déchirement des plaques. Il convient de fixer les plaques directement sur l'élément porteur, par exemple en fond de nervures, à moins que des mesures particulières ne soient prises pour garantir que les assemblages transmettent effectivement les efforts considérés dans le calcul.

(2) Il convient de couturer les emboîtements longitudinaux entre plaques adjacentes par des rivets, des vis autoperceuses, des soudures, ou autres éléments de fixation d'un type qui ne présente pas de risque de desserrage en service, d'arrachement, ou de rupture par cisaillement avant d'entraîner le déchirement des plaques. Il convient de limiter l'espacement de ces fixations à 500 mm.

(3) Il convient de prévoir une distance suffisante de chaque fixation aux bords de plaques pour prévenir un déchirement prématuré de la tôle.

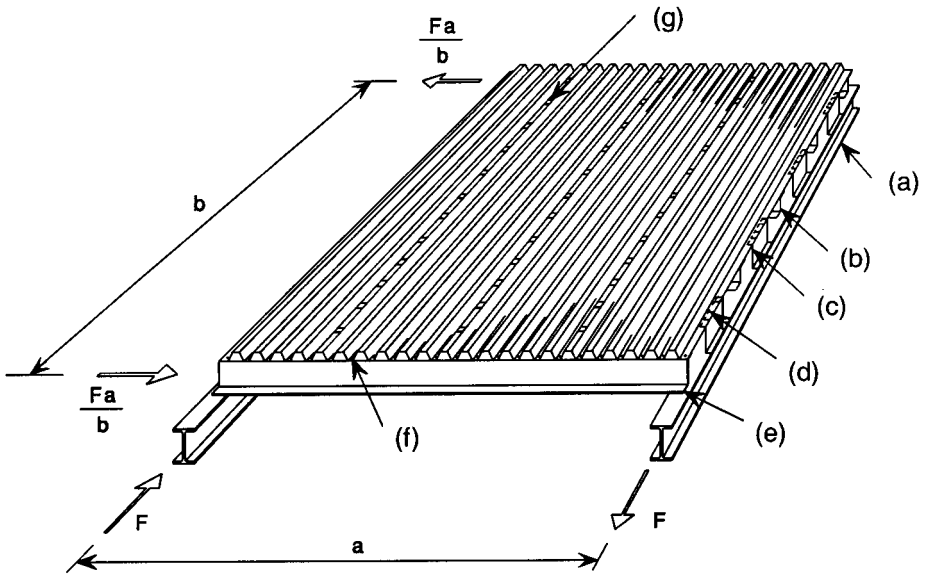
(4) Des ouvertures de petites dimensions, régulièrement réparties, dont la surface cumulée représente jusqu'à 3 % de la surface d'un diaphragme, peuvent être disposées sans calcul particulier, à condition que le nombre total de fixations ne soit pas réduit. Des ouvertures dont la surface cumulée représente jusqu'à 15% de la surface d'un diaphragme (aire de la surface du diaphragme prise en compte pour les calculs) peuvent être disposées si cela est justifié par des calculs détaillés. Il convient de diviser les surfaces comprenant des ouvertures plus importantes, en plusieurs surfaces plus petites, chacune constituant un diaphragme à part entière.

(5) Il convient de calculer, en premier lieu, toutes les plaques nervurées qui font partie d'un diaphragme pour leur utilisation principale en flexion. Pour garantir que toute détérioration des plaques se produira par flexion avant que la résistance de diaphragme soit atteinte, il convient de vérifier que la contrainte de cisaillement résultant de l'effet diaphragme n'excède pas $0{,}25\, f_{yb}/\gamma_{M1}$.

(6) Il convient de baser la résistance au cisaillement d'un diaphragme sur la moindre résistance des fixations de couture ou des fixations plaques sur éléments porteurs dans le sens parallèle aux nervures ou, pour les diaphragmes fixés uniquement aux éléments de rive longitudinaux, des fixations plaques sur éléments de rive. Il convient de vérifier que la résistance au cisaillement correspondant à tout autre mode de ruine soit supérieure à cette valeur minimale d'au moins :

— 40 % pour la ruine des fixations plaques de couverture sur panne sous l'action combinée du cisaillement et du soulèvement dû au vent,;

— 25% pour tout autre mode de ruine.



(a) Poutre principale
(b) Panne
(c) Connecteur de cisaillement
(d) Fixation plaque-connecteur de cisaillement
(e) Panne
(f) Fixation plaque-panne
(g) Fixation de couture

Figure 10.14 - Disposition d'un panneau élémentaire

10.3.5 Diaphragmes constitués de plateaux en acier

(1) Pour constituer un diaphragme, il convient d'utiliser des plateaux dont les larges plages sont raidies.

(2) Il convient d'assembler entre eux les plateaux constituant un diaphragme par des fixations de couture (normalement des rivets aveugles) au travers de leurs âmes avec un espacement e_s ne dépassant pas 300 mm et à une distance e_u de la plage n'excédant pas 30 mm, comme illustré à la Figure 10.15.

(3) Une évaluation précise des déplacements générés par les fixations peut être réalisée à l'aide d'une méthode similaire à celle utilisée pour les plaques nervurées.

(4) Il convient de vérifier que le flux de cisaillement $T_{v,Ed}$ résultant des charges de calcul à l'état limite ultime n'est pas supérieur à $T_{v,Rd}$ donné par :

$$T_{V,Rd} = 8{,}43\ E \sqrt[4]{I_a \left(t / b_u\right)^9} \tag{10.22}$$

où :

I_a est le moment d'inertie de la plage, par rapport à son propre centre de gravité, voir Figure 10.9 ;

b_u est la largeur hors-tout de la plage.

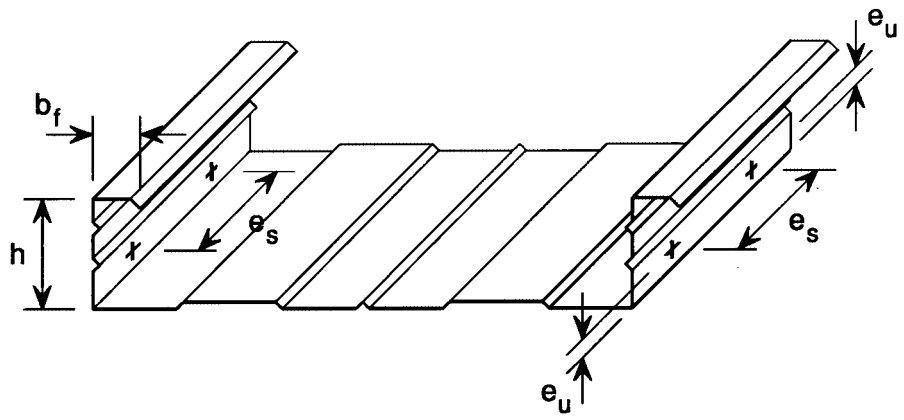


Figure 10.15 - Emplacement des fixations de couture

(5) Il convient de vérifier que le flux de cisaillement $T_{v,ser}$ résultant des charges de calcul en état limite de service ne soit pas supérieur à $T_{v,Cd}$ donné par :

$$T_{v,Cd} = S_v / 375 \tag{10.23}$$

où :

S_v est la rigidité de cisaillement du diaphragme, par unité de longueur de la travée des plateaux.

(6) La rigidité de cisaillement S_v par unité de longueur peut être obtenue à partir de l'équation suivante :

$$S_V = \frac{\alpha\ L\ b_u}{e_s\ (b - b_u)} \tag{10.24}$$

où :

L est la longueur totale du diaphragme (dans le sens de la portée des plateaux) ;
b est la largeur totale du diaphragme ($b = \Sigma\ b_u$) ;
α est le coefficient de rigidité.

(7) Le coefficient de rigidité α peut être pris, en se plaçant en sécurité, égal à 2 000 N/mm à moins que des essais permettent de déterminer une valeur plus précise.

10.4 Plaques nervurées perforées

(1) Les plaques nervurées perforées, avec percements en forme de triangle équilatéral, peuvent être dimensionnées par le calcul, à condition que les règles concernant les plaques nervurées non perforées soient modifiées par l'utilisation des épaisseurs efficaces données ci-dessous.

NOTE Ces règles de calcul tendent à donner une marge de sécurité assez grande. Des solutions plus économiques peuvent être obtenues par un dimensionnement assisté par des essais, voir Section 9.

(2) A condition que $0{,}2 \leq d / a \leq 0{,}9$, les caractéristiques de section brute peuvent être calculées à l'aide de 5.1, mais en remplaçant t par $t_{a,eff}$ obtenue par :

$$t_{a,eff} = 1{,}18\, t \left(1 - \frac{d}{0{,}9\, a} \right) \tag{10.25}$$

où :

d est le diamètre des perforations ;
a est l'espacement entre les perforations.

(3) A condition que $0,2 \leq d / a \leq 0,9$, les caractéristiques de section efficace peuvent être calculées à l'aide de la Section 5, mais en remplaçant *t* par $t_{b,eff}$ obtenue par :

$$t_{b,eff} = t \sqrt[3]{1,18\left(1 - d / a\right)} \tag{10.26}$$

(4) La résistance d'une âme unique aux forces transversales locales peut être calculée à l'aide de 6.1.9, mais en remplaçant *t* par $t_{c,eff}$ obtenue par :

$$t_{c,eff} = t \left[1 - \left(d / a\right)^2 s_{per} / s_w\right]^{3/2} \tag{10.27}$$

où :
s_{per} est la largeur de la partie perforée de l'âme ;
s_w est la largeur totale de l'âme.

Annexe A
(normative)

Méthodes d'essai

A.1 Généralités

(1) La présente Annexe A donne des méthodes d'essai et d'évaluation normalisées appropriées pour un certain nombre d'essais requis dans la pratique.

NOTE 1 Les profilés et les plaques nervurées formés à froid couramment utilisés sont souvent des produits standardisés dont le dimensionnement par le calcul peut se révéler non économique. Il est par conséquent souvent intéressant d'avoir recours au dimensionnement assisté par des essais.

NOTE 2 L'Annexe Nationale peut fournir des informations supplémentaires concernant les essais.

NOTE 3 L'Annexe Nationale peut fournir des coefficients de conversion afin que les résultats d'essais existants soient équivalents aux résultats des essais normalisés définis par la présente Annexe.

(2) La présente Annexe couvre :

— les essais réalisés sur les plaques nervurées et les plateaux, voir A.2 ;

— les essais réalisés sur les profilés formés à froid, voir A.3 ;

— les essais réalisés sur les structures ou les parties de structures, voir A.4 ;

— les essais réalisés sur les poutres maintenues en torsion, voir A.5 ;

— l'évaluation des résultats d'essais pour déterminer les valeurs de calcul, voir A.6.

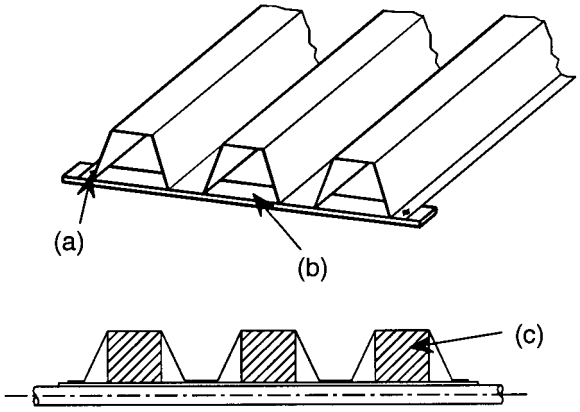
A.2 Essais sur plaques nervurées et plateaux

A.2.1 Généralités

(1) Bien que ces méthodes d'essai soient présentées en termes de plaques nervurées, des méthodes d'essais similaires basées sur les mêmes principes peuvent également être utilisées pour les plateaux et les autres types de plaques (par exemple plaques mentionnées dans l'EN 508).

(2) Le chargement peut être appliqué au moyen de baudruches ou d'un caisson en pression, ou par des palonniers en bois ou en acier disposés pour simuler un chargement uniformément réparti.

(3) Pour empêcher l'évasement des nervures, il est possible d'équiper les éprouvettes de liens transversaux ou d'autres accessoires d'essais appropriés, tels que des cales en bois. Quelques exemples sont donnés à la Figure A.1.



(a) Rivet ou vis

(b) Lien transversal (bande métallique)

(c) Cales en bois

Figure A.1 - Exemples d'accessoires d'essai appropriés

(4) Pour les essais en soulèvement, il convient de concevoir le dispositif d'essai pour simuler de façon réaliste le comportement des plaques nervurées dans les conditions pratiques. Il convient d'utiliser des assemblages entre plaques et éléments supports de même type que celui des assemblages devant être effectivement mis en oeuvre.

(5) Pour conférer aux résultats d'essais un large domaine de validité, il convient d'utiliser de préférence des supports articulés et à rouleau, pour éliminer toute influence sur les résultats d'un maintien en rotation au niveau des appuis.

(6) Il convient de s'assurer que la direction de chargement reste perpendiculaire au plan initial de la plaque tout au long du déroulement de l'essai.

(7) Pour éliminer l'effet de la déformation des appuis, il convient de mesurer également les flèches aux deux extrémités de l'éprouvette.

(8) Il convient de retenir comme résultat de l'essai, la valeur maximale du chargement appliqué à l'éprouvette au moment de la ruine, ou immédiatement avant la ruine, selon le cas.

A.2.2 Essai en travée simple

(1) Un dispositif d'essai équivalent à celui illustré à la Figure A.2 peut être utilisé pour déterminer le moment résistant à mi-portée (en l'absence d'effort de cisaillement) et la rigidité de flexion efficace.

(2) Il convient de choisir la portée de sorte que les résultats d'essai soient représentatifs du moment résistant de la plaque.

(3) Il convient de déterminer le moment résistant à partir des résultats d'essai.

(4) Il convient de déterminer la rigidité de flexion à partir de la courbe du comportement charge-flèche.

A.2.3 Essai en travée double

(1) Le dispositif d'essai illustré à la Figure A.3 peut être utilisé pour déterminer la résistance d'une plaque continue sur deux ou plusieurs travées à des combinaisons de moment et d'effort de cisaillement au droit des appuis intérieurs, ainsi que sa résistance à une combinaison de moment et de réaction d'appui pour une largeur d'appui donnée.

(2) Il convient d'appliquer, de préférence, un chargement uniformément réparti (à l'aide d'une baudruche ou dans un caisson en pression, par exemple).

(3) Il est également possible d'appliquer un certain nombre de charges linéaires (perpendiculairement à la portée), disposées de façon à générer des efforts et moments internes appropriés pour représenter les effets d'un chargement uniformément réparti. Quelques exemples de dispositions appropriées sont illustrés à la Figure A.4.

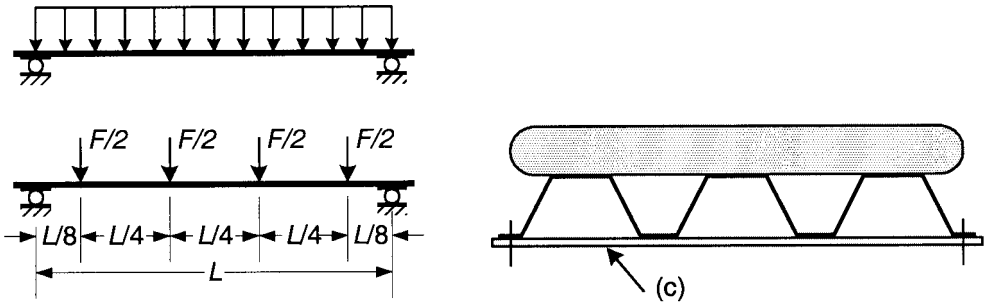
A.2.4 Essai d'appui intérieur

(1) Comme alternative au A.2.3, le dispositif d'essai illustré à la Figure A.5 peut être utilisé pour déterminer la résistance d'une plaque continue sur deux ou plusieurs travées à des combinaisons de moment et d'effort de cisaillement au droit des appuis intérieurs, ainsi que sa résistance à une combinaison de moment et de réaction d'appui pour une largeur d'appui donnée.

(2) La portée d'essai s utilisée pour représenter la partie de plaque entre points d'inflexion situés de part et d'autre de l'appui intérieur, dans une plaque continue sur deux travées égales L, peut être obtenue par :

$$s = 0{,}4\,L \tag{A.1}$$

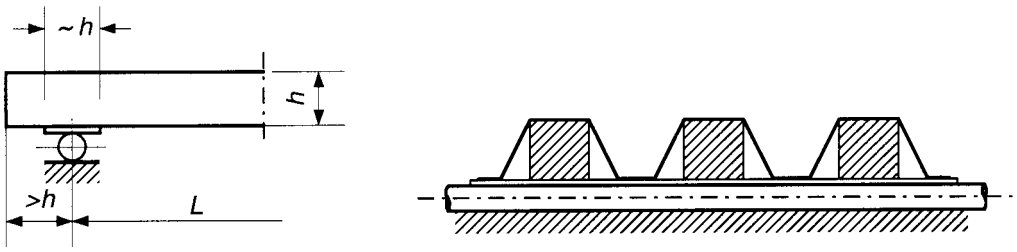
(3) Si une redistribution plastique du moment sur appui est prévue, il convient de réduire la portée d'essai s de façon à reproduire le rapport approprié du moment sur appui et de l'effort de cisaillement.



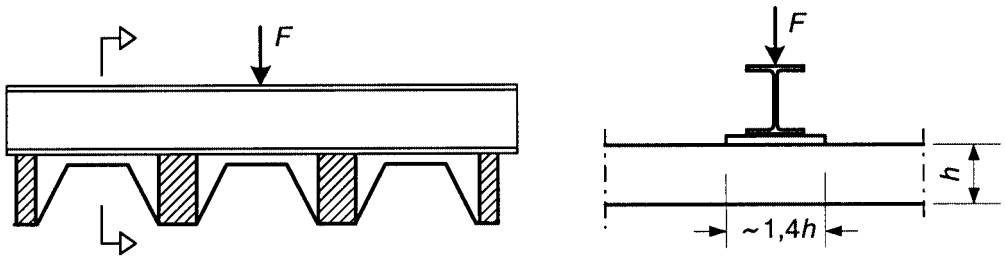
a) Chargement uniformément réparti et exemple d'alternative avec charges linéaires équivalentes

b) Chargement réparti appliqué par une baudruche (ou dans un caisson en pression)

(c) Lien transversal



c) Exemple de dispositions d'appui destinées à empêcher la distorsion



d) Exemple de méthode d'application d'une charge linéaire

Figure A.2 - Dispositif d'essai pour travée simple

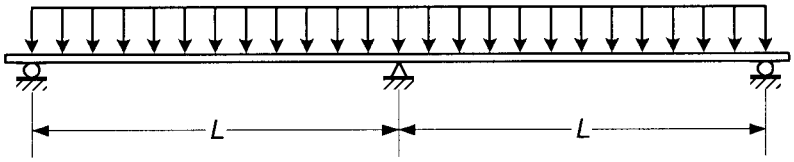


Figure A.3 - Dispositif d'essai pour travée double

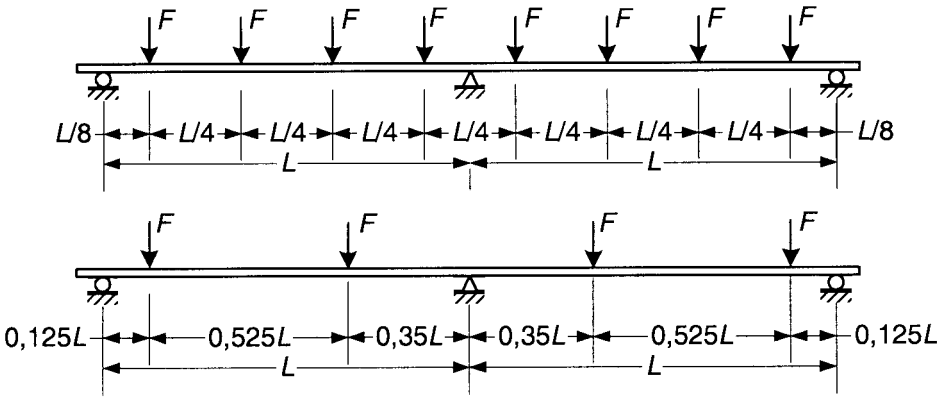


Figure A.4 - Exemples de dispositions alternatives appropriées de charges linéaires

(4) Il convient de choisir la largeur b_B de la poutre utilisée pour appliquer la charge d'essai de façon à représenter la largeur d'appui réelle devant être utilisée en pratique.

(5) Chaque résultat d'essai peut être utilisé pour représenter la résistance à une combinaison de moment fléchissant et de réaction d'appui (ou d'effort de cisaillement) pour une portée donnée et une largeur d'appui donnée. Pour obtenir des informations concernant l'interaction entre moment fléchissant et réaction d'appui, il convient de réaliser des essais pour plusieurs portées différentes.

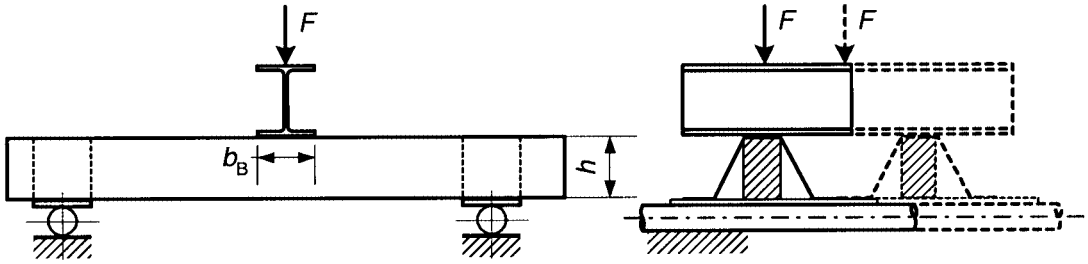
(6) Pour l'interprétation des résultats d'essai, voir A.5.2.3.

A.2.5 Essai d'appui d'extrémité

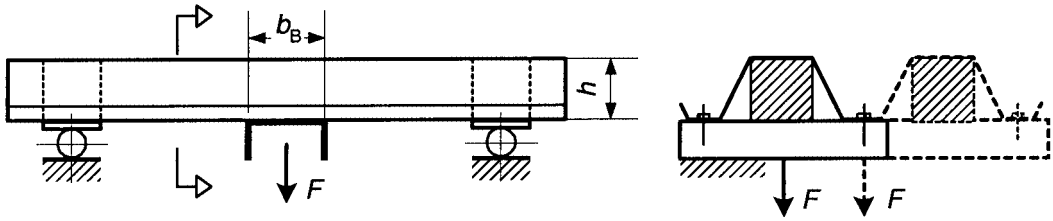
(1) Le dispositif d'essai illustré à la figure A.6 peut être utilisé pour déterminer la résistance au cisaillement d'une plaque au droit d'un appui d'extrémité.

(2) Il convient de réaliser des essais séparés pour déterminer la résistance au cisaillement de la plaque pour différentes valeurs de *u*, distance entre le point de contact au droit du bord intérieur de l'appui d'extrémité et l'extrémité réelle de la plaque, voir Figure A.6.

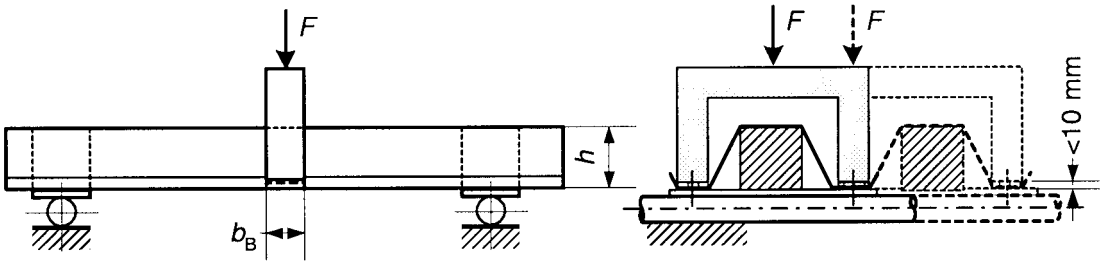
NOTE La valeur de la réaction d'appui maximale mesurée au cours de l'essai de flexion peut être utilisée comme limite inférieure de la résistance de la section à l'effort de cisaillement et à la force transversale locale.



a) appui intérieur avec chargement de gravité

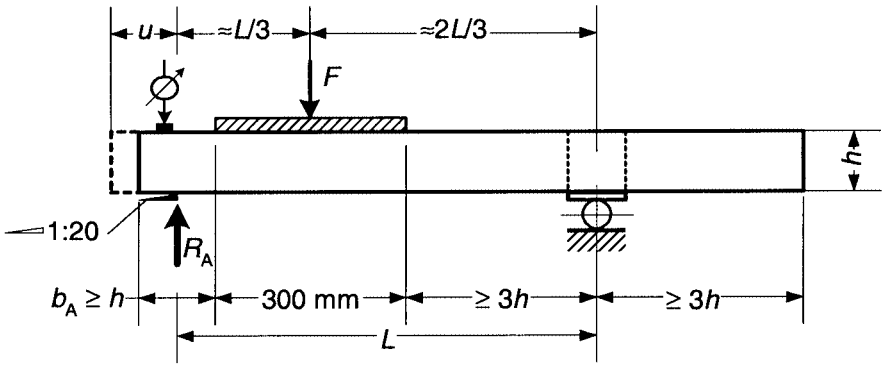


b) appui intérieur avec chargement de soulèvement



c) appui intérieur avec chargement appliqué sur la semelle tendue

Figure A.5 - Dispositif d'essai d'appui intérieur



Légende :

b_A = longueur d'appui

u = longueur entre le bord intérieur de l'appui d'extrémité et l'extrémité de la plaque

Figure A.6 - Dispositif d'essai d'appui d'extrémité

A.3 Essais sur profilés formés à froid

A.3.1 Généralités

(1) Il convient d'utiliser des éprouvettes en tous points similaires au composant ou à la structure qu'elles représentent.

(2) Lors des essais, il convient d'utiliser, de préférence, des dispositifs d'appui qui reproduisent fidèlement celles résultant des assemblages devant être utilisés en pratique. A défaut, il convient de créer lors des essais des conditions d'extrémité moins favorables, qui diminuent la résistance aux charges ou qui augmentent la flexibilité, selon le cas.

(3) Il convient d'utiliser des dispositifs d'application des charges d'essai reproduisant le mode réel d'application des charges. Il convient de s'assurer qu'ils n'apportent pas une résistance aux déformations transversales de la section transversale, supérieure à celle qui serait obtenue dans les conditions d'une surcharge en service. Il convient également de s'assurer qu'ils ne concentrent pas les efforts appliqués sur les lignes de plus grande résistance.

(4) Si la combinaison de charges donnée est composée d'efforts s'exerçant sur plus d'une ligne d'action, il convient d'appliquer à chacun de ces efforts, chaque accroissement du chargement d'essai, de manière proportionnelle.

(5) A chaque étape du chargement, il convient de mesurer les déplacements ou les déformations en un ou plusieurs points de la structure. Il convient d'effectuer les mesures de déplacements ou de déformations après stabilisation complète de la structure suivant un accroissement de charge.

(6) Il convient de considérer que la ruine d'une éprouvette est atteinte dans l'un quelconque des cas suivants :

— à l'effondrement ou à la rupture ;

— si une fissure se propage dans une partie vitale de l'éprouvette ;

— si le déplacement est excessif.

(7) Il convient de retenir comme résultat de l'essai, la valeur maximale du chargement appliqué à l'éprouvette au moment de la ruine, ou immédiatement avant celle-ci, selon le cas.

(8) Il convient de réaliser les mesures avec une précision compatible avec la valeur de la grandeur mesurée et que l'imprécision ne dépasse, en aucun cas, ± 1 % de la valeur à déterminer. Les exigences de précision définies en (9) doivent également être respectées.

(9) Concernant la géométrie de la section transversale de l'éprouvette, il convient de réaliser les mesures suivantes :

— dimensions hors-tout (largeur, hauteur et longueur) avec une précision de ± 1,0 mm ;

— largeur des parois de la section transversale avec une précision de ± 1,0 mm ;

— rayon des plis, avec une précision de ± 1,0 mm ;

— inclinaison des parois avec une précision de ± 2,0° ;

— angles entre les surfaces planes avec une précision de ± 2,0° ;

— emplacements et dimensions des raidisseurs intermédiaires, avec une précision de ± 1,0 mm ;

— épaisseur du matériau, avec une précision de ± 0,01 mm ;

— la précision de toutes les mesures relative à la section transversale doit être prise égale à 0,5 % au maximum des valeurs nominales.

(10) Il convient également de mesurer tous les autres paramètres appropriés, tels que :

— position des composants les uns par rapport aux autres ;

— position des fixations ;

— valeur des couples, etc. appliqués pour le serrage des fixations.

A.3.2 Essais de compression sur section transversale

A.3.2.1 Essai de compression sur tronçon court

(1) Des essais de compression sur tronçon court peuvent être réalisés pour évaluer les effets du flambement local dans des sections transversales à parois minces, en déterminant la valeur du rapport $\beta_A = A_{eff} / A_g$ et l'emplacement de l'axe neutre efficace.

(2) Si le flambement local des parois régit la résistance de la section transversale, il convient d'utiliser des éprouvettes présentant une longueur d'au moins 3 fois la largeur de la paroi la plus large.

(3) Pour les essais sur tronçon court relatifs aux éléments constitués dans une tôle perforée, Il convient d'utiliser des éprouvettes de longueur au moins égale à cinq fois le pas de perforation et telles que la coupe de l'éprouvette soit effectuée à mi-distance entre deux perforations.

(4) Dans le cas d'une section transversale avec raidisseurs de bord ou intermédiaires, il convient de s'assurer que la longueur de l'éprouvette n'est pas inférieure aux longueurs de flambement prévues des raidisseurs.

(5) Si la longueur hors-tout de l'éprouvette est supérieure à 20 fois le plus petit rayon de giration de sa section transversale brute i_{min}, il convient de prévoir des maintiens latéraux intermédiaires avec un espacement maximal de $20\ i_{min}$.

(6) Avant essai, il convient de s'assurer que les écarts relatifs aux dimensions de la section transversale de l'éprouvette restent dans les limites de tolérances autorisées.

(7) Il convient de réaliser les coupes de l'éprouvette planes et perpendiculaires à son axe longitudinal.

(8) Il convient d'appliquer l'effort de compression à chaque extrémité de l'éprouvette au moyen de platines d'épaisseur minimale 30 mm et débordant d'au moins 10 mm le contour de la section transversale.

(9) Il convient de placer l'éprouvette dans la machine d'essai munie d'un appui sphérique à chaque extrémité. Il convient de réaliser de petites empreintes usinées dans les platines pour recevoir les appuis sphériques. Il convient d'aligner les appuis sphériques avec l'axe neutre de la section transversale efficace calculée. Si l'emplacement calculé du centre de gravité de la section efficace s'avère incorrect, il peut être ajusté au cours de la série d'essais.

(10)Dans le cas de sections transversales ouvertes, un effet éventuel de déformation élastique au droit de la coupe peut être corrigé.

(11)Des essais de compression sur tronçon court peuvent être utilisés pour déterminer la résistance à la compression d'une section transversale. Pour l'interprétation des résultats d'essai, il convient de traiter les paramètres suivants comme des variables :

— l'épaisseur ;

— le rapport b_p / t ;

— le rapport f_u / f_{yb} ;

— la résistance à la rupture f_u et la limite d'élasticité f_{yb} ;

— la position du centre de gravité de la section transversale efficace ;

— les imperfections de forme des parois de la section transversale ;

— la méthode de formage à froid (par exemple l'augmentation de la limite d'élasticité par l'introduction d'une déformation éliminée par la suite).

A.3.2.2 Essai de flambement sur éléments

(1) Des essais de flambement sur élément peuvent être utilisés pour déterminer la résistance de barres comprimées dont la section transversale est à parois minces, au flambement global (comprenant le flambement par flexion, le flambement par torsion et le flambement par flexion-torsion), ainsi que l'interaction entre le flambement local et le flambement global.

(2) Il convient de réaliser de type d'essais suivant une méthode similaire à celle indiquée au A.3.2.1 pour les essais de compression sur tronçon court.

(3) Une série d'essais sur éprouvettes comprimées peut être utilisée pour déterminer la courbe de flambement appropriée pour un type donné de section transversale et une nuance d'acier donnée, fabriquée selon un procédé spécifique. Il convient de tirer du tableau A1 les valeurs d'élancement relatif $\bar{\lambda}$ des éprouvettes à soumettre aux essais, et le nombre minimal d'essais *n* pour chaque valeur de $\bar{\lambda}$.

Tableau A.1 - Valeurs d'élancement relatif et nombres d'essais

$\bar{\lambda}$	0,2	0,5	0,7	1,0	1,3	1,6	2,0	3,0
N	3	5	5	5	5	5	5	5

(4) Des essais similaires peuvent également être utilisés pour déterminer l'effet de maintiens intermédiaires sur la résistance au flambement par torsion d'une barre.

(5) Pour l'interprétation des résultats d'essai, il convient de prendre en compte les paramètres suivants :

— les paramètres énumérés pour les essais de compression sur tronçons courts au A.3.2.1(11) ;

— les défauts de rectitude globale par rapport à la production standard, voir (6) ;

— le type de maintien d'extrémité ou de maintien intermédiaire (en flexion, en torsion ou les deux).

(6) Les défauts de rectitude globale peuvent être pris en compte comme suit :

a) déterminer la charge critique élastique de compression de la barre par une analyse appropriée, en tenant compte d'une imperfection initiale en arc égale à celle de l'échantillon testé : $F_{cr,bow,test}$

b) identique à a) mais avec une imperfection initiale en arc prenant la valeur maximale admise selon la spécification du produit : $F_{cr,bow,max,nom}$

c) Coefficient de correction supplémentaire : $F_{cr,bow,max,nom}$ / $F_{cr,bow,test}$

A.3.3 Essais de traction sur section transversale

(1) Cet essai peut être utilisé pour déterminer la limite d'élasticité moyenne f_{ya} de la section transversale.

(2) Il convient de donner à l'éprouvette une longueur d'au moins 5 fois la largeur de la paroi la plus large de la section transversale.

(3) Il convient d'appliquer la charge par l'intermédiaire de dispositifs d'extrémité assurant une répartition uniforme des contraintes sur la section transversale.

(4) Il convient de vérifier que la ruine se produit à une distance des dispositifs d'extrémité au moins égale à la largeur de la paroi la plus large de la section transversale.

A.3.4 Essais de flexion sur section transversale

(1) Cet essai peut être utilisé pour déterminer le moment résistant et la capacité de rotation d'une section transversale.

(2) Il convient de donner à l'éprouvette une longueur d'au moins 15 fois sa plus grande dimension transversale. Il convient de retenir un espacement des maintiens latéraux de la semelle comprimée au moins égal à celui correspondant à la mise en œuvre réelle.

(3) Il convient d'appliquer deux charges ponctuelles à l'éprouvette de façon à créer à mi-portée un moment fléchissant uniforme sur une longueur d'au moins 0,2 x (portée) mais sans dépasser 0,33 x (portée). Il convient d'appliquer ces charges à l'aplomb du centre de cisaillement de la section transversale. Il convient de maintenir la section en torsion aux points d'application des charges. Si nécessaire, il convient d'empêcher le flambement local de l'éprouvette au droit des points d'application des charges, afin de garantir que la ruine se produit dans la partie centrale de la travée. Il convient de mesurer la flèche aux points de chargement, à mi-portée et aux extrémités de l'éprouvette.

(4) Pour l'interprétation des résultats d'essai, il convient de traiter les paramètres suivants comme des variables :

— l'épaisseur ;

— le rapport b_p / t ;

— le rapport f_u / f_{yb} ;

— la résistance à la rupture f_u et la limite d'élasticité f_{yb} ;

— les différences entre les maintiens utilisés pour l'essai et ceux réellement mis en oeuvre;

— les conditions d'appui.

A.4 Essais sur les structures et parties de structures

A.4.1 Essai de réception

(1) Un essai de réception peut être utilisé comme essai non destructif confirmant le comportement structural d'une structure ou d'une partie de structure.

(2) Lors d'un essai de réception, il convient de retenir comme charge d'essai la somme de :

— 1,0 × (le poids propre réel pendant l'essai) ;

— 1,15 × (le reste de la charge permanente) ;

— 1,25 × (les charges variables).

mais il n'est pas nécessaire de la prendre supérieure à la moyenne de la charge de calcul totale à l'état limite ultime et de la charge totale de calcul à l'état limite de service pour la combinaison de charges caractéristique (rare).

(3) Avant d'effectuer l'essai de réception, il est possible d'appliquer de manière facultative, puis de retirer, un chargement préliminaire de mise en place (ne dépassant pas les valeurs caractéristiques des charges.

(4) Il convient de charger en premier lieu la structure jusqu'à une valeur égale à la charge caractéristique totale. Sous l'effet de cette charge, il convient de démontrer un comportement essentiellement élastique. Au retrait de cette charge, il convient de vérifier que la flèche résiduelle n'excède pas 20 % du maximum relevé. Si ces critères ne sont pas satisfaits, il convient de répéter cette partie de la procédure d'essai. Au cours de ce cycle de charge répété, il convient de démontrer le comportement essentiellement linéaire de la structure jusqu'à la valeur caractéristique de la charge, et que la flèche résiduelle n'excède pas 10 % du maximum relevé.

(5) Au cours de l'essai de réception, il convient d'appliquer les charges par paliers réguliers à intervalles de temps réguliers et de mesurer les flèches principales à chaque étape. Lorsque les flèches montrent une non-linéarité significative, il convient de réduire les incréments de charge.

(6) Lorsque la charge d'essai de réception est atteinte, il convient de maintenir la charge jusqu'à stabilisation des mesures et d'enregistrer les déplacements afin d'établir si la structure subit des déformations en fonction du temps, comme celles de fixations ou résultant du fluage d'un revêtement de zinc.

(7) Il convient de procéder au déchargement par paliers réguliers, en mesurant les déplacements à chaque étape.

(8) Il convient de démontrer que la structure peut supporter la charge d'essai de réception, sans distorsion locale significative ou défauts susceptibles de la rendre inapte au service après l'essai.

A.4.2 Essai de résistance

(1) Cet essai de résistance peut être utilisé pour confirmer la capacité portante calculée d'une structure ou d'une partie de structure. Lorsqu'un certain nombre d'éléments similaires, de même conception, doivent être construits et qu'un ou plusieurs prototypes ont subi un essai de résistance et en ont satisfait toutes les prescriptions, les autres éléments peuvent être acceptés sans autre essai à condition qu'ils soient semblables aux prototypes pour tous les aspects pertinents.

(2) Avant de réaliser un essai de résistance, il convient au préalable de soumettre l'éprouvette à l'essai de réception détaillé en A.4.1.

(3) Il convient d'augmenter la charge par paliers jusqu'à la valeur de la charge d'essai de résistance et de mesurer les flèches principales à chaque étape. Il convient de maintenir la charge d'essai de résistance pendant au moins une heure et d'enregistrer les mesures de flèches afin d'établir si la structure est sujette au fluage.

(4) Il convient de procéder au déchargement par paliers réguliers, en mesurant les flèches à chaque étape.

(5) Il convient de déterminer la charge totale d'essai F_{str} (y compris le poids propre) pour un essai de résistance à partir de la charge totale de calcul F_{Ed} retenue pour les vérifications par le calcul à l'état limite ultime, au moyen de :

$$F_{str} = \gamma_M \mu_F F_{Ed} \tag{A.2}$$

où μ_F est le coefficient d'ajustement de la charge et γ_M représente le coefficient partiel à l'état limite ultime.

(6) Il convient de déterminer le coefficient d'ajustement de charge μ_F pour tenir compte des variations de la capacité portante de la structure, ou de la partie de structure, résultant de la variation de la limite d'élasticité du matériau, du flambement local, du flambement global et de tous autres paramètres ou considérations pertinents.

(7) Lorsqu'une évaluation réaliste de la capacité portante d'une structure ou d'une partie de structure, peut être effectuée suivant les dispositions de la présente partie 1.3 de l'EN 1993 pour le dimensionnement par calcul, ou par une autre méthode d'analyse reconnue et tenant compte de tous les effets de flambement, le coefficient d'ajustement de la charge μ_F peut être pris égal au rapport de (la valeur de la capacité portante basée sur la limite d'élasticité de base moyenne f_{ym}) et de (la valeur correspondante basée sur la limite d'élasticité de base nominale f_{yb}).

(8) Il convient de déterminer la valeur de f_{ym} à partir de la limite d'élasticité de base mesurée $f_{yb,obs}$ des divers composants de la structure, ou de la partie de structure, en tenant convenablement compte de leur importance relative.

(9) Si des évaluations théoriques réalistes de la capacité portante ne peuvent être effectuées, il convient de prendre le coefficient d'ajustement de la charge μ_F égal au coefficient d'ajustement de résistance μ_R défini en A.6.2.

(10)Sous la charge d'essai, il convient de ne constater ni ruine par instabilité ni rupture dans une quelconque partie de l'éprouvette.

(11)Au retrait de la charge d'essai, il convient de vérifier que la flèche diminue d'au moins 20%.

A.4.3 Essai de ruine sur prototype

(1) Un essai à la ruine peut être utilisé pour déterminer le mode de ruine réel et la véritable capacité portante d'une structure ou d'un ensemble. Si le prototype n'est pas destiné à l'emploi, il peut être utilisé à cette fin après avoir subi l'essai de résistance décrit en A.4.2.

(2) Un essai à la ruine peut également être effectué pour déterminer la véritable capacité portante de calcul à partir de la charge ultime d'essai. Comme il est préférable de réaliser au préalable les essais de réception et de résistance, il convient d'évaluer la capacité portante de calcul attendue comme base de ces essais.

(3) Avant de procéder à un essai à la ruine, il convient au préalable de soumettre l'éprouvette à l'essai de résistance décrit au A.4.2. L'évaluation de sa capacité portante de calcul peut alors être ajustée sur la base de son comportement au cours de l'essai de résistance.

(4) Au cours d'un essai à la ruine, il convient de commencer par appliquer le chargement par paliers jusqu'à la valeur de charge d'essai de résistance. Il convient de baser les accroissements de charge suivants sur l'examen du tracé des déplacements principaux.

(5) Il convient de retenir comme capacité portante ultime, la valeur de la charge d'essai atteinte lorsque la structure, ou l'ensemble essayé, est incapable de supporter tout accroissement supplémentaire de la charge.

NOTE A ce niveau de chargement, il est probable qu'une distorsion permanente se soit produite. Dans certains cas, la déformation peut être le critère d'arrêt de l'essai.

A.4.4 Essai d'étalonnage

(1) Un essai d'étalonnage peut être effectué pour :

— vérifier le comportement sous charge par rapport aux modèles de calcul analytique ;

— quantifier les paramètres issus des modèles de calcul, tels que la résistance ou la rigidité des barres ou des assemblages.

A.5 Essais sur poutres maintenues en torsion

A.5.1 Généralités

(1) Ces méthodes d'essai peuvent être utilisées pour les poutres partiellement maintenues en torsion, au moyen de plaques nervurées en acier ou autre élément d'enveloppe approprié.

(2) Ces méthodes peuvent être utilisées pour les pannes, lisses, solives, ainsi que pour d'autres types similaires de poutres avec des conditions de maintien appropriées.

A.5.2 Essai sur appui intermédiaire

A.5.2.1 Dispositif d'essai

(1) Le dispositif d'essai illustré à la Figure A.7 peut être utilisé pour déterminer la résistance d'une poutre, continue sur deux ou plusieurs travées, aux combinaisons de moment fléchissant et d'effort tranchant au droit des appuis intermédiaires.

NOTE Le même dispositif d'essai peut être utilisé pour les systèmes à emboîtement ou à éclissage.

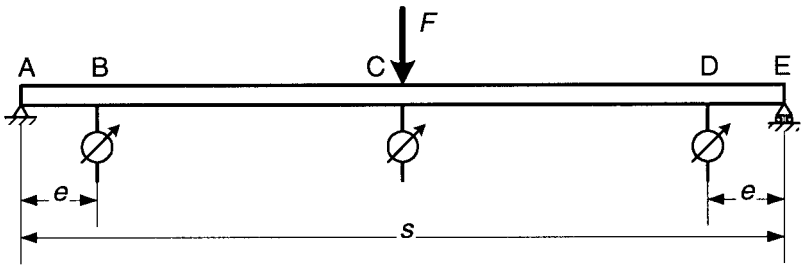


Figure A.7 - Dispositif d'essai pour essais sur appui intermédiaire

(2) Il convient de réaliser en A un appui articulé et en E un appui à rouleaux. Sur ces appuis, la rotation autour de l'axe longitudinal de la poutre peut être empêchée, par exemple au moyen d'échantignoles.

(3) Il convient d'appliquer la charge en C de manière cohérente avec le mode d'application réel en exploitation.

NOTE Dans de nombreux cas, ceci signifie que le déplacement latéral des deux semelles est empêché en C.

(4) Il convient de mesurer le déplacement des points B et D situés à une distance *e* de chaque appui, voir Figure A.7, afin de pouvoir éliminer ces déplacements de l'analyse des résultats.

(5) Il convient de choisir la portée d'essai *s* de façon à générer des combinaisons de moment fléchissant et d'effort tranchant, représentatives de celles attendues en pratique sous l'effet de la charge de calcul pour l'état limite concerné.

(6) Pour les poutres à deux travées de portée *L* soumises à des charges uniformément réparties, il convient de prendre normalement la portée d'essai *s*, égale à 0,4 *L*. Toutefois, si une redistribution plastique du moment sur appui est prévue, il convient de réduire la portée d'essai *s* afin d'obtenir un rapport satisfaisant du moment sur appui et de l'effort tranchant.

A.5.2.2 Exécution des essais

(1) Outre les règles générales concernant les essais, il convient de tenir compte des aspects particuliers suivants.

(2) Il convient de poursuivre les essais au-delà de la charge maximale et de mesurer les flèches soit jusqu'à ce que la charge appliquée ait diminué de 10 à 15 % par rapport à cette valeur maximale, soit jusqu'à ce que la flèche ait atteint une valeur égale à 6 fois le déplacement élastique maximum.

A.5.2.3 Interprétation des résultats d'essai

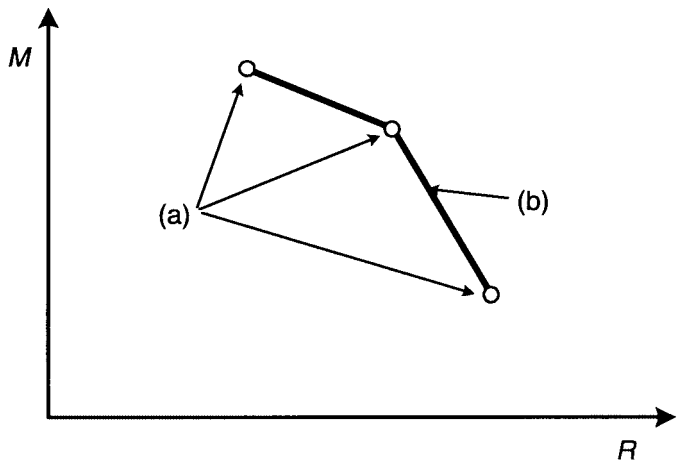
(1) Il convient de corriger les résultats d'essai réellement mesurés $R_{obs,i}$ comme indiqué au A.6.2 pour obtenir des valeurs ajustées $R_{adj,i}$ en fonction de la limite d'élasticité de base nominale f_{yb} et de l'épaisseur de calcul *t* de l'acier, voir 3.2.4.

(2) Pour chaque valeur de la portée d'essai *s*, il convient de prendre la réaction d'appui *R* égale à la moyenne des valeurs ajustées de la charge maximale F_{max} pour cette valeur de *s*. Il convient alors de déterminer la valeur correspondante du moment sur appui *M* par :

$$M = \frac{s\ R}{4} \tag{A.3}$$

En général, il convient d'ajouter l'influence de la charge permanente à la valeur du moment *M* obtenu suivant l'expression (A.3).

(3) Il convient de porter sur un graphique les couples de valeurs de *M* et *R* obtenus pour chaque valeur de *s* comme indiqué à la Figure A.8. Des couples de valeurs pour les combinaisons intermédiaires de *M* et *R* peuvent alors être déterminés par interpolation linéaire.



(a) résultats d'essai pour différentes portées d'essai *s,* (b) interpolation linéaire

Figure A.8 - Relation entre le moment sur appui *M* et la réaction d'appui *R*

(4) Il convient de déterminer la flèche nette au point d'application de la charge C sur la Figure A.7, à partir des valeurs brutes mesurées, en leur soustrayant la moyenne des flèches correspondantes mesurées aux points B et D situés à une distance e des points d'appui A et E, voir Figure A.7.

(5) Pour chaque essai, il convient de tracer un diagramme donnant la charge appliquée en fonction de la flèche nette correspondante, voir Figure A.9. A partir de ce tracé, il convient de déterminer la rotation θ pour une gamme de valeurs de la charge appliquée, par les équations suivantes :

$$\theta = \frac{2(\delta_{\mathrm{pl}} - \delta_{\mathrm{e}} - \delta_{\mathrm{el}})}{0{,}5\ s - e} \tag{A.4a}$$

$$\theta = \frac{2(\delta_{\mathrm{pl}} - \delta_{\mathrm{e}} - \delta_{\mathrm{lin}})}{0{,}5\ s - e} \tag{A.4b}$$

où :

δ_{el} est la flèche nette pour une charge donnée sur la partie ascendante de la courbe, avant F_{max} ;

δ_{pl} est la flèche nette pour la même charge sur la partie descendante de la courbe, après F_{max} ;

δ_{lin} est la flèche nette fictive pour une charge donnée qui serait obtenue avec un comportement linéaire, voir Figure A.9 ;

δ_{e} est la flèche moyenne mesurée à une distance *e* de l'appui, voir Figure A.7 ;

s est la portée d'essai ;

e est la distance entre un point de mesure de la flèche et un appui, voir Figure A.7.

L'expression (A.4a) est utilisée pour des analyses effectuées sur la base de la section transversale efficace. L'expression (A.4b) est utilisée pour des analyses effectuées sur la base de la section transversale brute.

(6) Il convient de tracer le diagramme *M* - θ pour chaque essai effectué avec une portée d'essai donnée *s* correspondant à une portée donnée L de la poutre comme indiqué sur la Figure A.10. Il convient alors de retenir comme valeur de calcul du rapport *M* - θ sur appui intermédiaire, celle qui correspond à 0,9 fois la valeur moyenne de *M* pour tous les essais correspondant à cette valeur de portée *L* de la poutre .

NOTE Il convient d'utiliser un coefficient de réduction inférieur à 0,9 si les essais en vraie grandeur sont utilisés pour déterminer l'effet de la charge latérale et du flambement de la semelle libre autour de l'appui intermédiaire, voir 10.1.3.2(4).

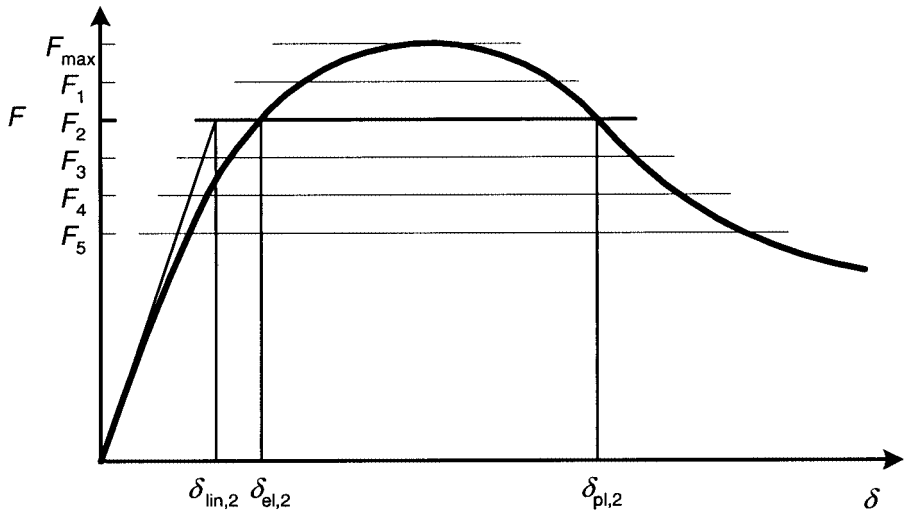
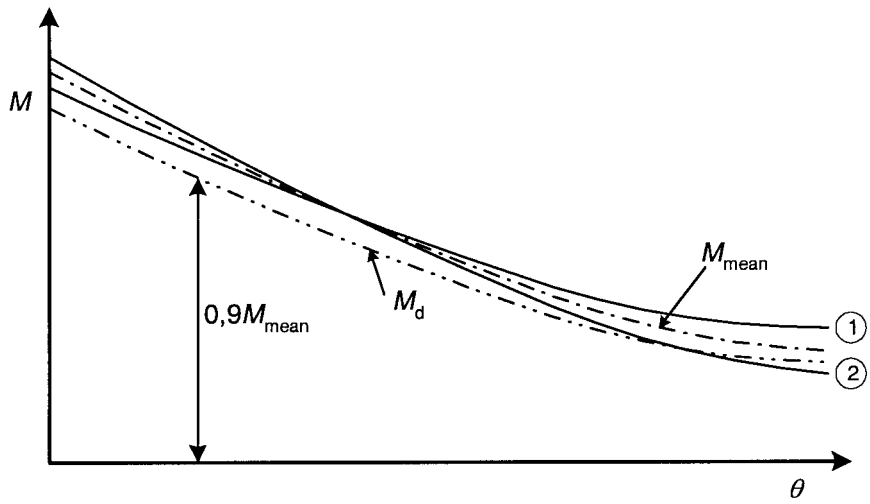


Figure A.9 - Relation entre la charge F et la flèche nette δ



M_{mean} = valeur moyenne, M_d = valeur de calcul

Figure A.10 - Détermination de la caractéristique moment-rotation (M - θ)

A.5.3 Détermination du maintien en torsion

(1) Le dispositif d'essai illustré à la figure A.11 peut être utilisé pour caractériser le maintien en torsion conféré par des plaques nervurées convenablement fixées ou par un autre élément perpendiculaire à la portée de la poutre.

(2) Ce dispositif d'essai mobilise deux contributions différentes au maintien total :

a) la rigidité latérale K_A par unité de longueur correspondant à la rigidité en rotation de la liaison entre les plaques et la poutre ;

b) la rigidité latérale K_B par unité de longueur résultant de la distorsion de la section transversale de la panne.

(3) Le maintien combiné par unité de longueur peut être déterminé à partir de l'équation suivante :

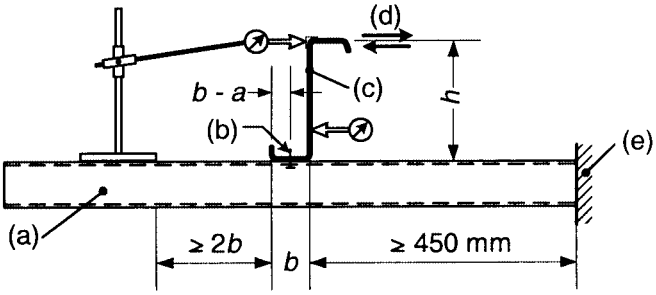
$$\left(1 / K_A + 1 / K_B \right) = \delta / F \tag{A.5}$$

où :

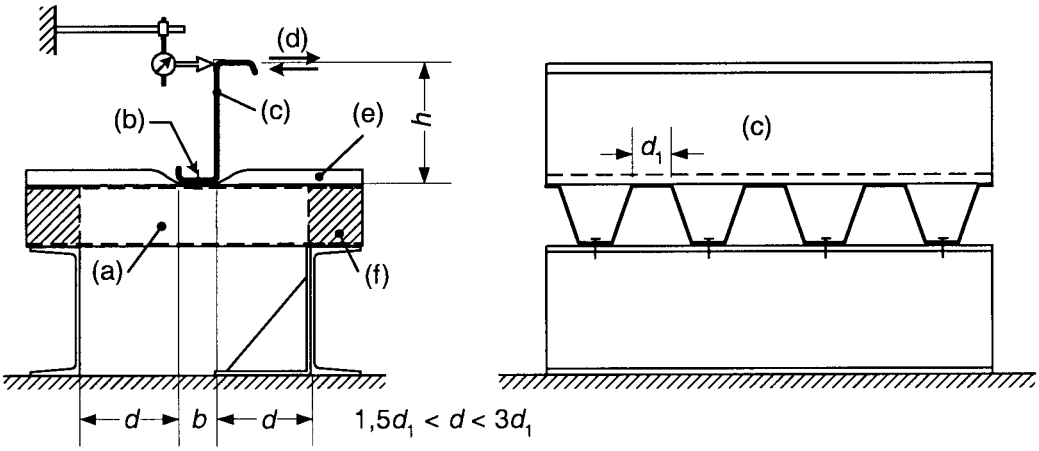
F	est la charge par unité de longueur de l'éprouvette entraînant une flèche latérale de $h/10$;
h	est la hauteur hors-tout de l'éprouvette ;
δ	est le déplacement latéral de la semelle supérieure dans la direction de la charge F.

(4) Pour l'interprétation des résultats d'essai, il convient de traiter les paramètres suivants comme des variables :

— le nombre de fixations par unité de longueur de l'éprouvette
— le type de fixations ;
— la rigidité de flexion de la poutre, en fonction de son épaisseur ;
— la rigidité de flexion de la plage inférieure de la plaque en fonction de son épaisseur ;
— les positions des fixations dans la plage inférieure de la plaque ;
— la distance entre les fixations et le centre de rotation de la poutre ;
— la hauteur hors-tout de la poutre ;
— la présence éventuelle d'une isolation entre la poutre et la plaque.



a) Alternative 1



(a) plaque, (b) fixation, (c) profilé, (d) charge, (e) isolation éventuelle, (f) cales en bois

b) Alternative 2

Figure A.11 - Détermination expérimentale des rigidités élastiques K_A et K_B

A.6 Evaluation des résultats d'essai

A.6.1 Généralités

(1) Il convient de considérer qu'une éprouvette soumise à un essai a atteint la ruine, si les charges d'essai appliquées atteignent leurs valeurs maximales, ou si les déformations brutes dépassent les limites spécifiées.

(2) Il convient en général de limiter comme suit les déformations brutes des profilés :

$$\delta \leq L/50 \quad \text{(A.6)}$$

$$\phi \leq 1/50 \quad \text{(A.7)}$$

où :

δ est la flèche maximale d'une poutre de portée L ;

ϕ est l'angle de déformation latérale d'une structure.

(3) Pour les essais d'assemblages, ou de composants pour lesquels l'étude des grandes déformations est nécessaire à une évaluation précise (par exemple, pour l'évaluation des caractéristiques moment-rotation d'éclissages), aucune limite des déformations globales pendant l'essai nest fixée.

(4) Il convient de prévoir une marge de sécurité appropriée entre un mode de ruine ductile et d'éventuels modes de ruine fragile. Etant donné que les modes de ruine fragile n'apparaissent pas habituellement lors des essais effectués à grande échelle, il convient de réaliser des essais de détail supplémentaires si nécessaire.

NOTE Cela est souvent le cas pour les assemblages.

A.6.2 Correction des résultats d'essai

(1) Il convient de corriger les résultats d'essais de manière appropriée pour tenir compte des différences entre les propriétés réelles mesurées des éprouvettes et leurs valeurs nominales.

(2) Il convient de vérifier que la limite d'élasticité de base réelle mesurée $f_{yb,obs}$ ne s'écarte pas de plus de 25 % en moins de la limite d'élasticité de base nominale f_{yb} c'est-à-dire que $f_{yb,obs} \langle 0{,}75\ f_{yb}$.

(3) Il convient de vérifier que l'épaisseur réelle mesurée t_{obs} n'est pas supérieure à l'épaisseur nominale t_{nom} (voir 3.2.4) de plus de 12%.

(4) Il convient de réaliser les ajustements pour les valeurs mesurées de l'épaisseur du matériau de base $t_{obs,cor}$ et de la limite d'élasticité de base $f_{yb,obs}$ pour tous les essais, sauf si les valeurs mesurées au cours des essais permettent d'étalonner un modèle de calcul, rendant ainsi inutile l'application des dispositions spécifiées en (5).

(5) Il convient de déterminer la valeur corrigée $R_{adj,i}$ du résultat $R_{obs,i}$ de l'essai *i* par :

$$R_{adj,i} = R_{obs,i} / \mu_R \tag{A.8}$$

où μ_R est le coefficient d'ajustement de la résistance donné par :

$$\mu_R = \left(\frac{f_{yb,obs}}{f_{yb}}\right)^{\alpha} \left(\frac{t_{obs,cor}}{t_{cor}}\right)^{\beta} \tag{A.9}$$

(6) Il convient de déterminer l'exposant α à utiliser dans l'expression (A.9) de la façon suivante :

- si $f_{yb,obs} \leq f_{yb}$: $\alpha = 0$
- si $f_{yb,obs} > f_{yb}$:
  - en général : $\alpha = 1$

Pour les plaques nervurées ou les plateaux pour lesquels les parois comprimées présentent des rapports b_p / t tels que le flambement local constitue clairement le mode de ruine : $\alpha = 0{,}5$.

(7) Il convient de déterminer l'exposant β à utiliser dans l'expression (A.9) de la façon suivante :

- si $t_{obs,cor} \leq t_{cor}$: $\beta = 1$
- si $t_{obs,cor} > t_{cor}$:
  - pour les essais sur des plaques nervurées ou des plateaux : $\beta = 2$
  - pour les essais sur des poutres, structures ou parties de structures :
    - si $b_p / t \leq (b_p / t)_{lim}$: $\beta = 1$
    - si $b_p / t > 1{,}5(b_p / t)_{lim}$: $\beta = 2$
    - si $(b_p / t)_{lim} < b_p / t < 1{,}5(b_p / t)_{lim}$: obtenir β par interpolation linéaire.

où la limite $(b_p / t)_{lim}$ du rapport largeur-épaisseur est donnée par l'équation suivante :

$$(b_p / t)_{lim} = 0{,}64 \sqrt{\frac{E\,k_\sigma}{f_{yb}}} \cdot \sqrt{\frac{f_{yb} / \gamma_{M1}}{\sigma_{com,Ed}}} \cong 19{,}1\,\varepsilon \sqrt{k_\sigma} \cdot \sqrt{\frac{f_{yb} / \gamma_{M1}}{\sigma_{com,Ed}}} \quad \text{(A.10)}$$

où :

b_p est la largeur de référence d'une paroi ;

k_σ est le coefficient de voilement approprié donné dans le Tableau 4.1 ou le Tableau 4.2 de l'EN 1993-1-5 ;

$\sigma_{com,Ed}$ est la plus grande contrainte de compression calculée dans cette paroi, à l'état limite ultime.

NOTE Dans le cas où un rapport d'essai relatif à des éprouvettes de tôle nervurée présentant un rapport $t_{obs,cor} / t_{cor}$ [1,06 est disponible, les ajustements de valeur ne dépassant pas 1,02 fois la valeur $R_{adj,i}$ conformément au A.6.2, peuvent être négligés.

A.6.3 Valeurs caractéristiques

A.6.3.1 Généralités

(1) Les valeurs caractéristiques peuvent être déterminées statistiquement, à condition que l'on dispose d'au minimum 4 résultats d'essais.

NOTE Un nombre plus élevé est en général préférable, en particulier si la dispersion est relativement importante.

(2) Si le nombre de résultats d'essai disponibles est inférieur ou égal à 3, la méthode donnée au A.6.3.3 peut être utilisée.

(3) Il convient de déterminer la valeur caractéristique minimale en appliquant les dispositions suivantes. Si la valeur caractéristique maximale ou la valeur caractéristique moyenne doit être déterminée, il convient d'adapter de manière appropriée les dispositions données pour la valeur caractéristique minimale.

(4) La valeur caractéristique R_k déterminée à partir d'au moins 4 essais peut être obtenue à par :

$$R_k = R_m +/- k\,s \quad \text{(A.11)}$$

où :

s est l'écart-type ;

k est le coefficient approprié donné dans le Tableau A.2 ;

R_m est la valeur moyenne des résultats d'essai corrigés R_{adj} ;

Il convient d'adopter le signe défavorable "+" ou "-" pour une valeur considérée donnée.

NOTE En règle générale, pour la valeur caractéristique de la résistance, il convient de prendre le signe "-" ; dans certains (par exemple pour la valeur caractéristique d'une rotation),les deux signes doivent être pris en considération.

(5) L'écart-type s peut être déterminé par :

$$s = \left[\sum_{i=1}^{n} \left(R_{adj.i} - R_m\right)^2 \Big/ (n-1) \right]^{0,5} \equiv \left[\left[\sum_{i=1}^{n} \left(R_{adj.i}\right)^2 - (1/n) \left(\sum_{i=1}^{n} R_{adj.i} \right)^2 \right] \Big/ (n-1) \right]^{0,5} \quad \text{(A.12)}$$

où :

$R_{adj,i}$ est le résultat d'essai corrigé pour l'essai i ;

n est le nombre d'essais.

Tableau A.2 - Valeurs du coefficient *k*

n	4	5	6	8	10	20	30	∞
k	2,63	2,33	2,18	2,00	1,92	1,76	1,73	1,64

A.6.3.2 Valeurs caractéristiques pour des familles d'essais

(1) Une série d'essais effectués sur un certain nombre de structures, parties de structures, poutres, plaques nervurées ou autres composants structurels, qui sont similaires, mais dans lesquels on fait varier un ou plusieurs paramètres, peut être traitée comme une seule famille d'essais, à condition que ces éléments aient tous le même mode de ruine. Les paramètres que l'on fait varier peuvent inclure les dimensions de section transversale, la portée, l'épaisseur et la résistance du matériau.

(2) La résistance caractéristique des éléments d'une famille donnée peuvent être déterminées à partir d'une formule de calcul adéquate mettant en relation les résultats d'essais et tous les paramètres appropriés. Cette formule de calcul peut être dérivée des équations de la résistance des matériaux, ou déterminée de façon empirique.

(3) Il convient de modifier la formule de calcul de manière à évaluer la résistance moyenne mesurée aussi précisément que possible, en ajustant les coefficients pour optimiser la corrélation.

NOTE Des informations concernant ce processus sont données dans l'Annexe D de l'EN 1990.

(4) Afin de calculer l'écart-type *s*, il convient en premier lieu de normaliser chaque résultat d'essai en le divisant par la valeur correspondante résultant de la formule de calcul. Si la formule de calcul a été modifiée comme spécifié en (3), la valeur moyenne des résultats normalisés d'essai est une valeur unitaire. Il convient de prendre pour n le nombre total d'essais effectués dans la famille.

(5) Pour une famille d'au moins quatre essais, il convient ensuite d'obtenir la résistance caractéristique R_k au moyen de l'expression (A.11) en prenant R_m égale à la valeur résultant de la formule de calcul, et en utilisant la valeur de *k* prise dans le Tableau A.2 pour *n* égal au nombre total d'essais effectués dans la famille.

A.6.3.3 Valeurs caractéristiques basées sur un nombre d'essais réduit

(1) Si on effectue un seul essai, il convient alors de déterminer la résistance caractéristique R_k correspondant à cet essai à partir du résultat ajusté R_{adj} au moyen de l'expression suivante :

$$R_k = 0{,}9\, \eta_k R_{adj} \qquad \text{(A.13)}$$

où il convient de déterminer η_k de la façon suivante, selon le mode de ruine :

— ruine par plastification : $\eta_k = 0{,}9$;

— déformation : $\eta_k = 0{,}9$;

— flambement local : $\eta_k = 0{,}8$.. ...0,9 selon les effets sur le comportement global durant les essais ;

— instabilité globale : $\eta_k = 0{,}7$.

(2) Pour une famille de deux ou trois essais, à condition que chaque résultat ajusté $R_{adj,i}$ se situe dans une fourchette de ± 10 % autour de la valeur moyenne R_m des résultats ajustés, il convient de déterminer la résistance caractéristique R_k par l'équation suivante :

$$R_k = \eta_k R_m \qquad \text{(A.14)}$$

(3) Les valeurs caractéristiques des rigidités (telles que la rigidité de flexion ou de rotation) peuvent être prises égales à la valeur moyenne d'au moins deux essais, à condition que chaque résultat d'essai ne s'écarte pas de plus de 10 % de la valeur moyenne.

(4) Dans le cas d'un essai unique, la valeur caractéristique de rigidité est réduite par 0,95 pour une valeur favorable et augmentée par 1,05 pour une valeur défavorable.

A.6.4 Valeurs de calcul

(1) Il convient de déterminer la valeur de calcul de résistance R_d à partir de la valeur caractéristique correspondante R_k résultant d'essais, au moyen de :

$$R_d = \eta_{sys} \frac{R_k}{\gamma_M} \tag{A.15}$$

où :

γ_M est le coefficient partiel pour la résistance ;

η_{sys} est le coefficient de conversion pour les différences de comportement dans les conditions d'essai et dans les conditions d'utilisation.

(2) Il convient de déterminer la valeur appropriée de η_{sys} en tenant compte de la modélisation d'essai.

(3) Pour les essais sur plaques nervurées ainsi que pour d'autres procédures d'essais normalisées bien définies (y compris les essais de compression sur tronçon court A.3.2.1, les essais de traction A.3.3 et les essais de flexion A.3.4), la valeur η_{sys} peut être prise égale à 1,0. Pour les essais sur poutres maintenues en torsion conformes au A.5, la valeur η_{sys} = 1,0 peut également être retenue.

(4) Pour d'autres types d'essais dans lesquels des phénomènes d'instabilité éventuels ou des modes de comportement des structures ou des composants de structures peuvent être insuffisamment couverts par les essais, il convient d'évaluer la valeur de η_{sys} en tenant compte des conditions réelles d'essai, afin de garantir la fiabilité nécessaire.

NOTE Le coefficient partiel γ_M peut être donné dans l'Annexe Nationale. Il est recommandé d'utiliser les valeurs γ_M choisies pour le dimensionnement par calcul définies à la Section 2 ou à la Section 8 de la présente partie, à moins que l'utilisation de l'Annexe D de l'EN 1990 ne conduise à d'autres valeurs.

A.6.5 Aptitude au service

(1) Il convient de vérifier que les dispositions de la Section 7 sont satisfaites.

Annexe B
(informative)

Durabilité des fixations

(1) Le Tableau B.1 peut être appliqué pour les classes de construction I, II et III.

Tableau B.1 - Éléments de fixation et environnement de corrosion (et matériau constituant les plaques nervurées uniquement à titre d'information). Seul le risque de corrosion est pris en considération. Classification des environnements conformément à l'EN ISO 12944-2.

Classification des environnements	Matériau constituant la plaque	Matériau constituant l'élément de fixation					
		Aluminium	Acier électro-zingué. Epaisseur de couche > 7µm	Acier zingué à chaud[b]. Epaisseur de couche > 45µm	Acier inoxydable, cémenté. 1.4006 [d]	Acier inoxydable, 1.4301 [d] 1.4436 [d]	Monel[a]
C1	A, B, C	X	X	X	X	X	X
	D, E, S	X	X	X	X	X	X
C2	A	X	-	X	X	X	X
	C, D, E	X	-	X	X	X	X
	S	X	-	X	X	X	X
C3	A	X	-	X	-	X	X
	C, E	X	-	X	(X)[C]	(X)[C]	-
	D	X	-	X	-	(X)[C]	X
	S	-	-	X	X	X	X
C4	A	X	-	(X)[C]	-	(X)[C]	-
	D	-	-	X	-	(X)[C]	-
	E	X	-	X	-	(X)[C]	-
	S	-	-	X	-	X	X
C5-I	A	X	-	-	-	(X)[C]	-
	D[f]	-	-	X	-	(X)[C]	-
	S	-	-	-	-	X	-
C5-M	A	X	-	-	-	(X)[C]	-
	D[f]	-	-	X	-	(X)[C]	-
	S	-	-	-	-	X	-

NOTE : Une fixation en acier sans revêtement peut être utilisée en classe C1 d'environnement corrosif.

A = Aluminium indépendamment de la finition de surface

B = Tôle d'acier nue

C = Tôle d'acier revêtue de zinc à chaud (Z275) ou d'aluzinc (AZ150)

D = Tôle d'acier revêtue de zinc à chaud + couche de peinture ou de plastique

E = Tôle d'acier revêtue d'aluzinc (AZ185)

S = Acier inoxydable

X = Type de matériau recommandé eu égard à la corrosion

(X) = Type de matériau recommandé eu égard à la corrosion dans les conditions spécifiées uniquement

- Type de matériau non recommandé eu égard à la corrosion

a Fait référence aux rivets uniquement

b Fait référence aux vis et écrous uniquement

c rondelle isolante, constituée d'un matériau résistant au vieillissement, entre la plaque et la rondelle

d Acier inoxydable EN 10 088

e Risque de décoloration

f Vérifier toujours auprès du fournisseur des plaques

(2) La classification des environnements conformément à l'EN-ISO 12944-2 est présentée dans le Tableau B.2.

Tableau B.2 - Catégories de corrosivité atmosphérique conformément à l'EN ISO 12944-2 et exemples d'environnements types

Catégorie de corrosivité	Niveau de corrosivité	Exemples d'environnements types dans un climat tempéré (informatif))	
		Extérieur	Intérieur
C1	Très faible	-	Bâtiments chauffés à atmosphère propre, par exemple bureaux, magasins, écoles et hôtels.
C2	Faible	Atmosphères avec un faible niveau de pollution. Surtout zones rurales	Bâtiments non chauffés où de la condensation peut se produire, par exemple entrepôts, salles de sport.
C3	Moyen	Atmosphères urbaines et industrielles, pollution modérée par le dioxyde de soufre. Zones côtières à faible salinité.	Enceintes de fabrication avec une humidité élevée et une certaine pollution de l'air, par exemple industries alimentaires, blanchisseries, brasseries et laiteries.
C4	Elevé	Zones industrielles et zones côtières à salinité modérée.	Usines chimiques, piscines, chantiers navals côtiers.
C5-I	Très élevé (zone industrielle)	Zones industrielles avec une humidité élevée et une atmosphère agressive.	Bâtiments ou zones avec une condensation permanente et avec une pollution élevée.
C5-M	Très élevé (zone marine)	Zones côtières et maritimes à salinité élevée.	Bâtiments ou zones avec une condensation permanente et avec une pollution élevée.

Annexe C
(informative)

Propriétés des sections transversales à paroi mince

C.1 Sections transversales ouvertes

(1) Diviser la section transversale en *n* éléments. Numéroter les éléments de 1 à *n.*

Insérer des nœuds entre les éléments. Numéroter les nœuds de 0 à *n*.

L'élément *i* est ainsi défini par les nœuds *i* - 1 et *i*.

Indiquer les nœuds, les coordonnées et l'épaisseur (efficace).

Nœuds et éléments $j = 0..n \quad i = 1..n$

Aire des éléments de section transversale

$$dA_i = \overrightarrow{\left[t_i \cdot \sqrt{\left(y_i - y_{i-1}\right)^2 + \left(z_i - z_{i-1}\right)^2} \right]}$$

Aire de section transversale

$$A = \sum_{i=1}^{n} dA_i$$

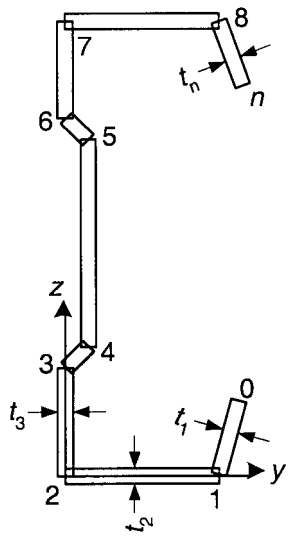


Figure C.1 - Nœuds de la section transversale

Moment statique par rapport à l'axe des y et coordonnée du centre de gravité

$$S_{y0} = \sum_{i=1}^{n} \left(z_i + z_{i-1}\right) \cdot \frac{dA_i}{2} \qquad z_{gc} = \frac{S_{y0}}{A}$$

Moment d'inertie par rapport à l'axe initial des *y* et au nouvel axe des y passant par le centre de gravité

$$I_{y0} = \sum_{i=1}^{n} \left[\left(z_i\right)^2 + \left(z_{i-1}\right)^2 + z_i \cdot z_{i-1} \right] \cdot \frac{dA_i}{3} \qquad I_y = I_{y0} - A \cdot z_{gc}{}^2$$

Moment statique par rapport à l'axe z et centre de gravité

$$S_{z0} = \sum_{i=1}^{n} \left(y_i + y_{i-1}\right) \cdot \frac{dA_i}{2} \qquad y_{gc} = \frac{S_{z0}}{A}$$

Moment d'inertie par rapport à l'axe initial des *z* et au nouvel axe z passant par le centre de gravité

$$I_{z0} = \sum_{i=1}^{n} \left[(y_i)^2 + (y_{i-1})^2 + y_i \cdot y_{i-1} \right] \cdot \frac{dA_i}{3} \qquad I_z = I_{z0} - A \cdot y_{gc}{}^2$$

Produit d'inertie par rapport aux axes *y* et *z* d'origine et aux nouveaux axes passant par le centre de gravité

$$I_{yz0} = \sum_{i=1}^{n} \left(2 \cdot y_{i-1} \cdot z_{i-1} + 2 \cdot y_i \cdot z_i + y_{i-1} \cdot z_i + y_i \cdot z_{i-1} \right) \cdot \frac{dA_i}{6} \qquad I_{yz} = I_{yz0} - \frac{S_{y0} \cdot S_{z0}}{A}$$

Axe principal

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{2 I_{yz}}{I_z - I_y} \right) \text{ si } (I_z - I_y) \neq 0 \text{ sinon } \alpha = 0$$

$$I_\xi = \frac{1}{2} \cdot \left[I_y + I_z + \sqrt{(I_z - I_y)^2 + 4 \cdot I_{yz}{}^2} \right]$$

$$I_\eta = \frac{1}{2} \cdot \left[I_y + I_z - \sqrt{(I_z - I_y)^2 + 4 \cdot I_{yz}{}^2} \right]$$

Aires sectorielles

$$\omega_0 = 0 \qquad \omega_{0_i} = y_{i-1} \cdot z_i - y_i \cdot z_{i-1} \qquad \omega_i = \omega_{i-1} + \omega_{0_i}$$

Moyenne des aires sectorielles

$$I_\omega = \sum_{i=1}^{n} \left(\omega_{i-1} + \omega_i \right) \cdot \frac{dA_i}{2} \qquad \omega_{mean} = \frac{I_\omega}{A}$$

Inerties sectorielles

$$I_{y\omega 0} = \sum_{i=1}^{n} \left(2 \cdot y_{i-1} \cdot \omega_{i-1} + 2 \cdot y_i \cdot \omega_i + y_{i-1} \cdot \omega_i + y_i \cdot \omega_{i-1} \right) \cdot \frac{dA_i}{6} \qquad I_{y\omega} = I_{y\omega 0} - \frac{S_{z0} \cdot I_\omega}{A}$$

$$I_{z\omega 0} = \sum_{i=1}^{n} \left(2 \cdot \omega_{i-1} \cdot z_{i-1} + 2 \cdot \omega_i \cdot z_i + \omega_{i-1} \cdot z_i + \omega_i \cdot z_{i-1} \right) \cdot \frac{dA_i}{6} \qquad I_{z\omega} = I_{z\omega 0} - \frac{S_{y0} \cdot I_\omega}{A}$$

$$I_{\omega\omega 0} = \sum_{i=1}^{n} \left[(\omega_i)^2 + (\omega_{i-1})^2 + \omega_i \cdot \omega_{i-1} \right] \cdot \frac{dA_i}{3} \qquad I_{\omega\omega} = I_{\omega\omega 0} - \frac{I_\omega{}^2}{A}$$

Centre de cisaillement

$$y_{sc} = \frac{I_{z\omega} \cdot I_z - I_{y\omega} \cdot I_{yz}}{I_y \cdot I_z - I_{yz}^2} \qquad z_{sc} = \frac{-I_{y\omega} \cdot I_y + I_{z\omega} \cdot I_{yz}}{I_y \cdot I_z - I_{yz}^2} \qquad (I_y I_z - I_{yz}^2 \neq 0)$$

Inertie sectorielle

$$I_w = I_{\omega\omega} + z_{sc} \cdot I_{y\omega} - y_{sc} \cdot I_{z\omega}$$

Inertie de torsion

$$I_t = \sum_{i=1}^{n} dA_i \cdot \frac{(t_i)^2}{3} \qquad W_t = \frac{I_t}{min(t)}$$

Aire sectorielle par rapport au centre de cisaillement

$$\omega_{s_j} = \omega_j - \omega_{mean} + z_{sc} \cdot (y_j - y_{gc}) - y_{sc} \cdot (z_j - z_{gc})$$

Aire sectorielle maximale et module d'inertie sectorielle

$$\omega_{max} = max(|\omega_s|) \qquad W_w = \frac{I_w}{\omega_{max}}$$

Distance entre le centre de cisaillement et le centre de gravité

$$y_s = y_{sc} - y_{gc} \qquad z_s = z_{sc} - z_{gc}$$

Moment d'inertie polaire par rapport au centre de cisaillement

$$I_p = I_y + I_z + A(y_s^2 + z_s^2)$$

Pas réussi à décaler les formules pour lisibilité

Coefficients de non symétrie z_j et y_j

$$z_j = z_s - \frac{0.5}{I_y} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left[(z_{c_i})^3 + z_{c_i} \cdot \left[\frac{(z_i - z_{i-1})^2}{4} + (y_{c_i})^2 + \frac{(y_i - y_{i-1})^2}{12} \right] + y_{c_i} \cdot \frac{(y_i - y_{i-1}) \cdot (z_i - z_{i-1})}{6} \right] \cdot dA_i$$

$$y_j = y_s - \frac{0.5}{I_z} \cdot \sum_{i=1}^{n} \left[(y_{c_i})^3 + y_{c_i} \cdot \left[\frac{(y_i - y_{i-1})^2}{4} + (z_{c_i})^2 + \frac{(z_i - z_{i-1})^2}{12} \right] + z_{c_i} \cdot \frac{(z_i - z_{i-1}) \cdot (y_i - y_{i-1})}{6} \right] \cdot dA_i$$

où les coordonnées du centre de gravité des éléments de la section transversale par rapport au centre de cisaillement sont les suivantes :

$$y_{c_i} = \frac{y_i + y_{i-1}}{2} - y_{gc} \qquad z_{c_i} = \frac{z_i + z_{i-1}}{2} - z_{gc}$$

NOTE $z_j = 0$ ($y_j = 0$) pour les éléments de section transversale dont l'axe *y* (axe *z*) est axe de symétrie, voir Figure C.1.

C.2 Propriétés des sections transversales ouvertes avec « branches »

(1) Les formules données en C.1 peuvent s'appliquer dans le cas des sections transversales avec « branches ». Toutefois, comme le parcours continu de la section conduit à parcourir certaines « branches » aller et retour, on donne une épaisseur nulle (*t=0*) aux éléments correspondant au parcours retour : exemple des éléments 3 – 4 - 5 et 6 - 7 de la Figure C.2. Une section avec « branches » est une section dans laquelle plus de deux éléments sont liés en certains points.

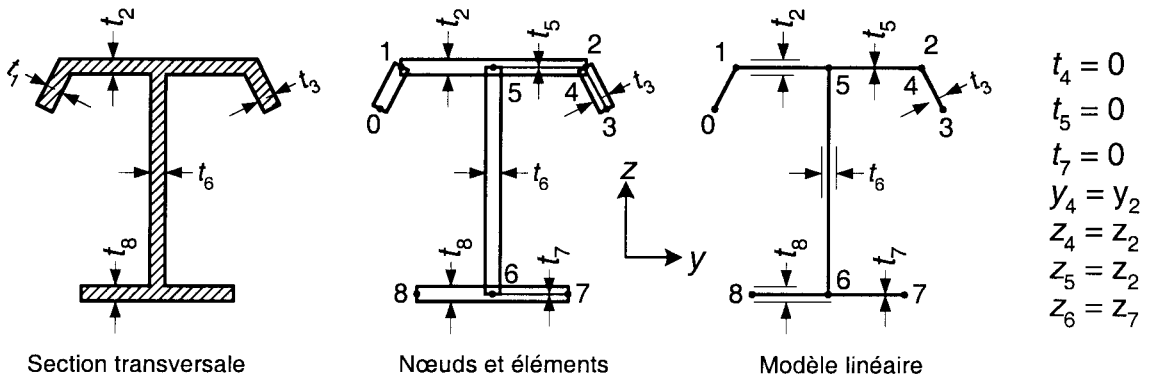


Figure C.2 - Nœuds et éléments d'une section transversale avec branches

C.3 Inertie de torsion et centre de cisaillement d'une section transversale avec partie fermée

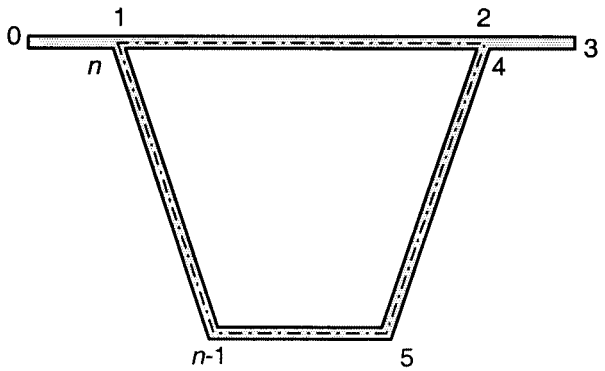


Figure C.3 - Section transversale avec partie fermée

(1) Pour une section transversale symétrique ou non symétrique avec une partie fermée, Figure C.3, l'inertie de torsion est donnée par l'équation suivante

$$I_t = \frac{4A_t^2}{S_t} \quad \text{et} \quad W_t = 2\,A_t\,\min(t_i)$$

où

$$A_t = 0{,}5\sum_{i=2}^{n}(y_i - y_{i-1})(z_i + z_{i-1})$$

$$S_t = \sum_{i=2}^{n}\frac{\sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}}{t_i} \qquad (t_i \neq 0)$$

Annexe D
(informative)

Méthode mixte largeur efficace/épaisseur efficace pour les parois en débord

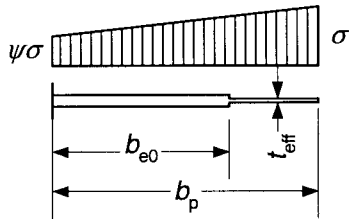
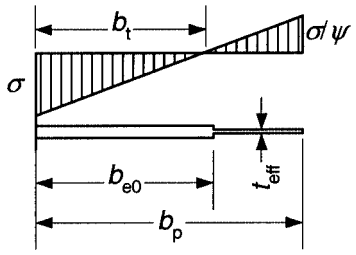
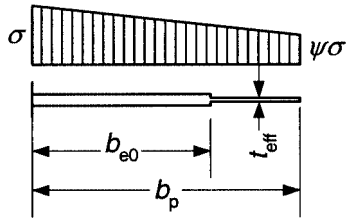
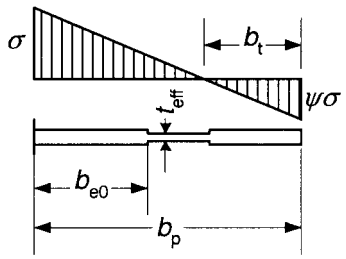
(1) La présente Annexe décrit une alternative à la méthode de la largeur efficace définie au 5.5.2 pour les parois en débord comprimées. La section efficace de la paroi se compose de d'une section égale au produit de son épaisseur par une largeur efficace b_{e0} et d'une section égale au produit d'une épaisseur efficace t_{eff} par la largeur restante de la paroi b_p . Voir Tableau C.1.

(2) Le paramètre d'élancement $\overline{\lambda}_p$ et le coefficient de réduction ρ sont donnés au 5.5.2 en fonction du coefficient de flambement k_σ indiqué dans le Tableau D.1.

(3) Le rapport de contraintes ψ intervenant dans l'expression de k_σ peut être basé sur la répartition des contraintes dans la section transversale brute.

(4) Il convient de calculer la résistance de la section pour une répartition élastique des contraintes dans la section.

Tableau D.1 - Parois en débord comprimées

Compression maximale au droit du bord longitudinal libre		
Distribution des contraintes	Largeur et épaisseur efficaces	Coefficient de flambement
	$1 \geq \psi \geq 0$ $b_{e0} = 0{,}42 b_p$ $t_{eff} = (1{,}75\rho - 0{,}75)t$	$1 \geq \psi \geq -2$ $k_\sigma = \dfrac{1{,}7}{3+\psi}$
	$\psi < 0$ $b_{e0} = \dfrac{0{,}42 b_p}{(1-\psi)} + b_t < b_p$ $b_t = \dfrac{\psi b_p}{(\psi - 1)}$ $t_{eff} = (1{,}75\rho - 0{,}75 - 0{,}15\psi)t$	$-2 > \psi \geq -3$ $k_\sigma = 3{,}3(1+\psi) + 1{,}25\psi^2$ $\psi < -3$ $k_\sigma = 0{,}29(1-\psi)^2$
Compression maximale au bord longitudinal maintenu		
Répartition des contraintes	Largeur et épaisseur efficaces	Coefficient de flambement
	$1 \geq \psi \geq 0$ $b_{e0} = 0{,}42 b_p$ $t_{eff} = (1{,}75\rho - 0{,}75)t$	$1 \geq \psi \geq 0$ $k_\sigma = \dfrac{1{,}7}{1+3\psi}$
	$\psi < 0$ $b_{e0} = \dfrac{0{,}42 b_p}{(1-\psi)}$ $b_t = \dfrac{\psi b_p}{(\psi - 1)}$ $t_{eff} = (1{,}75\rho - 0{,}75)t$	$0 \geq \psi \geq -1$ $k_\sigma = 1{,}7 - 5\psi + 17{,}1\psi^2$ $\psi < -1$ $k_\sigma = 5{,}98(1-\psi)^2$

Annexe E
(Informative)

Calcul simplifié des pannes

(1) Les pannes avec section transversale en C, Z et Σ avec ou sans raidisseurs d'âme ou de semelle, peuvent être calculées selon les clauses (2) à (4) si les conditions suivantes sont satisfaites :

— les dimensions de la section transversale se situent dans les plages données dans le Tableau E.1;

— les pannes sont maintenues horizontalement par des plaques nervurées, lorsque le maintien horizontal satisfait aux conditions de l'équation 10.1a ;

— les pannes sont maintenues en rotation par des plaques nervurées et les conditions définies au Tableau E.1 sont satisfaites.

— les pannes comportent des travées égales et sont soumises à une charge uniforme

Il convient de ne pas utiliser cette méthode :

— pour les systèmes utilisant des liernes ;

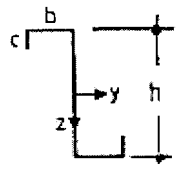
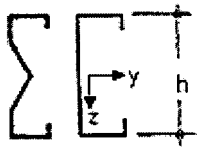
— pour les systèmes à emboîtement ou à éclissage ;

— pour l'application d'un effort normal N_{Ed}.

NOTE La limitation d'utilisation et la validité de cette méthode peuvent être indiquées dans l'Annexe Nationale.

Tableau E.1 - Limitations à satisfaire en cas d'utilisation de la méthode de calcul simplifié et autres limites telles que définies dans le Tableau 5.1 et au paragraphe 5.2

(les axes y et z sont respectivement parallèle et perpendiculaire à la semelle supérieure)

pannes	*t* [mm]	*b*/*t*	*h*/*t*	*h*/*b*	*c*/*t*	*b*/*c*	*L*/*h*
	≥ 1,25	≤ 55	≤ 160	≤ 3,43	≤ 20	≤ 4,0	≥ 15
	≥ 1,25	≤ 55	≤ 160	≤ 3,43	≤ 20	≤ 4,0	≥ 15

(2) Il convient de vérifier que la valeur de calcul du moment de flexion M_{Ed} satisfait la condition :

$$\frac{M_{\mathrm{Ed}}}{M_{\mathrm{LT,Rd}}} \leq 1 \qquad \text{(E.1)}$$

où

$$M_{\mathrm{LT,Rd}} = \left(\frac{f_{\mathrm{y}}}{\gamma_{\mathrm{M1}}}\right) W_{\mathrm{eff,y}} \frac{\chi_{\mathrm{LT}}}{k_{\mathrm{d}}} \tag{E.2}$$

et

$W_{\mathrm{eff,y}}$ est le module de résistance de la section transversale efficace par rapport à l'axe y ;

χ_{LT} est le coefficient de réduction pour le déversement compte tenu de $\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}}$ défini au 6.2.3, où α_{LT} est remplacé par $\alpha_{\mathrm{LT,eff}}$;

et

$$\bar{\lambda}_{\mathrm{LT}} = \sqrt{\frac{W_{\mathrm{eff,y}}\ f_{\mathrm{y}}}{M_{\mathrm{cr}}}} \tag{E.3}$$

$$\alpha_{\mathrm{LT,eff}} = \alpha_{\mathrm{LT}} \sqrt{\frac{W_{\mathrm{el,y}}}{W_{\mathrm{eff,y}}}} \tag{E.4}$$

et

α_{LT} est le coefficient d'imperfection défini au 6.2.3 ;

$W_{\mathrm{el,y}}$ est le moment de résistance de la section transversale brute par rapport à l'axe y ;

k_{d} est un coefficient prenant en compte la partie non maintenue de la panne suivant équation (E.5) et Tableau E.2 ;

$$k_{\mathrm{d}} = \left(a_1 - a_2 \frac{L}{h}\right), \text{ mais} \geq 1.0 \tag{E.5}$$

a_1, a_2 coefficients définis dans le Tableau E.2 ;

L portée de la panne ;

h hauteur hors-tout de la panne.

Tableau E.2 - Coefficients a_1, a_2 utilisés dans l'équation (E.5)

Système	Pannes de type Z		Pannes de type C		Pannes de type Σ	
	a_1	a_2	a_1	a_2	a_1	a_2
poutre à travée simple charge de gravité	1.0	0	1.1	0.002	1.1	0.002
poutre à travée simple charge de soulèvement	1.3	0	3.5	0.050	1.9	0.020
poutre continue charge de gravité	1.0	0	1.6	0.020	1.6	0.020
poutre continue charge de soulèvement	1.4	0.010	2.7	0.040	1.0	0

(3) Le coefficient de réduction ξ_{LT} peut être pris selon l'équation (E.6), pour une poutre à travée simple sous l'action d'une charge de gravité ou si l'équation (E.7) est satisfaite

$$\chi_{\mathrm{LT}} = 1{,}0 \tag{E.6}$$

$$C_{\mathrm{D}} \geq \frac{M_{\mathrm{el,u}}^{2}}{E\,I_{\mathrm{v}}}\,k_{\vartheta} \tag{E.7}$$

où

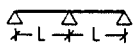
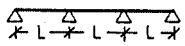
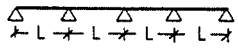
$M_{\mathrm{el,u}} = W_{\mathrm{el,u}}\ f_{\mathrm{y}}$ moment résistant élastique de la section transversale brute par rapport à l'axe fort u ….(E.8)

I_{v} moment d'inertie de la section transversale brute par rapport à l'axe faible v :

k_{ϑ} coefficient dépendant du système statique de la panne défini dans le Tableau E.3.

NOTE Pour des pannes de type C et de type Σ avec semelles égales, $I_v = I_z$, $W_u = W_y$, et $M_{el,u} = M_{el,y}$. Les conventions qui s'appliquent aux axes de sections transversales sont présentées à la Figure 1.7 et en 1.6.4.

Tableau E.3 - Coefficients k_{ϑ}

Système statique	charge de gravité	charge de soulèvement
	-	0.210
	0.07	0.029
	0.15	0.066
	0.10	0.053

(4) Il convient de calculer le coefficient de réduction χ_{LT} à l'aide de l'équation (6.2.4) en utilisant $\overline{\lambda}_{LT}$ et $\alpha_{LT,eff}$ dans les cas non couverts par (3). Le moment critique élastique de déversement M_{cr} peut être calculé par l'équation (E.9) suivante :

$$M_{cr} = \frac{k}{L}\sqrt{G\,I_t^*\,E\,I_v} \tag{E.9}$$

où

I_t^* est l'inertie de torsion de St. Venant fictive en tenant compte du maintien en rotation efficace par les équations (E.10) et (E.11):

$$I_t^* = I_t + C_D\,\frac{L^2}{\pi^2\,G} \tag{E.10}$$

I_t est l'inertie de torsion de St. Venant de la panne ;

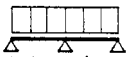
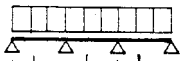
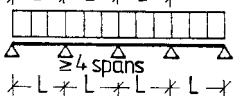
$$1/C_D = \frac{1}{C_{D,A}} + \frac{1}{C_{D,B}} + \frac{1}{C_{D,C}} \tag{E.11}$$

$C_{D,A}$, $C_{D,C}$ représentent les rigidités en rotation définies au 10.1.5.2 ;

$C_{D,B}$ représente la rigidité en rotation résultant de la distorsion de la section transversale de la panne définie au 10.1.5.1, $C_{D,B} = K_B\,h^2$, où h = hauteur de la panne et K_B défini conformément au 10.1.5.1 ;

k est le coefficient de déversement défini dans le Tableau E.4.

Tableau E.4 - Coefficient de déversement *k* pour les poutres maintenues horizontalement au niveau de la semelle supérieure

Système statique	Charge de gravité	Charge de soulèvement
	∞	10.3
	17.7	27.7
	12.2	18.3
	14.6	20.5