

# normalisation française

**FD ENV 1993-1-7**  
Septembre 2002

Indice de classement : **P 22-317**

ICS : 91.010.30 ; 91.080.10

Eurocode 3

## Calcul des structures en acier

**Partie 1-7 : Règles générales — Règles supplémentaires  
pour la résistance et la stabilité des structures  
en plaques raidies chargées hors de leur plan**

- E : Eurocode 3 — Design of steel structures — Part 1-7: General rules —  
Supplementary rules for planar plated structural elements with out  
of plane loading
- D : Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten —  
Teil 1-7: Allgemeine Bemessungsregeln — Ergänzende Regeln  
zu ebenen Blechfeldern mit Querbelastung

---

### ***Fascicule de documentation***

publié par AFNOR en septembre 2002.

---

### ***Correspondance***

Le présent document reproduit intégralement la Prénorme européenne  
ENV 1993-1-7:1999.

---

### ***Analyse***

Le présent document donne des principes et des règles d'application pour le calcul  
structural des plaques raidies et non raidies chargées par des actions hors de leur  
plan. Il est destiné à être utilisé conjointement avec l'ENV 1993-1-1 et les normes  
d'application appropriées.

---

### ***Descripteurs***

**Thésaurus International Technique** : bâtiment, génie civil, construction métallique,  
acier de construction, plaque, définition, symbole, calcul, résistance des matériaux,  
contrainte, stabilité.

---

### ***Modifications***

---

### ***Corrections***



## Membres de la commission de normalisation

Président : M MAITRE

Secrétariat : M PESCATORE — BNCM

M	ARIBERT	INSA RENNES
M	BAUDY	BUREAU VERITAS
M	BAZIN	Secrétaire Général CGNorBât-DTU
M	BRAHAM	ASTRON BUILDING SYSTEMS
M	CHABROLIN	CTICM
M	CRETON	BNS
MME	DUSSAUGEY	SYNDICAT NATIONAL DES INDUSTRIES D'EQUIPEMENTS
M	ESTEVE	EDF DIRECTION DE L'EQUIPEMENT
M	GALEA	CTICM
M	GAULIARD	SYNDICAT DE LA CONSTRUCTION METALLIQUE DE FRANCE
M	GOURMELON	LABORATOIRE CENTRAL DES PONTS ET CHAUSSEES
M	GRIMAULT	TUBEUROP FRANCE
M	KRUPPA	CTICM
M	IZABEL	SNPPA
M	LAPEYRE	C.E.P.
M	LE CHAFFOTEC	SOCOTEC
M	MAITRE	SOCOTEC
M	MARTIN	SNCF
M	MOUTY	MOUTY
M	PAMIES	CETEN APAVE
MME	PATROUILLEAU	AFNOR
MME	PECHENARD	AFFIX
M	PERNIER	MINISTERE DE L'EQUIPEMENT, DU LOGEMENT, DU TRANSPORT ET DU TOURISME
MME	PETROVA	S.F.J.F.
M	RAMEAU	EDF
M	RAOUL	SETRA
M	REYNAUD	SERVICE TECHNIQUE DES REMONTEES MECANIQUES
M	ROUSSEAU	INSTITUT DE SOUDURE
M	RYAN	CTICM
M	SOKOL	P.A.B.
M	VILLETTE	BAUDIN-CHATEAUNEUF
M	VOISIN	I.N.R.S.

## ***Avant-propos national***

*Le présent document traite du calcul structural des plaques raidies et non raidies chargées par des actions hors de leur plan. Les principales parties applicatives ayant été publiées sous forme de Fascicules de Documentation, il a été décidé de ne pas établir de Document d'Application Nationale (D.A.N.)*

*Les observations concernant le présent fascicule de documentation sont à adresser au BNCM / CTICM — Bâtiment 6 — Domaine de Saint-Paul — 102, route de Limours — 78471 Saint-Rémy-Lès-Chevreuse.*

## Liste des normes et textes normatifs de référence

Normes européennes ou internationales publiées		Normes pouvant être appliquées avec l'ENV	
Désignation	Intitulé	Désignation	Intitulé
ENV 1993-1-1	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments	XP ENV 1993-1-1 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 1993-1-2	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-2 : Calcul du comportement au feu	XP ENV 1993-1-2 P 22-312	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et document d'application nationale — Partie 1-2 : Calcul du comportement au feu
ENV 1993-1-3	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-3 : Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid	XP ENV 1993-1-3 P 22-313	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et document d'application nationale — Partie 1-3 : Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid
ENV 1993-1-4	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-4 : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables	XP ENV 1993-1-4 P 22-314	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et document d'application nationale — Partie 1-4 : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables
ENV 1993-1-5	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-5 : Règles supplémentaires pour les plaques planes, raidies ou non, chargées dans leur plan	XP ENV 1993-1-5 P 22-315	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et document d'application nationale — Partie 1-5 : Règles supplémentaires pour les plaques planes, raidies ou non, chargées dans leur plan
ENV 1993-1-6	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-6 : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en coques	FD ENV 1993-1-6 P 22-316	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-6 : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en coques
ENV 1993-1-7	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-7 : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en plaques raidies chargées hors de leur plan	FD ENV 1993-1-7 P 22-317	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-7 : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en plaques raidies chargées hors de leur plan
ENV 1993-2	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 2 : Ponts métalliques	XP ENV 1993-2 P 22-320	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et document d'application nationale — Partie 2 : Ponts métalliques
ENV 1993-3-1	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Tours, mâts et cheminées — Partie 3-1 : Pylônes et mâts haubanés	XP ENV 1993-3-1 P 22-331	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et Document d'Application Nationale — Tours, mâts et cheminées — Partie 3-1 : Pylônes et mâts haubanés
ENV 1993-3-2	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Tours, mâts et cheminées — Partie 3-2 : Cheminées	XP ENV 1993-3-2 P 22-332	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et Document d'Application Nationale — Tours, mâts et cheminées — Partie 3-2 : Cheminées
ENV 1993-4-1	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-1 : Silos, réservoirs et canalisations — Silos	FD ENV 1993-4-1 P 22-341	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-1 : Silos, réservoirs et canalisations — Silos
ENV 1993-4-2	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-2 : Silos, réservoirs et canalisations — Réservoirs	FD ENV 1993-4-2 P 22-342	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-2 : Silos, réservoirs et canalisations — Réservoirs
ENV 1993-4-3	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-3 : Silos, réservoirs et canalisations — Canalisations	FD ENV 1993-4-3 P 22-343	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-3 : Silos, réservoirs et canalisations — Canalisations
ENV 1993-5	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 5 : Pieux et palplanches	FD ENV 1993-5 P 22-350	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 5 : Pieux et palplanches
ENV 1993-6	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 6 : Chemins de roulement	XP ENV 1993-6 P 22-360	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et document d'application nationale — Partie 6 : Chemins de roulement



**Version française**

**Eurocode 3 —  
Calcul des structures en acier —  
Partie 1-7 : Règles générales —  
Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité  
des structures en plaques raidies chargées hors de leur plan**

Eurocode 3 —  
Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten —  
Teil 1-7: Allgemeine Bemessungsregeln —  
Ergänzende Regeln zu ebenen Blechfeldern  
mit Querbelastung

Eurocode 3 —  
Design of steel structures —  
Part 1-7: General rules — Supplementary rules  
for planar plated structural elements with out  
of plane loading

La présente prénorme européenne (ENV) a été adoptée par le CEN le 25 décembre 1998 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
<b>Avant-propos</b> .....	4
<b>1 Généralités</b> .....	6
1.1 Objet .....	6
1.2 Distinction entre principes et règles d'application .....	7
1.3 Références normatives .....	7
1.4 Définitions .....	8
1.5 Unités SI .....	10
1.6 Symboles .....	10
<b>2 Bases de calcul</b> .....	12
2.1 Généralités .....	12
2.2 État limite ultime .....	12
2.3 États limites de service .....	13
2.4 Caractéristiques des matériaux .....	13
2.5 Actions .....	13
2.6 Conception et calcul assistés par l'expérimentation .....	13
<b>3 Modélisation en vue de l'analyse de structure</b> .....	13
3.1 Généralités .....	13
3.2 Calcul des contraintes et des sollicitations internes .....	14
<b>4 États limites de service</b> .....	19
4.1 Généralités .....	19
4.2 Exigences .....	19
<b>5 État limite ultime</b> .....	19
5.1 Généralités .....	19
5.2 État limite plastique .....	20
5.3 Plasticité cyclique .....	21
5.4 Résistance au voilement .....	21
5.5 Fatigue .....	22
<b>Annexe A (informative) Types d'analyse pour le calcul des structures en plaques</b> .....	23
A.1 Généralités .....	23
A.2 Analyse de plaque élastique linéaire (LA) .....	23
A.3 Analyse géométriquement non linéaire (GNA) .....	23
A.4 Analyse matériellement non linéaire (MNA) .....	24
A.5 Analyse géométriquement et matériellement non linéaire (GMNA) .....	24
A.6 Analyse géométriquement non linéaire incluant les imperfections (GNIA) .....	24
A.7 Analyse géométriquement et matériellement non linéaire incluant les imperfections (GMNIA) .....	24
<b>Annexe B (informative) Sollicitations exercées dans les plaques rectangulaires non raidies</b> (Théorie des petits déplacements) .....	25
B.1 Généralités .....	25
B.2 Définitions .....	25
B.3 Chargement uniformément réparti .....	25
B.4 Chargement localisé centré .....	29

## Sommaire (fin)

	Page
<b>Annexe C</b> (informative) <b>Sollicitations exercées dans les plaques rectangulaires non raidies</b> (Théorie des grands déplacements) .....	31
<b>C.1</b> Généralités .....	31
<b>C.2</b> Définitions .....	31
<b>C.3</b> Chargement uniformément réparti .....	31
<b>C.4</b> Chargement localisé centré .....	37

## Avant-propos

### Objectifs des Eurocodes

- (1) Les Eurocodes structuraux constituent 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) eut l'initiative de démarrer le travail d'établissement d'un ensemble de règles techniques harmonisées pour le calcul des bâtiments et ouvrages de génie civil, règles destinées à être utilisées, au début, comme alternative aux différentes règles en vigueur dans les différents états membres et, ultérieurement, à les remplacer. Ces règles techniques se sont fait connaître sous le nom «d'Eurocodes structuraux».
- (5) En 1990, après consultation de ses états membres, la CCE a transféré le travail d'élaboration, de diffusion et de mise à jour des Eurocodes Structuraux au CEN, et le Secrétariat de l'AELE a accepté d'aider 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 travaux sont en cours sur les Eurocodes Structuraux suivants, chacun étant généralement constitué de 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	Résistance des structures aux séismes ;
EN 1999	Eurocode 9	Calcul des structures en aluminium.
- (8) Des sous-comités distincts ont été constitués par le CEN/TC 250 pour les différents Eurocodes énoncés ci-dessus.
- (9) La présente partie 1-7 de l'ENV 1993 est publiée par le CEN en tant que Prénorme Européenne (ENV) pour une durée de vie initiale de trois ans.
- (10) La présente prénorme est destinée à une application expérimentale et est soumise à commentaires.
- (11) Au terme d'une durée approximative de deux ans, les membres du CEN seront invités à soumettre des commentaires formels qui seront pris en compte dans la détermination des actions futures.
- (12) Dans l'intervalle, les réactions et commentaires concernant la présente prénorme devront être adressés au Secrétariat du sous-comité CEN/TC 250/SC 3 à l'adresse suivante :

BSI Standards  
British Standards House  
389 Chiswick High Road  
Londres W4 4AL  
Angleterre

ou à votre organisme national de normalisation.



## Documents d'Application Nationale

(13) Dans l'optique des responsabilités incombant aux autorités des pays membres en ce qui concerne la sécurité, la santé, et 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 identifiées par . 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 de référence indispensables peuvent ne pas être disponibles à la publication de la présente prénorme. Il est par conséquent prévu qu'un Document d'Application Nationale (DAN) donnant les valeurs définitives des éléments de sécurité faisant références aux normes d'accompagnement compatibles et précisant les directives nationales d'application de la présente prénorme, soit publié dans chaque état membre ou son organisme de normalisation.

(15) Il est prévu que la présente prénorme soit utilisée complètement avec le DAN en vigueur dans le pays où le bâtiment ou l'ouvrage de génie civil est situé.

(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 Tours, mâts et cheminées ;
- ENV 1993-4 Silos, réservoirs et canalisations ;
- ENV 1993-5 Pieux et palplanches ;
- ENV 1993-6 Chemins de roulement ;

(17) La présente Partie 1-7 de l'ENV 1993 complète la Partie 2 et la Partie 4 de l'ENV 1993 en donnant les règles concernant les structures en plaques raidies nécessaires pour le calcul des segments en plaques des ponts, silos et réservoirs.

(18) Étant donné que ces règles ne sont pas spécifiques aux ponts, silos et réservoirs, elles ont été réunies en tant que document distinct, sous une forme permettant l'incorporation future avec d'autres règles générales dans l'EN 1993-1-1.

## 1 Généralités

### 1.1 Objet

(1)P La Partie 1-7 de l'ENV 1993 donne des principes et des règles d'application pour le calcul structural des plaques raidies et non raidies chargées par des actions hors de leur plan. Elle est destinée à être utilisée conjointement avec l'ENV 1993-1-1 et les normes d'application appropriées.

(2) Toutes considérations concernant les actions, telles que :

- définition d'une action
- combinaison d'actions
- coefficients partiels pour les actions

doivent être prises dans l'ENV 1991 en ce qui concerne les règles générales, et dans les parties appropriées de l'ENV 1993 en ce qui concerne les règles d'application spécifiques.

(3) Ce document définit uniquement les valeurs caractéristiques de la résistance ; les coefficients partiels pour la résistance doivent être pris dans les normes d'application appropriées.

(4) La présente Partie 1-7 concerne les exigences de calcul appropriées à l'état limite ultime prenant en compte les modes de ruine suivants :

- plastification
- plasticité cyclique
- voilement
- fatigue.

(5) L'équilibre global de la structure (glissement, soulèvement, renversement) n'est pas compris dans la présente Partie 1-7, mais il est traité dans l'ENV 1993-1-1. Des considérations particulières en vue d'applications spécifiques peuvent être trouvées dans les parties appropriées d'application de l'ENV 1993-1-1.

(6) Les règles données dans la présente Partie 1-7 concernent les segments de plaques de structures en plaques, pouvant être raidis ou non raidis. Ces segments de plaques peuvent être des plaques individuelles ou des parties d'une structure en plaques. Ils sont chargés par des actions hors de leur plan combinées à des actions dans leur plan provoquées par le comportement d'ensemble de la structure.

(7)P La vérification des structures en plaques raidies ou non raidies chargées uniquement par des effets dans leur plan doit être effectuée au moyen des règles de calcul données dans l'ENV 1993-1-5. L'ENV 1993-1-7 donne des règles pour l'interaction entre les effets du chargement dans le plan et hors du plan.

(8) Des règles de calcul pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid sont données dans l'ENV 1993-1-3.

(9) Les plages de températures à l'intérieur desquelles l'application des règles de la présente Partie 1-7 est autorisée sont définies dans les parties d'application appropriées de l'ENV 1993.

(10) Les règles données dans la présente Partie 1-7 concernent le calcul structural sous l'effet d'actions pouvant être considérées comme essentiellement quasi-statiques.

(11) Les règles données dans la présente Partie 1-7 concernent les structures réalisées conformément aux spécifications d'exécution données dans l'ENV 1993-1-1.

(12) Les charges de vent ainsi que les flux de matières peuvent, en général, être considérés comme des actions quasi statiques. Pour la fatigue, les effets dynamiques doivent être pris en compte conformément aux parties appropriées d'application de l'ENV 1993. Les sollicitations provoquées par le comportement dynamique sont donc considérées dans la présente partie comme quasi-statiques.

## 1.2 Distinction entre principes et règles d'application

(1)P En fonction du caractère de chaque alinéa, une distinction est faite dans la présente Partie entre principes et règles d'application.

(2)P Les principes comprennent :

- des déclarations générales ou définitives pour lesquelles il n'existe aucune alternative ;
- des exigences et des modèles analytiques pour lesquels aucune alternative n'est autorisée sauf mention spécifique.

(3) Les principes sont identifiés par la lettre P suivant le numéro d'alinéa.

(4)P Les règles d'application sont en général des règles reconnues qui suivent les principes et satisfont leurs exigences. Il est possible d'utiliser d'autres règles de calcul alternatives différentes des règles d'application données dans l'Eurocode, à condition qu'il soit démontré que la règle alternative est conforme aux principes concernés et qu'elle offre une fiabilité au moins égale.

(5) Dans la présente Partie, les règles d'application sont identifiées par un numéro entre parenthèses, comme dans cet alinéa.

## 1.3 Références normatives

La présente Prénorme Européenne intègre, par référence datée et non datée, des dispositions provenant d'autres normes. Ces références normatives sont citées aux emplacements appropriés du texte, et les publications sont mentionnées ci-après. Pour les références datées, les amendements ou révisions ultérieurs de ces publications s'appliquent à la Prénorme Européenne uniquement 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 *Eurocode 3 : Calcul des structures en acier* ;

Partie 1.1 : *Règles générales et règles pour les bâtiments* ;

Partie 1.3 : *Règles générales — Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid* ;

Partie 1.5 : *Règles générales — Règles supplémentaires pour les plaques planes raidies chargées dans leur plan* ;

Partie 1.6 : *Règles générales — Règles supplémentaires pour les coques* ;

Partie 2 : *Ponts métalliques* ;

Partie 4.1 : *Silos* ;

Partie 4.2 : *Réservoirs* ;

Partie 4.3 : *Canalisations*.

## 1.4 Définitions

### 1.4.1 Composantes de contraintes

#### 1.4.1.1 Contraintes de membrane exercées dans les plaques rectangulaires

$\sigma_{mx}$  contrainte de membrane dans le sens x provoquée par les efforts de membrane  $n_x$ .

$\sigma_{my}$  contrainte de membrane dans le sens y provoquée par les efforts de membrane  $n_y$ .

$\tau_{mxy}$  contrainte de cisaillement de membrane provoquée par les efforts de membrane  $n_{xy}$ .

NOTE Les contraintes sont positives lorsqu'elles provoquent une traction dans la plaque.

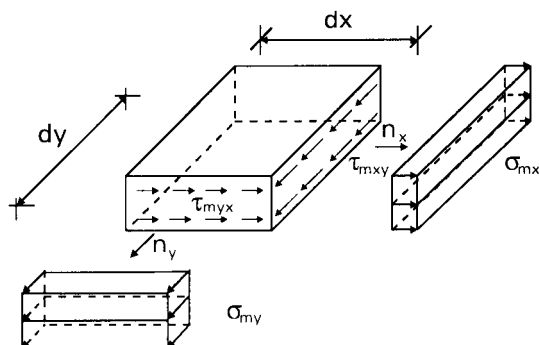


Figure 1.1 : Définition des contraintes de membrane

#### 1.4.1.2 Contraintes de flexion et de cisaillement provoquées dans les plaques rectangulaires par la flexion

$\sigma_{bx}$  contrainte dans le sens x provoquée par le moment fléchissant  $m_x$ .

$\sigma_{by}$  contrainte dans le sens y provoquée par le moment fléchissant  $m_y$ .

$\tau_{bxy}$  contrainte de cisaillement provoquée par le moment de torsion  $m_{xy}$ .

$\tau_{bxz}$  contrainte de cisaillement provoquée par les efforts tranchants  $q_x$ .

$\tau_{byz}$  contrainte de cisaillement provoquée par les efforts tranchants  $q_y$ .

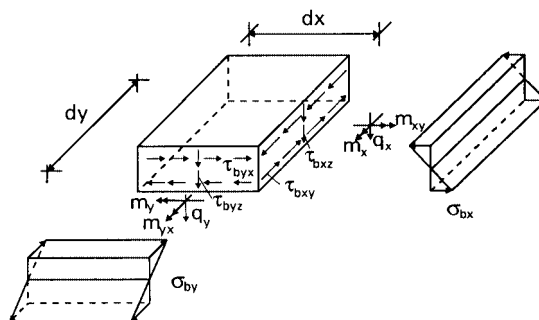


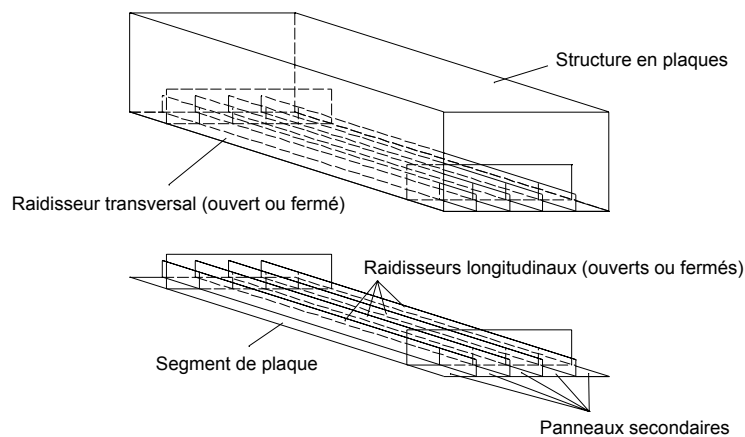
Figure 1.2 : Définition des contraintes de flexion et de cisaillement provoquées par la flexion

NOTE En général, il existe huit sollicitations dans une plaque en un point quelconque. Les contraintes de cisaillement  $\tau_{bxz}$  et  $\tau_{byz}$  provoquées par  $q_x$  et  $q_y$  sont dans la plupart des cas pratiques insignifiantes comparées aux autres contraintes, et elles peuvent donc normalement être négligées pour le calcul.

### 1.4.2 Formes structurales

(1) Les définitions suivantes s'appliquent dans cette norme.

- Structure en plaques : Structure constituée de plaques nominale-ment planes. Les plaques peuvent être raidies ou non raidies, voir Figure 1.3.
- Segment de plaque : Un segment de plaque est une plaque plane qui peut être raidie ou non raidie. Un segment de plaque peut être considéré comme une partie distincte d'une structure en plaques.
- Raidisseur : Plaque ou profil fixé sur une plaque dans le but d'empêcher le voilement de la plaque ou d'améliorer sa résistance à la flexion ou sa rigidité de flexion. Un raidisseur est appelé :
  - longitudinal si son sens est parallèle au sens dominant des efforts de compression.
  - transversal si son axe est perpendiculaire au sens dominant des forces de compression.
- Plaque raidie : Plaque comportant des raidisseurs transversaux et/ou longitudinaux.
- Panneau secondaire : Plaque non raidie délimitée par des semelles ou des raidisseurs.



**Figure 1.3 : Composants de structures en plaques**

### 1.4.3 Terminologie

- (1) Effondrement plastique : mode de ruine à l'état limite ultime où la structure perd sa capacité à résister au chargement accru par la plastification du matériau.
- (2) Plastification : mode de ruine à l'état limite ultime où la plaque subit une ruine provoquée par la traction.
- (3) Plasticité cyclique : Cas où une plastification répétée est provoquée par des cycles de chargement et de déchargement.
- (4) Voilement : Cas où la structure perd brutalement sa stabilité sous l'effet de la compression et/ou du cisaillement.
- (5) Fatigue : Cas où un chargement cyclique provoque la propagation de fissures entraînant une ruine partielle ou complète.

#### 1.4.4 Actions

(1) Dans le cadre de la présente partie, les définitions suivantes s'appliquent :

- Chargement hors du plan : La charge s'applique perpendiculairement à la surface d'un segment de plaque.
- Efforts dans le plan : Forces agissant parallèlement à la surface du segment de plaque. Celles-ci sont induites par des effets dans le plan (par exemple les effets de la température et du frottement) ou par des charges globales appliquées sur la structure en plaques.

#### 1.5 Unités SI

(1) Il convient d'utiliser les Unités SI conformément à l'ISO 1000.

(2) Pour les calculs, il convient d'utiliser les unités suivantes :

- dimensions et épaisseurs :	m	mm
- poids unitaire :	kN/m <sup>3</sup>	N/mm <sup>3</sup>
- forces et charges :	kN	N
- forces linéaires et charges linéaires :	kN/m	N/mm
- pressions et actions réparties sur des surfaces :	kPa	MPa
- densité :	kg/m <sup>3</sup>	kg/mm <sup>3</sup>
- accélération :	km/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>
- efforts de membrane :	kN/m	N/mm
- efforts de flexion :	kNm/m	Nmm/mm
- contraintes et modules d'élasticité :	kPa	MPa (= N/mm <sup>2</sup> )

(3) Facteurs de conversion

$$1 \text{ mbar} = 0,1 \text{ kPa}$$

#### 1.6 Symboles

Caractères grecs minuscules

- $\alpha$  coefficient d'aspect d'un segment de plaque ( $a/b$ ) ;
- $\varepsilon$  déformation ;
- $\rho$  facteur de réduction pour le voilement de plaque ;
- $\sigma_i$  contrainte normale dans le sens  $i$ , voir 1.4.1 ;
- $\tau$  contrainte de cisaillement, voir 1.4.1 ;
- $\gamma_M$  coefficient de sécurité pour la résistance ;
- $\nu$  coefficient de Poisson.

Caractères romains majuscules

- $E$  module d'élasticité ;
- $R$  facteur d'amplification de charge.

Caractères romains minuscules

- a longueur d'un segment de plaque, voir Figures 1.4 et 1.5 entre appuis ;
- b largeur d'un segment de plaque, voir Figures 1.4 et 1.5 entre appuis ;
- $f_y$  limite d'élasticité ;
- $n_i$  effort de membrane par unité de largeur dans le sens  $i$  [kN/m] ;
- $m$  moment fléchissant par unité de largeur [kNm/m] ;
- $q_i$  effort tranchant par unité de largeur dans le sens  $i$  [kN/m] ;
- $t$  épaisseur d'un segment de plaque, voir Figures 1.4 et 1.5.

NOTE Les symboles et notations non mentionnées ci-dessus sont explicités lors de leur première utilisation.

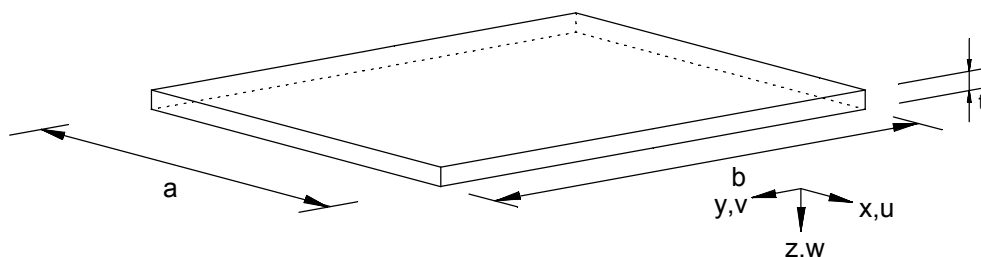


Figure 1.4 : Dimensions et axes de segments de plaque non raidis

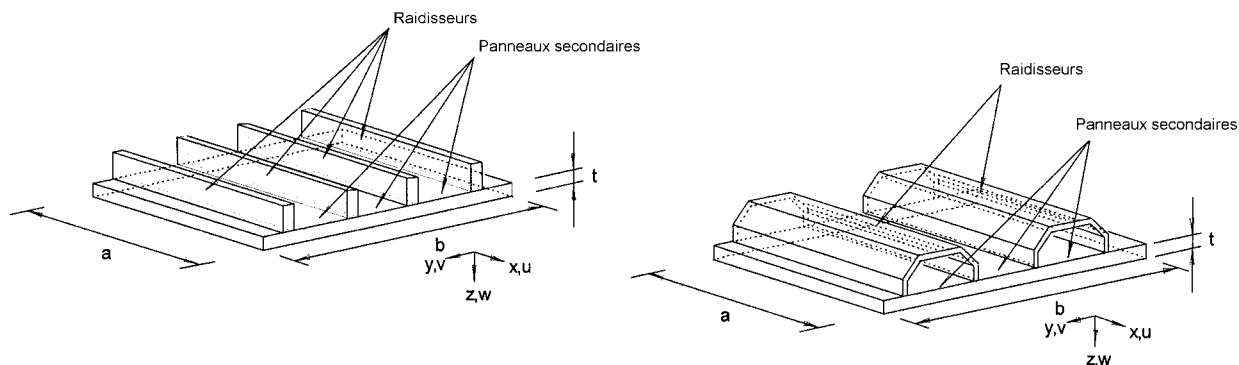


Figure 1.5 : Dimensions et axes de segments de plaque raidis ;  
 les raidisseurs peuvent être à section ouverte ou fermée

## **2 Bases de calcul**

### **2.1 Généralités**

(1)P Les bases de calcul doivent être conformes à l'ENV 1991-1.

(2)P Les états limites suivants doivent être vérifiés pour une structure en plaques :

a) état limite ultime avec les modes de ruine suivants :

— plastification, voir 2.2.2 ;

— plasticité cyclique, voir 2.2.3 ;

— voilement, voir 2.2.4 ;

— fatigue, voir 2.2.5.

b) état limite de service avec des limites données pour :

— les flèches hors du plan, voir 2.3.2 ;

— les vibrations excessives, voir 2.3.3.

### **2.2 État limite ultime**

#### **2.2.1 Généralités**

(1)P Les principes donnés pour l'état limite ultime dans les sections 2 et 5 de l'ENV 1993-1-1 doivent également être appliqués aux structures en plaques.

#### **2.2.2 Plastification**

(1) La plastification est défini comme la condition où une partie de la structure subit des déformations plastiques excessives, associées à la formation d'un mécanisme plastique.

(2) Le mode de ruine implique une perte d'équilibre entre les chargements imposés et les sollicitations internes maximum dans la plaque, et seules les considérations d'équilibre sont concernées.

#### **2.2.3 Plasticité cyclique**

(1) La plasticité cyclique est définie comme la condition limite pour des cycles répétés de chargement et de déchargement. Elle produit une plastification en traction ou en compression ou les deux en un même point, provoquant ainsi la répétition d'un travail plastique sur la structure. Cette plastification cyclique peut entraîner une fissuration locale par épuisement de la capacité d'absorption d'énergie du matériau. Les contraintes qui sont associées à cette condition apparaissent sous une combinaison de toutes les actions et des conditions de compatibilité pour la structure.

#### **2.2.4 Voilement**

(1) Le voilement est défini comme la condition où tout ou partie de la structure subit des déplacements importants provoqués par une instabilité sous les contraintes de compression ou de cisaillement exercées dans la plaque. Il finit par entraîner l'incapacité de supporter une augmentation des sollicitations.

#### **2.2.5 Fatigue**

(1) La fatigue est définie comme la condition limite provoquée par l'apparition et/ou l'extension de fissures provoquées par des cycles de contraintes répétés.



## **2.3 États limites de service**

### **2.3.1 Généralités**

(1)P Les principes donnés pour l'état limite de service dans les sections 4 et 6 de l'ENV 1993-1-1 doivent également être appliqués aux structures en plaques.

(2)P Pour les structures en plaques les critères d'état limite donnés en 2.3.2 et 2.3.3 doivent en particulier être vérifiés.

### **2.3.2 Flèche hors du plan**

(1) La valeur limite de la flèche hors du plan  $w$  est définie comme la flèche qui gouverne l'utilisation effective d'un segment de plaque. Elle dépend habituellement de l'usage et il convient de la prendre dans la norme appropriée.

### **2.3.3 Vibrations excessives (résonance)**

(1) Les vibrations excessives sont définies comme la condition limite où la ruine d'une structure en plaques survient par fatigue au niveau d'assemblages adjacents en raison des vibrations excessives de la plaque, ou bien où les états limites de service s'appliquent.

(2) Il convient de limiter l'élanement d'un segment de plaque afin d'éviter les vibrations excessives.

## **2.4 Caractéristiques des matériaux**

(1)P La présente Partie 1-7 de l'ENV 1993 couvre le calcul des structures en plaques fabriquées à partir d'acier conforme aux normes de produit mentionnées dans l'ENV 1993-1-1 et l'ENV 1993-2.

(2)P Les caractéristiques de matériau des aciers inoxydables doivent être prises dans l'ENV 1993-1-4.

## **2.5 Actions**

(1)P Les valeurs caractéristiques des actions doivent être déterminées par référence aux parties appropriées de l'ENV 1991.

## **2.6 Conception et calcul assistés par l'expérimentation**

(1)P Pour la conception et le calcul assistés par l'expérimentation, il convient de se reporter à la section 8 de l'ENV 1991-1, à la section 8 de l'ENV 1993-1-1 et, selon le cas, à la section 9 de l'ENV 1993-1-3.

# **3 Modélisation en vue de l'analyse de structure**

## **3.1 Généralités**

(1)P Les calculs doivent être effectués au moyen de modèles de calcul appropriés faisant intervenir toutes les variables appropriées. Les modèles utilisés doivent être appropriés à la prévision du comportement structural et des états limites considérés.

(2) Si les conditions aux limites peuvent être définies de façon sécuritaire, une structure en plaques peut être subdivisée en segments de plaques distincts et calculés indépendamment.

(3)P La stabilité globale de la structure complète doit être vérifiée conformément aux parties appropriées de l'ENV 1993.

## 3.2 Calcul des contraintes et des sollicitations internes

### 3.2.1 Généralités

- (1)P Les contraintes ou sollicitations internes d'une structure en plaques doivent être calculées pour la combinaison d'actions appropriée, voir 1.1 (2).
- (2) Il convient que le modèle de calcul ainsi que les hypothèses fondamentales utilisés pour la détermination des contraintes ou des sollicitations internes représentent le comportement structural prévu à l'état limite ultime.
- (3) Il convient que les modèles soient suffisamment précis pour prévoir le comportement de la plaque, en fonction de la qualité d'exécution susceptible d'être atteinte et de la fiabilité des informations sur lesquelles est fondé le calcul.
- (4) Les modèles structuraux peuvent être simplifiés dans la mesure où l'on peut démontrer que les simplifications utilisées donnent des estimations des effets d'actions plaçant en sécurité.
- (5) Si nécessaire, il convient que le modèle de calcul soit complété par des essais faisant intervenir toutes les variables appropriées.
- (6) Il convient de baser l'évaluation de la fatigue pour une structure en plaques sur une analyse globale élastique.
- (7) Il convient d'examiner d'éventuels écarts par rapport aux hypothèses de sens ou de positions d'actions.

### 3.2.2 Conditions aux limites des plaques

- (1)P La structure en plaques doit être calculée en supposant des conditions aux limites appropriées qui peuvent être réalisées en construction et qu'il convient de faire figurer sur les plans.
- (2)P Si une structure en plaques est subdivisée en segments de plaque distincts, les conditions aux limites, par ex. des raidisseurs de segments de plaque distincts pris en compte dans les calculs, doivent figurer sur les plans.

### 3.2.3 Modèles de calcul pour les structures en plaques

#### 3.2.3.1 Généralités

- (1) Il convient de déterminer les contraintes internes d'un segment de plaque d'une structure en plaques au moyen de l'un des modèles de calcul suivants :
- formules courantes pour les plaques, voir 3.2.3.2 ;
  - analyse globale, voir 3.2.3.3 ;
  - modèles simplifiés, voir 3.2.3.4.
- (2) Il convient que les modèles de calcul définis en (1) prennent en compte une théorie de flexion linéaire ou non linéaire pour les plaques.
- (3) La théorie de flexion linéaire est fondée sur des hypothèses de petites déformations et est basée sur une relation proportionnelle entre charges et déformations.
- (4) Si la flèche hors du plan  $w$  d'un élément de plaque atteint l'épaisseur de l'élément de plaque, il convient d'utiliser une théorie de flexion non linéaire dans l'analyse.
- (5) La théorie de flexion non linéaire est fondée sur des hypothèses de grandes déformations et les effets des déformations sur l'équilibre sont pris en compte. Si les bords d'une plaque sont encastrés contre les mouvements dans le plan et si la plaque est soumise à des charges hors du plan  $p$ , la théorie de flexion non linéaire prend en compte à la fois les contraintes de membrane et les contraintes de flexion.
- (6) Les modèles de calcul définis en (1) peuvent être fondés sur les types d'analyse donnés dans le Tableau 3.1 ; toutefois, pour les ponts, il convient d'utiliser une analyse de plaque élastique linéaire.

**Tableau 3.1 : Types d'analyse**

Type d'analyse	Théorie de flexion	Loi de matériau	Géométrie de plaque
Analyse de plaque élastique linéaire (LA)	linéaire	linéaire	parfaite
Analyse élastique géométriquement non linéaire (GNA)	non linéaire	linéaire	parfaite
Analyse matériellement non linéaire (MNA)	linéaire	non linéaire	parfaite
Analyse géométriquement et matériellement non linéaire (GMNA)	non linéaire	non linéaire	parfaite
Analyse élastique géométriquement non linéaire avec imperfections (GNIA)	non linéaire	linéaire	imparfaite
Analyse géométriquement et matériellement non linéaire avec imperfections (GMNIA)	non linéaire	non linéaire	imparfaite

NOTE Une définition des différents types d'analyse est donnée dans l'Annexe A.

### 3.2.3.2 Analyse par formules courantes

(1) Pour un segment de plaque distinct d'une structure en plaques, les contraintes internes peuvent être calculées pour la combinaison d'actions de calcul appropriée au moyen de formules de calcul appropriées fondées sur les types d'analyse donnés en 3.2.3.1.

NOTE L'Annexe B et l'Annexe C donnent des valeurs tabulées pour les plaques non raidies rectangulaires soumises à des charges hors du plan. Pour les plaques circulaires, des formules de calcul sont données dans l'ENV 1993-1-6. D'autres formules de calcul peuvent être utilisées, si la fiabilité de ces formules de calcul est conforme aux exigences données dans l'ENV 1991-1.

(2) Dans le cas d'un champ de contraintes bidimensionnel résultant d'une analyse par une théorie de membrane, la contrainte équivalente de Von Mises  $\sigma_{eq,Sd}$  peut être déterminée par l'expression suivante :

$$\sigma_{eq,Sd} = \frac{1}{t} \sqrt{n_{x,Sd}^2 + n_{y,Sd}^2 - n_{x,Sd}n_{y,Sd} + 3n_{xy,Sd}^2} \quad \dots (3.1)$$

(3) Dans le cas d'un champ de contraintes bidimensionnel résultant d'une analyse par théorie de plaque élastique, la contrainte équivalente de Von Mises  $\sigma_{eq,Sd}$  peut être approchée par les critères de plastification d'Iljushin :

$$\sigma_{eq,Sd} = \sqrt{\sigma_{x,Sd}^2 + \sigma_{y,Sd}^2 - \sigma_{x,Sd}\sigma_{y,Sd} + 3\tau_{xy,Sd}^2} \quad \dots (3.2)$$

où :  $\sigma_{x,Sd} = \frac{n_{x,Sd}}{t} \pm \frac{m_{x,Sd}}{t^2/4}$

$$\sigma_{y,Sd} = \frac{n_{y,Sd}}{t} \pm \frac{m_{y,Sd}}{t^2/4}$$

$$\tau_{xy,Sd} = \frac{n_{xy,Sd}}{t} \pm \frac{m_{xy,Sd}}{t^2/4}$$

et  $n_{x,Sd}$ ,  $n_{y,Sd}$ ,  $n_{xy,Sd}$ ,  $m_{x,Sd}$ ,  $m_{y,Sd}$  et  $m_{xy,Sd}$  sont définis en 1.4.1.2.

### 3.2.3.3 Calcul par analyse globale : analyse numérique

(1) Si les contraintes exercées dans une structure en plaques sont déterminées par une analyse numérique fondée sur une analyse matériellement linéaire, il convient de calculer la contrainte équivalente de Von Mises  $\sigma_{eq,Sd}$  la plus élevée exercée dans la structure en plaques pour la combinaison d'actions de calcul appropriée.

(2) La contrainte équivalente de Von Mises  $\sigma_{eq,Sd}$  est évaluée à partir des sollicitations qui apparaissent en un point isolé quelconque de la structure en plaques.

$$\sigma_{eq,Sd} = \sqrt{\sigma_{x,Sd}^2 + \sigma_{y,Sd}^2 - \sigma_{x,Sd}\sigma_{y,Sd} + 3\tau_{Sd}^2} \quad \dots (3.3)$$

où  $\sigma_{x,Sd}$  et  $\sigma_{y,Sd}$  sont positives en cas de traction.

(3)P Si l'on utilise une analyse numérique pour la vérification du voilement, les effets des imperfections inévitables en pratique doivent être pris en compte. Ces imperfections peuvent être les suivantes :

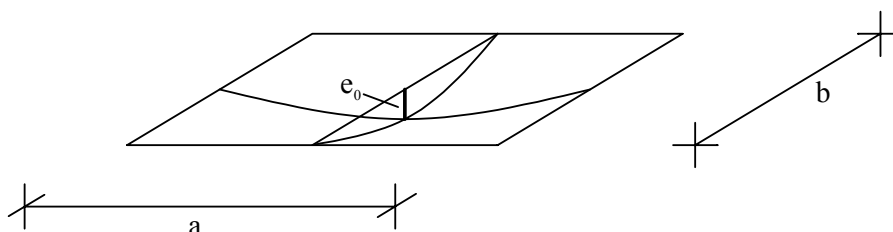
(a) imperfections géométriques :

- écarts par rapport à la forme géométrique de la plaque (prédéformation, flèches hors du plan) ;
- irrégularités des soudures (excentricités mineures) ;
- écarts par rapport à l'épaisseur nominale ;

(b) imperfections de matériau :

- contraintes résiduelles provenant du laminage, de l'emboutissage, du soudage, du redressage ;
- défaut d'homogénéité et anisotropie.

(4)P À défaut de meilleure méthode connue, les imperfections géométriques et de matériau doivent être prises en compte par une imperfection géométrique équivalente de la plaque parfaite. La forme de l'imperfection géométrique équivalente initiale doit être dérivée du mode de voilement approprié.



**Figure 3.1 : Imperfection géométrique en arc équivalente initiale  $e_0$  d'un segment de plaque**

(5) L'amplitude de l'imperfection géométrique équivalente initiale  $e_0$  d'un segment de plaque rectangulaire peut être calculé par calibrage numérique en fonction de résultats d'essais d'échantillons pouvant être considérés comme représentatifs de la fabrication, ou d'après la courbe de voilement de plaque de l'ENV 1993-1-5, de la façon suivante :

$$e_0 = \frac{\left(1 - \rho \lambda_p^2\right) \left(1 - \rho\right)}{\rho \zeta} \quad \dots (3.4)$$

où 
$$\zeta = \frac{6b^2(b^2 + va^2)}{t(a^2 + b^2)^2} \text{ et } \alpha < \sqrt{2}$$

- et  $\rho$  facteur de réduction pour le voilement de plaque défini en 4.2.1(2) de l'ENV 1993-1-5,  
 $a$  côté le plus long de la plaque ;  
 $b$  côté le plus court de la plaque ;  
 $t$  épaisseur de la plaque,  
 $\alpha$  coefficient d'aspect  $a/b \leq \sqrt{2}$ , si  $a/b > \sqrt{2}$  voir (6).  
 $\xi$  paramètre d'imperfection

(6) Comme hypothèse plaçant en sécurité, l'amplitude peut être prise égale à  $e_0 = b/250$  où  $a \geq b$ .

(7) Il convient que le schéma des imperfections géométriques équivalentes figure, le cas échéant, sur les plans.

(8)P La fiabilité d'une analyse par éléments finis doit être vérifiée au moyen de résultats d'essais ou d'une analyse comparable.

#### 3.2.3.4 Calcul par modèles de calcul simplifiés

(1) Les sollicitations exercées dans une structure en plaques soumise à des charges hors du plan et à des charges dans le plan peuvent être calculées au moyen d'un modèle de calcul simplifié donnant des estimations plaçant en sécurité.

(2) Par conséquent, la structure en plaques peut être subdivisée en segments de plaque distincts, qui peuvent être raidis ou non raidis.

(3) Si les efforts de compression sont uniquement dominants dans un seul sens de la plaque, les segments de plaque distincts peuvent être calculés au moyen des modèles de calculs suivants :

##### a) Segments de plaque non raidis

(4) Une plaque rectangulaire non raidie soumise à des charges transversales peut être modélisée comme une poutre équivalente dans le sens de la flexion dominante, si les conditions suivantes sont satisfaites :

— le coefficient d'aspect  $a/b$  de la plaque est supérieur à 2 ;

— la plaque est soumise à une charge hors du plan répartie, qui peut être linéaire ou constante ;

— la résistance, la stabilité et la rigidité de l'ossature ou de la poutre qui supportent le segment de plaque satisfont les conditions aux limites supposées de la poutre équivalente.

(5) Il convient de déterminer les sollicitations de la poutre équivalente au moyen d'une analyse élastique telle que définie dans l'ENV 1993-1-1.

(6) Si le sens de la flexion dominante n'est pas le même que le sens dominant des efforts de compression dans le plan, l'interaction entre les effets de la flexion et des efforts dans le plan provoqués par les charges hors du plan peuvent être négligés.

(7) Si le sens de la flexion dominante est le même que le sens dominant des efforts de compression dans le plan, la formule d'interaction spécifiée en 5.5.4 de l'ENV 1993-1-1 peut être appliquée à la poutre équivalente.

##### b) Segments de plaque raidis

(8) Une plaque raidie ou un segment de plaque raidi d'une structure en plaques peuvent être modélisés comme un grillage s'ils sont raidis régulièrement dans les sens transversal et longitudinal.

(9) Lors de la détermination de la valeur de section transversale  $A_i$  de la plaque participante d'un élément individuel  $i$  du grillage, il convient de prendre en compte les effets de traînage de cisaillement au moyen du coefficient de réduction  $\beta$  conformément à l'ENV 1993-1-5.

(10) Pour un élément  $i$  du grillage disposé parallèlement au sens des efforts de compression dans le plan, il convient de déterminer également la valeur de section transversale  $A_i$  en prenant en compte la largeur efficace des panneaux secondaires adjacents résultant du voilement de plaque conformément à l'ENV 1993-1-5.

(11) Il convient d'examiner l'interaction des effets de traînage de cisaillement et des effets de voilement de plaque, voir Figure 3.2, au moyen de l'aire efficace  $A_i$  donnée par l'équation 3.5.

$$A_i = \left[ \rho_c \left( A_{L,eff} + \sum \rho_{pan,i} b_{pan,i} t_{pan,i} \right) \right] \beta^\kappa \quad \dots (3.5)$$

où :

- $A_{L,eff}$  aire efficace du raidisseur résultant du voilement de plaque local du raidisseur, voir ENV 1993-1-5 ;
- $\rho_c$  facteur de réduction résultant du voilement global du segment de plaque raidi, tel que défini en 4.2.2.3 (9) de l'ENV 1993-1-5 ;
- $\rho_{pan,i}$  facteur de réduction résultant du voilement local de plaque du panneau secondaire  $i$ , tel que défini en 4.2.1(2) de l'ENV 1993-1-5 ;
- $b_{pan,i}$  largeur du panneau secondaire  $i$ , telle que définie en 4.2.1(3) de l'ENV 1993-1-5 ;
- $t_{pan,i}$  épaisseur du panneau secondaire  $i$  ;
- $\beta$  facteur de largeur efficace pour l'effet de traînage de cisaillement, voir 3.2(2) de l'ENV 1993-1-5 ;
- $\kappa$  rapport défini en 3.2(2) de l'ENV 1993-1-5.

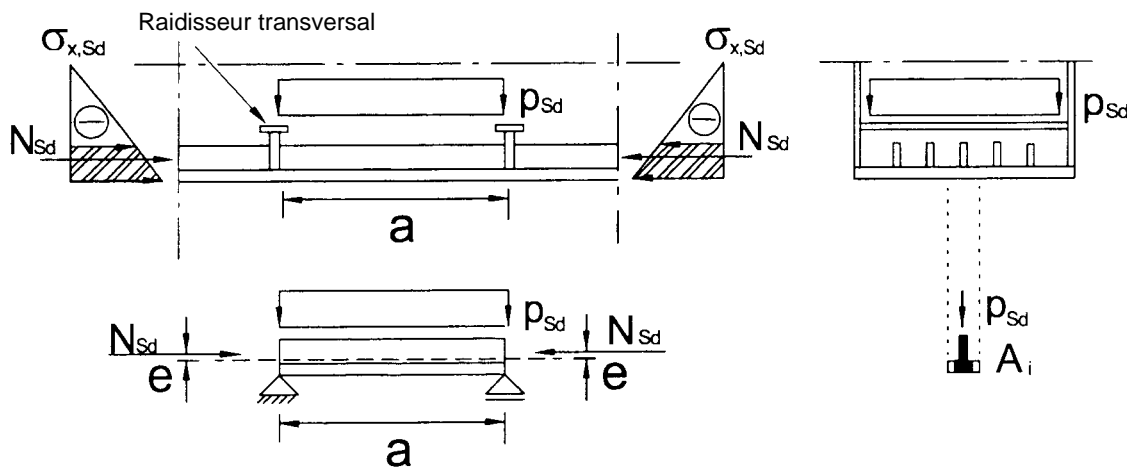


Figure 3.2 : Définition de la section transversale  $A_i$

(12) La vérification d'un élément  $i$  du grillage peut être effectuée au moyen de la formule d'interaction de 5.5.4 de l'ENV 1993-1-1 en prenant en compte les conditions de chargement suivantes :

- effets des chargements transversaux
- force axiale équivalente exercée dans la section transversale  $A_i$  par les contraintes normales agissant dans la

plaque :  $N_{Sd} = \int \sigma_x dA_i$

excentrement  $e$  de la force axiale équivalente  $N_{Sd}$  où  $e$  représente la distance entre le centre de la section transversale  $A_i$  et le point d'application de charge de  $N_{Sd}$ .

- (13) Si les raidisseurs d'une plaque ou d'un segment de plaque sont uniquement disposés parallèlement au sens des efforts de compression dans le plan, la plaque raidie peut être modélisée comme une poutre équivalente reposant sur des ressorts élastiques, voir ENV 1993-1-5.
- (14) Si les raidisseurs d'un segment de plaque raidi sont disposés dans le sens transversal par rapport aux efforts de compression dans le plan, il convient de vérifier l'interaction entre les efforts de compression et les moments fléchissants exercés dans les segments de plaque non raidis entre les raidisseurs conformément à (7).
- (15) Il convient que les raidisseurs longitudinaux satisfassent les exigences données en 4.2.2.7 de l'ENV 1993-1-5.
- (16) Il convient que les raidisseurs transversaux satisfassent les exigences données en 4.2.2.6 de l'ENV 1993-1-5.

## **4 États limites de service**

### **4.1 Généralités**

- (1)P Les structures en plaques en acier doivent satisfaire les critères d'état limite de service de 4.1 de l'ENV 1993-1-1.
- (2)P Pour les structures en plaques, les critères d'état limite particuliers donnés par 2.3 doivent être vérifiés.

### **4.2 Exigences**

#### **4.2.1 Limitation de la flèche hors du plan $w$**

- (1)P Les exigences concernant la flèche hors du plan  $w$  d'un segment de plaque de structure en plaques doivent être définies par la norme d'application appropriée ou par l'autorité compétente, le concepteur ou le client.

#### **4.2.2 Vibrations excessives**

- (1)P L'état limite de vibrations excessives doit être vérifié vis-à-vis des exigences fournies par l'autorité compétente, le concepteur ou le client.

## **5 État limite ultime**

### **5.1 Généralités**

- (1)P Toutes les parties d'une structure en plaques doivent être dimensionnées de telle sorte que les exigences fondamentales de calcul concernant les états limites ultimes données dans la section 2 soient satisfaites.
- (2)P Le coefficient partiel  $\gamma_M$  pour la résistance des structures en plaques doit être pris dans les parties appropriées de l'ENV 1993.
- (3)P Pour les assemblages de structures en plaques, le coefficient partiel  $\gamma_M$  doit être tiré de la section 6 de l'ENV 1993-1-1.
- (4)P Les éléments et assemblages soumis à la fatigue doivent également satisfaire les exigences données dans la section 6 de l'ENV 1993-1-1.

## 5.2 État limite plastique

### 5.2.1 Généralités

(1) Dans un calcul élastique, l'état limite plastique d'un segment de plaque d'une structure en plaques soumis à une combinaison de flexion et d'efforts dans le plan est défini par la contrainte équivalente de Von Mises  $\sigma_{eq,Rd}$  de la façon suivante :

$$\sigma_{eq,Rd} = 1,0 f_y / \gamma_{M0} \quad \dots (5.1)$$

(2) En tout point d'une structure en plaque, la contrainte de calcul  $\sigma_{eq,Sd}$  doit satisfaire la condition :

$$\sigma_{eq,Sd} \leq \sigma_{eq,Rd} \quad \dots (5.2)$$

où :

$\sigma_{eq,Sd}$  représente la valeur la plus grande de la contrainte équivalente de Von Mises telle que définie en 3.2.3.

### 5.2.2 Règles supplémentaires pour le calcul par analyse globale

(1) Si une analyse numérique est fondée sur une analyse matériellement linéaire, il convient de vérifier la résistance par rapport à l'état limite plastique pour l'exigence donnée en 5.2.1.

(2) Si une analyse matériellement non linéaire est fondée sur une relation contraintes-déformations de calcul avec  $f_{yd}$ , il convient de soumettre la structure en plaques à une disposition de charges  $F$  qui peut être tirée des valeurs de calcul d'actions  $F_{Sd}$  telles que définies dans 1.1 (2), et la charge peut être augmentée par paliers afin de déterminer le facteur d'amplification de charges  $R$  de l'état limite plastique  $F_{Rd}$ .

(3) Il convient que le résultat de l'analyse numérique donne un rapport  $R$  supérieur à 1,0, de sorte à satisfaire la condition suivante :

$$F_{Sd} \leq F_{Rd} \quad \dots (5.3)$$

où :

$$F_{Rd} = R F_{Sd}$$

### 5.2.3 Règles supplémentaires pour le calcul par modèles de calcul simplifiés

#### 5.2.3.1 Plaques non raidies

(1)P Si une plaque non raidie est calculée comme une poutre équivalente, la résistance de section transversale de la poutre équivalente doit être vérifiée pour la combinaison d'effets de flexion et d'efforts dans le plan au moyen des règles de calcul données dans l'ENV 1993-1-1.

#### 5.2.3.2 Plaques raidies

(1)P Si un segment de plaque raidi est modélisé comme un grillage selon la description de 3.2.3.4, la résistance de section transversale ainsi que la résistance au voilement des éléments individuels  $i$  du grillage doivent être vérifiées pour la combinaison d'effets de flexion et d'efforts dans le plan au moyen de la formule d'interaction donnée dans l'ENV 1993-1-1 en 5.5.4.

(2)P Si un segment de plaque raidi est calculé comme une poutre équivalente selon la description de 3.2.3.4, la résistance de section transversale ainsi que la résistance au voilement de la poutre équivalente doivent être vérifiées pour la combinaison d'effets de flexion et d'efforts dans le plan au moyen de la formule d'interaction donnée dans l'ENV 1993-1-1 en 5.5.4.

(3) Il convient de vérifier les sollicitations ou les contraintes d'un panneau secondaire par rapport à la plastification au moyen des règles de calcul données en 5.2.1, 5.2.2 ou 5.2.3.1.



## 5.3 Plasticité cyclique

### 5.3.1 Généralités

(1) Il convient d'analyser la plaque au moyen d'une analyse LA ou GNA de la structure soumise aux deux valeurs de calcul extrêmes des actions  $F_{Sd}$ . Pour chaque condition de charge extrême du processus cyclique, il convient d'évaluer les composantes de contraintes. À partir de valeurs extrêmes adjacentes dans le processus cyclique, il convient de déterminer les valeurs de calcul de la variation de chaque composante de contraintes  $\Delta\sigma_x$ ,  $\Delta\sigma_y$  et  $\Delta\tau$  sur chaque surface extérieure de la plaque et en chaque point de la structure. À partir de ces variations de contraintes, il convient de calculer la valeur de calcul de la variation de contrainte équivalente de Von Mises sur chaque surface extérieure  $\Delta\sigma_{eq,Sd}$  au moyen de l'expression :

$$\Delta\sigma_{eq,Sd} = \sqrt{\Delta\sigma_{x,Sd}^2 + \Delta\sigma_{y,Sd}^2 - \Delta\sigma_{x,Sd}\Delta\sigma_{y,Sd} + 3\Delta\tau_{Sd}^2} \quad \dots (5.4)$$

(2) Dans un calcul matériellement linéaire, la résistance à la plasticité cyclique d'un segment de plaque d'une structure en plaques peut être vérifiée au moyen de la résistance à l'étendue de contraintes de Von Mises  $\Delta\sigma_{Rd}$  :

$$\Delta\sigma_{Rd} \leq [2,0] f_y / \gamma_{M0} \quad \dots (5.5)$$

(3) En tout point d'une structure en plaques, il convient que l'étendue de contraintes de calcul  $\Delta\sigma_{eq,Sd}$  satisfasse la condition suivante :

$$\Delta\sigma_{eq,Sd} \leq \Delta\sigma_{Rd} \quad \dots (5.6)$$

### 5.3.2 Règles supplémentaires pour le calcul par analyse globale

(1)P Lorsque l'on effectue une analyse matériellement non linéaire informatisée, il convient de soumettre la plaque aux valeurs de calcul des actions fixes et variables. Il convient d'utiliser la plus grande variation de la déformation plastique de Von Mises au cours d'un cycle de charge en un point quelconque de la structure comme valeur de calcul de l'étendue de déformations plastiques  $\Delta\varepsilon_{Sd}$ .

(2) Il convient que la valeur de calcul de l'étendue de déformations plastiques satisfasse la condition :

$$\Delta\varepsilon_{Sd} \leq [2,0] \frac{f_y}{E \gamma_{M0}} \quad \dots (5.7)$$

## 5.4 Résistance au voilement

### 5.4.1 Généralités

(1)P Si un segment de plaque d'une structure en plaques est chargé par des forces dans le plan, sa résistance au voilement de plaque doit être vérifiée au moyen des règles de calcul données dans l'ENV 1993-1-5.

(2)P La résistance au voilement par cisaillement d'un segment de plaque doit être vérifiée au moyen des règles de calcul données dans l'ENV 1993-1-5.

(3) Pour l'interaction entre les effets des efforts dans le plan et les effets de la flexion, voir section 3.

### 5.4.2 Règles supplémentaires pour le calcul par analyse globale

(1) Si la résistance au voilement de plaque pour la combinaison de flexion et d'efforts dans le plan est vérifiée par une analyse numérique, il convient que les actions de calcul  $F_{Sd}$  satisfassent la condition :

$$F_{Sd} \leq F_{Rd} \quad \dots (5.8)$$

(2) La résistance au voilement de plaque  $F_{Sd}$  d'une structure en plaques est définie ainsi :

$$F_{Rd} = k F_{Rk} / \gamma_{M1} \quad \dots (5.9)$$

où :

$F_{Rk}$  résistance au voilement calculée par GMNIA de la structure en plaques

$k$  facteur de calibration, voir (6).

(3) Il convient de dériver la résistance au voilement caractéristique  $F_{Rk}$  d'une courbe charges-déplacements calculée pour le point approprié de la structure, en prenant en compte la combinaison d'actions de calcul  $F_{Sd}$  appropriée. En outre, il convient que l'analyse prenne en compte les imperfections conformément aux dispositions de 3.2.3.3.

(4) La résistance au voilement caractéristique  $F_{Rk}$  est définie par l'un des trois critères suivants :

- charge maximum de la courbe charges-déplacements (charge limite) ;
- charge de bifurcation si elle survient au cours du chargement avant que le point limite de la courbe charges-déplacements soit atteint ;
- déformation maximale admissible si elle survient au cours du chargement avant que la charge de bifurcation ou la charge limite soient atteintes.

(5) Il convient de vérifier la fiabilité de la résistance au voilement critique déterminée numériquement au moyen de l'une des méthodes alternatives suivantes :

(a) calcul d'autres cas de voilement de plaque, pour lesquels des valeurs de résistance au voilement caractéristique  $F_{k,known}$  sont connues, avec le même programme et des hypothèses d'imperfections similaires. Il convient que les cas de vérification soient similaires en ce qui concerne les paramètres contrôlant le voilement (par exemple : élancement réduit de plaque, comportement post-voilement, sensibilité aux imperfections, comportement des matériaux) ;

(b) comparaison des valeurs calculées avec des résultats d'essais  $F_{k,known}$ . Il convient que les cas de vérification satisfassent les mêmes conditions de similarité que celles données en (a).

(6) En fonction des résultats des vérifications de fiabilité, il convient d'évaluer le facteur  $k$  au moyen de l'expression :

$$k = F_{k,known,check} / F_{Rk,check} \quad \dots (5.10)$$

où  $F_{k,known,check}$  représentent les résultats de connaissances préalables et  $F_{Rk,check}$  les résultats des calculs numériques.

### 5.4.3 Règles supplémentaires pour le calcul par modèles de calcul simplifiés

(1)P Si un segment de plaque raidi est subdivisé en panneaux secondaires et raidisseurs efficaces équivalents selon la description de 3.2.3.4, la résistance au voilement du segment de plaque raidi doit être vérifiée au moyen des règles de calcul données dans l'ENV 1993-1-5, en négligeant les effets de flexion provoqués par les charges hors du plan appliquées sur les segments de plaque.

(2)P En outre, la résistance au flambement du raidisseur efficace équivalent, défini en 3.2.3.4, doit être vérifiée au moyen des règles de calcul données dans l'ENV 1993-1-1.

## 5.5 Fatigue

### 5.5.1 Généralités

(1)P Pour les structures en plaques, les exigences concernant la fatigue doivent être prises dans les parties d'application appropriées de l'ENV 1993.

(2) Si aucune autre exigence n'est donnée par les parties d'application de l'ENV 1993 ou par l'autorité compétente, le client ou le concepteur, aucune évaluation de la fatigue n'est exigée pour un nombre de cycle ne dépassant pas 10 000.

## Annexe A (informative)

### Types d'analyse pour le calcul des structures en plaques

#### A.1 Généralités

(1) Les sollicitations des plaques raidies et non raidies peuvent être déterminées au moyen des types d'analyse suivants :

- LA : Analyse élastique linéaire ;
- GNA : Analyse géométriquement non linéaire ;
- MNA : Analyse matériellement non linéaire ;
- GMNA : Analyse géométriquement et matériellement non linéaire ;
- GNIA : Analyse géométriquement non linéaire incluant les imperfections ;
- GMNIA : Analyse géométriquement et matériellement non linéaire incluant les imperfections ;

#### A.2 Analyse de plaque élastique linéaire (LA)

(1) L'analyse élastique linéaire modélise le comportement des structures en plaques minces sur la base de la théorie de flexion de plaque, en fonction de la géométrie parfaite de la structure. La linéarité de la théorie découle des hypothèses de la loi de matériau élastique linéaire et de l'hypothèse des petits déplacements linéaire.

(2) L'analyse LA satisfait l'équilibre ainsi que la compatibilité des flèches. Les contraintes et les déformations varient linéairement avec le chargement hors du plan.

(3) L'équation aux dérivées partielles du quatrième degré suivante est donnée à titre d'exemple d'analyse LA pour une plaque mince isotrope soumise uniquement à une charge surfacique hors du plan  $p(x,y)$  :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = \frac{p(x,y)}{D} \quad \dots (A.1)$$

où  $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$

#### A.3 Analyse géométriquement non linéaire (GNA)

(1) L'analyse élastique géométriquement non linéaire est basée sur les principes de la théorie de flexion de plaque de la structure parfaite, en utilisant la loi de matériau élastique linéaire et la théorie non linéaire en grands déplacements.

(2) L'analyse GNA satisfait l'équilibre ainsi que la compatibilité des déplacements en configuration déformée de la structure.

(3) La théorie de grands déplacements prend en compte l'interaction entre les actions de flexion et de membrane. Les flèches et les contraintes varient de façon non linéaire en fonction de la pression hors du plan.

(4) Le système d'équations aux dérivées partielles du quatrième degré suivant est donné à titre d'exemple d'analyse GNA pour une plaque mince isotrope soumise uniquement à une charge surfacique hors du plan  $p(x,y)$  :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} - \frac{t}{D} \left[ \frac{\partial^2 f}{\partial y^2} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} - 2 \left( \frac{\partial^2 f}{\partial x \partial y} \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right) + \frac{\partial^2 f}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] = \frac{p(x,y)}{D} \quad \dots \text{(A.2a)}$$

$$\frac{\partial^4 f}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 f}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 f}{\partial y^4} = E \left[ \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \quad \dots \text{(A.2b)}$$

où  $f$  représente la fonction d'Airy, et  $D = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$

#### A.4 Analyse matériellement non linéaire (MNA)

(1) L'analyse matériellement non linéaire est basée sur la théorie de flexion de plaque pour une structure parfaite avec l'hypothèse de petits déplacements, comme dans l'article A.2. Cependant, elle prend en compte le comportement non linéaire du matériau.

#### A.5 Analyse géométriquement et matériellement non linéaire (GMNA)

(1) L'analyse géométriquement et matériellement non linéaire est basée sur la théorie de flexion de plaque pour une structure parfaite avec les hypothèses de non-linéarité en grands déplacements et du comportement élasto-plastique non linéaire du matériau.

#### A.6 Analyse géométriquement non linéaire incluant les imperfections (GNIA)

(1) L'analyse géométriquement non linéaire incluant les imperfections est équivalente à l'analyse GNA définie dans l'article A.3. Cependant, le modèle géométrique utilise la structure géométriquement imparfaite, par exemple une déformation initiale s'applique à la plaque, gouvernée par le mode de voilement approprié.

(2) L'analyse GNIA est utilisée dans les cas de contraintes de cisaillement ou de compression dominantes dans certaines structures en plaques en raison d'effets dans le plan. Elle donne les charges de voilement élastique de la structure en plaques imparfaite «réelle».

#### A.7 Analyse géométriquement et matériellement non linéaire incluant les imperfections (GMNIA)

(1) L'analyse géométriquement et matériellement non linéaire incluant les imperfections est équivalente à l'analyse GMNA définie dans l'article A.5. Cependant, le modèle géométrique utilise la structure géométriquement imparfaite, par exemple une déformation initiale s'applique à la plaque, gouvernée par le mode de voilement approprié.

(2) L'analyse GMNIA est utilisée dans les cas de contraintes de cisaillement ou de compression dominantes dans certaines structures en plaques en raison d'effets dans le plan. Elle donne les charges de voilement élasto-plastique de la structure en plaques imparfaite «réelle».

## Annexe B (informative)

### Sollicitations exercées dans les plaques rectangulaires non raidies (Théorie des petits déplacements)

#### B.1 Généralités

(1) Cette annexe donne des formules de calcul pour la détermination des sollicitations exercées dans les plaques rectangulaires non raidies sur la base de la théorie des petits déplacements pour les plaques. Par conséquent, les effets des forces de membrane ne sont pas pris en compte dans les formules de calcul données dans cette annexe.

(2) Des formules de calcul sont données pour les cas de charge suivants :

— chargement uniformément réparti sur la totalité de la plaque, voir B.3 ;

— chargement partiellement réparti centré réparti uniformément sur une zone, voir B.4.

(3) La flèche  $w$  d'un segment de plaque ainsi que les contraintes de flexion exercées dans un segment de plaque peuvent être calculées avec les coefficients donnés dans les tableaux des articles B.3 et B.4. Les coefficients prennent en compte un coefficient de Poisson  $\nu$  égal à 0,3.

#### B.2 Définitions

$p_{Sd}$  valeur de calcul de la charge appliquée.

$a$  côté le plus petit de la plaque.

$b$  côté le plus long de la plaque.

$t$  épaisseur de la plaque.

$E$  module d'élasticité.

$k_w$  coefficient pour la déformée de la plaque approprié aux conditions aux limites de la plaque données dans les tableaux.

$k_{\sigma_{bx}}$  coefficient pour la contrainte de flexion  $\sigma_{bx}$  de la plaque approprié aux conditions aux limites de la plaque données dans les tableaux.

$k_{\sigma_{by}}$  coefficient pour la contrainte de flexion  $\sigma_{by}$  de la plaque approprié aux conditions aux limites de la plaque données dans les tableaux.

#### B.3 Chargement uniformément réparti

##### B.3.1 Flèche hors du plan

(1) La flèche  $w$  d'un segment de plaque soumis à un chargement uniformément réparti  $p$  sur la totalité de son aire peut être calculée de la façon suivante :

$$w = k_w \frac{p_{Sd} a^4}{Et^3} \quad \dots \text{ (B.1)}$$

NOTE Comparée à l'épaisseur du segment de plaque, la flèche  $w$  est faible car les formules de calcul sont basées sur la théorie de flèches limitées.

### B.3.2 Sollicitations

(1) Les contraintes de flexion  $\sigma_{bx}$  et  $\sigma_{by}$  exercées dans un segment de plaque peuvent être déterminées au moyen des expressions suivantes :

$$\sigma_{bx, Sd} = k_{\sigma_{bx}} \frac{p_{Sd} a^2}{t^2} \quad \dots \text{ (B.2)}$$

$$\sigma_{by, Sd} = k_{\sigma_{by}} \frac{p_{Sd} a^2}{t^2} \quad \dots \text{ (B.3)}$$

(2) Pour un segment de plaque, la contrainte équivalente peut être calculée avec les contraintes de flexion données en (1) de la façon suivante :

$$\sigma_{eq, Sd} = \sqrt{\sigma_{bx, Sd}^2 + \sigma_{by, Sd}^2 - \sigma_{bx, Sd} \sigma_{by, Sd}} \quad \dots \text{ (B.4)}$$

NOTE Les points pour lesquels l'état de contraintes est défini dans les tableaux de données sont situés soit sur les axes centraux soit sur les bords, de sorte qu'en raison de la symétrie ou des conditions aux limites supposées, les contraintes de cisaillement par flexion  $\tau_p$  sont nulles.

### B.3.3 Coefficients k pour des chargements uniformément répartis

Tableau B.1 — Coefficients k

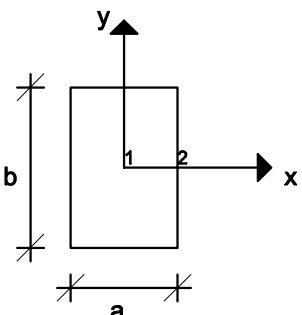
Chargement : Chargement uniformément réparti			
		Conditions aux limites : — Tous les bords sont simplement appuyés.	
		$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$
b/a			
1,0	0,04434	0,286	0,286
1,5	0,08438	0,486	0,299
2,0	0,11070	0,609	0,278
3,0	0,13420	0,712	0,244

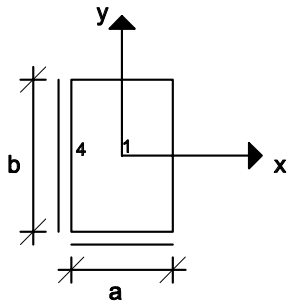
Tableau B.2 — Coefficients k

Chargement : Chargement uniformément réparti				
			Conditions aux limites : — Tous les bords sont encastrés.	
b/a	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{bx2}}$
1,0	0,01375	0,1360	0,1360	– 0,308
1,5	0,02393	0,2180	0,1210	– 0,454
2,0	0,02763	0,2450	0,0945	– 0,498
3,0	0,02870	0,2480	0,0754	– 0,505

Tableau B.3 — Coefficients k

Chargement : Chargement uniformément réparti				
			Conditions aux limites : — Trois bords sont simplement appuyés. — Un bord est encastré.	
b/a	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{bx4}}$
1,5	0,04894	0,330	0,177	– 0,639
2,0	0,05650	0,368	0,146	– 0,705

**Tableau B.4 — Coefficients k**

Chargement : Chargement uniformément réparti				
		Conditions aux limites : — Deux bords adjacents sont simplement appuyés ; les deux autres bords sont encastrés.		
b/a	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{bx4}}$
1,0	0,02449	0,185	0,185	– 0,375
1,5	0,04411	0,302	0,180	– 0,588
2,0	0,05421	0,355	0,152	– 0,683

**Tableau B.5 — Coefficients k**

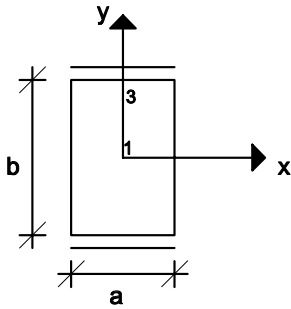
Chargement : Chargement uniformément réparti				
		Conditions aux limites : — Deux bords courts opposés sont simplement appuyés ; les deux autres bords sont encastrés.		
b/a	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{bx3}}$
1,0	0,02089	0,145	0,197	– 0,420
1,5	0,05803	0,348	0,274	– 0,630
2,0	0,09222	0,519	0,284	– 0,717



Tableau B.6 — Coefficients k

Chargement : Chargement uniformément réparti				
			Conditions aux limites : — Deux bords longs opposés sont simplement appuyés ; les deux autres bords sont encastrés.	
b/a	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{bx2}}$
1,5	0,02706	0,240	0,106	– 0,495
2,0	0,02852	0,250	0,0848	– 0,507

## B.4 Chargement localisé centré

### B.4.1 Flèche hors du plan

(1) La flèche  $w$  d'un segment de plaque soumis à un chargement centré  $p$  appliqué sur une aire  $u \times v$  peut être calculée de la façon suivante :

$$w = k_w \frac{p_{Sd} a^2}{Et^3} \quad \dots (B.5)$$

### B.4.2 Sollicitations

(1) Les contraintes de flexion  $\sigma_{bx}$  et  $\sigma_{by}$  exercées dans un segment de plaque peuvent être déterminées au moyen des formules suivantes :

$$\sigma_{bx,Sd} = k_{\sigma_{bx}} \frac{p_{Sd}}{t^2} \quad \dots (B.6)$$

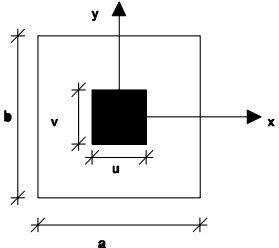
$$\sigma_{by,Sd} = k_{\sigma_{by}} \frac{p_{Sd}}{t^2} \quad \dots (B.7)$$

(2) Pour un segment de plaque, la contrainte équivalente peut être calculée avec les contraintes de flexion données en (1) de la façon suivante :

$$\sigma_{eq,Sd} = \sqrt{\sigma_{bx,Sd}^2 + \sigma_{by,Sd}^2 - \sigma_{bx,Sd} \sigma_{by,Sd}} \quad \dots (B.8)$$

### B.4.3 Coefficients k pour un chargement localisé centré

Tableau B.7 — Coefficients k

Chargement : Chargement localisé centré				
			Conditions aux limites : — Tous les bords sont simplement appuyés.	
			Paramètres : $\alpha = u/a, \beta = v/a$	
b/a	$\alpha \times \beta$	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$
1	0,1 × 0,1	0,1254	1,72	1,72
	0,2 × 0,2	0,1210	1,32	1,32
	0,3 × 0,3	0,1126	1,04	1,04
	0,2 × 0,3	0,1167	1,20	1,12
	0,2 × 0,4	0,1117	1,10	0,978
1,5	0,1 × 0,1	0,1664	1,92	1,70
	0,2 × 0,2	0,1616	1,51	1,29
	0,3 × 0,3	0,1528	1,22	1,01
	0,2 × 0,3	0,1577	1,39	1,09
	0,2 × 0,4	0,1532	1,29	0,953
2,0	0,1 × 0,1	0,1795	1,97	1,67
	0,2 × 0,2	0,1746	1,56	1,26
	0,3 × 0,3	0,1657	1,28	0,985
	0,2 × 0,3	0,1708	1,45	1,07
	0,2 × 0,4	0,1665	1,35	0,929
3,0	0,1 × 0,1	0,184	1,99	1,66
	0,2 × 0,2	0,1791	1,58	1,25
	0,3 × 0,3	0,1701	1,30	0,975
	0,2 × 0,3	0,1753	1,47	1,06
	0,2 × 0,4	0,1711	1,37	0,918

## Annexe C (informative)

### Sollicitations exercées dans les plaques rectangulaires non raidies (Théorie des grands déplacements)

#### C.1 Généralités

- (1) Cette annexe donne des formules de calcul pour la détermination des sollicitations exercées dans les plaques rectangulaires non raidies sur la base de la théorie des grands déplacements pour les plaques.
- (2) Les conditions de chargement suivantes sont examinées :
  - chargement uniformément réparti sur la totalité de la plaque, voir C.3 ;
  - chargement localisé centré réparti uniformément sur la zone d'aire  $u \times v$ , voir C.4.
- (3) Les contraintes de flexion et de membrane exercées dans une plaque ainsi que la flèche  $w$  d'une plaque peuvent être calculées avec les coefficients donnés dans les tableaux des articles C.3 et C.4. Les coefficients prennent en compte un coefficient de Poisson  $\nu$  égal à 0,3.

#### C.2 Définitions

$p_{Sd}$  valeur de calcul de la charge appliquée.

$a$  côté le plus petit de la plaque.

$b$  côté le plus long de la plaque.

$t$  épaisseur de la plaque.

$E$  module d'élasticité.

$k_w$  coefficient pour la déformation de la plaque.

$k_{\sigma_{bx}}$  coefficient pour la contrainte de flexion  $\sigma_{bx}$  exercée dans la plaque.

$k_{\sigma_{by}}$  coefficient pour la contrainte de flexion  $\sigma_{by}$  exercée dans la plaque.

$k_{\sigma_{mx}}$  coefficient pour la contrainte de membrane  $\sigma_{mx}$  exercée dans la plaque.

$k_{\sigma_{my}}$  coefficient pour la contrainte de membrane  $\sigma_{my}$  exercée dans la plaque.

#### C.3 Chargement uniformément réparti

##### C.3.1 Flèche hors du plan

- (1) La flèche  $w$  d'un segment de plaque soumis à un chargement uniformément réparti  $p$  sur la totalité de son aire peut être calculée de la façon suivante :

$$w = k_w \frac{p_{Sd} a^4}{Et^2} \quad \dots (C.1)$$

### C.3.2 Sollicitations

(1) Les contraintes de flexion  $\sigma_{bx}$  et  $\sigma_{by}$  exercées dans un segment de plaque peuvent être déterminées au moyen des équations suivantes :

$$\sigma_{bx,Sd} = k_{\sigma_{bx}} \frac{p_{Sd} a^2}{t^2} \quad \dots \text{ (C.2)}$$

$$\sigma_{by,Sd} = k_{\sigma_{by}} \frac{p_{Sd} a^2}{t^2} \quad \dots \text{ (C.3)}$$

(2) Les contraintes de membrane  $\sigma_{mx}$  et  $\sigma_{my}$  exercées dans un segment de plaque peuvent être déterminées de la façon suivante :

$$\sigma_{mx,Sd} = k_{\sigma_{mx}} \frac{p_{Sd} a^2}{t^2} \quad \dots \text{ (C.4)}$$

$$\sigma_{my,Sd} = k_{\sigma_{my}} \frac{p_{Sd} a^2}{t^2} \quad \dots \text{ (C.5)}$$

(3) Au niveau de la surface chargée, les contraintes totales sont calculées avec les contraintes de flexion et de membrane données en (1) et (2) de la façon suivante :

$$\sigma_{x,Sd} = -\sigma_{bx,Sd} + \sigma_{mx,Sd} \quad \dots \text{ (C.6)}$$

$$\sigma_{y,Sd} = -\sigma_{by,Sd} + \sigma_{my,Sd} \quad \dots \text{ (C.7)}$$

(4) Au niveau de la surface non chargée, les contraintes totales sont calculées avec les contraintes de flexion et de membrane données en (1) et (2) de la façon suivante :

$$\sigma_{x,Sd} = \sigma_{bx,Sd} + \sigma_{mx,Sd} \quad \dots \text{ (C.8)}$$

$$\sigma_{y,Sd} = \sigma_{by,Sd} + \sigma_{my,Sd} \quad \dots \text{ (C.9)}$$

(5) Pour une plaque, la contrainte équivalente  $\sigma_{eq,Sd}$  peut être calculée avec les contraintes données en (3) ou (4) de la façon suivante :

$$\sigma_{eq,Sd} = \sqrt{\sigma_{x,Sd}^2 + \sigma_{y,Sd}^2 - \sigma_{x,Sd} \sigma_{y,Sd}} \quad \dots \text{ (C.10)}$$

NOTE Les points pour lesquels l'état de contraintes est défini dans les tableaux de données sont situés soit sur les axes centraux soit sur les bords, de sorte qu'en raison de la symétrie ou des conditions aux limites supposées, les contraintes de cisaillement de membrane  $\tau_m$  ainsi que les contraintes de cisaillement par flexion  $\tau_b$  sont nulles. La somme algébrique des contraintes de flexion et de membrane appropriées au niveau des points considérés dans les tableaux de données donne les valeurs des contraintes de surface maximum et minimum au niveau de ces points.

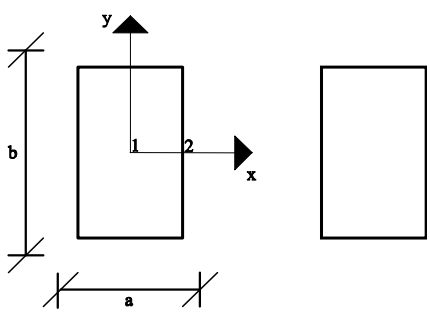
(6) Les conditions aux limites sont définies ainsi :

TBC : conditions aux limites transversales concernant les déplacements et les rotations d'extrémité de la plaque.

MBC : conditions aux limites de membrane ou dans le plan concernant les déplacements dans le plan au niveau du bord.

### C.3.3 Coefficients k pour des chargements uniformément répartis

Tableau C.1 — Coefficients k

Chargement : Chargement uniformément réparti							
		Conditions aux limites : TBC : Tous les bords sont simplement appuyés. MBC : Contraintes directes nulles, contraintes de cisaillement nulles					
		Paramètres : $P = \frac{p_{Sd} a^4}{Et^4}$					
b/a	P	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$	$k_{\sigma_{mx2}}$
1,0	20	0,0396	0,2431	0,2431	0,0302	0,0302	- 0,0589
	40	0,0334	0,1893	0,1893	0,0403	0,0403	- 0,0841
	120	0,0214	0,0961	0,0961	0,0411	0,0411	- 0,1024
	200	0,0166	0,0658	0,0658	0,0372	0,0372	- 0,1004
	300	0,0135	0,0480	0,0480	0,0335	0,0335	- 0,0958
	400	0,0116	0,0383	0,0383	0,0306	0,0306	- 0,0915
1,5	20	0,0685	0,3713	0,2156	0,0243	0,0694	- 0,1244
	40	0,0546	0,2770	0,1546	0,0238	0,0822	- 0,1492
	120	0,0332	0,1448	0,0807	0,0170	0,0789	- 0,1468
	200	0,0257	0,1001	0,0583	0,0141	0,0715	- 0,1363
	300	0,0207	0,0724	0,0440	0,0126	0,0646	- 0,1271
	400	0,0176	0,0569	0,0359	0,0117	0,0595	- 0,1205
2,0	20	0,0921	0,4909	0,2166	0,0085	0,0801	- 0,1346
	40	0,0746	0,3837	0,1687	0,0079	0,0984	- 0,1657
	120	0,0462	0,2138	0,0959	0,0073	0,0992	- 0,1707
	200	0,0356	0,1516	0,0695	0,0067	0,0914	- 0,1610
	300	0,0287	0,1121	0,0528	0,0061	0,0840	- 0,1510
	400	0,0245	0,0883	0,0428	0,0061	0,0781	- 0,1434

**Tableau C.2 — Coefficients k**

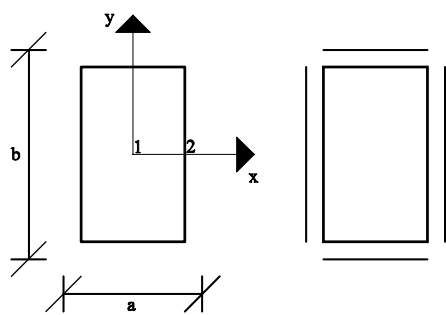
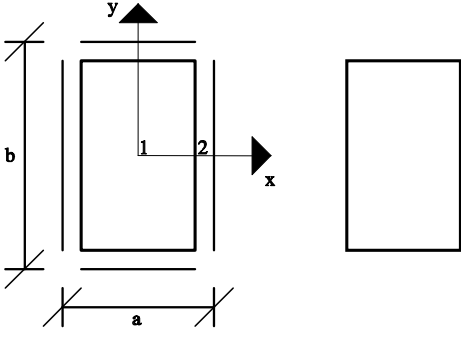
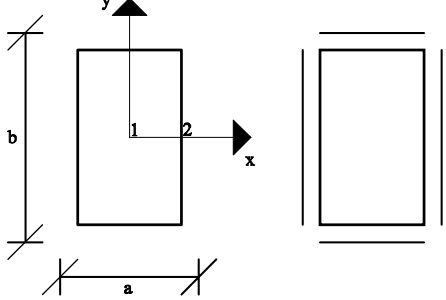
Chargement : Chargement uniformément réparti :								
			Conditions aux limites :					
			— TBC : Tous les bords sont simplement appuyés. — MBC : Tous les bords restent droits. Contraintes directes moyennes nulles, contraintes de cisaillement nulles					
			Paramètres :					
			$P = \frac{p_{sd} a^4}{Et^4}$					
b/a	P	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$	$k_{\sigma_{mx2}}$	$k_{\sigma_{my2}}$
1	20	0,0369	0,2291	0,2291	0,0315	0,0315	0,0352	-0,0343
	40	0,0293	0,1727	0,1727	0,0383	0,0383	0,0455	-0,0429
	120	0,0170	0,0887	0,0887	0,0360	0,0360	0,0478	-0,0423
	200	0,0126	0,0621	0,0621	0,0317	0,0317	0,0443	-0,0380
	300	0,0099	0,0466	0,0466	0,0280	0,0280	0,0403	-0,0337
	400	0,0082	0,0383	0,0383	0,0255	0,0255	0,0372	-0,0309
1,5	20	0,0554	0,3023	0,1612	0,0617	0,0287	0,0705	-0,0296
	40	0,0400	0,2114	0,1002	0,0583	0,0284	0,0710	-0,0293
	120	0,0214	0,1079	0,0428	0,0418	0,0224	0,0559	-0,0224
	200	0,0157	0,0778	0,0296	0,0345	0,0191	0,0471	-0,0188
	300	0,0122	0,0603	0,0224	0,0296	0,0167	0,0408	-0,0161
	400	0,0103	0,0505	0,0188	0,0267	0,0152	0,0369	-0,0147
2	20	0,0621	0,3234	0,1109	0,0627	0,0142	0,0719	-0,0142
	40	0,0438	0,2229	0,0689	0,0530	0,0120	0,0639	-0,0120
	120	0,0234	0,1163	0,0336	0,0365	0,0086	0,0457	-0,0083
	200	0,0172	0,0847	0,0247	0,0305	0,0075	0,0384	-0,0067
	300	0,0135	0,0658	0,0195	0,0268	0,0067	0,0335	-0,0058
	400	0,0113	0,0548	0,0164	0,0244	0,0064	0,0305	-0,0050
3	20	0,0686	0,3510	0,1022	0,0477	0,0020	0,0506	-0,0007
	40	0,0490	0,2471	0,0725	0,0420	0,0020	0,0441	0,0000
	120	0,0267	0,1317	0,0390	0,0320	0,0027	0,0335	0,0010
	200	0,0196	0,0954	0,0283	0,0271	0,0044	0,0285	0,0027
	300	0,0153	0,0733	0,0217	0,0242	0,0059	0,0256	0,0044
	400	0,0127	0,0605	0,0178	0,0221	0,0066	0,0235	0,0051

Tableau C.3 — Coefficients k

Chargement : Chargement uniformément réparti :								
				Conditions aux limites : — TBC : Tous les bords sont encastrés. — MBC : Contraintes directes nulles, contraintes de cisaillement nulles				
				Paramètres : $P = \frac{p_{Sd} a^4}{Et^4}$				
b/a	P	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$	$k_{\sigma_{bx2}}$	$k_{\sigma_{my2}}$
1	20	0,0136	0,1336	0,1336	0,0061	0,0061	-0,3062	-0,0073
	40	0,0131	0,1268	0,1268	0,0113	0,0113	-0,3006	-0,0137
	120	0,0108	0,0933	0,0933	0,0212	0,0212	-0,2720	-0,0286
	200	0,0092	0,0711	0,0711	0,0233	0,0233	-0,2486	-0,0347
	300	0,0078	0,0547	0,0547	0,0233	0,0233	-0,2273	-0,0383
	400	0,0069	0,0446	0,0446	0,0226	0,0226	-0,2113	-0,0399
1,5	20	0,0234	0,2117	0,1162	0,0061	0,0133	-0,4472	-0,0181
	40	0,0222	0,1964	0,1050	0,0098	0,0234	-0,4299	-0,0322
	120	0,0173	0,1406	0,0696	0,0124	0,0385	-0,3591	-0,0559
	200	0,0144	0,1103	0,0537	0,0116	0,0415	-0,3160	-0,0620
	300	0,0122	0,0879	0,0430	0,0105	0,0416	-0,2815	-0,0636
	400	0,0107	0,0737	0,0364	0,0098	0,0409	-0,2583	-0,0635
2	20	0,0273	0,2418	0,0932	0,0010	0,0108	-0,4935	-0,0150
	40	0,0265	0,2330	0,0897	0,0017	0,0198	-0,4816	-0,0277
	120	0,0223	0,1901	0,0740	0,0032	0,0392	-0,4223	-0,0551
	200	0,0192	0,1578	0,0621	0,0039	0,0456	-0,3780	-0,0647
	300	0,0165	0,1306	0,0518	0,0042	0,0483	-0,3396	-0,0690
	400	0,0147	0,1120	0,0446	0,0044	0,0487	-0,3132	-0,0702
3	20	0,0288	0,2492	0,0767	-0,0015	0,0027	-0,5065	-0,0033
	40	0,0290	0,2517	0,0795	-0,0022	0,0066	-0,5095	-0,0084
	120	0,0281	0,2440	0,0812	-0,0010	0,0247	-0,4984	-0,0331
	200	0,0260	0,2230	0,0750	0,0000	0,0368	-0,4702	-0,0497
	250	0,0247	0,2096	0,0707	0,0002	0,0415	-0,4520	-0,0564

**Tableau C.4 — Coefficients k**

Chargement : Chargement uniformément réparti :									
					Conditions aux limites : — TBC : Tous les bords sont encastés. — MBC : Tous les bords restent droits. Contraintes directes moyennes nulles, contraintes de cisaillement nulles				
					Paramètres : $P = \frac{p_{Sd} a^4}{Et^4}$				
b/a	P	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$	$k_{\sigma_{bx2}}$	$k_{\sigma_{mx2}}$	$k_{\sigma_{my2}}$
1	20	0,0136	0,1333	0,1333	0,0065	0,0065	- 0,3058	0,0031	- 0,0055
	40	0,0130	0,1258	0,1258	0,0118	0,0118	- 0,3000	0,0059	- 0,0103
	120	0,0105	0,0908	0,0908	0,0216	0,0216	- 0,2704	0,0123	- 0,0202
	200	0,0087	0,0688	0,0688	0,0234	0,0234	- 0,2473	0,0151	- 0,0233
	300	0,0073	0,0528	0,0528	0,0231	0,0231	- 0,2267	0,0169	- 0,0244
	400	0,0063	0,0430	0,0430	0,0223	0,0223	- 0,2119	0,0176	- 0,0246
1,5	20	0,0230	0,2064	0,1125	0,0137	0,0097	- 0,4431	0,0118	- 0,0082
	40	0,0210	0,1833	0,0957	0,0218	0,0155	- 0,4195	0,0200	- 0,0133
	120	0,0149	0,1175	0,0532	0,0275	0,0202	- 0,3441	0,0295	- 0,0185
	200	0,0118	0,0876	0,0369	0,0259	0,0195	- 0,3028	0,0304	- 0,0182
	300	0,0096	0,0678	0,0275	0,0238	0,0180	- 0,2710	0,0300	- 0,0173
	400	0,0083	0,0562	0,0221	0,0220	0,0168	- 0,2492	0,0291	- 0,0163
2	20	0,0262	0,2288	0,0853	0,0140	0,0060	- 0,4811	0,0149	- 0,0052
	40	0,0234	0,1994	0,0701	0,0206	0,0086	- 0,4492	0,0234	- 0,0077
	120	0,0162	0,1276	0,0404	0,0238	0,0094	- 0,3611	0,0299	- 0,0086
	200	0,0129	0,0963	0,0296	0,0223	0,0085	- 0,3162	0,0289	- 0,0079
	300	0,0105	0,0752	0,0230	0,0208	0,0077	- 0,2824	0,0274	- 0,0072
	400	0,0090	0,0627	0,0190	0,0196	0,0071	- 0,2600	0,0259	- 0,0066
3	20	0,0272	0,2331	0,0700	0,0102	0,0010	- 0,4878	0,0111	- 0,0008
	40	0,0247	0,2071	0,0615	0,0149	0,0011	- 0,4575	0,0167	- 0,0009
	120	0,0177	0,1396	0,0413	0,0186	0,0009	- 0,3727	0,0202	- 0,0005
	200	0,0143	0,1074	0,0319	0,0184	0,0009	- 0,3272	0,0197	- 0,0003
	300	0,0117	0,0848	0,0251	0,0176	0,0008	- 0,2924	0,0192	- 0,0002
	400	0,0101	0,0709	0,0210	0,0169	0,0008	- 0,2687	0,0182	0,0000



## C.4 Chargement localisé centré

### C.4.1 Flèche hors du plan

(1) La flèche  $w$  d'une plaque soumise à un chargement localisé centré d'intensité  $p$  appliqué sur une zone  $u \times v$  peut être calculée de la façon suivante :

$$w = k_w \frac{p_{Sd} a^2}{Et^3} \quad \dots (C.11)$$

### C.4.2 Contraintes

(1) Les contraintes de flexion  $\sigma_{bx}$  et  $\sigma_{by}$  exercées dans un segment de plaque peuvent être déterminées au moyen des équations suivantes :

$$\sigma_{bx,Sd} = k_{\sigma_{bx}} \frac{p_{Sd} a^2}{t^2} \quad \dots (C.12)$$

$$\sigma_{by,Sd} = k_{\sigma_{by}} \frac{p_{Sd} a^2}{t^2} \quad \dots (C.13)$$

(2) Les contraintes de membrane  $\sigma_{mx}$  et  $\sigma_{my}$  exercées dans un segment de plaque peuvent être déterminées de la façon suivante :

$$\sigma_{mx,Sd} = k_{\sigma_{mx}} \frac{p_{Sd} a^2}{t^2} \quad \dots (C.14)$$

$$\sigma_{my,Sd} = k_{\sigma_{my}} \frac{p_{Sd} a^2}{t^2} \quad \dots (C.15)$$

(3) Au niveau de la surface chargée d'une plaque, les contraintes totales sont calculées avec les contraintes de flexion et de membrane données en (1) et (2) de la façon suivante :

$$\sigma_{x,Sd} = -\sigma_{bx,Sd} + \sigma_{mx,Sd} \quad \dots (C.16)$$

$$\sigma_{y,Sd} = -\sigma_{by,Sd} + \sigma_{my,Sd} \quad \dots (C.17)$$

(4) Au niveau de la surface non chargée d'une plaque, les contraintes totales sont calculées avec les contraintes de flexion et de membrane données en (1) et (2) de la façon suivante :

$$\sigma_{x,Sd} = \sigma_{bx,Sd} + \sigma_{mx,Sd} \quad \dots (C.18)$$

$$\sigma_{y,Sd} = \sigma_{by,Sd} + \sigma_{my,Sd} \quad \dots (C.19)$$

(5) Pour une plaque, la contrainte équivalente  $\sigma_{eq,Sd}$  peut être calculée avec les contraintes données en (3) ou (4) de la façon suivante :

$$\sigma_{eq,Sd} = \sqrt{\sigma_{x,Sd}^2 + \sigma_{y,Sd}^2 - \sigma_{x,Sd} \sigma_{y,Sd}} \quad \dots (C.20)$$

NOTE Les points pour lesquels l'état de contraintes est défini dans les tableaux de données sont situés soit sur les axes centraux soit sur les limites, de sorte qu'en raison de la symétrie ou des conditions aux limites supposées, les contraintes de cisaillement de membrane  $\tau_m$  ainsi que les contraintes de cisaillement par flexion  $\tau_b$  sont nulles. La somme algébrique des contraintes de flexion et de membrane appropriées au niveau des points considérés dans les tableaux de données donne les valeurs des contraintes de surface maximum et minimum au niveau de ces points.

(6) Les conditions aux limites sont définies ainsi :

TBC : conditions aux limites transversales concernant les déplacements et les rotations d'extrémité de la plaque.

MBC : conditions aux limites de membrane ou dans le plan concernant les déplacements dans le plan au niveau du bord.

### C.4.3 Coefficients k pour un chargement localisé centré

Tableau C.5 — Coefficients k

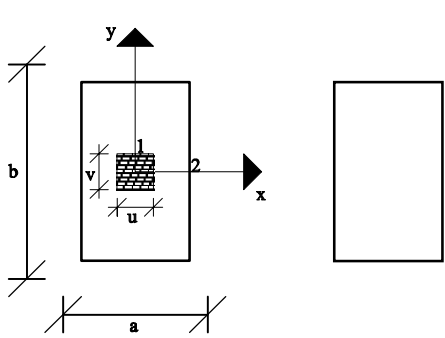
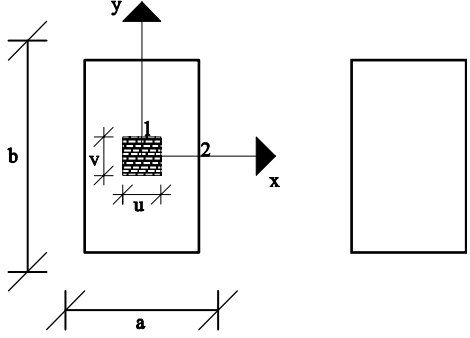
Chargement : Chargement localisé centré						
			Conditions aux limites : — TBC : Tous les bords sont simplement appuyés. — MBC : Contraintes directes nulles, contraintes de cisaillement nulles			
			Paramètres : $\alpha = u/a$ ; $\beta = v/a$			
<b>b/a = 1</b>						
$\alpha \times \beta$	P	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$
0,1 × 0,1	10	0,1021	1,4586	1,4586	0,1548	0,1548
	20	0,0808	1,2143	1,2143	0,1926	0,1926
	60	0,0485	0,8273	0,8273	0,2047	0,2047
	100	0,0372	0,6742	0,6742	0,1978	0,1978
	150	0,0298	0,5693	0,5693	0,1892	0,1892
	200	0,0255	0,5005	0,5005	0,1823	0,1823
0,2 × 0,2	10	0,0998	1,0850	1,0850	0,1399	0,1399
	20	0,0795	0,8593	0,8593	0,1729	0,1729
	60	0,0478	0,5108	0,5108	0,1756	0,1756
	100	0,0364	0,3881	0,3881	0,1624	0,1624
	150	0,0293	0,3089	0,3089	0,1505	0,1505
	200	0,0249	0,2614	0,2614	0,1412	0,1412
0,3 × 0,3	10	0,0945	0,8507	0,8507	0,1144	0,1144
	20	0,0759	0,6614	0,6614	0,1425	0,1425
	60	0,0459	0,3702	0,3702	0,1425	0,1425
	100	0,0351	0,2704	0,2704	0,1300	0,1300
	150	0,0282	0,2101	0,2101	0,1186	0,1186
	200	0,0240	0,1747	0,1747	0,1102	0,1102
0,2 × 0,3	10	0,0971	0,9888	0,9128	0,1224	0,1288
	20	0,0776	0,7800	0,7101	0,1512	0,1602
	60	0,0468	0,4596	0,4021	0,1488	0,1624
	100	0,0358	0,3468	0,2957	0,1368	0,1512
	150	0,0287	0,2760	0,2307	0,1248	0,1389
	200	0,0245	0,2340	0,1926	0,1152	0,1310
0,2 × 0,4	10	0,0939	0,9119	0,7961	0,1078	0,1183
	20	0,0755	0,7216	0,6142	0,1320	0,1487
	60	0,0457	0,4235	0,3355	0,1287	0,1516
	100	0,0350	0,3201	0,2435	0,1166	0,1408
	150	0,0280	0,2541	0,1868	0,1045	0,1301
	200	0,0239	0,2156	0,1545	0,0968	0,1213

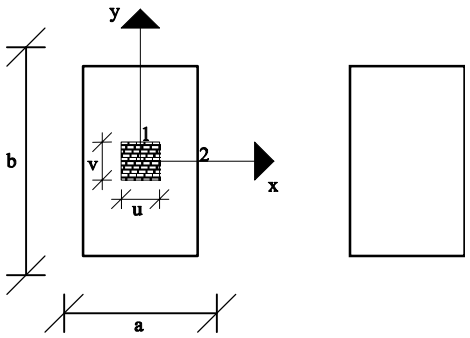
Tableau C.6 — Coefficients k

Chargement : Chargement localisé centré						
		Conditions aux limites : — TBC : Tous les bords sont simplement appuyés. — MBC : Contraintes directes nulles, contraintes de cisaillement nulles				
		Paramètres : $\alpha = u/a$ ; $\beta = v/a$  <b><math>b/a = 1,5</math></b>				
$\alpha \times \beta$	P	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$
0,1 × 0,1	10	0,1303	1,5782	1,3855	0,1517	0,1921
	20	0,1018	1,3056	1,1373	0,1786	0,2295
	60	0,0612	0,8986	0,7701	0,1824	0,2380
	100	0,0469	0,7411	0,6273	0,1747	0,2295
	150	0,0378	0,6298	0,5287	0,1670	0,2193
	200	0,0323	0,5568	0,4641	0,1594	0,2125
0,2 × 0,2	10	0,1281	1,1974	1,0049	0,1344	0,1780
	20	0,1007	0,9453	0,7766	0,1555	0,2116
	60	0,0605	0,5783	0,4554	0,1465	0,2103
	100	0,0462	0,4485	0,3457	0,1329	0,1974
	150	0,0372	0,3624	0,2748	0,1208	0,1845
	200	0,0317	0,3111	0,2322	0,1133	0,1742
0,3 × 0,3	10	0,1229	0,9589	0,7737	0,1074	0,1525
	20	0,0972	0,7405	0,5828	0,1232	0,1818
	60	0,0585	0,4282	0,3161	0,1110	0,1788
	100	0,0449	0,3221	0,2353	0,0988	0,1667
	150	0,0361	0,2550	0,1828	0,0878	0,1535
	200	0,0309	0,2147	0,1525	0,0805	0,1444
0,2 × 0,3	10	0,1260	1,1037	0,8360	0,1154	0,1657
	20	0,0994	0,8688	0,6322	0,1321	0,1984
	60	0,0598	0,5296	0,3553	0,1168	0,1973
	100	0,0459	0,4114	0,2649	0,1043	0,1853
	150	0,0369	0,3336	0,2082	0,0931	0,1722
	200	0,0314	0,2877	0,1755	0,0848	0,1624
0,2 × 0,4	10	0,1235	1,0294	0,7271	0,0993	0,1563
	20	0,0977	0,8101	0,5432	0,1109	0,1877
	60	0,0590	0,4954	0,2983	0,0955	0,1877
	100	0,0453	0,3857	0,2220	0,0826	0,1754
	150	0,0365	0,3148	0,1744	0,0722	0,1630
	200	0,0311	0,2722	0,1468	0,0658	0,1544

**Tableau C.7 — Coefficients k**

Chargement : Chargement localisé centré						
			Conditions aux limites : — TBC : Tous les bords sont simplement appuyés. — MBC : Contraintes directes nulles, contraintes de cisaillement nulles			
			Paramètres : $\alpha = u/a$ ; $\beta = v/a$  <b><math>b/a = 2</math></b>			
$\alpha \times \beta$	P	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$
0,1 × 0,1	10	0,1438	1,6351	1,3560	0,1517	0,1904
	20	0,1154	1,3692	1,1106	0,1773	0,2288
	60	0,0725	0,9633	0,7498	0,1753	0,2438
	100	0,0564	0,7979	0,6112	0,1675	0,2355
	150	0,0456	0,6797	0,5127	0,1596	0,2271
	200	0,0390	0,6028	0,4492	0,1517	0,2188
0,2 × 0,2	10	0,1414	1,2542	0,9752	0,1326	0,1751
	20	0,1138	1,0078	0,7510	0,1513	0,2104
	60	0,0716	0,6427	0,4410	0,1373	0,2167
	100	0,0555	0,5054	0,3339	0,1232	0,2054
	150	0,0449	0,4134	0,2646	0,1108	0,1928
	200	0,0384	0,3572	0,2230	0,1030	0,1827
0,3 × 0,3	10	0,1362	1,0227	0,7506	0,1062	0,1517
	20	0,1104	0,8090	0,5615	0,1190	0,1822
	60	0,0698	0,4941	0,3093	0,1024	0,1862
	100	0,0542	0,3789	0,2275	0,0883	0,1753
	150	0,0421	0,3046	0,1783	0,0794	0,1645
	200	0,0374	0,2586	0,1487	0,0717	0,1546
0,2 × 0,3	10	0,1395	1,1702	0,8164	0,1146	0,1231
	20	0,1129	0,9396	0,6153	0,1262	0,1990
	60	0,0712	0,6003	0,3488	0,1088	0,2044
	100	0,0553	0,4742	0,2611	0,0943	0,1947
	150	0,0447	0,3901	0,2065	0,0841	0,1830
	200	0,0383	0,3379	0,1744	0,0754	0,1733
0,2 × 0,4	10	0,1375	1,0976	0,7051	0,0959	0,1551
	20	0,1117	0,8829	0,5267	0,1053	0,1886
	60	0,0706	0,5670	0,2945	0,0851	0,1942
	100	0,0549	0,4496	0,2220	0,0729	0,1849
	150	0,0445	0,3713	0,1765	0,0635	0,1737
	200	0,0381	0,3227	0,1496	0,0554	0,1644

Tableau C.8 — Coefficients k

Chargement : Chargement localisé centré						
			Conditions aux limites : — TBC : Tous les bords sont simplement appuyés. — MBC : Contraintes directes nulles, contraintes de cisaillement nulles			
			Paramètres : $\alpha = u/a$ ; $\beta = v/a$  $b/a = 2,5$			
$\alpha \times \beta$	P	$k_{w1}$	$k_{\sigma_{bx1}}$	$k_{\sigma_{by1}}$	$k_{\sigma_{mx1}}$	$k_{\sigma_{my1}}$
0,1 × 0,1	10	0,1496	1,6636	1,3463	0,1552	0,1826
	20	0,1235	1,4109	1,1006	0,1811	0,2175
	60	0,0861	1,0428	0,7453	0,1811	0,2374
0,2 × 0,2	10	0,1470	1,2814	0,9650	0,1359	0,1688
	20	0,1218	1,0491	0,7400	0,1548	0,2000
	60	0,0849	0,7205	0,4363	0,1390	0,2088
0,3 × 0,3	10	0,1419	1,0504	0,7410	0,1092	0,1443
	20	0,1182	0,8489	0,5519	0,1222	0,1726
	60	0,0827	0,5681	0,3052	0,1014	0,1775
0,2 × 0,3	10	0,1455	1,1981	0,8056	0,1161	0,1579
	20	0,1210	0,9820	0,6053	0,1294	0,1876
	60	0,0847	0,6806	0,3487	0,1088	0,1982
0,2 × 0,4	10	0,1434	0,1126	0,6949	0,0986	0,1469
	20	0,1199	0,9261	0,5168	0,1069	0,1763
	60	0,0844	0,6480	0,2993	0,0849	0,1873