

normalisation française

XP ENV 1993-1-5
Décembre 2000

Indice de classement : **P 22-315**

ICS : 91.080.10

Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et Document d'Application Nationale

Partie 1-5 : Règles générales — Règles supplémentaires pour les plaques planes, raidies ou non, chargées dans leur plan

E : Eurocode 3 : Design of steel structures and National Application Document —
Part 1-5: General rules — Supplementary rules for planar plated structures
without transverse loading

D : Eurocode 3 : Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten und national
Anwendungsdokumente — Teil 1-5: Allgemeine Bemessungsregeln —
Ergänzende Regeln zu ebener Blechfelder ohne Querbelastung

Norme expérimentale

publiée par AFNOR en décembre 2000.

Les observations relatives à la présente norme expérimentale doivent être adressées à l'AFNOR avant le 20 décembre 2001.

Correspondance

Le présent document reproduit intégralement la Prénorme européenne ENV 1993-1-5:1997 et intègre les adaptations nationales relatives à cette ENV.

Analyse

Le présent document donne des dispositions supplémentaires pour le calcul des structures à plaques, raidies ou non, pour une utilisation en conjonction avec XP ENV 1993-1-1 (y compris XP ENV 1993-1-1/A1), ainsi qu'avec les autres parties de XP ENV 1993 qui y font référence.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : bâtiment, génie civil, construction métallique, acier de construction, plaque métallique, calcul, règle de calcul, conception, règle de construction, résistance des matériaux.

Modifications

Corrections

Éditée et diffusée par l'Association Française de Normalisation (AFNOR), Tour Europe 92049 Paris La Défense Cedex
Tél. : 01 42 91 55 55 — Tél. international : + 33 1 42 91 55 55



Membres de la commission de normalisation

Président : M BROZZETTI

Secrétariat : M PESCATORE — BNCM

M	ARIBERT	INSA
M	BARAKA	CTICM
M	BARJON	SERVICE TECHNIQUE DES REMONTEES MECANIQUES
M	BAZIN	CSTB
M	BORGEOT	CTICM
M	BRAHAM	ASTRON BUILDING SYSTEMS
M	BROZZETTI	CTICM
M	CAMPAN	EUROPROFIL FRANCE
M	CHABROLIN	CTICM
M	CRETON	BNS
M	DESFERTILLES	INSTITUT DE SOUDURE
MME	DUSSAUGEY	SYNDICAT NATIONAL DES INDUSTRIES D'EQUIPEMENT
M	ESTEVE	EDF
M	ETIENNE	M.E.L.T. / D.A.E.I.
MME	FERNANDEZ	AFNOR
M	GALEA	CTICM
M	GAULIARD	SYNDICAT DE LA CONSTRUCTION METALLIQUE DE FRANCE
M	GOURMELON	LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES
M	GREGOIRE	CETEN APAVE
M	GRIMAULT	TUBEUROP FRANCE
M	KRUPPA	CTICM
M	LAPEYRE	C.E.P.
M	LE CHAFFOTEC	SOCOTEC
M	LE ROUX	EDF
M	MAITRE	SOCOTEC
M	MARTIN	SNCF
M	MAYERE	BUREAU VERITAS
M	MOREAU	SNPPA
M	MOUTY	
MME	PECHENARD	AFFIX
M	PERFETTI	C.S.N.E.
M	PESCATORE	BNCM
M	RAOUL	SETRA
M	ROCHE	SETRA
M	RYAN	CTICM
M	SOKOL	PAB
M	VOISIN	INRS

Ont participé en tant qu'experts au groupe de travail EC3 partie 1-5/DAN :

M	ARIBERT	INSA RENNES
M	BERTHELLEMY	SETRA
M	BITAR	CTICM
M	BOUCHON	MELTT / SETRA
M	BROZZETTI	CTICM
M	BUI	SETRA
M	CAMPAN	EUROPROFIL
M	CHABROLIN	CTICM
M	DUGAS	RICHARD DUCROS
MME	EZRAN	SETEC
M	FOUCRIAT	Ingénieur Conseil
M	FUZIER	FREYSSINET
MME	GENONCEAUX	SETEC
M	GUILLOT	CETE DE L'OUEST
M	HEVER	EUROPROFIL
M	HOORPAH	OTUA
M	JARTOUX	FREYSSINET
M	KEUSCH	EIFFEL
M	KRETZ	LCPC
M	LABOURIE	CETE DU NORD-PICARDIE
M	LE FAUCHEUR	SETRA
M	LECROCQ	SEER-INGEROP
M	MAITRE	SOCOTEC
M	MARTIN	SNCF
M	MATHIEU	IGPC
M	PLU	SNCF
M	RAOUL	SETRA
M	RAVISY	BERTHOLD
M	RESPLENDINO	CETE MEDITERRANEE
M	ROCHE	SETRA
M	TRINH	CETEN / APAVE
M	TROUILLET	M.C.S.C.A.
M	XERCAVINS	P.X. CONSULTANTS

Sommaire

	Page
AP.1 Introduction	4
AP.2 Relations avec les normes P 22-311 (ENV 1993-1-1) et XP ENV 1993-1-1/A1	4
AP.3 Modalités d'application	4
AP.3.1 Domaine d'application	4
AP.3.2 La référence aux textes normatifs	4
AP.3.3 Modalités contractuelles	5
AP.3.4 Modalités d'expérimentation	5
AP.4 Liste des normes et textes normatifs de référence	5

Avant-propos national

AP.1 Introduction

La présente norme française expérimentale, dénommée EC3-1-5 DAN, reproduit intégralement l'ENV 1993-1-5 (en clair l'Eurocode 3 partie 1-5, en abrégé l'EC3-1-5), approuvée par le Comité Européen de Normalisation (CEN) en tant que prénorme européenne (ENV).

La présente norme française expérimentale spécifie, en outre, les adaptations nationales qui ont été apportées à l'EC3-1-5 dont la réunion constitue le Document d'Application Nationale (en abrégé le DAN).

AP.2 Relations avec les normes P 22-311 (ENV 1993-1-1) et XP ENV 1993-1-1/A1

- a) Il y a lieu de se reporter à la norme expérimentale P 22-311-0 (ENV 1993-1-1:1992 ou Eurocode 3 partie 1-1) pour obtenir les informations générales applicables à toutes les parties et, en particulier, connaître les conventions de présentation relatives au DAN.
- b) Il y a lieu également de se reporter à l'appendice de la norme expérimentale P 22-311-2 (Bases de calcul), qui fixe et récapitule les valeurs encadrées applicables à toutes les parties, sauf indication contraire dans les textes.
- c) La présente norme française expérimentale donne des dispositions supplémentaires pour le calcul des structures à plaques, raidies ou non, chargées dans leur plan, pour une utilisation en conjonction avec l'ENV 1993-1-1 (y compris l'ENV 1993-1-1/A1), ainsi qu'avec les autres parties de l'ENV 1993 qui y font référence.

AP.3 Modalités d'application

AP.3.1 Domaine d'application

Le domaine d'application de l'ENV 1993-1-5 DAN couvre la construction des bâtiments et ouvrages de génie civil en acier.

Pour les applications à la marge de ce domaine, il est recommandé de consulter la Commission de Normalisation de la Construction Métallique (CNCMét).

AP.3.2 La référence aux textes normatifs

Dans les répertoires de l'article AP.4 du présent avant-propos sont présentés :

- partie gauche : les normes européennes actuellement en vigueur ;
- partie droite et en regard des normes européennes, les normes nationales et autres documents s'y substituant temporairement et à utiliser, en totalité ou partiellement, avec la présente norme française expérimentale.

Dans le cadre de l'application de la norme française expérimentale, on se référera aux normes répertoriées dans la partie droite de l'article AP.4. En l'absence de normes européennes, il est fait appel, pour l'essentiel aux normes nationales. Il n'a pas été jugé nécessaire, chaque fois que l'EC3-1-5 fait référence à une norme (européenne ou ISO) de mentionner dans le corps même du DAN, la (les) norme(s) nationale(s) équivalente(s). À charge pour l'utilisateur de retrouver celle(s)-ci dans l'article AP.4 par une lecture allant de la gauche vers la droite.

AP.3.3 Modalités contractuelles

La présente norme expérimentale n'est applicable, en totalité ou en partie, dans le cadre contractuel d'un marché public ou privé que s'il y est fait explicitement référence :

- pour les marchés publics, dans le Cahier des Clauses Administratives Particulières à l'article 2 — où la liste des pièces générales rendues contractuelles mentionnera la norme française expérimentale et en cas d'utilisation partielle les parties de celle-ci à considérer — et à l'article 10 — qui indiquera la dérogation correspondante faite au Cahier des Clauses Techniques Générales.
- pour les marchés privés, dans des documents particuliers du marché tels que définis dans la norme NF P 03-001, septembre 1991 (Cahier des Clauses Administratives Particulières, Cahier des Clauses Spéciales, Cahier des Clauses Techniques Particulières).

AP.3.4 Modalités d'expérimentation

L'ENV 1993-1-5 a été approuvé par le CEN le 30 juin 1997.

Au terme d'une période expérimentale de trois ans, les pays membres du CEN auront à opter soit pour un ultime prolongement du statut de l'ENV pour une période d'au moins trois ans, soit pour le statut de norme européenne (EN).

Cette décision sera très certainement assortie d'une révision de la norme.

Dans cette perspective, les utilisateurs de la présente norme expérimentale sont invités à faire connaître leurs observations avec, si possible, propositions d'amendements à l'appui, à AFNOR (Tour Europe — Cedex 7 — 92049 PARIS LA DÉFENSE) qui transmettra au BNCM.

Évolution des adaptations nationales

Il n'est pas exclu que l'expérimentation de l'EC3-1-5 DAN mette en évidence certains problèmes relatifs à l'applicabilité du document, conduisant la CNCMét à formuler des amendements ou à apporter des compléments jugés indispensables aux adaptations nationales déjà produites. En cas de difficulté, il y aura lieu de se rapprocher de l'AFNOR ou du BNCM.

AP.4 Liste des normes et textes normatifs de référence

Le présent article a pour objet de donner la liste des normes et autres textes normatifs auxquels il y a lieu de se référer pendant la phase d'expérimentation de l'EC3-1-5 DAN.

Normes européennes ou internationales publiées			Normes pouvant être appliquées avec l'ENV	
Désignation	Intitulé	Date de publication	Désignation	Intitulé
ENV 1993-1-1	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments	12/1992	P 22-311	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et Document d'Application Nationale — Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments
ENV 1993-2	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 2 : Ponts métalliques	10/1997	XP ENV 1993-2	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et Document d'Application Nationale — Partie 2 : Ponts métalliques

ICS : 91.010.30 ; 91.080.10

Descripteurs : construction métallique, acier de construction, plaque métallique, règle de calcul, résistance des matériaux, charge.

Version française

**Eurocode 3 : Calcul des structures en acier —
Partie 1-5 : Règles générales —
Règles supplémentaires pour les plaques planes,
raidies ou non, chargées dans leur plan**

Eurocode 3 : Bemessung und Konstruktion
von Stahlbauten —
Teil 1-5: Allgemeine Bemessungsregeln —
Ergänzende Regeln zu ebener
Blechfelder ohne Querbelastung

Eurocode 3 : Design of steel structures —
Part 1-5: General rules —
Supplementary rules for planar plated structures
without transverse loading

La présente prénorme européenne (ENV) a été adoptée par le CEN le 30 juin 1997 comme norme expérimentale pour application provisoire. La période de validité de cette ENV est limitée initialement à trois ans. Après deux ans, les membres du CEN seront invités à soumettre leurs commentaires, en particulier sur l'éventualité de la conversion de l'ENV en norme européenne (EN).

Les membres du CEN sont tenus d'annoncer l'existence de cette ENV de la même façon que pour une EN et de rendre cette ENV rapidement disponible au niveau national sous une forme appropriée. Il est admis de maintenir (en parallèle avec l'ENV) des normes nationales en contradiction avec l'ENV en application jusqu'à la décision finale de conversion possible de l'ENV en EN.

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

CEN

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Europäisches Komitee für Normung
European Committee for Standardization

Secrétariat Central : rue de Stassart 36, B-1050 Bruxelles

Sommaire

	Page
Avant-propos	3
1 Généralités	5
1.1 Objet	5
1.2 Distinction entre principes et règles d'application	5
1.3 Références normatives	5
1.4 Définitions	6
1.5 Symboles	6
2 Bases de calcul	7
2.1 Modélisation pour l'analyse globale élastique	7
2.2 Vérification de la résistance d'une section transversale	8
3 Effets du traînage de cisaillement sur la répartition des contraintes et sur la résistance	12
3.1 Généralités	12
3.2 Largeur efficace pour le traînage de cisaillement aux états limites de service et de fatigue	12
3.3 Répartition des contraintes en cas de traînage de cisaillement	14
3.4 Application de charges dans le plan	14
3.5 Effets du traînage de cisaillement aux états limites ultimes	16
4 Résistance au voilement des plaques	16
4.1 Généralités	16
4.2 Voilement des plaques comprimées	17
4.3 Voilement des plaques soumises au cisaillement	27
4.4 Résistance des âmes aux forces transversales	31
Annexe A (informative) Coefficients de voilement	35
A.1 Coefficient de voilement pour les plaques comportant des raidisseurs multiples chargées par des contraintes directes	35
A.2 Contrainte critique pour un raidisseur considéré comme un élément comprimé fictif maintenu par la plaque	36
A.3 Coefficient de voilement par cisaillement pour les panneaux raidis	36

Avant-propos

Objectifs des Eurocodes

- (1) Les Eurocodes structuraux comprennent un ensemble de normes élaborées en vue du calcul géotechnique et structural des bâtiments et ouvrages de génie civil.
- (2) Ils ne couvrent l'exécution et le contrôle que dans la mesure où cela est nécessaire pour indiquer la qualité des produits de construction et le niveau d'exécution indispensables pour la conformité aux hypothèses des règles de calcul.
- (3) Jusqu'à ce que l'ensemble des spécifications techniques harmonisées pour les produits et pour les méthodes d'essai de leurs comportements soit disponible, quelques-uns des Eurocodes structuraux couvrent certains de ces aspects dans des annexes informatives.

Historique du programme des Eurocodes

- (4) La Commission des Communautés Européennes (CCE) a commencé à élaborer un ensemble de règles techniques harmonisées pour le calcul des bâtiments et ouvrages de génie civil, qui devait initialement servir d'alternative aux différentes règles en vigueur dans les différents états membres et qui les remplacerait à terme. Ces règles techniques ont pris le nom d'Eurocodes structuraux.
- (5) En 1990, après consultation de ses états membres respectifs, la CCE a transféré la charge des élaborations, éditions et mises à jour ultérieures des Eurocodes structuraux au CEN, et le Secrétariat de l'AELE a accepté de soutenir le CEN dans cette tâche.
- (6) Le Comité Technique CEN/TC 250 du CEN est responsable de tous les Eurocodes structuraux.

Programme des Eurocodes

- (7) Les Eurocodes structuraux suivants sont en cours d'élaboration, chacun d'eux comportant en général plusieurs parties :

EN 1991, *Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures.*

EN 1992, *Eurocode 2 : Calcul des structures en béton.*

EN 1993, *Eurocode 3 : Calcul des structures en acier.*

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

EN 1995, *Eurocode 5 : Calcul des structures en bois.*

EN 1996, *Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie.*

EN 1997, *Eurocode 7 : Calcul géotechnique.*

EN 1998, *Eurocode 8 : Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance au séisme.*

EN 1999, *Eurocode 9 : Calcul des structures en alliage d'aluminium.*

- (8) Des sous-comités distincts ont été constitués par le CEN/TC 250 pour les différents Eurocodes mentionnés ci-dessus.
- (9) La présente partie 1-5 de l'Eurocode 3 est publiée par le CEN en tant que Prénorme Européenne (ENV) avec une durée de vie initiale de trois ans.
- (10) La présente Prénorme est destinée aux applications expérimentales et à la soumission de commentaires.
- (11) À l'issue d'une période de deux ans environ, les membres du CEN seront invités à soumettre des commentaires formels en vue de déterminer les actions futures.
- (12) Dans l'intervalle, il convient que les réactions et commentaires concernant la présente Prénorme soient transmis au Secrétariat du CEN/TC 250/SC 3 à l'adresse suivante :

BSI Standards

British Standards House

389 Chiswick High Road

London W4 4AL

England

ou à l'organisme national de normalisation approprié.

Document d'Application Nationale (DAN)

(13) Dans l'optique des responsabilités incombant aux autorités des pays membres en ce qui concerne la sécurité, la santé, et les autres domaines couverts par les exigences essentielles de la Directive sur les Produits de Construction (DPC), certains éléments de sécurité figurant dans la présente ENV ont été affectés de valeurs indicatives figurant dans un encadré . Il appartient aux autorités de chaque pays membre de revoir les valeurs encadrées, et elles ont la faculté de substituer des valeurs alternatives définitives pour ces éléments de sécurité en vue de l'application nationale.

(14) Certaines Normes Européennes ou Internationales concernées peuvent ne pas être disponibles à la publication de la présente Prénorme. On prévoit donc qu'un Document d'Application Nationale (DAN) donnant toutes valeurs de substitution définitives pour les éléments de sécurité, mentionnant les normes concernées compatibles et contenant des directives sur l'application nationale de la présente Prénorme, sera publié par chaque pays membre ou par son Organisme de Normalisation.

(15) La présente Prénorme est prévue pour être utilisée conjointement avec le DAN valable dans le pays où se situe le bâtiment ou l'ouvrage de génie civil.

Spécificités de la présente Prénorme

(16) Les Parties de l'ENV 1993 dont la publication est actuellement envisagée sont les suivantes :

ENV 1993-1-1, *Règles générales : Règles générales et règles pour les bâtiments.*

ENV 1993-1-2, *Règles générales : Calcul du comportement au feu.*

ENV 1993-1-3, *Règles générales : Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid.*

ENV 1993-1-4, *Règles générales : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables.*

ENV 1993-1-5, *Règles générales : Règles supplémentaires pour les plaques planes, raidies ou non, chargées dans leur plan.*

ENV 1993-1-6, *Règles générales : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en coques.*

ENV 1993-1-7, *Règles générales : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des plaques planes chargées transversalement.*

ENV 1993-2, *Ponts métalliques.*

ENV 1993-3, *Pylônes, mâts et cheminées.*

ENV 1993-4, *Silos, réservoirs et pipelines.*

ENV 1993-5, *Pieux et palplanches.*

ENV 1993-6, *Chemins de roulement.*

ENV 1993-7, *Structures marines et maritimes.*

ENV 1993-8, *Structures agricoles.*

(17) La présente Partie 1-5 de l'Eurocode 3 a été élaborée pour compléter la Partie 2 en donnant les règles concernant les plaques nécessaires au calcul des ponts comportant des poutres à âme pleine ou des poutres-caissons.

(18) Étant donné que ces règles ne sont pas spécifiques aux ponts, elles ont été rassemblées en tant que document séparé, sous une forme permettant une incorporation ultérieure avec d'autres règles générales dans la partie 1 de l'Eurocode 3.

1 Généralités

1.1 Objet

(1)P La présente partie 1-5 de l'ENV 1993 donne des dispositions supplémentaires pour le calcul des structures à plaques, raidies ou non, pour une utilisation en conjonction avec l'ENV 1993-1-1 (y compris l'ENV 1993-1-1/A1) ainsi qu'avec les autres parties de l'ENV 1993 qui y font référence.

(2)P Des méthodes sont données pour la détermination des effets du voilement des plaques et du traînage de cisaillement dans les poutres en I à âme pleine et dans les poutres-caissons.

(3)P Ces méthodes sont également applicables aux parties plates de réservoirs et de silos en ce qui concerne les effets dans le plan. Les effets de la pression latérale ne sont pas couverts dans la présente Partie 1-5.

(4) Les méthodes données sont applicables aux sections transversales de classe 3 et de classe 4, telles qu'elles sont définies dans la clause 5.3.2 de l'ENV 1993-1-1. Les sections transversales de classe 1 et de classe 2 peuvent être traitées de la même façon que les sections transversales de classe 3, mais les méthodes exploitant leur résistance plastique ne sont pas incluses.

(5) Lorsque la présente Partie 1-5 est utilisée, elle remplace les dispositions correspondantes données dans la Section 5 de l'ENV 1993-1-1 et dans la clause D.5 de l'ENV 1993-1-1/A1.

1.2 Distinction entre principes et règles d'application

(1)P En fonction du caractère de chaque paragraphe, une distinction est faite entre principes et règles d'application.

(2)P Les principes comprennent :

- des dispositions à caractère général ou intangible pour lesquelles il n'existe aucune alternative ;
- des exigences et des modèles analytiques qui n'admettent aucune alternative, sauf mention spécifique.

(3) Les principes sont identifiés par la lettre P suivant le numéro de paragraphe.

(4)P Les règles d'application sont des règles généralement reconnues qui respectent les principes et qui satisfont à leurs exigences. On peut utiliser des règles de calcul alternatives différentes des règles d'application données dans l'Eurocode, à condition de démontrer que la règle alternative respecte les principes concernés et présente une fiabilité au moins identique.

(5) Les règles d'application sont identifiées par un numéro entre parenthèses, comme dans le présent paragraphe.

1.3 Références normatives

La présente Prénorme Européenne intègre, par référence datée ou non, des dispositions provenant d'autres publications. Ces références normatives sont citées aux endroits appropriés du texte et les publications sont indiquées ci-dessous. En ce qui concerne les références datées, les révisions ou amendements ultérieurs de ces publications ne s'appliquent à la présente Prénorme Européenne que lorsqu'ils y sont intégrés par amendement ou révision. Pour les références non datées, c'est l'édition la plus récente de la publication concernée qui s'applique.

ENV 1993-1-1, *Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1.1 : Règles générales — Règles générales et règles pour les bâtiments.*

ENV 1993-2, *Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 2 : Ponts métalliques.*

1.4 Définitions

Dans le cadre de la présente norme, les définitions suivantes s'appliquent :

1.4.1

contrainte critique élastique

contrainte dans un élément pour laquelle cet élément devient instable lorsqu'on utilise la théorie élastique avec petites déformations

1.4.2

section transversale brute

aire totale de la section transversale d'un élément, mais à l'exclusion des raidisseurs longitudinaux non continus, des traverses de liaison et des couvre-joints

1.4.3

section transversale efficace

section transversale brute réduite pour tenir compte du voilement de plaque et du traînage de cisaillement

1.4.4

contrainte de membrane

contrainte dans le plan moyen de la plaque

1.4.5

structure à plaques

structure constituée d'un assemblage de plaques nominalelement planes. Les plaques peuvent être raidies ou non

1.4.6

raidisseur

plat ou profil fixé sur une plaque dans le but de prévenir le voilement de cette plaque ou de la renforcer vis-à-vis des charges locales. Un raidisseur est appelé :

- longitudinal si sa direction est parallèle à celle de l'élément ;
- transversal si son axe est perpendiculaire à celui de l'élément.

1.4.7

plaque raidie

plaque munie de raidisseurs transversaux et/ou longitudinaux

1.4.8

panneau secondaire

plaque non raidie bordée par des semelles ou des raidisseurs

1.5 Symboles

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

A_{sl}	aire totale de tous les raidisseurs longitudinaux à l'intérieur de la largeur de semelle b_0 , voir 3.2(2)
A_{st}	aire de section transversale brute d'un seul raidisseur transversal
A_{eff}	aire de section transversale efficace, voir 2.2.2(2)
b	largeur de la plaque
b_w	largeur libre entre soudures
b_{eff}	largeur efficace pour le traînage de cisaillement élastique
F_{Sd}	effort transversal de calcul
f_{yd}	limite d'élasticité de calcul f_y/γ_{M1} ou f_y/γ_{M0} selon l'ENV 1993-1-1:1992. Les indices supplémentaires f et w font respectivement référence à la semelle et à l'âme
h_w	hauteur d'âme libre entre semelles
L_{eff}	longueur efficace pour la résistance aux efforts transversaux, voir 4.4.3(1)

$M_{f,Rd}$	moment résistant plastique de calcul d'une section transversale composée uniquement des semelles
$M_{pl,Rd}$	moment résistant plastique de calcul de la section transversale (indépendamment de la classe de section transversale)
M_{sd}	moment fléchissant de calcul
N_{sd}	effort axial de calcul
t	épaisseur de la plaque
t_{eff}	épaisseur efficace pour le voilement par cisaillement, voir 4.3.2
V_{sd}	effort tranchant de calcul
W_{eff}	module de résistance efficace, voir 2.2.2(3)
β	facteur de largeur efficace pour le traînage de cisaillement élastique, voir 3.2(2)
η	relation entre résistance en cisaillement et limite d'élasticité en traction
$\gamma_{M,ser}$	coefficient partiel pour la résistance aux états de service

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

2 Bases de calcul

2.1 Modélisation pour l'analyse globale élastique

(1)P Les effets du traînage de cisaillement et du voilement local sur la rigidité doivent être pris en compte s'ils affectent de façon significative l'analyse globale.

(2) Les effets du traînage de cisaillement des semelles dans l'analyse globale peuvent être pris en compte en utilisant une largeur efficace. Pour des raisons de simplicité, cette largeur efficace peut être considérée comme étant uniforme sur la longueur de la poutre.

(2) **C** Dans le cas de travées continues, on peut considérer que la largeur efficace est uniforme sur la longueur de chaque travée.

(3) Pour chaque travée d'une poutre, il convient de prendre la largeur efficace des semelles égale à la plus petite des valeurs de la largeur totale et de $L/8$ par côté de l'âme, où L représente la portée, ou deux fois la distance entre l'appui et l'extrémité pour une console.

(3) **A** Dans le cas de travées continues, L est à remplacer par une valeur approchée de la distance L_e entre points de moment fléchissant nul.

(4) Pour l'analyse globale, l'effet du voilement de la plaque sur la rigidité peut être négligé dans les structures à plaques usuelles.

(4) **C** Pour l'analyse globale, on peut négliger l'effet des raidisseurs longitudinaux sur la rigidité si ces raidisseurs sont discontinus.

(5) Si l'aire de section transversale efficace selon 4.2 d'un élément comprimé est inférieure à $\boxed{0,5}$ fois l'aire de section transversale brute, il convient de prendre en compte la réduction de la rigidité résultant du voilement de la plaque.

(5) **C** Cette réduction de rigidité due au voilement ne concerne que l'analyse globale pour les vérifications à l'état limite ultime de résistance.

Un élément comprimé d'une section transversale peut être la membrure comprimée de la section, ou bien l'âme avec ses raidisseurs éventuels.

Si un élément au moins d'une section est concerné par le critère, il convient de prendre en compte la réduction de rigidité éventuelle de tous les éléments de la section.

Du fait que le calcul de la réduction de rigidité est approximatif, il convient de prendre en compte cette réduction seulement si elle est défavorable.

2.2 Vérification de la résistance d'une section transversale

2.2.1 Généralités

(1)P Aux états limites ultimes, la vérification de la résistance d'une section transversale doit prendre en compte les effets suivants :

- les contraintes longitudinales $\sigma_{x,Ed}$ en tenant compte du traînage de cisaillement et du voilement de la plaque ;
- les contraintes transversales $\sigma_{z,Ed}$ en tenant compte de leur répartition et du voilement de la plaque ;
- les contraintes de cisaillement τ_{Ed} en tenant compte du voilement de la plaque ;
- les effets combinés de a), b) et c) agissant dans la même section transversale le cas échéant, voir 2.2.3.

(2) D'une manière générale, il convient que la vérification soit effectuée de la façon suivante :

$$\eta_1 = \frac{\sigma_{x,Ed}}{f_{yd}} = \frac{N_{Sd}}{f_{yd} A_{eff}} + \frac{M_{Sd} + N_{Sd} e_N}{f_{yd} W_{eff}} \leq 1,0 \quad (2.1)$$

$$\eta_2 = \frac{\sigma_{z,Ed}}{f_{ywd}} = \frac{F_{Sd}}{f_{ywd} L_{eff} t} \leq 1,0 \quad (2.2)$$

$$\eta_3 = \frac{\tau_{Ed}}{\chi_v f_{ywd} / \sqrt{3}} = \frac{V_{Sd}}{\chi_v f_{ywd} b t / \sqrt{3}} \leq 1,0 \quad (2.3)$$

où :

A_{eff} aire de section transversale efficace selon 2.2.2(2) ;

b largeur de la plaque (pour une âme, distance libre entre semelles h_w) ;

e_N décalage de la position de l'axe du centre de gravité, voir 2.2.2(2) ;

F_{Sd} effort transversal de calcul ;

f_{yd} limite d'élasticité de calcul f_y/γ_{M1} ou f_y/γ_{M0} selon l'ENV 1993-1-1:1992. Les indices supplémentaires f et w font respectivement référence à la semelle et à l'âme ;

L_{eff} longueur efficace pour la résistance aux efforts transversaux, voir 4.4.3(1) ;

M_{Sd} moment fléchissant de calcul ;

N_{Sd} effort axial de calcul ;

t épaisseur de la plaque ;

V_{Sd} effort tranchant de calcul incluant le cisaillement provenant de la torsion ;

W_{eff} module de résistance efficace, voir 2.2.2(3) ;

χ_v fonction de résistance pour la résistance au cisaillement, voir 4.3.2.

Les contraintes sont prises positives dans les conditions (2.1) à (2.3). Il convient que les effets des actions M_{Sd} , N_{Sd} et V_{Sd} incluent les effets du second ordre le cas échéant.

(2) C Dans l'expression (2.2) :

- il convient de déterminer le terme $\sigma_{z,Ed} = F_{Sd}/L_{eff} t$ suivant le modèle plastique défini en 4.4 ;
- on doit prendre $f_{ywd} = f_{yw}/\gamma_{M1}$.

2.2.2 Contraintes longitudinales aux états limites ultimes

(1) Dans le calcul des contraintes longitudinales, il convient de prendre en compte les effets du traînage de cisaillement et du voilement de la plaque en utilisant une largeur efficace, voir 3.5.

(1) C Conformément à 4.2.2.7 (2), il convient de négliger les raidisseurs longitudinaux discontinus :

- pour calculer la largeur efficace résultant du traînage de cisaillement, voir 3.2 (2) ;
- pour calculer les caractéristiques mécaniques de la section transversale comprise dans cette largeur efficace.

(2) Normalement, il convient de déterminer l'aire efficace A_{eff} d'une section transversale en considérant qu'elle est soumise uniquement à des contraintes résultant de la compression axiale N_{Sd} . Pour les sections transversales non symétriques, le décalage éventuel e_N du centre de gravité de l'aire efficace A_{eff} par rapport au centre de gravité de la section transversale brute, voir Figure 2.1, donne un moment supplémentaire qu'il convient de prendre en compte dans la vérification de la section transversale au moyen de l'expression (2.1).

(3) Normalement, il convient de déterminer le module de résistance efficace W_{eff} en considérant une section transversale soumise uniquement à des contraintes de flexion résultant de M_{Sd} , voir Figure 2.2.

(3) **C** L'excentrement du centre d'inertie de la section efficace e_M indiqué sur la Figure 2.2 n'intervient pas dans les calculs.

(4) En alternative à 2.2.2(2) et (3), la section transversale efficace peut être déterminée pour l'état de contrainte résultant de N_{Sd} et M_{Sd} agissant simultanément. Il convient de prendre en compte les effets de e_N comme en (2).

(5) Il convient de calculer la contrainte s'exerçant dans une semelle en utilisant le module de résistance élastique se rapportant au plan moyen de la semelle.

(5) **C** Dans le cas d'une poutre-caisson, il convient de calculer η_1 dans le plan moyen de la semelle, au point le plus défavorable.

(6) Le matériau d'une semelle de poutre hybride peut posséder une limite d'élasticité f_{yf} maximale de $\boxed{2} f_{yw}$ à condition que :

- a) l'augmentation des contraintes dans la semelle provoquée par la plastification de l'âme soit prise en compte ;
- b) l'on utilise f_{yf} (et non f_{yw}) pour la détermination de l'aire efficace de l'âme.

(7) L'augmentation des déformations provoquée par la plastification de l'âme peut être négligée pour les poutres hybrides conformes à (6).

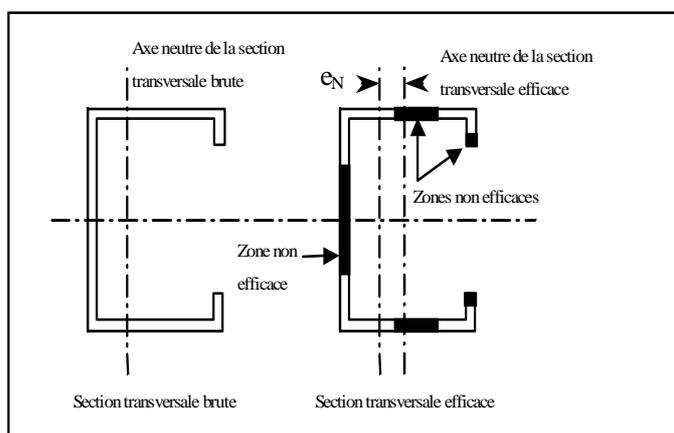


Figure 2.1 — Sections transversales de classe 4 — Effort axial

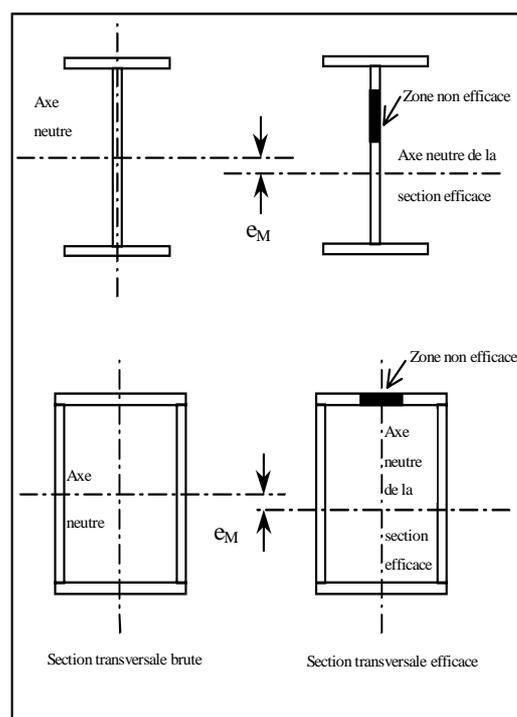


Figure 2.2 — Sections transversales de classe 4 — Moment fléchissant

2.2.3 Méthodes de vérification pour l'interaction

2.2.3.1 Interaction entre effort tranchant, moment fléchissant et effort axial

(1) À condition que η_3 n'excède pas 0,5 il n'est pas nécessaire de réduire la résistance de calcul au moment fléchissant et à l'effort axial pour tenir compte de l'effort tranchant. Si η_3 est supérieur à 0,5 il convient que l'effet combiné de la flexion et du cisaillement dans une âme de poutre en I ou en caisson satisfasse la relation suivante :

$$\eta_1 + \left[1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right] \left[2\eta_3 - 1 \right]^2 \leq 1,0 \quad (2.4)$$

où :

$M_{f,Rd}$ moment résistant plastique de calcul d'une section transversale composée uniquement des semelles ;

$M_{pl,Rd}$ résistance plastique de la section transversale (indépendamment de la classe de section transversale).

Pour cette vérification, η_1 peut être calculé en utilisant les caractéristiques de section brute. En outre, il convient de satisfaire les conditions (2.1) et (2.3).

(1) **C** Il convient ici de calculer η_1 dans le plan moyen de la semelle, au droit de l'âme considérée.
Le mode de calcul de $M_{f,Rd}$ est indiqué en (3).

(2) Il convient de vérifier le critère donné en (1) au niveau de chaque section transversale, mais il est inutile de le vérifier dans une zone située à une distance inférieure à $h_w/2$ d'un appui intérieur.

(2) **I** Il convient de vérifier (2.4) au niveau de chaque section transversale, y compris celles des zones sur appui.

(2) **C** Certaines des sollicitations servant à déterminer η_1 et η_2 sont des sollicitations concomitantes. Dans le cas des ponts à poutres classiques, il suffit généralement d'effectuer la vérification pour :

- M_{Sd} maximal, N_{Sd} et V_{Sd} concomitants ;
- V_{Sd} maximal, M_{Sd} et N_{Sd} concomitants.

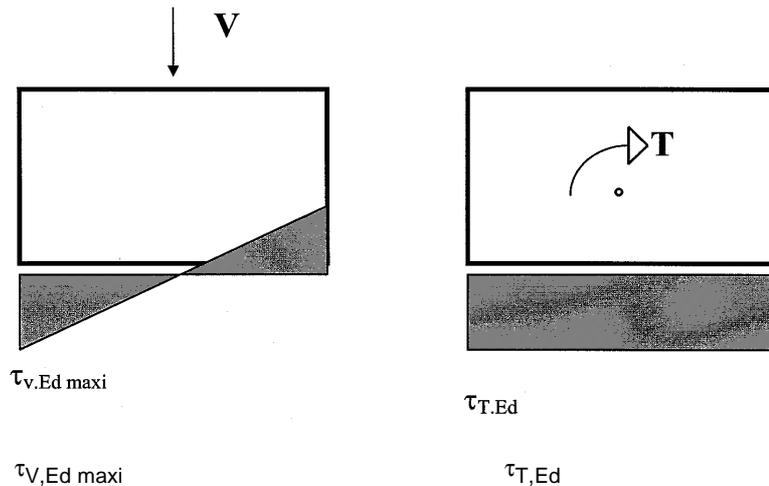
(3) Il convient de prendre le moment résistant plastique $M_{f,Rd}$ de la section transversale composée uniquement des semelles égal au produit de la limite d'élasticité de calcul, de l'aire efficace de la plus petite semelle, et de la distance entre les centres de gravité des semelles.

(4) Si un effort axial N_{Sd} est appliqué, il convient de remplacer $M_{pl,Rd}$ par le moment résistant plastique réduit $M_{N,Rd}$ selon 5.4.8.1(2) de l'ENV 1993-1-1:1992 et de réduire $M_{f,Rd}$ selon 4.3.4(2). Si l'effort axial est suffisamment grand pour que la totalité de l'âme se trouve comprimée, il convient d'appliquer 2.2.3.1(5).

(5) Il convient de vérifier une semelle de poutre-caisson au moyen de l'expression (2.4) en prenant $M_{f,Rd} = 0$ et la valeur de τ_{Ed} égale à la contrainte de cisaillement moyenne dans la semelle mais sans qu'elle soit inférieure à la moitié de la contrainte de cisaillement maximale dans la semelle. En outre, il convient de vérifier les panneaux secondaires en utilisant la contrainte de cisaillement moyenne dans le panneau secondaire, et de déterminer χ_w pour le voilement par cisaillement du panneau secondaire selon 4.3.3, en considérant les raidisseurs longitudinaux comme rigides.

(5) **C** Lorsque τ_{Ed} est composé d'une partie $\tau_{V,Ed}$ provenant d'un effort tranchant dans les âmes du caisson et d'une partie $\tau_{T,Ed}$ provenant d'un moment de torsion, la règle d'abattement indiquée s'applique à $\tau_{V,Ed}$ seulement, et non à $\tau_{T,Ed}$ (voir l'ENV 1993-2:1997, 5.4.6 (3)). Par exemple, dans le cas représenté sur les schémas, on a :

$$\tau_{Ed} = 0,5 \tau_{V,Ed \text{ maxi}} + \tau_{T,Ed}$$



2.2.3.2 Interaction entre effort transversal, moment fléchissant et effort axial

(1) Si la poutre est soumise à une force transversale concentrée combinée avec une flexion et un effort axial, il convient de vérifier la résistance au moyen des expressions (2.1), (2.2) et de l'expression d'interaction suivante :

$$\eta_2 + 0,8 \eta_1 \leq 1,4 \quad (2.5)$$

(1) **C** Le coefficient η_1 est à calculer à mi-épaisseur de la semelle au contact de la charge concentrée transversale. L'effort tranchant n'intervient pas dans cette vérification qui a un caractère local. Il est rappelé qu'il doit être pris en compte dans la vérification de l'expression (2.4).

(1) **A** Dans le cas d'un croisement de semelles, il convient de vérifier le critère de von Mises.

2.2.4 Vérification des contraintes pour les états limites de service et de fatigue

(1) Il convient que la vérification de la section pour les contraintes s'exerçant aux états limites de service et de fatigue soit basée sur la section transversale efficace en prenant en compte le traînage de cisaillement élastique. Les effets du voilement de la plaque peuvent être négligés.

(2) Pour les états de contraintes biaxiaux, il convient de déterminer la contrainte efficace σ_e pour la vérification vis-à-vis de la plastification au moyen de l'expression suivante :

$$\sigma_{e,Ed} = \left[\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{z,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \sigma_{z,Ed} + 3\tau_{Ed}^2 \right]^{0,5} \quad (2.6)$$

(2) **C** La valeur de $\sigma_{z,Ed}$ à introduire dans l'expression (2.6) est à déterminer suivant le modèle élastique défini en 3.4.

Il convient que les contraintes soient introduites avec leur signe dans l'expression (2.6).

(3) Il convient que la contrainte efficace $\sigma_{e,Ed}$ satisfasse la relation suivante :

$$\sigma_{e,Ed} \leq f_y / \gamma_{M,ser} \quad (2.7)$$

où :

$\gamma_{M,ser}$ coefficient partiel pour la résistance aux états limites de service tel que spécifié dans l'Eurocode approprié.

(3) **C** Il est rappelé que pour les ponts, les conditions générales de vérification des contraintes pour les états limites de service sont définies dans l'ENV 1993-2:1997, 4.3.

3 Effets du traînage de cisaillement sur la répartition des contraintes et sur la résistance

3.1 Généralités

(1) Le traînage de cisaillement dans les semelles peut être négligé à condition que $b_0 < L_e/20$ où la largeur de semelle b_0 est prise égale à la partie en console ou à la moitié de la largeur d'un élément interne, et L_e représente la longueur entre les points de moment fléchissant nul, voir 3.2 (2).

(2) Lorsque cette limite est dépassée, il convient de prendre en compte les effets du traînage de cisaillement pour la vérification aux états limites de service et de fatigue en utilisant une largeur efficace selon 3.2 et une répartition des contraintes selon 3.3. Pour la vérification aux états limites ultimes, on peut utiliser une largeur efficace selon 3.5.

(3) Il convient de déterminer conformément à 3.4 les contraintes élastiques provoquées par l'application dans l'âme de charges locales dans son plan par l'intermédiaire d'une semelle. Des exigences peuvent être trouvées dans d'autres Eurocodes.

3.2 Largeur efficace pour le traînage de cisaillement aux états limites de service et de fatigue

(1) Il convient de déterminer la largeur efficace b_{eff} pour le traînage de cisaillement élastique au moyen de l'expression suivante :

$$b_{\text{eff}} = \beta b_0 \quad (3.1)$$

(1) **C** Lorsque l'application de 3.2 conduit à des valeurs de β inférieures à 0,5, il convient de recourir à une méthode d'analyse plus précise, notamment pour les vérifications où les déformations interviennent.

(2) Il convient de prendre le facteur de largeur efficace β dans le Tableau 3.2 en utilisant des valeurs de κ déterminées au moyen de l'expression suivante :

$$\kappa = \alpha_0 b_0 / L_e \quad (3.2)$$

avec :

$$\alpha_0 = \left(1 + A_{\text{sl}} / b_0 t\right)^{0,5}$$

où :

A_{sl} représente l'aire de tous les raidisseurs longitudinaux à l'intérieur de la largeur b_0 et où tous les autres symboles sont tels que définis dans la Figure 3.2.

(2) **C** Pour le calcul de A_{sl} , on entend par raidisseurs longitudinaux les raidisseurs longitudinaux continus seulement. L'aire des raidisseurs discontinus peut être négligée.

(3) À condition qu'aucune portée ne soit supérieure à 1,5 fois une portée adjacente et qu'aucune console ne soit supérieure à la moitié de la portée adjacente, les longueurs efficaces L_e peuvent être déterminées d'après la Figure 3.1. Dans les autres cas, il convient de prendre les valeurs de L_e égales à une estimation de la distance entre points adjacents de moment fléchissant nul.

(3) **C** Les points de moment fléchissant nul sont à déterminer pour le cas de charge considéré.

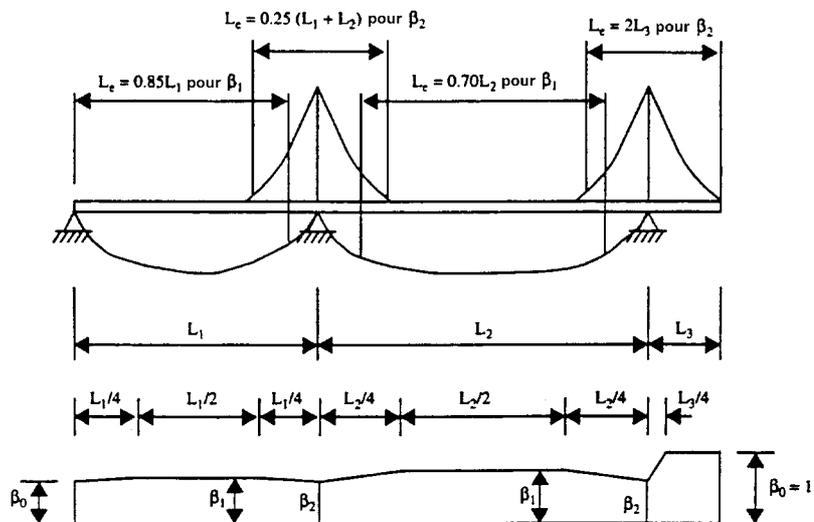


Figure 3.1 — Longueur efficace L_e pour une poutre continue et répartition de largeur efficace

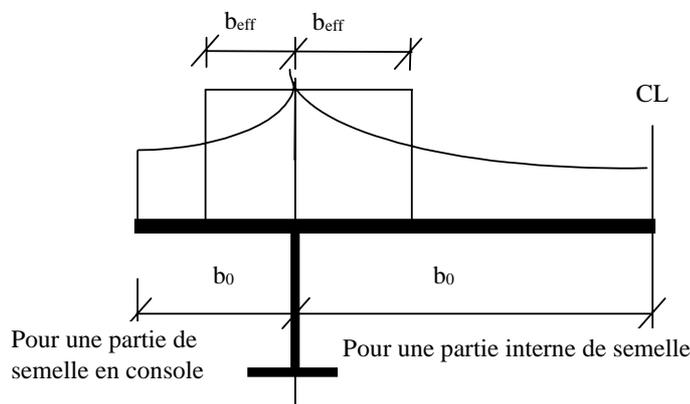


Figure 3.2 — Définitions de notation pour le traînage de cisailment

Tableau 3.2 — Facteur de largeur efficace β

$\kappa = \frac{\alpha_0 \cdot b_0}{L_e}$	emplacement de la vérification	valeur β
$\leq 0,02$		$\beta = 1,0$
(0,02) — 0,70	zone de moment positif	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{1 + 6,4 \kappa^2}$
	zone de moment négatif	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{1 + 6,0 \left(\kappa - \frac{1}{2500 \kappa} \right)^2 + 1,6 \kappa^2}$
$> 0,70$	zone de moment positif	$\beta = \beta_1 = \frac{1}{5,9 \kappa}$
	zone de moment négatif	$\beta = \beta_2 = \frac{1}{8,6 \kappa}$
tout κ	appui d'extrémité	$\beta_0 = (0,55 + 0,025/\kappa) \beta_1$ mais $\beta_0 < \beta_1$
tout κ	console	$\beta = \beta_2$ au niveau de l'appui $\beta_0 = 1,0$ à l'extrémité

3.3 Répartition des contraintes en cas de traînage de cisaillement

(1) Il convient de tirer du tableau 3.3 la répartition des contraintes longitudinales dans la largeur de la plaque due au traînage de cisaillement.

(1) C Sur la Figure 3.3, σ_1 représente la contrainte calculée dans la section transversale avec la largeur efficace résultant du traînage de cisaillement.

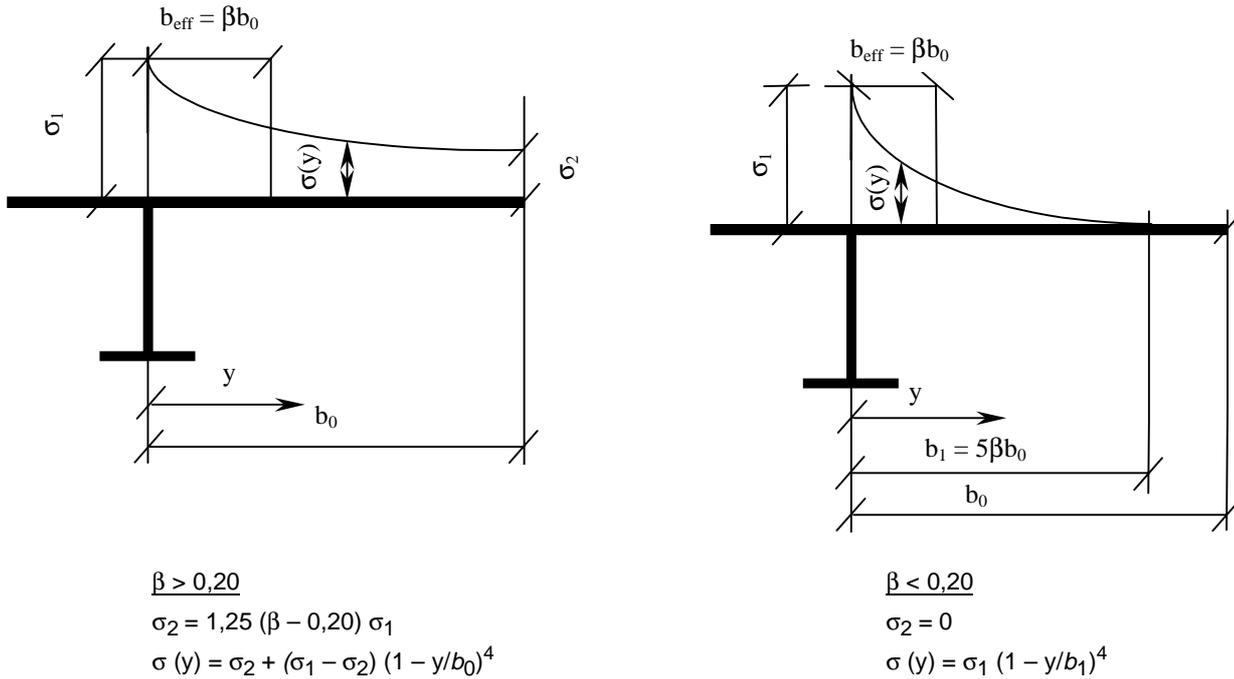


Figure 3.3 — Répartition des contraintes dans la largeur de la plaque en raison du traînage de cisaillement

3.4 Application de charges dans le plan

(1) Il convient de déterminer la répartition des contraintes élastiques dans une plaque raidie ou non raidie en raison de l'application locale d'efforts dans le plan, voir Figure 3.4, à partir de l'expression suivante :

$$\sigma_{z,Ed} = F_{Sd} / (b_{eff} t + A_{st,0}) \quad (3.3)$$

avec :

$$b_{eff} = s_e \left(1 + (z/s_e n)^2 \right)^{0,5}$$

$$n = 0,636 \left(1 + 0,878 A_{st,1} / t \right)^{0,5}$$

$$s_e = l_f + 2t_f$$

où :

- $A_{st,1}$ aire de la section transversale brute des raidisseurs par unité de largeur, c'est-à-dire l'aire d'un raidisseur divisée par la distance entre axes des raidisseurs ;
- $A_{st,0}$ aire de la section transversale brute des raidisseurs qui sont directement chargés en tenant compte d'une diffusion de la charge de 1:1 dans l'épaisseur de la semelle.

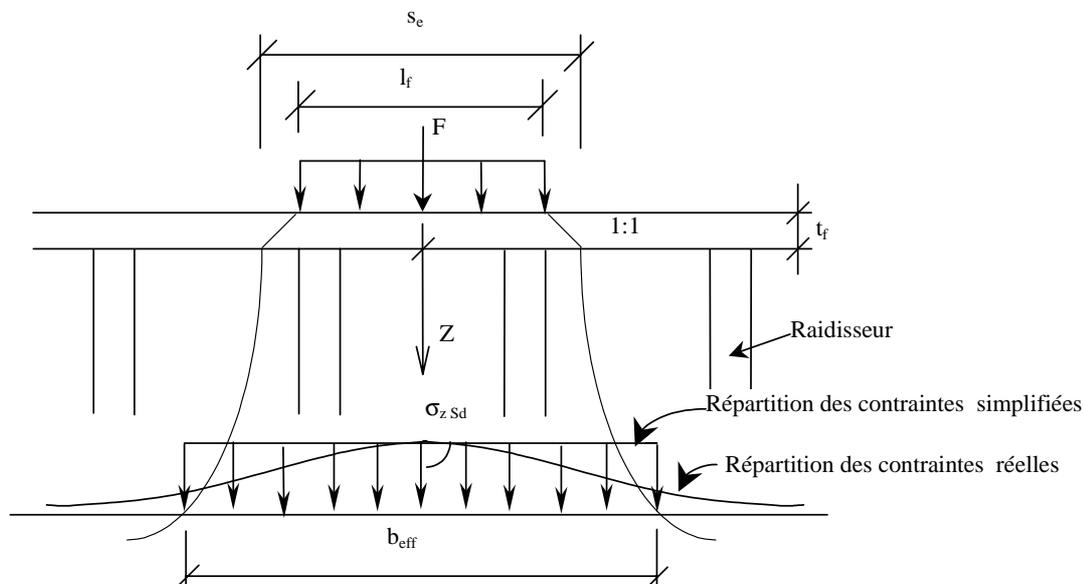


Figure 3.4 — Application de charge dans le plan

(1) **A** Lorsque l'effort dans le plan est introduit par l'intermédiaire d'un galet (phase de lancement d'un pont par exemple), cette méthode peut être adoptée avec :

$$s_e = 2 t_f$$

Dans les cas particuliers où l'introduction de l'effort s'effectue par l'intermédiaire d'un galet et d'un rail rigidement fixé à la semelle, les contraintes $\sigma_{z,Ed}$ peuvent être évaluées suivant les modalités ci-après, tirées de l'ENV 1993-6:1998, 5.4.2.

La contrainte verticale $\sigma_{z,Ed}$ dans l'âme, à l'interface avec la semelle pour un profil reconstitué soudé, ou à la sortie du congé de raccordement âme-semelle pour un profil laminé, peut être calculée en considérant l'action du galet comme uniformément répartie sur une longueur efficace ℓ_{eff} déterminée par :

$$\ell_{eff} = 3,25 \left(\frac{I_{rf}}{t_w} \right)^{\frac{1}{3}}$$

expression dans laquelle :

t_w : épaisseur de l'âme ;

I_{rf} : moment d'inertie, autour de l'axe principal perpendiculaire à l'âme, d'une section composée du rail et de la semelle, la largeur de cette dernière étant toutefois limitée à la valeur $b_{fr} + d_r$, où :

b_{fr} : largeur d'appui du rail sur la semelle ;

d_r : distance entre la surface de roulement du galet et le niveau de l'âme où est évaluée la longueur ℓ_{eff} .

Il convient de calculer la contrainte verticale $\sigma_{z,Ed}$ régnant dans l'âme, à une distance z du niveau où est évaluée la longueur ℓ_{eff} , à partir de l'expression suivante :

$$\sigma_{z,Ed} = \frac{F_{Sd}}{b_{eff} t_w}$$

avec :

$$b_{eff} = \ell_{eff} \sqrt{1 + \left(\frac{z}{0,636 \ell_{eff}} \right)^2}$$

Dans les cas où l'âme se trouve sollicitée par plusieurs galets, il convient de superposer les contraintes $\sigma_{z,Ed}$ dues aux différents efforts correspondants, dans les zones de recouvrement de leurs largeurs de diffusion respectives.

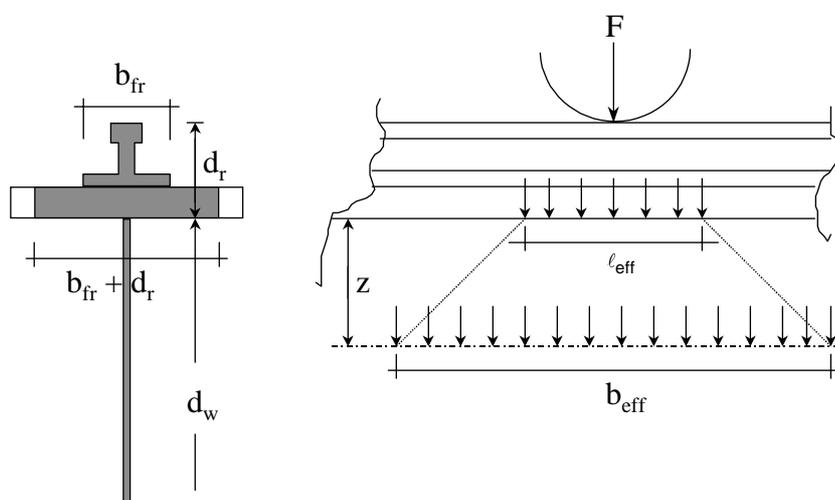


Figure 3.4

3.5 Effets du traînage de cisaillement aux états limites ultimes

(1) Aux états limites ultimes, il convient de prendre en compte les effets combinés du traînage de cisaillement et du voilement de la plaque en utilisant une aire efficace A_{eff} donnée par l'expression suivante :

$$A_{eff} = A_{c,eff} \cdot \beta^{\kappa} \text{ mais } A_{eff} \geq \beta A_{c,eff} \quad (3.4)$$

où :

$A_{c,eff}$ aire efficace d'une semelle comprimée compte tenu du voilement de la plaque selon 4.2 ;

β facteur de largeur efficace pour l'effet du traînage de cisaillement à l'état élastique selon 3.2 ;

κ rapport défini en 3.2(2).

(2) L'expression (3.4) est également applicable pour les semelles tendues, auquel cas il convient de remplacer $A_{c,eff}$ par l'aire brute de la semelle tendue.

4 Résistance au voilement des plaques

4.1 Généralités

(1) Il convient de tenir compte du voilement des plaques provoqué par les contraintes de compression longitudinales en adoptant une section transversale efficace comme indiqué en 4.2. Cela s'applique aux sections transversales de classe 4 telles que définies dans 5.3.2 de l'ENV 1993-1-1:1992. Il convient de prendre en compte l'effet combiné du traînage de cisaillement et du voilement des plaques par l'application de 3.5.

(1) **C** Les sections transversales de classe 4 définies dans l'ENV 1993-1-1:1992 sont des sections non raidies. Le voilement de ces sections est traité en 4.2.1.

En ce qui concerne les sections raidies, traitées en 4.2.2, il convient de tenir compte du voilement dans les cas suivants :

— section de classe 1, 2 ou 3, $\bar{\lambda}_p > 0,673$ et/ou $\bar{\lambda}_c > 0,20$;

— section de classe 4, quels que soient $\bar{\lambda}_p$ et $\bar{\lambda}_c$.

Dans ces critères :

— la classe de la section est la classe la plus défavorable des panneaux entre les raidisseurs, et des panneaux formant les raidisseurs.

— $\bar{\lambda}_p$ est l'élançement de la plaque équivalente à la plaque raidie, défini par l'expression (4.8) ;

— $\bar{\lambda}_c$ est l'élançement au flambement de la plaque équivalente à la plaque raidie, défini par l'expression (4.10).

Le coefficient γ_{M1} est à utiliser pour déterminer la résistance de calcul de ces sections, quel que soit le résultat de la vérification au voilement.

Le coefficient γ_{M0} est à utiliser pour les autres sections, en l'absence de risque d'instabilité autre que le voilement.

- (2) Il convient de prendre en compte l'effet du voilement des plaques sur la résistance au flambement et au déversement des éléments comprimés conformément à 5.5.1.1 et 5.5.2 de l'ENV 1993-1-1:1992 en adoptant les sections efficaces calculées ci-après.
- (3) Il convient de déterminer la résistance des plaques au voilement par cisaillement conformément à 4.3.
- (4) Il convient de déterminer la résistance aux efforts transversaux concentrés conformément à 4.4.

4.2 Voilement des plaques comprimées

4.2.1 Section efficace des sections transversales de classe 4 dépourvues de raidisseurs longitudinaux

(1) Il convient que les caractéristiques de section transversale efficace de section transversale de classe 4 soient basées sur l'aire efficace des éléments comprimés et sur leur emplacement dans la section transversale efficace.

(2) Il convient de calculer l'aire efficace des éléments comprimés plans d'après le Tableau 4.1 pour les éléments intérieurs et d'après le Tableau 4.2 pour les éléments en console. Il convient de calculer l'aire efficace d'une plaque ou d'une partie de plaque comprimée d'aire A_c au moyen de l'expression suivante :

$$A_{c,eff} = \rho A_c \quad (4.1)$$

avec :

ρ coefficient réducteur pour le voilement de plaque.

(3) Comme approximation, le coefficient réducteur ρ peut être obtenu de la façon suivante :

lorsque $\bar{\lambda}_p \leq 0,673$ $\rho = 1$ (4.2)

lorsque $\bar{\lambda}_p > 0,673$ $\rho = (\bar{\lambda}_p - 0,22) / \bar{\lambda}_p^2$ (4.3)

avec :

$$\bar{\lambda}_p = \left[\frac{f_y}{\sigma_{cr}} \right]^{0,5} = \frac{b_p / t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} \quad (4.4)$$

où :

b_p représente la largeur appropriée comme indiqué ci-dessous (pour les définitions, voir le Tableau 5.3.1 de l'ENV 1993-1-1:1992) :

b_w pour les âmes ;

b pour les parties intérieures de semelle (sauf sections creuses laminées) ;

$b - 3 \cdot t$ pour les semelles de sections creuses laminées ;

c pour les parties en console des semelles ;

Tableau 4.1 — Éléments comprimés intérieurs

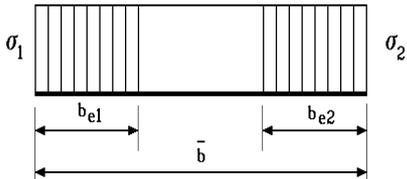
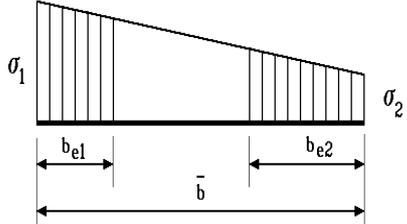
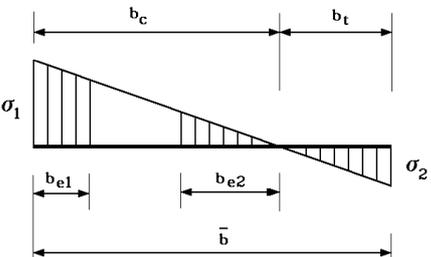
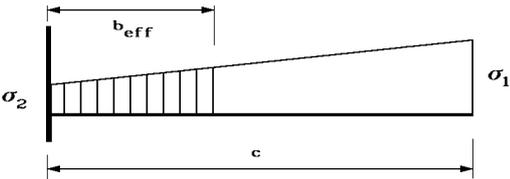
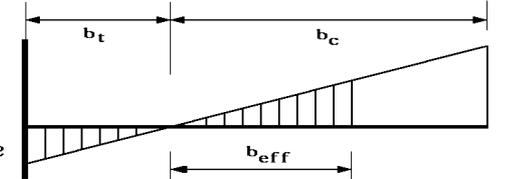
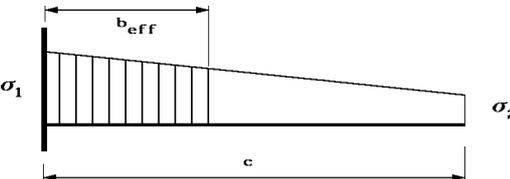
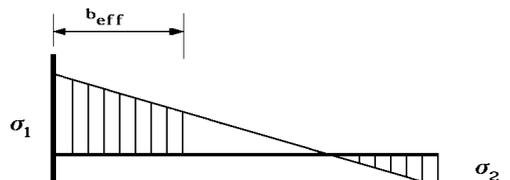
Répartition des contraintes (compression positive)				Largeur efficace b_{eff}		
				$\Psi = 1 :$ $b_{\text{eff}} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 b_{\text{eff}}$ $b_{e2} = 0,5 b_{\text{eff}}$		
				$1 > \Psi \geq 0 :$ $b_{\text{eff}} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2 b_{\text{eff}}}{5 - \Psi}$ $b_{e2} = b_{\text{eff}} - b_{e1}$		
				$\Psi < 0 :$ $b_{\text{eff}} = \rho b_c = (\rho \bar{b}) / (1 - \Psi)$ $b_{e1} = 0,4 b_{\text{eff}}$ $b_{e2} = 0,6 b_{\text{eff}}$		
$\Psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \Psi > 0$	0	$0 > \Psi > -1$	-1	$-1 > \Psi > -2$
Coefficient de voilement k_{σ}	4,0	$\frac{8,2}{1,05 + \Psi}$	7,81	$7,81 - 6,29 \Psi + 9,78 \Psi^2$	23,9	$5,98 (1 - \Psi)^2$
En alternative, pour $1 \geq \Psi \geq -1$: $k_{\sigma} = \frac{16}{\left[(1 + \Psi)^2 + 0,112 (1 - \Psi)^2 \right]^{0,5} + (1 + \Psi)}$						

Tableau 4.2 — Éléments comprimés en console

Répartition des contraintes (compression positive)		Largeur efficace b_{eff}			
		$1 > \Psi \geq 0 :$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\Psi < 0 :$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\Psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq -1$	
Coefficient de voilement k_{σ}	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21 \psi + 0,07 \psi^2$	
		$1 > \Psi \geq 0 :$ $b_{eff} = \rho c$			
		$\Psi < 0 :$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\Psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Coefficient de voilement k_{σ}	0,43	$\frac{0,578}{\psi + 0,34}$	1,70	$1,7 - 5 \psi + 17,1 \psi^2$	23,8

$(b + h) / 2$ pour les cornières à ailes égales ;

h ou $(b + h) / 2$ pour les cornières à ailes inégales ;

k_{σ} coefficient de voilement correspondant au rapport de contraintes ψ tiré du Tableau 4.1 ou du Tableau 4.2 selon le cas ;

t épaisseur ;

σ_{cr} contrainte critique de voilement élastique.

(4) Pour les éléments de semelle, il convient que le rapport de contraintes ψ utilisé dans le Tableau 4.1 ou le Tableau 4.2 soit basé sur les caractéristiques de la section transversale brute, réduite pour tenir compte du traînage de cisaillement conformément à 3.5 le cas échéant.

(5) Pour les éléments d'âme, il convient de calculer le rapport de contraintes ψ utilisé dans le Tableau 4.1 au moyen de l'aire efficace de la semelle comprimée et de l'aire brute de l'âme.

(6) Sauf dans le cas indiqué en (7), l'élancement $\bar{\lambda}_p$ d'un élément peut être remplacé par :

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\sigma_{com,Ed} / f_{yd}} \quad (4.5)$$

où :

$\sigma_{com,Ed}$ contrainte de compression de calcul maximale s'exerçant dans l'élément, déterminé au moyen des aires efficaces pour tous les éléments comprimés.

NOTE Cette méthode exige en général un calcul itératif dans lequel ψ est recalculé à chaque étape à partir des contraintes calculées sur la section transversale efficace définie à l'issue de l'étape précédente.

(7) Toutefois, lorsqu'on vérifie la résistance au flambement/déversement d'un élément par la méthode indiquée dans 5.5 de l'ENV 1993-1-1, il convient de toujours utiliser l'élancement $\bar{\lambda}_p$.

4.2.2 Section transversale efficace des sections transversales de Classe 4 munies de raidisseurs longitudinaux

4.2.2.1 Généralités

(1) Il convient que les caractéristiques de section transversale efficace des sections transversales de Classe 4 munies de raidisseurs longitudinaux soient basées sur les aires efficaces des éléments comprimés. À condition que les plaques soient d'épaisseur constante, les aires efficaces peuvent être déterminées par les méthodes indiquées en 4.2.2.2 à 4.2.2.4 ou 4.2.2.5. La méthode décrite en 4.2.2.2 à 4.2.2.4 est destinée aux semelles mais peut également être utilisée pour les âmes en tant qu'approximation. La méthode donnée en 4.2.2.5 peut être utilisée pour les semelles et les âmes.

(2) Il convient que les règles données en 4.2.1(4) à (7) soient également appliquées.

(3) En première étape, il convient que les aires de section transversale efficace A_{eff} soient déterminées au moyen d'un coefficient réducteur ρ_{an} pour chaque panneau secondaire pour tenir compte du voilement de plaque entre les raidisseurs. Dans une deuxième étape, il convient de considérer la plaque comme une plaque orthotrope équivalente et de déterminer un coefficient réducteur ρ_c pour le voilement d'ensemble de la plaque équivalente.

4.2.2.2 Coefficients réducteurs pour les panneaux secondaires

(1) Il convient de réduire l'aire de chaque panneau secondaire entre les raidisseurs ou des panneaux formant le raidisseur au moyen d'un coefficient réducteur ρ_{an} afin de tenir compte d'un voilement de plaque éventuel, où ρ_{an} est pris égal à la valeur de ρ déterminée conformément à 4.2.1(3).

4.2.2.3 Plaques munies de raidisseurs longitudinaux multiples

(1) Il convient de déterminer le coefficient réducteur pour le voilement d'ensemble par interpolation conformément à 4.2.2.3(9) entre un coefficient réducteur pour le voilement de plaque déterminé au moyen de 4.2.2.3(2) à (4) et un coefficient réducteur pour le flambement des éléments comprimés déterminé au moyen de 4.2.2.3(5) à (8).

(2) La contrainte critique de voilement élastique de la plaque équivalente est la suivante :

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma,p} \sigma_E \quad (4.6)$$

où :

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E t^2}{12 (1 - \nu^2) b^2} = 189800 \left[\frac{t}{b} \right]^2 \text{ (en MPa)} \quad (4.7)$$

$k_{\sigma,p}$ coefficient de voilement selon la théorie de plaque orthotrope avec raidisseurs «tartinés» et en ignorant le voilement entre les raidisseurs, obtenu soit au moyen de tableaux de coefficients de voilement appropriés, soit au moyen de calculs informatiques adéquats, soit conformément à l'annexe A1.

b, t définis dans la Figure 4.1.

(2) **C** Pour le calcul de $k_{\sigma,p}$, l'étalement des raidisseurs est une simplification. Il est bien entendu licite de considérer les raidisseurs à leur position réelle.

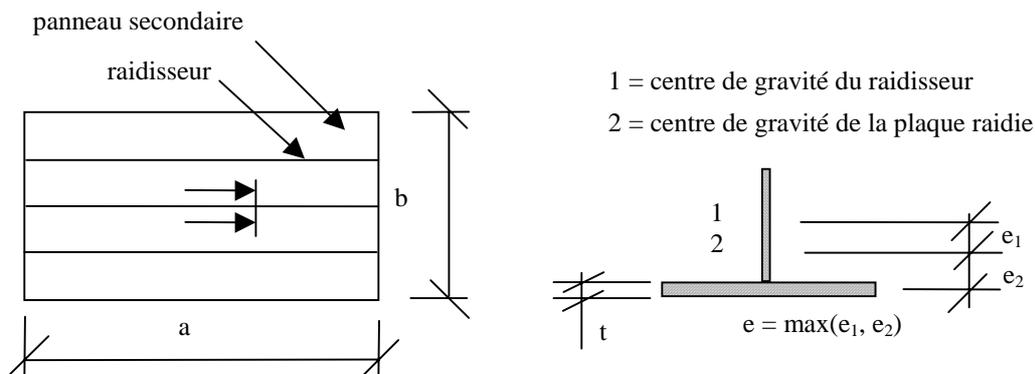


Figure 4.1 — Notations pour les plaques munies de raidisseurs longitudinaux

(3) L'élanement relatif $\bar{\lambda}_p$ de la plaque équivalente est :

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\beta_A f_y}{\sigma_{cr,p}}} \quad (4.8)$$

avec :

$$\beta_A = \frac{A_{eff}}{A}$$

où :

A aire brute de la partie comprimée de la plaque raidie ;

A_{eff} aire efficace de la même partie de la plaque, prenant en compte le voilement des panneaux secondaires, voir 4.2.2.2.

(3) **C** A et A_{eff} sont relatifs à la plaque raidie, c'est-à-dire qu'ils incluent l'aire des raidisseurs longitudinaux.

Pour calculer A_{eff} , on doit tenir compte du voilement des panneaux secondaires entre les raidisseurs, ainsi que du voilement des panneaux constituant les raidisseurs eux-mêmes.

(4) Le coefficient réducteur ρ pour la plaque équivalente est obtenu à partir de 4.2.1(3).

(5) Il convient de prendre la contrainte critique de flambement $\sigma_{cr,c}$ de la plaque équivalente égale à la contrainte de flambement de la même plaque en supprimant les appuis situés le long des bords longitudinaux. Pour une compression uniforme, $\sigma_{cr,c}$ peut être obtenue par l'expression suivante :

$$\sigma_{cr,c} = \frac{\pi^2 E I_x}{A a^2} \quad (4.9)$$

où :

I_x moment d'inertie de la section brute pour la flexion dans le sens longitudinal de la partie comprimée de la plaque raidie.

(6) On peut tenir compte d'un gradient de contraintes le long de la plaque en utilisant une longueur efficace. 5.5.2.4(8) de l'ENV 1993-2:1997 peut être utilisée avec $\gamma = 0$. L'équation (4.9) peut être utilisée comme approximation dans le sens de la sécurité s'il existe un gradient de contraintes sur la largeur de la plaque.

(7) L'élanement flambement $\bar{\lambda}_c$ de la plaque équivalente est défini comme :

$$\bar{\lambda}_c = \sqrt{\frac{\beta_A f_y}{\sigma_{cr,c}}} \quad (4.10)$$

(8) Il convient de calculer le coefficient réducteur χ_c au moyen de 5.5.1.2(1) de l'ENV 1993-1-1 où α est remplacé par :

$$\alpha_e = \alpha_0 + \frac{0,09}{i/e} \quad (4.11)$$

avec :

$$i = \sqrt{\frac{I_x}{A}} \quad (4.12)$$

e plus grande distance entre :

- d'une part le centre de gravité de la plaque ou le centre de gravité du raidisseur dans le cas d'un raidisseur unilatéral ou le centre de gravité de l'un des deux raidisseurs dans le cas de raidisseurs des deux côtés de la plaque
- et d'autre part le centre de gravité de la plaque raidie, voir Figure 4.1.

$\alpha_0 = 0,34$ pour les raidisseurs à section fermée

$= 0,49$ pour les raidisseurs à section ouverte.

NOTE Le facteur α_e prend en compte une imperfection en arc initiale de $a/500$.

(9) Il convient de calculer le coefficient réducteur final ρ_c par interpolation entre χ_c et ρ selon l'expression suivante :

$$\rho_c = (\rho - \chi_c) \xi (2 - \xi) + \chi_c \quad (4.13)$$

où :

$$\xi = \frac{\sigma_{cr,p} - 1}{\sigma_{cr,c}} \quad (4.14)$$

Il convient de ne pas prendre le paramètre ξ inférieur à 0 ni supérieur à 1.

(9) I Il convient d'adopter comme coefficient réducteur final :

$$\rho_c = \sup \begin{cases} \chi_c \\ \rho_{\min} \end{cases}$$

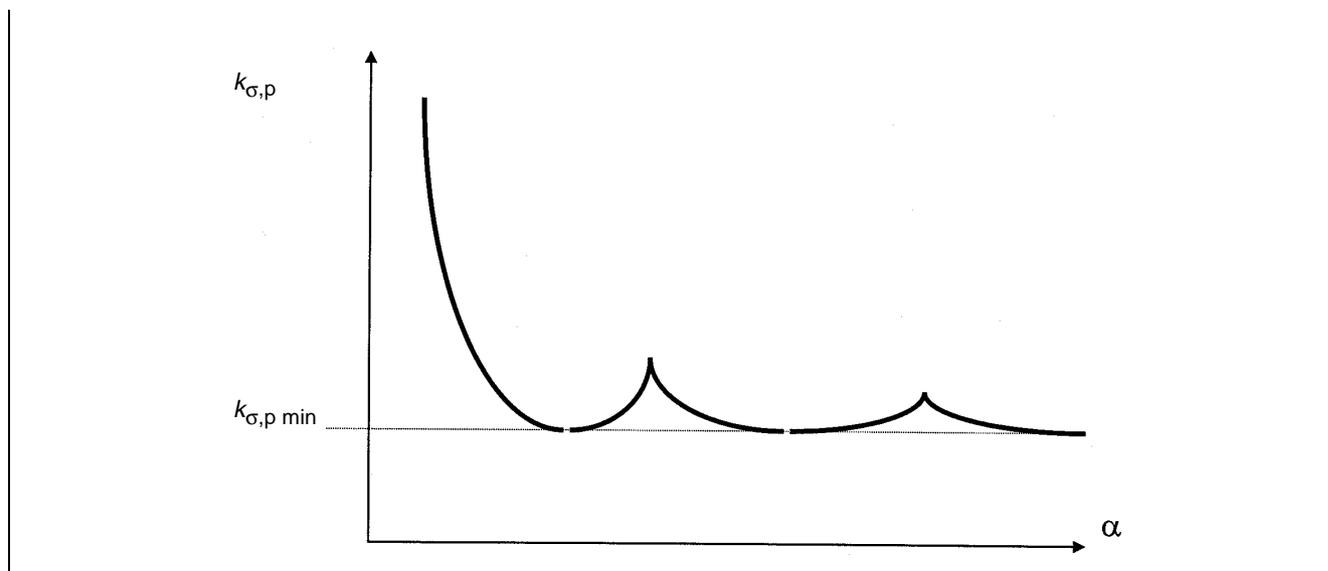
avec ρ_{\min} : valeur minimale de ρ correspondant à la valeur minimale de $\sigma_{cr,p}$ quand le coefficient d'aspect α du panneau varie.

(9) C La valeur minimale de $\sigma_{cr,p}$ est $\sigma_{cr,p \min} = k_{\sigma,p \min} \sigma_E$, expression dans laquelle $k_{\sigma,p \min}$ est l'ordonnée de la tangente aux minima de la fonction $k_{\sigma,p}(\alpha)$.

Des formules permettant de calculer une valeur approchée de $k_{\sigma,p \min}$ dans un certain domaine d'application sont données à l'annexe A.

Dans le cas où il n'y a des raidisseurs que dans la partie tendue de la plaque, il convient de prendre $\rho_c = \rho$.

(à suivre)



4.2.2.4 Aire de la section transversale efficace

- (1) Il convient de prendre l'aire de section transversale efficace de la zone comprimée de la plaque raidie égale à :

$$A_{c,eff} = \rho_c A_c \quad (4.15)$$

où :

A_c est composée de l'aire de la section transversale efficace de tous les raidisseurs et panneaux secondaires situés en totalité ou en partie dans la zone comprimée.

- (2) Il convient de calculer l'aire A_c au moyen de l'expression suivante :

$$A_c = A_{sl,eff} + \sum_c \rho_{pan} b_{c,pan} t \quad (4.16)$$

où :

$A_{sl,eff}$ aire de la section efficace de tous les raidisseurs longitudinaux d'après 4.2.1(3) ;

$b_{c,pan}$ largeur de la partie comprimée de chaque panneau secondaire ;

ρ_{pan} coefficient réducteur d'après 4.2.1(3) pour chaque panneau secondaire.

(1) (2) **C** La définition de A_c donnée en 4.2.1 est relative à une plaque non raidie.
La définition de A_c donnée en 4.2.2 est relative à une plaque munie de raidisseurs longitudinaux.

- (3) La réduction de l'aire de la partie comprimée au moyen de ρ_c peut être considérée comme une réduction uniforme conservant la géométrie globale.

(3) **C** La première réduction de section (définie en 4.2.2.2 (1)) peut être figurée par des trous dans les panneaux secondaires. Les parties restantes de la section sont l'objet ici d'une nouvelle réduction qui peut être figurée par une diminution de leur épaisseur.

- (4) Il convient de prendre l'aire de section transversale efficace de la zone tendue de l'élément de plaque raidie égale à l'aire brute de la zone tendue.

- (5) Il convient de prendre le module de résistance efficace W_{eff} égal au moment d'inertie de flexion de la section transversale efficace divisé par la distance entre son centre de gravité et le plan moyen de la semelle.

4.2.2.5 Plaques comportant un ou deux raidisseurs dans la zone comprimée

A Cette méthode ne s'applique qu'au cas d'un raidisseur unique.

(1) Si la plaque ne comporte qu'un ou deux raidisseurs longitudinaux, la méthode exposée en 4.2.2.3 peut être simplifiée en remplaçant la contrainte critique de voilement élastique du paragraphe 4.2.2.3(2) par la contrainte critique d'un élément comprimé fictif maintenu élastiquement par la plaque. Il convient de calculer la section transversale de l'élément comprimé fictif selon 4.2.2.5(2)-(3). La contrainte critique peut être obtenue d'après l'annexe A.2. Il convient de calculer la contrainte critique de flambement de l'élément comprimé au moyen de l'expression (4.9) pour la même section transversale mais en négligeant l'encastrement provoqué par l'âme.

(2) Il convient de prendre la section transversale brute de l'élément comprimé fictif (pour le calcul de A et I_{sl}) égale à l'aire brute du raidisseur A_{sl} et des parties adjacentes de la plaque définies de la façon suivante. Si le panneau secondaire est totalement comprimé, la moitié de la largeur est prise comme partie de l'élément comprimé fictif. Si les contraintes varient de la compression à la traction dans le panneau secondaire, il convient de prendre un tiers de la partie comprimée comme partie de l'élément comprimé fictif, voir Figure 4.2.

(3) Il convient de prendre l'aire efficace de l'élément comprimé fictif égale à la section transversale efficace du raidisseur $A_{sl,eff}$ et des parties efficaces adjacentes de la plaque, voir Figure 4.2. L'élanement des éléments de plaque de l'élément comprimé fictif peut être déterminé selon 4.2.1(6), avec $\sigma_{com,Ed}$ calculé pour la section transversale brute de la plaque.

(4) Si $\rho_c f_{yd}$, avec ρ_c selon 4.2.2.3(9), est supérieure à la contrainte moyenne dans l'élément comprimé fictif $\sigma_{c,Ed}$ il convient de n'effectuer aucune réduction supplémentaire de l'aire efficace de l'élément comprimé fictif. Dans le cas contraire, la réduction selon l'expression (4.15) est remplacée par :

$$A_{c,eff} = \rho_c f_{yd} A_c / \sigma_{c,Ed} \quad (4.17)$$

(5) Il convient d'appliquer la réduction mentionnée en (4) uniquement à l'aire de l'élément comprimé fictif. Aucune réduction n'est nécessaire pour les autres parties comprimées de la plaque, à l'exception de celle requise pour le voilement des panneaux secondaires.

(6) Comme alternative à l'utilisation d'une aire efficace selon 4.2.2.4, on peut déterminer la résistance de l'élément comprimé fictif d'après 4.2.2.3(5)-(8) et vérifier qu'elle est supérieure à la contrainte moyenne $\sigma_{x,Ed}$. On peut utiliser cette approche également dans le cas de raidisseurs multiples et, comme simplification du côté de la sécurité, l'effet de maintien dû à la plaque peut être négligé, c'est-à-dire que l'élément comprimé fictif est considéré libre de flamber hors du plan de l'âme.

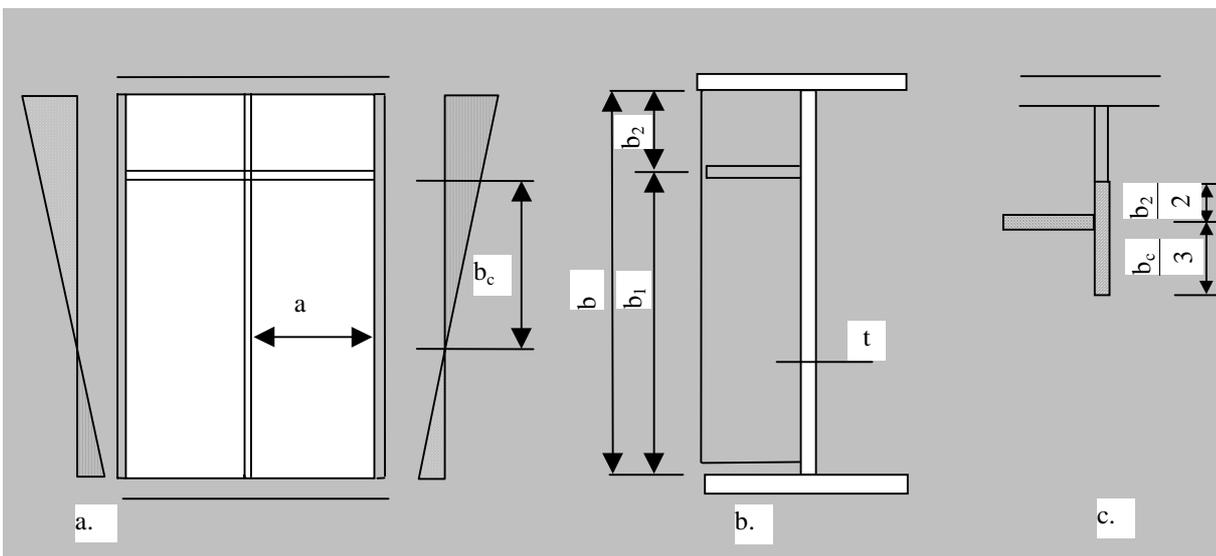


Figure 4.2 — Notations pour les plaques comportant un raidisseur unique

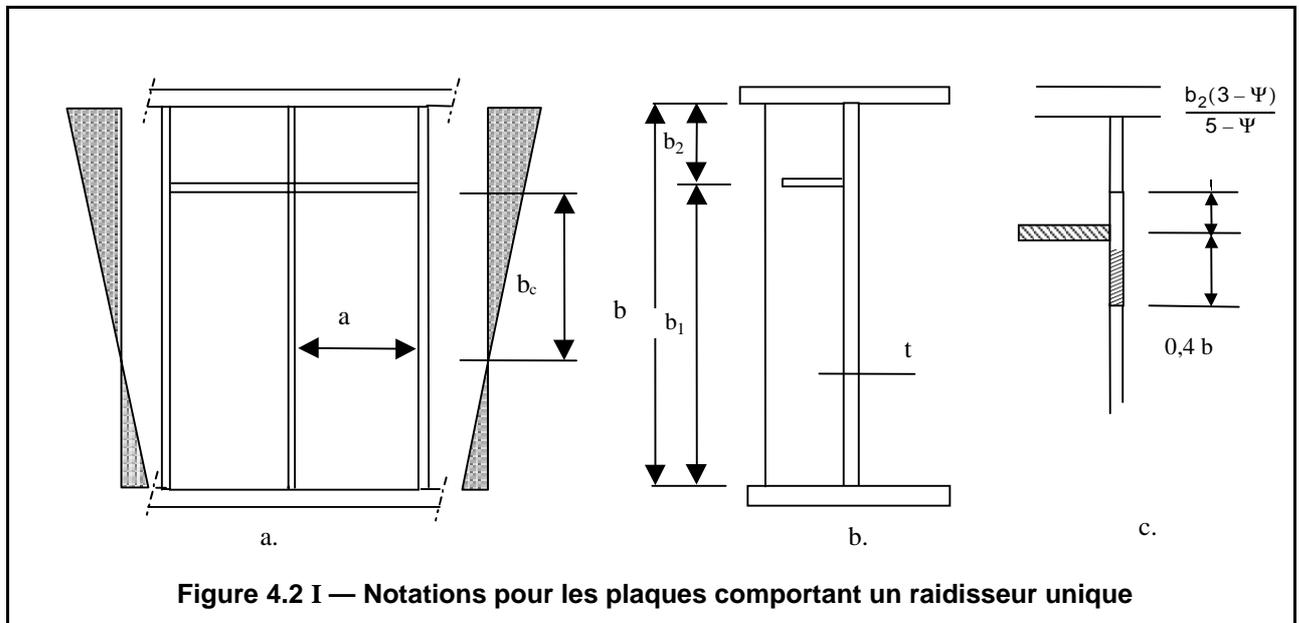


Figure 4.2 I — Notations pour les plaques comportant un raidisseur unique

4.2.2.6 Exigences concernant les raidisseurs transversaux

(1) Afin de fournir des appuis rigides aux raidisseurs longitudinaux, il convient que les raidisseurs transversaux satisfassent les exigences de rigidité et de résistance données ci-dessous.

(1) **C** Dans le cas de poutres en I, ces raidisseurs transversaux doivent avoir au moins leur âme soudée sur les semelles de la poutre, et pouvoir transmettre les efforts de compression résultant du fonctionnement post-critique de l'âme cisailée.

(2) Il convient de considérer que la section transversale du raidisseur transversal comprend une partie de plaque associée $b_{\text{eff}} = 30 \varepsilon t$, voir Figure 4.9.

(3) Il convient de considérer le raidisseur transversal comme une poutre sur appuis simples avec une imperfection sinusoïdale initiale w_0 égale à $s/300$, où s représente la plus petite des trois valeurs a_1 , a_2 et b , voir Figure 4.3.

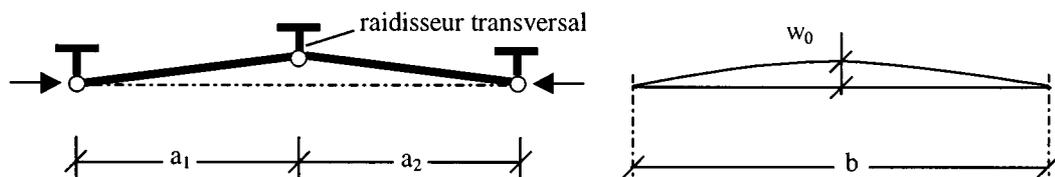


Figure 4.3 — Raidisseur transversal

(4) Il convient que le raidisseur transversal supporte les forces provenant des panneaux comprimés adjacents, en considérant que les deux raidisseurs transversaux adjacents sont rigides et rectilignes. Les panneaux comprimés ainsi que les raidisseurs longitudinaux sont considérés comme simplement appuyés sur les raidisseurs transversaux.

(5) Il convient de vérifier les deux critères suivants :

- que la contrainte maximale dans le raidisseur ne soit pas supérieure à f_{yd} ;
- que la flèche supplémentaire ne soit pas supérieure à $b/300$.

(6) Ces deux critères peuvent être considérés comme satisfaits à condition que le moment d'inertie de flexion I_{st} des raidisseurs transversaux ne soit pas inférieur à :

$$I_{st} = \frac{\sigma_m}{E} \left(\frac{b}{\pi}\right)^4 \left[1 + w_0 \frac{300}{b} u\right] \quad (4.18)$$

avec :

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} \frac{N_{Sd}}{b} \left[\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}\right]$$

$$u = \frac{\pi^2 E e_{max}}{f_{yd} 300 b} \geq 1,0$$

où :

e_{max} distance entre la fibre extrême du raidisseur et le centre de gravité du raidisseur ;

N_{Sd} effort de compression de calcul maximal des panneaux adjacents, mais pris non inférieur au produit de la contrainte de compression maximale par la demi-aire comprimée efficace du panneau, raidisseurs inclus ;

$\sigma_{cr,c}$, $\sigma_{cr,p}$ définis en 4.2.2.3.

4.2.2.7 Exigences concernant les raidisseurs longitudinaux

(1) Afin d'éviter le flambement par torsion des raidisseurs à section transversale ouverte, il convient que l'un des critères suivants soit satisfait :

$$\frac{I_T}{I_p} \geq 11,0 \left(\frac{t}{b}\right)^2 \quad \text{ou} \quad \frac{I_T}{I_p} \geq 5,3 \frac{f_y}{E} \quad (4.19)$$

où :

b largeur de la plaque entre les raidisseurs ;

t épaisseur de la plaque entre les raidisseurs ;

I_p inertie de flexion polaire du raidisseur seul par rapport à son bord fixé sur la plaque ;

I_T inertie de torsion de St Venant du raidisseur seul.

(2) Les âmes peuvent comporter des raidisseurs longitudinaux discontinus, à condition que ceux-ci ne soient pas considérés comme faisant partie de la section transversale supposée supporter les contraintes longitudinales.

(2) **C** Les raidisseurs d'âme longitudinaux discontinus au voisinage des raidisseurs transversaux peuvent être négligés dans l'analyse globale pour le calcul des sollicitations.

On peut tenir compte de leur présence pour déterminer les parties d'âme efficace, mais il convient de ne pas inclure leur section dans la section résistante.

Pour vérifier ces raidisseurs vis-à-vis du flambement par torsion, par exemple dans le cas de raidisseurs en cornière, il convient de tenir compte du fait que leurs extrémités ne sont pas complètement maintenues vis-à-vis des rotations.

Les raidisseurs longitudinaux de fond de caisson doivent être continus.

(3) Un raidisseur trapézoïdal de grandes dimensions peut être considéré comme deux raidisseurs séparés ou comme un raidisseur unique situé au milieu du raidisseur.

4.2.2.8 Raidisseurs sur appui

(1) Il convient de calculer les raidisseurs sur appuis pour qu'ils supportent la force de réaction ainsi que le moment fléchissant éventuel résultant de l'excentricité de l'appui. Si les raidisseurs sont supposés procurer un encastrement latéral à la semelle supérieure, il convient qu'ils possèdent une rigidité et une résistance appropriées à l'hypothèse prise dans le calcul pour le déversement.

4.3 Voilement des plaques soumises au cisaillement

4.3.1 Bases

(1)P Les plaques avec b_w/t supérieure à $72\varepsilon/\eta$ pour une âme non raidie, ou à $31\varepsilon\sqrt{k_\tau}/\eta$ pour une âme raidie, doivent être vérifiées pour la résistance au voilement par cisaillement et doivent être munies de raidisseurs transversaux sur appui. Pour la notation η voir 4.3.3(1), et pour k_τ voir 4.3.3(3).

4.3.2 Résistance de calcul

(1) Pour les âmes pourvues ou non de raidisseurs, il convient de prendre en compte le voilement par cisaillement en utilisant la résistance de calcul suivante :

$$V_{cRd} = \chi_v f_{ywd} b t / (\sqrt{3}) \quad (4.20)$$

$$\chi_v = \chi_w + \chi_f \text{ mais pas supérieur à } \eta. \quad (4.21)$$

où :

χ_w représente une contribution de l'âme et χ_f une contribution des semelles, déterminées selon 4.3.3 et 4.3.4 respectivement, et où $f_{ywd} = f_{yw}/\gamma_{M1}$. À titre de simplification, la contribution des semelles χ_f peut être négligée.

(2) Il convient que les raidisseurs satisfassent aux exigences exposées en 4.3.5, et que les soudures satisfassent aux exigences données en 4.3.6.

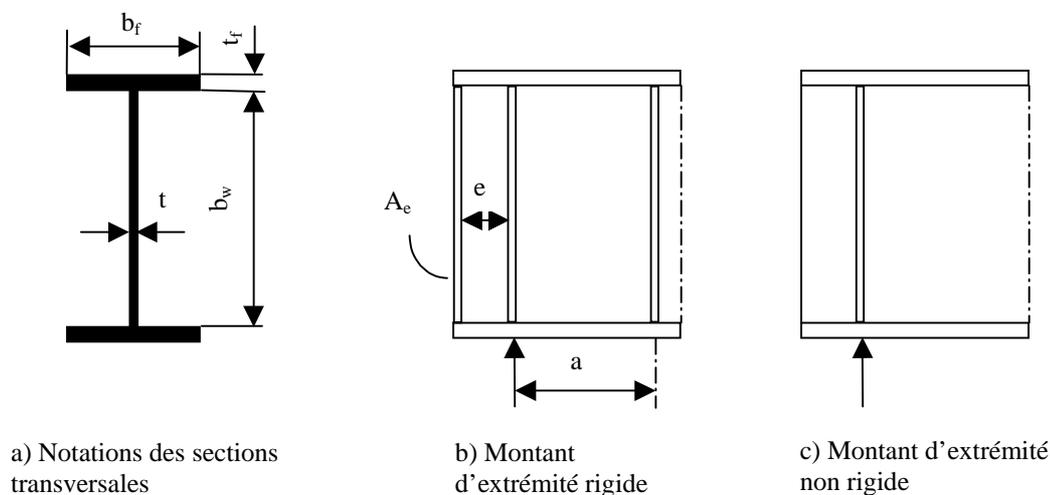


Figure 4.4 — Critères pour les raidisseurs d'extrémité

4.3.3 Contribution de l'âme

(1) Pour les âmes comportant des raidisseurs transversaux sur appui uniquement et pour les âmes comportant des raidisseurs intermédiaires transversaux et/ou longitudinaux, il convient de déterminer χ_w à partir du Tableau 4.3 ou de la Figure 4.5.

Tableau 4.3 : Contribution de l'âme χ_w à la résistance au voilement par cisaillement		
$\bar{\lambda}_w$	Montant d'extrémité rigide	Montant d'extrémité souple
$< 0,83/\eta$	η	η
$0,83/\eta \leq \bar{\lambda}_w < 1,08$	$0,83/\bar{\lambda}_w$	$0,83/\bar{\lambda}_w$
$\geq 1,08$	$1,37 / (0,7 + \bar{\lambda}_w)$	$0,83/\bar{\lambda}_w$

(A) Pour les éléments d'ouvrage dont la vérification à la fatigue n'est pas requise

$\eta = 1,20 \gamma_{M1}/\gamma_{M0}$ pour S235, S275 et S355
 $\eta = 1,05 \gamma_{M1}/\gamma_{M0}$ pour S420 et S460

(A) Pour les éléments d'ouvrage dont la vérification à la fatigue est requise :

$\eta = \gamma_{M1} / \gamma_{M0}$ pour tous les aciers.

(2) Il convient de faire une distinction entre :

- a) les montants d'extrémité rigides selon 4.3.5.1. Ce cas est également applicable aux panneaux qui ne sont pas situés à l'extrémité de la poutre ou qui sont situés au niveau d'un appui intermédiaire d'une poutre continue ;
- b) les montants d'extrémité souples selon 4.3.5.2.

(3) Il convient de déterminer le paramètre d'élançement $\bar{\lambda}_w$ du Tableau 4.3 et de la Figure 4.5 d'après :

$$\bar{\lambda}_w = 0,76 \left(f_{yw} / \tau_{cr} \right)^{0,5} \quad (4.22)$$

où τ_{cr} représente la contrainte critique de voilement par cisaillement calculée par :

$$\tau_{cr} = k_\tau \sigma_E \quad (4.23)$$

où il convient de prendre σ_E d'après 4.2.2.3(2) et k_τ d'après (5) ou (6).

(4) Pour les âmes comportant des raidisseurs transversaux uniquement sur appui, le paramètre d'élançement $\bar{\lambda}_w$ peut être pris égal à :

$$\bar{\lambda}_w = \frac{b_w}{86,4 t \varepsilon} \quad (4.24)$$

(5) Pour les âmes comportant des raidisseurs transversaux sur appui et des raidisseurs transversaux intermédiaires et/ou des raidisseurs longitudinaux, le paramètre d'élançement $\bar{\lambda}_w$ peut être pris égal à :

$$\bar{\lambda}_w = \frac{b_w}{37,4 t \varepsilon \sqrt{k_\tau}} \quad (4.25)$$

où k_τ représente le plus petit coefficient de voilement pour le panneau d'âme entouré par des appuis rigides (raidisseurs transversaux ou semelles).

(6) Il convient de réduire le moment d'inertie de flexion des raidisseurs à 1/3 de la valeur réelle dans le calcul de k_τ . On peut utiliser les formules de k_τ prenant en compte cette réduction et données dans l'annexe A.3

NOTE Cette réduction est uniquement nécessaire pour $\bar{\lambda}_w > 1,3$, et les raidisseurs peuvent être considérés comme totalement efficaces pour $\bar{\lambda}_w < 0,83 / \eta$. La prise en compte de ceci conduit à un calcul itératif.

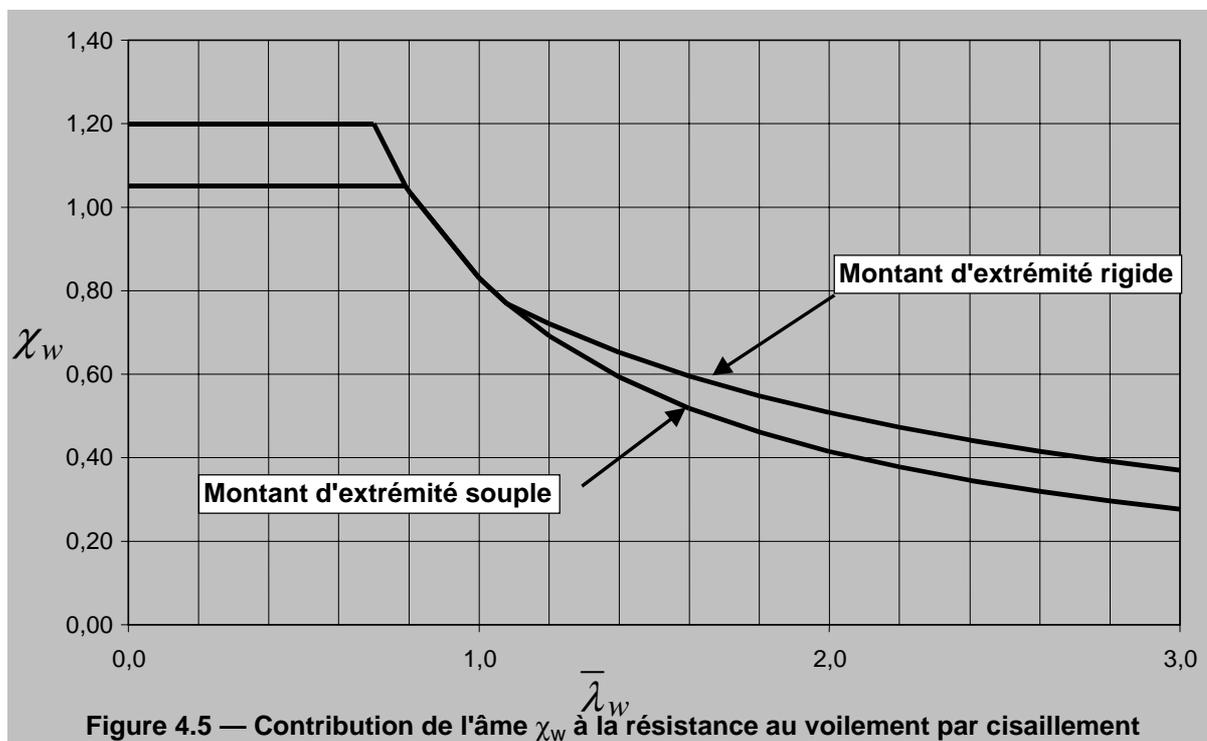


Figure 4.5 I — Figure invalidée, voir Tableau 4.3(A)

(7) Pour les âmes comportant des raidisseurs longitudinaux, il convient de ne pas prendre le paramètre d'élanement $\bar{\lambda}_w$ inférieur à :

$$\bar{\lambda}_w = \frac{b_{w1}}{37,4 \varepsilon t \sqrt{k_{\tau 1}}} \quad (4.26)$$

où le coefficient de voilement par cisaillement $k_{\tau 1}$ fait référence au plus grand panneau secondaire de hauteur b_{w1} et de longueur a , voir Figure 4.6. L'annexe A.3 peut être utilisée avec $k_{\tau st} = 0$.

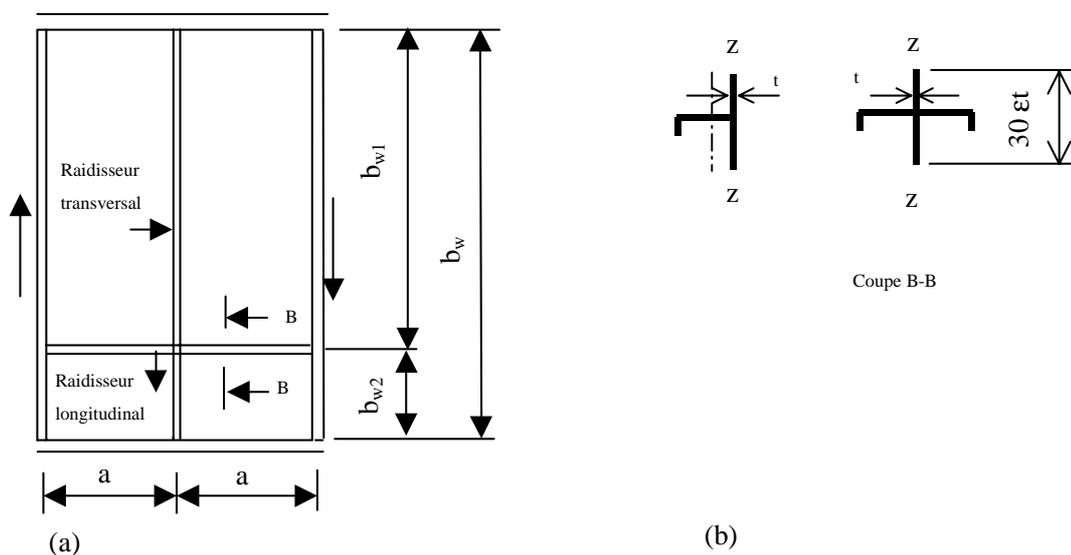


Figure 4.6 — Âme comportant des raidisseurs transversaux et longitudinaux

4.3.4 Contribution des semelles

(1) Si la résistance des semelles n'est pas totalement exploitée pour la résistance au moment fléchissant ($M_{Sd} < M_{f,Rd}$), une contribution χ_f des semelles peut être introduite dans la résistance au voilement par cisaillement. Cette contribution est obtenue par :

$$\chi_f = \frac{b_f t_f^2 f_{yf} \sqrt{3}}{c t h_w f_{yw}} \left[1 - \left[\frac{M_{Sd}}{M_{f,Rd}} \right]^2 \right] \quad (4.27)$$

$$c = \left[0,25 + \frac{16 b_f t_f^2 f_{yf}}{t h_w^2 f_{yw}} \right] a \quad (4.28)$$

où les valeurs b_f et t_f sont celles de la plus petite semelle.

(2) Si un effort axial N_{Sd} est également appliqué, il convient de réduire la valeur de $M_{f,Rd}$ d'un facteur :

$$\left[1 - \frac{N_{Sd}}{(A_{f1} + A_{f2}) f_{yfd}} \right] \quad (4.29)$$

où :

A_{f1} et A_{f2} représentent l'aire des semelles.

4.3.5 Raidisseurs

4.3.5.1 Montants d'extrémité rigides

(1) Il convient que le montant d'extrémité rigide agisse comme un raidisseur porteur s'opposant à la réaction au niveau de l'appui de poutre, et comme une poutre courte résistant aux contraintes de membrane longitudinales dans le plan de l'âme.

(2) Un montant d'extrémité rigide peut comprendre deux raidisseurs transversaux sur deux côtés formant les semelles d'une poutre courte de longueur h_w , voir Figure 4.4(b). La bande d'âme située entre les raidisseurs forme l'âme de la poutre courte. Comme alternative, un montant d'extrémité peut prendre la forme d'un profil rapporté, assemblé à l'extrémité de l'âme.

(3) Il convient que chaque raidisseur en plats ait une section d'aire au moins égale à $4 h_w t^2 / e$ où e représente la distance entre les raidisseurs et $e > 0,1 h_w$, voir Figure 4.4(b). Au cas où le montant d'extrémité n'est pas fait de plats, il convient que son module de résistance soit d'au moins $4 h_w t^2$ pour la flexion selon un axe horizontal perpendiculaire à l'âme.

(4) Comme alternative, l'extrémité de la poutre peut être pourvue d'un raidisseur unique et d'un raidisseur vertical situé suffisamment près de l'appui pour que le panneau secondaire résiste au cisaillement maximal calculé avec un montant d'extrémité souple.

4.3.5.2 Montant d'extrémité souple

(1) Un montant d'extrémité souple peut consister en un raidisseur unique comme illustré à la Figure 4.4(c). Il convient qu'il agisse comme un raidisseur porteur s'opposant à la réaction d'appui.

4.3.5.3 Raidisseurs transversaux intermédiaires

- (1) Il convient de vérifier la résistance et la rigidité des raidisseurs intermédiaires agissant comme appuis rigides des panneaux intérieurs de l'âme.
- (2) Les autres raidisseurs transversaux intermédiaires peuvent être considérés comme souples, leur rigidité étant prise en compte dans le calcul de k_{τ} en 4.3.3(4).
- (3) Il convient que les raidisseurs intermédiaires agissant comme appuis rigides pour le panneau d'âme possèdent un moment d'inertie de flexion remplissant les conditions suivantes :

$$\text{si } a/h_w < \sqrt{2} : \quad I_{st} \geq 1,5 h_w^3 t^3 / a^2 \quad (4.30)$$

$$\text{si } a/h_w \geq \sqrt{2} : \quad I_{st} \geq 0,75 h_w t^3 \quad (4.31)$$

Il convient de vérifier la résistance des raidisseurs rigides intermédiaires pour un effort axial égal à V_{Sd} moins $\chi_w f_{ywd} h_w t / \sqrt{3}$ calculé en supposant que le raidisseur considéré est enlevé.

4.3.5.4 Raidisseurs longitudinaux

- (1) Les raidisseurs longitudinaux peuvent être soit rigides soit souples. Dans les deux cas, il convient de prendre en compte leur rigidité dans la détermination de l'élanement $\bar{\lambda}_w$ en 4.3.3.
- (2) Si la valeur de $\bar{\lambda}_w$ est gouvernée par le panneau secondaire, le raidisseur peut être considéré comme rigide.
- (3) Il convient de vérifier la résistance pour les contraintes directes si les raidisseurs sont pris en compte pour résister aux contraintes directes.

4.3.6 Soudures

- (1) Les soudures peuvent être calculées pour le flux de cisaillement nominal V_s / h_w si V_s n'excède pas $\chi_w f_{ywd} h_w t / \sqrt{3}$. Pour des valeurs supérieures, il convient de calculer les soudures entre semelles et âmes pour le flux de cisaillement $\eta f_{yw} t / \sqrt{3}$, à moins que l'état des contraintes ne fasse l'objet d'une étude détaillée.

4.4 Résistance des âmes aux forces transversales

4.4.1 Bases

- (1) La résistance d'une âme raidie ou non aux forces transversales appliquées par l'intermédiaire d'une semelle est donnée par 2.2.1(2) avec la valeur de L_{eff} déterminée au moyen des règles suivantes, qui sont applicables pour les profilés et les poutres soudées, à conditions que les semelles soient maintenues latéralement soit par leur propre rigidité, soit par des contreventements.
- (2) Il convient de distinguer trois types d'application des charges, de la façon suivante :
- Forces appliquées par l'intermédiaire d'une semelle et équilibrées par des efforts de cisaillement dans l'âme, voir Figure 4.7(a) ;
 - Forces appliquées sur une semelle et transmises par l'âme directement à l'autre semelle, voir Figure 4.7(b) ;
 - Forces appliquées par l'intermédiaire d'une semelle à proximité d'une extrémité non raidie, voir Figure 4.7(c).
- (3) Pour les poutres-caissons comportant des âmes inclinées, il convient de vérifier la résistance de l'âme ainsi que de la semelle. Les sollicitations à prendre en compte sont les composantes de la charge extérieure dans le plan de l'âme et de la semelle respectivement.

(4) En outre, il convient de prendre en compte l'effet de la force transversale sur le moment résistant de l'élément, voir 2.2.3.2.

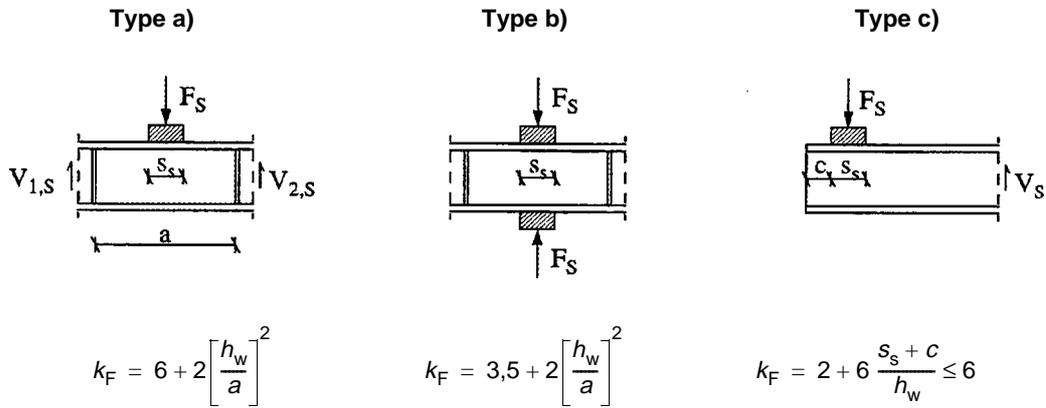


Figure 4.7 — Coefficients de voilement pour différents types d'application des charges

4.4.2 Longueur d'appui rigide

(1) La longueur d'appui rigide s_s sur la semelle est la distance sur laquelle la force appliquée est effectivement répartie, et peut être déterminée par la diffusion de la charge au sein de l'acier selon une pente de 1:1, voir Figure 4.8. Toutefois, il convient de ne pas prendre une valeur de s_s supérieure à h_w .

(2) Si plusieurs charges concentrées ont un espacement réduit, il convient de vérifier la résistance pour chaque charge séparée ainsi que pour la charge totale avec s_s égal à la distance entre axe des charges extérieures.

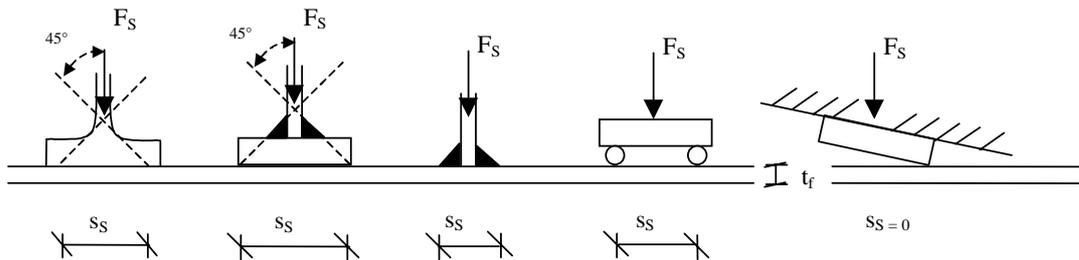


Figure 4.8 — Longueur d'appui rigide

4.4.3 Longueur efficace pour la résistance

(1) Il convient de calculer la longueur efficace pour la résistance au moyen de l'expression :

$$L_{\text{eff}} = \chi_F \ell_y \quad (4.32)$$

avec :

$$\chi_F = \frac{0,5}{\lambda_F} \leq 1 \quad (4.33)$$

$$\lambda_F = \sqrt{\frac{\ell_y t_w f_{yw}}{F_{\text{cr}}}} \quad (4.34)$$

$$F_{\text{cr}} = 0,9 k_F E \frac{t_w^3}{h_w} \quad (4.35)$$

(2) Il convient de calculer le facteur k_F selon la Figure 4.7 et ℓ_y selon 4.4.4.

4.4.4 Longueur chargée efficace

(1) Il convient de calculer la longueur chargée efficace ℓ_y au moyen de deux paramètres adimensionnels m_1 et m_2 obtenus par les expressions suivantes :

$$m_1 = \frac{f_{yf} b_f}{f_{yw} t_w} \quad (4.36)$$

$$m_2 = 0,02 \left[\frac{h_w}{t_f} \right]^2 \text{ si } \lambda_F > 0,5 ; \text{ sinon } m_2 = 0 \quad (4.37)$$

Pour les poutres-caissons, il convient de limiter b_f dans l'équation (4.36) à $25 t_f$ de chaque côté de l'âme.

(2) Pour les cas a) et b) de la Figure 4.7, il convient de calculer ℓ_y au moyen de l'expression :

$$\ell_y = s_s + 2t_f \left[1 + \sqrt{m_1 + m_2} \right] \quad (4.38)$$

(3) Pour le cas c) il convient de prendre ℓ_y comme la plus petite des valeurs données par les équations (4.38), (4.40) et (4.41). Cependant, il convient de prendre s_s dans l'équation (4.38) égal à zéro si la structure qui introduit la force ne suit pas la pente de la poutre, voir Figure 4.8.

$$\ell_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{yw} h_w} \leq s_s + c \quad (4.39)$$

$$\ell_y = \ell_e + t_f \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left[\frac{\ell_e}{t_f} \right]^2} + m_2 \quad (4.40)$$

$$\ell_y = \ell_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} \quad (4.41)$$

4.4.5 Raidisseurs transversaux

(1) Si la résistance de calcul d'une âme non raidie est insuffisante, il convient d'ajouter des raidisseurs transversaux. Au niveau de l'emplacement d'une rotule plastique dans la poutre, il convient de toujours prévoir la présence de raidisseurs si la charge locale relative η_2 selon (2.2) est supérieure à 0,5.

(2) Lors de la vérification de la résistance au flambement, la section transversale efficace d'un raidisseur peut être considérée comme comprenant une largeur de plaque d'âme égale à $30 \varepsilon t_w$, disposée avec $15 \varepsilon t_w$ de part et d'autre du raidisseur, voir Figure 4.9, à condition que cette valeur ne soit pas supérieure à la dimension réelle disponible.

(3) Il convient de déterminer la résistance au flambement hors du plan selon 5.5.1 de l'ENV 1993-1-1:1992, au moyen de la courbe de flambement c et d'une longueur de flambement ℓ d'au moins $0,75 h_w$. Il convient d'utiliser une valeur de ℓ plus élevée si les conditions aux extrémités n'assurent qu'un maintien réduit.

(3) **C** Dans le cas des montants d'appui, la charge est transmise au montant par l'âme de la poutre ; il convient de tenir compte de l'excentrement e de cette âme par rapport à la section résistante A_s (Figure 4.9). On peut admettre que la charge est transmise progressivement au montant, mais cela ne doit pas conduire à adopter une longueur de flambement inférieure au minimum indiqué.

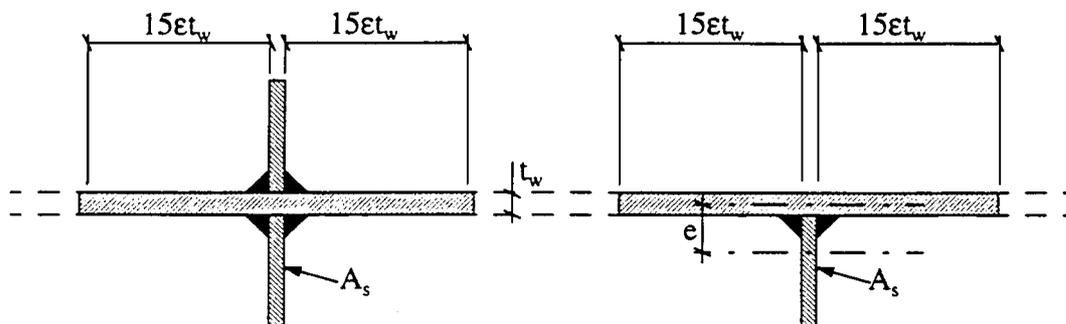


Figure 4.9 — Section efficace des raidisseurs transversaux

(5) Lorsqu'on utilise des raidisseurs d'un seul côté de l'âme ou d'autres raidisseurs dissymétriques, il convient de prendre en compte l'excentricité qui en résulte selon 5.5.4 de l'ENV 1993-1-1:1992.

(6) Outre la vérification de la résistance au flambement, il convient de vérifier la résistance de section transversale d'un raidisseur porteur au voisinage immédiat de la semelle chargée. Il convient de limiter la largeur d'âme comprise dans la section transversale efficace à ℓ_y (voir 4.4.4) et de prendre en compte toute découpe éventuelle dans le raidisseur.

4.4.6 Voilement induit par la semelle

(1) Afin de prévenir l'éventualité d'un flambement de la semelle comprimée dans le plan de l'âme, il convient que le rapport h_w/t_w de l'âme satisfasse au critère suivant :

$$h_w/t_w \leq k \left(E/f_{yf} \right) \sqrt{A_w/A_{fc}} \quad (4.42)$$

où :

A_w aire de l'âme ;

A_{fc} aire de la semelle comprimée.

Il convient de prendre la valeur du facteur k égale à :

- exploitation de la rotation plastique 0,3
- exploitation du moment résistant plastique 0,4
- exploitation du moment résistant élastique 0,55

(2) Lorsque la poutre est incurvée en élévation, avec la semelle comprimée du côté concave, il convient de vérifier le critère suivant :

$$h_w/t_w \leq \frac{k \left(E/f_{yf} \right) \sqrt{A_w/A_{fc}}}{\sqrt{1 + \frac{h_w \bar{E}}{3r f_{yf}}}} \quad (4.43)$$

où :

r représente le rayon de courbure de la semelle comprimée.

(3) Si la poutre comporte des raidisseurs d'âme longitudinaux ou transversaux, la valeur limite de h_w/t_w peut être augmentée.

Annexe A (informative)

Coefficients de voilement

A.1 Coefficient de voilement pour les plaques comportant des raidisseurs multiples chargées par des contraintes directes

(1) Pour les plaques raidies comportant plusieurs raidisseurs longitudinaux également espacés, le coefficient de voilement $k_{\sigma,p}$ peut être approché au moyen des expressions suivantes :

$$k_{\sigma,p} = \frac{2 \left(\left(1 + \alpha^2 \right)^2 + \gamma \right)}{\alpha^2 (\psi + 1) (1 + \delta)} \quad \text{si } \alpha < (1 + \gamma)^{0,25} \quad (\text{A.1})$$

$$k_{\sigma,p} = \frac{4 \left(1 + \sqrt{1 + \gamma} \right)}{(\psi + 1) (1 + \delta)} \quad \text{si } \alpha > (1 + \gamma)^{0,25} \quad (\text{A.2})$$

avec :

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} > 0$$

$$\gamma = \frac{I_x}{I_p} > 50$$

$$\delta = \frac{A_{sl}}{A_p}$$

$$\alpha = a/b > 1$$

où :

I_x moment d'inertie pour la flexion longitudinale pour l'ensemble du panneau ;

$$I_p \quad \text{moment d'inertie pour la flexion de la plaque} = \frac{bt^3}{12(1-\nu^2)} ;$$

A_{sl} aire brute de tous les raidisseurs longitudinaux, à l'exclusion de la plaque ;

A_p aire brute de la plaque = bt ;

σ_1 contrainte de bord maximale ;

σ_2 contrainte de bord minimale ;

a, b et t tels que définis dans la Figure 4.1.

(1) **C** Pour l'application de 4.2.2.3 (9), $k_{\sigma,p \text{ min}}$ peut être pris égal à $k_{\sigma,p}$ de l'expression (A.2), cas $\alpha \geq (1 + \gamma)^{0,25}$.
Le domaine de validité ($\psi > 0, \gamma > 50, \alpha > 1$) reste inchangé.

A.2 Contrainte critique pour un raidisseur considéré comme un élément comprimé fictif maintenu par la plaque

(1) Dans le cas où un seul raidisseur longitudinal est situé dans la zone comprimée et où l'on néglige les raidisseurs situés dans la zone tendue, la contrainte critique de voilement élastique est la suivante :

$$\sigma_{cr,p} = \frac{1,05 E \sqrt{I_{sl} t^3 b}}{A b_1 b_2} \quad \text{si } a \geq a_c \quad (\text{A.3})$$

$$\sigma_{cr,p} = \frac{\pi^2 E I_{sl}}{A a^2} + \frac{E t^3 b a^2}{4 \pi^2 [1 - \nu^2] A b_1^2 b_2^2} \quad \text{si } a \leq a_c \quad (\text{A.4})$$

$$a_c = 4,33 \left[I_{sl} b_1^2 b_2^2 / (t^3 b) \right]^{0,25} \quad (\text{A.5})$$

où :

A aire brute de l'élément comprimé fictif ;

I_{sl} moment d'inertie de flexion de la section transversale brute du élément comprimé fictif défini en 4.2.2.6(2) selon un axe passant par son centre de gravité et parallèle au plan de la plaque ;

b_1, b_2 distances entre les bords longitudinaux et le raidisseur ($b_1 + b_2 = b$).

(1) **C** Pour l'application de 4.2.2.3 (9), on a $k_{\sigma,p \min} = \frac{1}{A} \frac{b^2}{b_1 b_2} \sqrt{\frac{I_{sl} b}{t}}$, qui donne $\sigma_{cr,p \min}$ égal à $\sigma_{cr,p}$ de l'expression (A.3), cas $a \geq a_c$.

(2) Dans le cas de deux raidisseurs longitudinaux, tous deux comprimés, il convient de considérer tout d'abord chaque raidisseur séparément en supposant que l'autre est rigide, en utilisant la procédure indiquée pour un raidisseur unique. Il convient de considérer ensuite les deux raidisseurs comme faisant bloc, avec une aire et un moment d'inertie de flexion égaux à la somme de ceux des raidisseurs séparés. L'emplacement du bloc de raidisseurs est la position de la résultante des efforts axiaux dans les raidisseurs. La contrainte critique de voilement élastique est la plus petite des valeurs calculées pour les trois cas. Si l'un des raidisseurs est tendu, cette méthode donne des valeurs offrant toute sécurité.

(2) **I** Voir 4.2.2.5.

A.3 Coefficient de voilement par cisaillement pour les panneaux raidis

(1) Pour les plaques comportant des raidisseurs transversaux rigides avec ou sans raidisseurs longitudinaux intercalés, le coefficient de voilement par cisaillement k_τ est le suivant :

$$k_\tau = 5,34 + 4,00 \left(h_w / a \right)^2 + k_{\tau st} \quad \text{lorsque } a / h_w \geq 1 \quad (\text{A.6})$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34 \left(h_w / a \right)^2 + k_{\tau st} \quad \text{lorsque } a / h_w < 1 \quad (\text{A.7})$$

avec :

$$k_{\tau st} = 9 \left[\frac{h_w}{a} \right]^2 \left[\frac{I_{sl}}{t^3 h_w} \right]^{3/4} \quad \text{sans être inférieur à : } \frac{2,1}{t} \left[\frac{I_{sl}}{h_w} \right]^{1/3} \quad (\text{A.8})$$

où :

a distance entre raidisseurs transversaux (voir Figure 4.6) ;

I_{sl} moment d'inertie de flexion du raidisseur longitudinal par rapport à l'axe z, voir Figure 4.6(b). Pour les âmes comportant deux ou plusieurs raidisseurs égaux, pas nécessairement également espacés, I_{sl} est la somme de la rigidité des raidisseurs séparés.