

# normalisation française

**FD ENV 1993-4-1**  
Novembre 2002

Indice de classement : **P 22-341**

**ICS : 65.040.20 ; 91.080.10**

Eurocode 3

## Calcul des structures en acier

### Partie 4-1 : Silos, réservoirs et canalisations — Silos

E : Eurocode 3 — Design of steel structures — Part 4-1: Silos, tanks and pipelines — Silos

D : Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4-1: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen — Silos

---

#### **Fascicule de documentation**

publié par AFNOR en novembre 2002.

---

#### **Correspondance**

Le présent document reproduit intégralement la Prénorme européenne ENV 1993-4-1:1999.

---

#### **Analyse**

La partie 4-1 de l'Eurocode 3 donne des principes et des règles d'application pour la conception et le calcul des structures de silos en acier de forme en plan circulaire ou rectangulaire, auto-portants ou supportés.

---

#### **Descripteurs**

**Thésaurus International Technique** : bâtiment, silo, construction métallique, définition, symbole, calcul, modélisation, dimension, caractéristique, matériau, acier de construction, acier inoxydable, résistance des matériaux, contrainte, stabilité, contrainte de cisaillement, paroi, trémie.

---

#### **Modifications**

#### **Corrections**



## Membres de la commission de normalisation

Président : M BROZZETTI

Secrétariat : M PESCATORE — BNCM

M	ARIBERT	INSA RENNES
M	BARJON	SERVICE TECHNIQUE DES REMONTEES MECANQUES
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	JOURDAN	S.F.J.F.
M	LAMADON	BUREAU VERITAS
M	LAPEYRE	C.E.P.
M	LE CHAFFOTEC	SOCOTEC
M	MAITRE	SOCOTEC
M	MARTIN	SNCF
M	MOUTY	
M	PAMIES	CETEN APAVE
MME	PATROUILLEAU	AFNOR
MME	PECHENARD	AFFIX
M	PERNIER	MINISTERE DE L'EQUIPEMENT, DU LOGEMENT, DU TRANSPORT ET DU TOURISME
M	RAMEAU	EDF
M	RAOUL	SETRA
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 dimensionnement des silos en acier. Les actions exercées par les matières ensilées ont été publiées en tant que fascicule de documentation. Dans ces conditions, 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, Domaine de Saint-Paul — 102, route de Limours — 78471 Saint-Rémy-Lès-Chevreuse Cédex.*

#### *Références aux normes françaises*

*La correspondance entre les normes mentionnées à l'article 1.3 «Références normatives» et les normes françaises est la suivante :*

##### *— Normes internationales*

*ISO 3898 : NF P 06-005*

##### *— Eurocodes*

*ENV 1991-1 : XP ENV 1991-1 (indice de classement : P 06-101)*

*ENV 1991-2-1 : XP ENV 1991-2-1 (indice de classement : P 06-102-1)*

*ENV 1991-2-2 : XP ENV 1991-2-2 (indice de classement : P 06-102-2)*

*ENV 1991-2-3 : XP ENV 1991-2-3 (indice de classement : P 06-102-3)*

*ENV 1991-2-4 : XP ENV 1991-2-4 (indice de classement : P 06-102-4)*

*ENV 1991-2-5 : XP ENV 1991-2-5 (indice de classement : P 06-102-5)*

*ENV 1991-3 : XP ENV 1993-1-3 (indice de classement : P 06-103)*

*ENV 1991-4 : FD ENV 1991-4 (indice de classement : P 06-104)*

*ENV 1991-5 : FD ENV 1991-5 (indice de classement : P 06-105)*

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 1090	Exécution des structures en acier	FD ENV 1090-1 XP P 22 501-1	Partie 1 : Règles générales et règles pour les bâtiments
ENV 1991-1	Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures — Partie 1 : Bases de calcul	XP ENV 1991-1 P 06-101	Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures et document d'application nationale — Partie 1 : Bases de calcul
ENV 1991-2-1	Eurocode 1 : Partie 2-1 : Poids volumiques, poids propre et charges d'exploitation	XP ENV 1991-2-1 P 06-102-1	Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures et document d'application nationale — Partie 2-1 : Poids volumiques, poids propre et charges d'exploitation
ENV 1991-2-2	Eurocode 1 : Partie 2-2 : Actions sur les structures exposées au feu	XP ENV 1991-2-2 P 06-102-2	Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures et document d'application nationale — Partie 2-2 : Actions sur les structures exposées au feu
ENV 1991-2-3	Eurocode 1 : Partie 2-3 : Charges de neige	XP ENV 1991-2-3 P 06-102-3	Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures et document d'application nationale — Partie 2-3 : Charges de neige
ENV 1991-2-4	Eurocode 1 : Partie 2-4 : Actions du vent	XP ENV 1991-2-4 P 06-102-4	Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures et document d'application nationale — Partie 2-4 : Actions du vent
ENV 1991-2-5	Eurocode 1 : Partie 2-5 : Actions thermiques		
ENV 1991-4	Eurocode 1 : Partie 4 : Actions dans les silos et réservoirs	FD ENV 1991-4 P 06-104	Eurocode 1 : Partie 4 : Actions dans les silos et réservoirs
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 1993-1-3	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 1993-1-6	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-6 : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en coque	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 coque
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 1993-4-2	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 1997-1	Eurocode 7 : Calcul géotechnique — Partie 1 : Règles générales	XP ENV 1997-1 P 94-250-1	Eurocode 7 : Calcul géotechnique — Partie 1 : Règles générales
ENV 1998-1-1	Eurocode 8 : Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes — Partie 1-1 : Règles générales — Actions sismiques et prescriptions générales pour les structures	XP ENV 1998-1-1 P 06-031-1	Eurocode 8 : Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes et document d'application nationale — Partie 1-1 : Règles générales — Actions sismiques et prescriptions générales pour les structures

**Version française**

**Eurocode 3 — Calcul des structures en acier —  
Partie 4-1 : Silos, réservoirs et canalisations — Silos**

Eurocode 3 —  
Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten —  
Teil 4-1: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen —  
Silos

Eurocode 3 —  
Design of steel structures —  
Part 4-1: Silos, tanks and pipelines —  
Silos

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 .....	6
1.3 Références normatives .....	7
1.4 Définitions .....	8
1.5 Unités S.I. ....	8
1.6 Symboles utilisés dans la partie 4-1 de l'Eurocode 3 .....	9
1.7 Terminologie .....	12
1.8 Conventions de signes .....	14
<b>2 Bases de calcul</b> .....	19
2.1 Exigences fondamentales .....	19
2.2 Hypothèses .....	19
2.3 Différentiation de la fiabilité .....	19
2.4 États limites .....	20
2.5 Actions et influences de l'environnement .....	20
2.6 Propriétés des matériaux .....	20
2.7 Données géométriques .....	20
2.8 Modélisation du silo pour la détermination des effets d'actions .....	21
2.9 Dimensionnement assisté par l'expérimentation .....	21
2.10 Effets des actions pour les vérifications aux états limites ultimes .....	21
2.11 Durabilité .....	22
2.12 Résistance au feu .....	22
<b>3 Propriétés des matériaux</b> .....	23
3.1 Généralités .....	23
3.2 Aciers de construction .....	23
3.3 Aciers inoxydables .....	23
3.4 Aciers alliés spéciaux .....	24
3.5 Exigences concernant la rupture fragile .....	24
<b>4 Bases pour l'analyse structurale</b> .....	25
4.1 États limites ultimes .....	25
4.2 Analyse de la structure d'un silo coque .....	25
4.3 Analyse de la structure de caisson d'un silo rectangulaire .....	28
4.4 Propriétés orthotropes équivalentes des tôles ondulées .....	29
<b>5 Calcul des parois cylindriques</b> .....	31
5.1 Bases .....	31
5.2 Distinctions entre formes de coques cylindriques .....	32
5.3 Résistance des parois cylindriques de silos .....	32
5.4 Conditions d'appui particulières pour les parois cylindriques .....	49
5.5 Dispositions constructives pour les ouvertures dans les parois cylindriques .....	53
5.6 États limites de service .....	54
<b>6 Calcul des trémies coniques</b> .....	54
6.1 Bases .....	54
6.2 Distinctions entre formes de coque de trémie .....	55
6.3 Résistance des trémies coniques .....	55
6.4 Considérations concernant les structures de trémies particulières .....	59
6.5 États limites de service .....	60

## Sommaire (fin)

	Page
<b>7</b>	<b>Calcul des structures de toit coniques circulaires</b> ..... 61
<b>7.1</b>	Bases ..... 61
<b>7.2</b>	Distinctions entre différentes formes structurales de toits ..... 61
<b>7.3</b>	Résistance des toits de silos coniques circulaires ..... 61
<b>8</b>	<b>Calcul des zones de transition et des ceintures</b> ..... 62
<b>8.1</b>	Bases ..... 62
<b>8.2</b>	Analyse de la jonction ..... 64
<b>8.3</b>	Résistances structurales ..... 70
<b>8.4</b>	Vérifications aux états limites ..... 74
<b>8.5</b>	Considérations concernant les dispositions des appuis pour la jonction ..... 75
<b>9</b>	<b>Calcul des silos rectangulaires et des silos à côtés plans</b> ..... 76
<b>9.1</b>	Bases ..... 76
<b>9.2</b>	Classification des formes structurales ..... 76
<b>9.3</b>	Résistance des parois verticales ..... 77
<b>9.4</b>	Silos à tirants intérieurs ..... 81
<b>9.5</b>	Résistance des trémies pyramidales ..... 83
<b>9.6</b>	Raidisseurs verticaux placés sur des parois en caisson ..... 83
<b>9.7</b>	États limites de service ..... 84
<b>Annexe A</b>	<b>(normative) Actions et combinaisons d'actions exercées sur les silos</b> ..... 85
<b>A.1</b>	Actions pour les combinaisons ..... 85
<b>A.2</b>	Situations de calcul et combinaisons d'actions pour les Classes de Fiabilité 2 et 3 ..... 85
<b>A.3</b>	Combinaisons d'actions pour la Classe de Fiabilité 1 ..... 86
<b>Annexe B</b>	<b>(informative) Règles simplifiées pour les silos circulaires de Classe de Fiabilité 1</b> ..... 87
<b>B.1</b>	Combinaisons d'actions pour la Classe de Fiabilité 1 ..... 87
<b>B.2</b>	Évaluation des effets d'actions ..... 87
<b>B.3</b>	Évaluation à l'état limite ultime ..... 87
<b>Annexe C</b>	<b>(informative) Expressions pour les efforts de membrane exercées dans les trémies coniques</b> ..... 92
<b>C.1</b>	Pression uniforme $\rho_0$ avec frottement de paroi $\mu$ ..... 92
<b>C.2</b>	Pression variant linéairement de $\rho_1$ au sommet à $\rho_2$ à la transition avec frottement de paroi $\mu$ ..... 92
<b>C.3</b>	Champ de contrainte radiale avec diagramme triangulaire à la transition ..... 93
<b>C.4</b>	Pressions selon la théorie de Walker généralisée ..... 93
<b>Annexe D</b>	<b>(informative) Répartition de la pression du vent autour des structures de silo circulaires</b> ..... 94
<b>Annexe E</b>	<b>(informative) Références</b> ..... 95
<b>E.1</b>	Références concernant les structures de silos cylindriques ..... 95
<b>E.2</b>	Références concernant les structures de silos rectangulaires ..... 98
<b>E.3</b>	Références concernant les structures de silo en tôles ondulées ..... 98

## Avant-propos

Le présent document a été préparé par le CEN/TC 250 «Eurocodes structuraux».

Selon le Règlement Intérieur du CEN/CENELEC, les instituts de normalisation nationaux des pays suivants sont tenus d'annoncer cette Prénorme européenne : Allemagne, Autriche, Belgique, Danemark, Espagne, Finlande, France, Grèce, Irlande, Islande, Italie, Luxembourg, Norvège, Pays-Bas, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Suède et Suisse.

### 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 4 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 1993-3-1 Pylônes et mâts haubanés ;
- ENV 1993-3-2 Cheminées ;
- ENV 1993-4-1 Silos ;
- ENV 1993-4-2 Réservoirs ;
- ENV 1993-4-3 Canalisations ;
- ENV 1993-5 Pieux et palplanches ;
- ENV 1993-6 Chemins de roulement ;
- ENV 1993-7 Structures marines et maritimes ;
- ENV 1993-8 Structures agricoles.

(17) Des coefficients de sécurité pour les silos «standardisés» (production industrielle) peuvent être spécifiés par les autorités concernées. Lorsqu'ils sont appliqués aux silos «standardisés», les coefficients mentionnés en 2.10 ne sont donnés qu'à titre indicatif. Ils sont fournis pour indiquer les valeurs susceptibles de donner une fiabilité cohérente avec d'autres ouvrages.

## 1 Généralités

### 1.1 Objet

(1)P La partie 4-1 de l'Eurocode 3 donne des principes et des règles d'application pour la conception des structures de silos en acier de forme en plan circulaire ou rectangulaire, auto-portants ou supportés.

(2)P Cette partie ne concerne que les exigences de résistance et de stabilité des silos en acier. Pour d'autres exigences (telles la sécurité de fonctionnement, les performances fonctionnelles, la fabrication et le montage, le contrôle de qualité, les détails tels les trous d'homme, les brides, les dispositifs de remplissage, les vannes de vidange et les conduites, voir ENV ...

(3)P Des dispositions concernant les exigences particulières du calcul parasismique sont données dans l'ENV 1998-4, qui complète ou adapte spécifiquement dans ce but les dispositions données dans l'Eurocode 3.

(4) Le calcul des structures porteuses de silos est traité dans l'ENV 1993-1-1. La structure porteuse est supposée être constituée de tous les éléments structuraux situés au-dessous de la semelle inférieure de la ceinture la plus basse du silo, voir Figure 1.1.

(5) Les fondations en béton armé des silos en acier sont traitées dans les ENV 1992 et ENV 1997.

(6) Des valeurs numériques des actions spécifiques exercées sur les silos en acier à prendre en compte dans le calcul sont données dans l'ENV 1991-4 «Actions exercées dans les silos et réservoirs». Des règles supplémentaires concernant les actions exercées sur les silos sont données dans l'Annexe A de la présente Partie 4.1 de l'Eurocode 3.

(7)P La présente partie 4-1 ne couvre pas :

- la résistance au feu ;
- les silos comportant des subdivisions intérieures et des structures intérieures ;
- les silos de capacité inférieure à 10 tonnes ;
- les cas où des mesures particulières sont nécessaires pour limiter les conséquences d'accidents.

(8) Les silos de forme en plan circulaire couverts par la présente Prénorme se limitent aux structures axisymétriques, mais les actions exercées sur elles peuvent être asymétriques, et leurs appuis peuvent induire dans ces silos des forces qui ne sont pas axisymétriques.

### 1.2 Distinction entre principes et règles d'application

(1)P En fonction du caractère de chaque paragraphe, 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 de paragraphe.

(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 différentes des règles d'application données dans l'Eurocode, à condition qu'il soit démontré que cette 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 le présent paragraphe.

### 1.3 Références normatives

Cette 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 1090 Exécution des structures en acier ;

ENV 1991-1 Eurocode 1 : Bases de calcul et actions exercées sur les structures — Partie 1 : Bases de calcul ;

ENV 1991-1 Eurocode 1 : Bases de calcul et actions exercées sur les structures — Partie 2-1 : Poids volumique, poids propre et charges d'exploitation ;

ENV 1991-1 Eurocode 1 : Bases de calcul et actions exercées sur les structures — Partie 2-2 : Actions exercées sur les structures exposées au feu ;

ENV 1991-1 Eurocode 1 : Bases de calcul et actions exercées sur les structures — Partie 2-3 : Charges de neige ;

ENV 1991-1 Eurocode 1 : Bases de calcul et actions exercées sur les structures — Partie 2-4 : Actions du vent ;

ENV 1991-1 Eurocode 1 : Bases de calcul et actions exercées sur les structures — Partie 2-5 : Charges thermiques ;

ENV 1991-1 Eurocode 1 : Bases de calcul et actions exercées sur les structures — Partie 4 : Actions dans les silos et réservoirs ;

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

ENV 1993 Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-3 : Règles générales — Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid ;

ENV 1993 Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-6 : Règles générales — Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en coque ;

ENV 1993 Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-7 : Règles générales — Règles supplémentaires pour les plaques planes raidies chargées hors de leurs plans ;

ENV 1993 Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-2 : Réservoirs ;

ENV 1997 Eurocode 7 : Calcul géotechnique ;

ENV 1998 Eurocode 8 : Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance au séisme — Partie 4 : Silos, réservoirs et canalisations ;

EN 10025 Produits laminés à chaud en aciers de construction non alliés — conditions techniques de livraison ;

EN 10113 Produits laminés à chaud en aciers de construction soudables à grains fins ;

EN 10149 Produits laminés à chaud en aciers à haute limite élastique pour formage à froid ;

ISO 1000 Unités SI ;

ISO 3898 Bases du calcul des constructions — Notations — Symboles généraux ;

ISO 4997 Tôles en acier de construction laminées à froid ;

ISO 8930 Principes généraux de la fiabilité des constructions — Listes de termes équivalents.

## 1.4 Définitions

(1) Les termes définis dans l'ENV 1991-1 pour un usage commun dans les Eurocodes Structuraux et les définitions données dans l'ISO 8930 s'appliquent à cette partie 4-1 de l'ENV 1993, sauf mention contraire, mais pour l'application de la présente partie 4-1 les définitions supplémentaires suivantes sont données :

**1.4.1 coque** : structure formée à partir d'une tôle mince incurvée

**1.4.2 coque axisymétrique** : structure de coque dont la géométrie est définie par rotation d'une ligne méridienne autour d'un axe central

**1.4.3 caisson** : structure composée d'un ensemble de plaques planes de forme tridimensionnelle fermée. Dans le cadre de la présente Prénorme, le caisson possède des dimensions en général comparables en tous sens

NOTE Il n'existe aucune direction pouvant être comparée à la portée d'un pont à poutres caissonnées.

**1.4.4 direction méridienne** : tangente à la paroi du silo dans un plan vertical en un point quelconque. Varie en fonction de l'élément structural considéré. Comme alternative, direction verticale ou inclinée à la surface de la structure, que suivrait une goutte de pluie glissant le long de la surface

**1.4.5 direction circonférentielle** : tangente horizontale à la paroi du silo en un point quelconque. Varie autour du silo, se situe dans le plan horizontal, et est tangente à la paroi du silo, que le silo soit de forme en plan circulaire ou rectangulaire

**1.4.6 surface médiane** : ce terme est utilisé pour désigner la surface centrale exempte de contraintes lorsqu'une coque est soumise à une flexion pure et le plan médian d'une plaque plane formant partie d'un caisson

**1.4.7 espacement de raidisseurs** : distance séparant les axes longitudinaux de deux raidisseurs parallèles adjacents

## 1.5 Unités S.I.

(1)P Les unités S.I. doivent être utilisées conformément à l'ISO 1000.

(2) Pour les calculs, les unités cohérentes suivantes sont recommandées :

— 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 sur 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

$$1 \text{ mbar} = 100 \text{ N/m}^2 = 0,1 \text{ kPa}$$

## 1.6 Symboles utilisés dans la partie 4-1 de l'Eurocode 3

Les symboles utilisés sont basés sur l'ISO 3898:1987.

### 1.6.1 Caractères majuscules romains

A	aire de section transversale ;
C	rigidité d'étirement de membrane ;
C	coefficient de flambement ;
D	rigidité de flexion ;
E	module de Young ;
F	force, effort ;
G	module de cisaillement ;
H	hauteur de structure ;
I	moment d'inertie de flexion de section transversale ;
$I_t$	constante de torsion uniforme ;
K	rigidité de flexion de panneau de paroi ;
L	hauteur de segment de coque ou de raidisseur ;
M	moment fléchissant ;
N	effort axial ;
Q	qualité de tolérance de fabrication d'une coque susceptible de flamber ;
$R_\phi$	rayon local de courbure au sommet ou dans le creux d'une onde.

### 1.6.2 Caractères minuscules romains

a	coefficient ;
b	largeur de plaque ou de raidisseur ;
d	dimension d'une onde de sommet à sommet ;
e	excentricité d'une force ou d'un raidisseur ;
$f_y$	limite d'élasticité de calcul de l'acier ;
$f_u$	résistance ultime de l'acier ;
h	espacement des semelles d'une poutre annulaire ;
j	harmonique équivalente de la variation de la contrainte de calcul ;
l	longueur efficace de coque dans une analyse des contraintes linéaire ;
l	longueur d'onde d'une ondulation de tôle ondulée ;
l	demi-longueur d'onde d'un flambement potentiel (hauteur à considérer dans le calcul) ;
m	moment fléchissant par unité de largeur ;
$m_x$	moment fléchissant méridien par unité de circonférence ;
$m_y$	moment fléchissant circonférentiel par unité de hauteur de caisson ;
$m_\theta$	moment fléchissant circonférentiel par unité de hauteur de coque ;
$m_{xy}$	moment de cisaillement par torsion par unité de largeur de plaque ;
$m_{x\theta}$	moment de cisaillement par torsion par unité de largeur de coque ;

$n$	résultante de contrainte de membrane ;
$n$	nombre d'appuis discrets sur la circonférence du silo ;
$n_x$	effort méridien de membrane par unité de circonférence ;
$n_y$	effort circonférentiel de membrane par unité de hauteur de caisson ;
$n_{x\theta}$	effort circonférentiel de membrane par unité de hauteur de coque ;
$n_{xy}$	effort tranchant de membrane par unité de largeur de plaque ;
$n_{x\theta}$	effort tranchant de membrane par unité de largeur de coque ;
$p$	chargement réparti de pression ;
$p_n$	pression normale à la coque (vers l'extérieur) ;
$p_x$	chargement de surface méridien parallèle à la coque (vers le bas) ;
$p_\theta$	chargement de surface circonférentiel parallèle à la coque (sens antihoraire dans le plan) ;
$q$	force transversale par unité de longueur agissant sur un tirant ;
$r$	coordonnée radiale dans un silo de forme en plan circulaire ;
$r$	rayon de surface médiane de coque ;
$s$	espacement circonférentiel de raidisseurs ;
$t$	épaisseur de paroi ;

### 1.6.3 Caractères grecs

$\alpha$	facteur d'imperfection pour le flambement élastique ;
$\alpha$	coefficient de dilatation thermique ;
$\beta$	demi-angle de sommet de trémie ;
$\gamma_F$	coefficient partiel pour les actions ;
$\gamma_M$	coefficient partiel pour la résistance du matériau ;
$\delta$	flèche limite ;
$\Delta$	incrément ;
$\chi$	coefficient de réduction pour le flambement par flexion ;
$\chi$	coefficient de réduction des contraintes de flambement ;
$\lambda$	demi-longueur d'onde pour la flexion méridienne de coque ;
$\bar{\lambda}$	élancement réduit d'une coque ;
$\mu$	coefficient de frottement de paroi ;
$\nu$	coefficient de Poisson ;
$\theta$	coordonnée circonférentielle autour de la coque ;
$\sigma$	contrainte directe ;
$\sigma_{bx}$	contrainte de flexion méridienne ;
$\sigma_{by}$	contrainte de flexion circonférentielle dans un caisson ;
$\sigma_{b\theta}$	contrainte de flexion circonférentielle dans une coque courbe ;
$\tau_{bx\theta}$	effort tranchant par torsion dans une coque courbe ;
$\sigma_{mx}$	contrainte de membrane méridienne ;
$\sigma_{my}$	contrainte circonférentielle de membrane dans un caisson ;
$\sigma_{m\theta}$	contrainte circonférentielle de membrane dans une coque courbe ;

$\tau_{mx\theta}$	effort tranchant de membrane dans une coque courbe ;
$\sigma_{sox}$	contrainte méridienne sur surface extérieure ;
$\sigma_{soy}$	contrainte circonférentielle sur surface extérieure dans un caisson ;
$\sigma_{so\theta}$	contrainte circonférentielle sur surface extérieure dans une coque courbe ;
$\tau_{sox\theta}$	cisaillement sur surface extérieure dans une coque courbe ;
$\tau$	cisaillement ;
$\omega$	paramètre adimensionnel utilisé dans le calcul du flambement ;
$\omega$	inclinaison d'une trémie dont l'axe n'est pas vertical ;
$\psi$	paramètre de non-uniformité de contraintes.

#### 1.6.4 Indices

E	valeur de contrainte ou de déplacement (provenant d'actions de calcul) ;
F	actions ;
M	matériau ;
R	résistance ;
S	sollicitation (provenant d'actions de calcul) ;
cr	valeur critique d'instabilité ;
d	valeur de calcul ;
b	flexion ;
c	cylindre ;
eff	efficace ;
h	trémie ;
m	membrane, mi-portée ;
min	valeur minimum autorisée ;
n	normal à la paroi ;
p	pression ;
r	radial ;
s	jupe, appui ;
u	ultime ;
w	parallèle à la paroi selon le sens méridien (frottement de paroi) ;
x	méridien ;
y	circonférentiel (structures en caisson), écoulement ;
z	sens axial ;
$\theta$	circonférentiel (coques de révolution).

## 1.7 Terminologie

En complément de celle utilisée dans la partie 1 de l'ENV 1993 (et la partie 4 de l'ENV 1991), dans le cadre de la présente partie 4.1, la terminologie suivante s'applique, voir Figure 1.1 :

**1.7.1 silo** : un silo est un réservoir destiné au stockage de particules granulaires solides. Dans la présente Prénorme, on suppose qu'il possède une forme verticale, et que les apports de matières se font par gravité depuis la partie supérieure. Le terme «silo» comprend toutes les formes de structures de stockage de particules solides pouvant par ailleurs être appelées caissons, trémies, caisses ou coffres.

**1.7.2 robe** : la robe est la section à parois verticales d'un silo.

**1.7.3 trémie** : une trémie est une section convergeant vers le fond d'un silo. Elle sert à guider les matières vers un orifice de vidange par gravité.

**1.7.4 jonction** : une jonction est le point où se rejoignent deux ou plusieurs segments de coque quelconques, ou deux ou plusieurs éléments plans d'un caisson. Elle peut comporter ou non un raidisseur : le point de fixation d'un raidisseur annulaire sur la coque ou le caisson peut être considéré comme une jonction.

**1.7.5 zone de transition** : la zone de transition se situe entre la robe et la trémie. Elle peut être à la base de la robe ou plus haut.

**1.7.6 jupe** : la jupe est la partie de la robe située au-dessous de la zone de transition. À la différence de la partie située plus haut, elle n'a aucun contact avec les matières ensilées.

**1.7.7 virole** : une virole, ou assise, est une seule épaisseur de tôles en acier constituant un niveau de la robe cylindrique d'un silo.

**1.7.8 raidisseur vertical** : un raidisseur vertical est un élément de raidissage local qui suit le méridien d'une coque, représentant une génératrice de l'enveloppe de révolution. Il est destiné à augmenter la stabilité, ou à contribuer à l'introduction des charges locales, ou à supporter des charges axiales. Il n'est pas prévu pour donner une capacité de résistance primaire en flexion dues aux charges transversales.

**1.7.9 nervure** : une nervure est un élément local constituant un chemin principal de transmission des charges de flexion le long du méridien d'une coque ou d'une tôle plane, représentant une génératrice de l'enveloppe de révolution, ou un raidisseur vertical sur un caisson. Il sert à répartir les charges transversales exercées sur la structure par la flexion.

**1.7.10 raidisseur annulaire** : un raidisseur annulaire est un élément local de raidissage disposé sur la circonférence de la structure à un niveau donné sur le méridien. Il est supposé n'avoir aucune rigidité dans le plan méridien de la structure. Il est destiné à augmenter la stabilité ou à introduire les charges locales, non à servir d'élément porteur principal. Dans une coque de révolution, il est circulaire, mais dans les structures rectangulaires, il prend la forme en plan rectangulaire.

**1.7.11 raidisseurs de caractéristique équivalente répartie** : les raidisseurs sont ainsi appelés lorsque les caractéristiques de la paroi de coque et les raidisseurs individuels sont traités comme une section mixte en utilisant une largeur égale à un multiple entier de l'espacement des raidisseurs. Les caractéristiques d'une paroi de coque munie de tels raidisseurs sont orthotropes avec des termes croisés entraînant un couplage entre les comportements de membrane et de flexion.

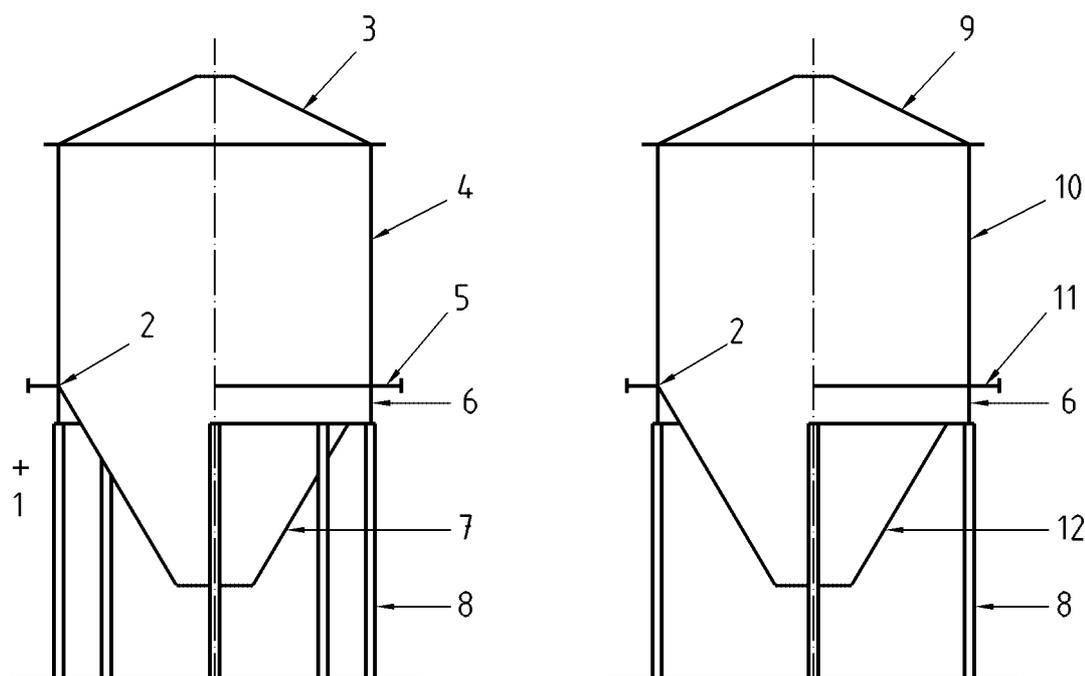
**1.7.12 ceinture** : une plaque annulaire est un élément structural disposé sur la circonférence de la structure à sa base, et comportant des moyens de fixation de la structure sur une fondation ou autre élément. Il est nécessaire que les hypothèses de conditions aux limites soient bien réalisées en pratique.

**1.7.13 poutre annulaire/poutre ceinture** : une poutre annulaire est un raidisseur circonférentiel possédant une résistance et une rigidité de flexion tant dans le plan de la section circulaire d'une coque ou dans le plan d'une structure rectangulaire que perpendiculairement à ce plan. C'est un élément porteur principal, servant à répartir les charges locales dans la structure de coque ou de caisson.

**1.7.14 appuis continus** : dans un silo à appuis continus, tous les points situés sur la circonférence bénéficient d'un appui identique. Les différences mineures (par exemple une ouverture de faibles dimensions) n'affectent pas l'applicabilité de cette définition.

**1.7.15 appui discret** : un appui discret est un point où l'appui d'un silo est réalisé localement par une console ou un poteau, donnant ainsi un nombre limité d'appuis étroits sur la circonférence du silo. On utilise couramment quatre ou six appuis discrets, mais on en trouve aussi trois ou plus de six.

**1.7.16 trémie pyramidale** : on utilise une trémie pyramidale, en forme de pyramide inversée, pour la trémie d'un silo rectangulaire. Dans la présente Prénorme, on suppose que la géométrie est simple, ne comportant que quatre éléments plans de forme trapézoïdale.



**Légende**

- 1 Le silo finit ici
- 2 Transition
- 3 Toit cône
- 4 Coque cylindrique ou robe
- 5 Ceinture
- 6 Jupe

- 7 Trémie cône
- 8 Poteau : structure porteuse
- 9 Toit pyramidal
- 10 Caisson rectangulaire
- 11 Poutre annulaire
- 12 Trémie pyramidale

a) Silo de forme circulaire

b) Silo de forme rectangulaire

**Figure 1.1 — Terminologie utilisée pour les structures de silos**

## 1.8 Conventions de signes

### 1.8.1 Conventions pour le système d'axes global pour les silos circulaires

(1) La convention de signe donnée ici concerne l'ensemble de la structure de silo, et admet que le silo n'est pas un élément structural. Les systèmes de coordonnées exigent un soin particulier pour s'assurer que l'on ne confond pas les coordonnées locales associées aux éléments fixés sur la paroi de coque et les charges données dans les sens des coordonnées locales mais définies par des coordonnées globales.

(2) En général, la convention pour le système d'axes global de structure de silo est en coordonnées cylindriques (voir Figure 1.2), de la façon suivante :

Système de coordonnées :

Coordonnée sur l'axe central d'une enveloppe de révolution	$z$
Coordonnée radiale	$r$
Coordonnée circonférentielle	$\theta$

(3) La convention pour le sens positif est la suivante :

Sens vers l'extérieur positif (pression interne positive, déplacements vers l'extérieur positifs)

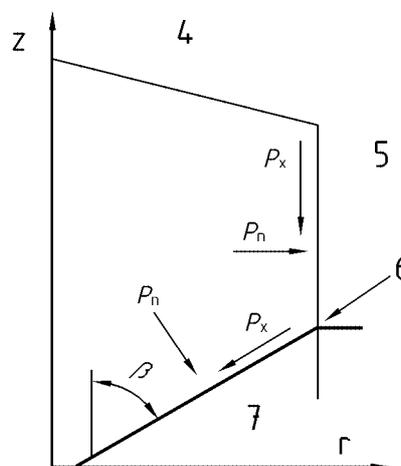
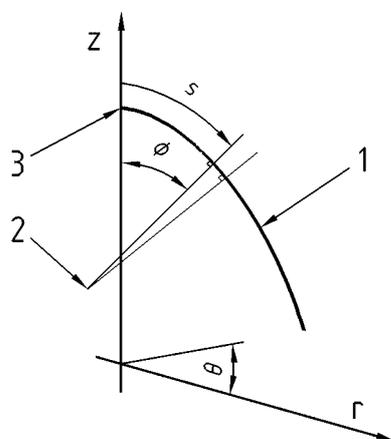
Contraintes de traction positives (sauf dans les expressions de voilement où la compression est positive)

(4) La convention pour les actions réparties sur la surface de paroi de silo est la suivante :

Pression normale à la coque (vers l'extérieur)  $p_n$

Charges méridiennes sur la surface parallèlement à la coque (vers le bas)  $p_x$

Charges circonférentielles sur la surface parallèlement à la coque (sens antihoraire dans le plan)  $p_\theta$



#### Légende

1	Méridien de coque	5	Roche
2	Centre instantané de courbure méridienne	6	Transition
3	Pôle	7	Trémie
4	Toit		

a) Système général de coordonnées

b) Coordonnées de coque de silo et charges : coupe

Figure 1.2 — Systèmes de coordonnées pour un silo circulaire

### 1.8.2 Conventions pour le système d'axes global pour les silos rectangulaires

(1) La convention de signes donnée ici concerne l'ensemble de la structure de silo, et admet que le silo n'est pas un élément structural. Les systèmes de coordonnées exigent un soin particulier pour s'assurer de ne pas confondre les coordonnées locales associées aux éléments fixés sur la paroi de coque et les charges données dans les sens des coordonnées locales mais définies par des coordonnées globales.

(2) En général, la convention pour le système d'axes global de silo est en coordonnées cartésiennes  $x, y, z$ , où le sens vertical est  $z$ , voir Figure 1.3.

(3) La convention pour le sens positif est la suivante :

Sens vers l'extérieur positif (pression interne positive, déplacements vers l'extérieur positifs)

Contraintes de traction positives (sauf dans les expressions de voilement où la compression est positive)

(4) La convention pour les actions réparties sur la surface de paroi de silo est la suivante :

Pression normale à la coque (vers l'extérieur)  $P_n$

Charges méridiennes sur la surface parallèlement à la coque (vers le bas)  $P_x$

Charges circonférentielles sur la surface parallèlement à la coque (sens antihoraire)  $P_y$

### 1.8.3 Conventions pour les axes d'éléments structuraux dans les silos circulaires et rectangulaires

(1) La convention pour les éléments structuraux fixés sur la paroi du silo (voir Figures 1.4 et 1.5) est différente pour les éléments méridiens et circonférentiels.

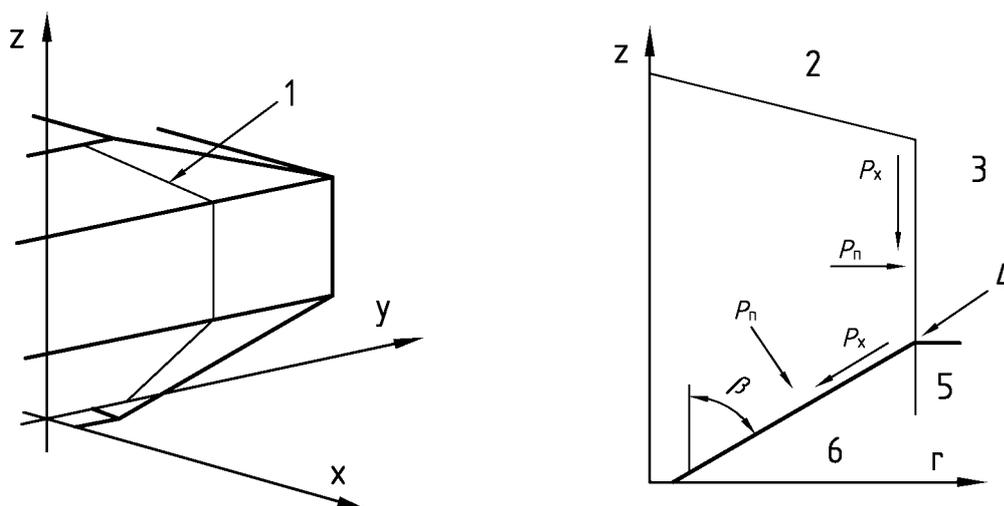
(2) La convention pour les éléments structuraux rectilignes méridiens (voir Figure 1.4a) fixés sur les parois de silos (coques et caissons) est la suivante :

Coordonnée méridienne pour fixation sur robe, trémie et toit  $x$

Axe de flexion fort (parallèle aux ailes : axe pour flexion méridienne)  $y$

Axe de flexion faible (perpendiculaire aux ailes)  $z$

NOTE La flexion d'un raidisseur méridien compatible avec la flexion méridienne ( $m_x$ ) dans le cylindre s'effectue selon son axe  $y$ .



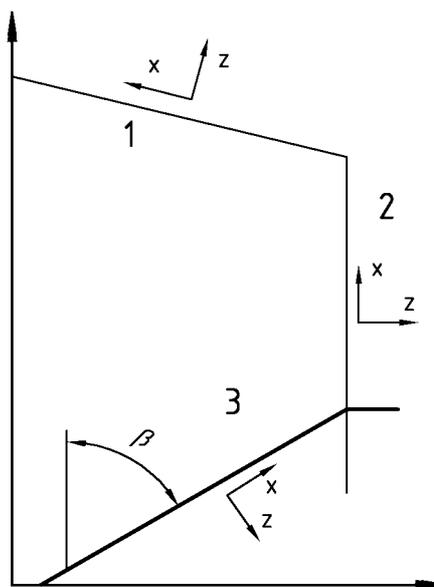
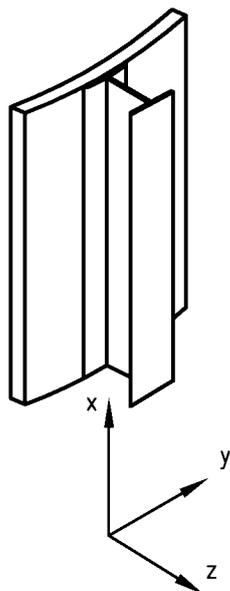
#### Légende

- |   |                     |   |            |
|---|---------------------|---|------------|
| 1 | Méridien de caisson | 4 | Transition |
| 2 | Toit                | 5 | Jupe       |
| 3 | Robe                | 6 | Trémie     |

a) Système de coordonnées général

b) Coordonnées et charges pour un silo en caisson

Figure 1.3 — Systèmes de coordonnées pour un silo rectangulaire



**Légende**

- 1 Toit
- 2 Robe
- 3 Trémie

a) Raidisseur et axes de flexion

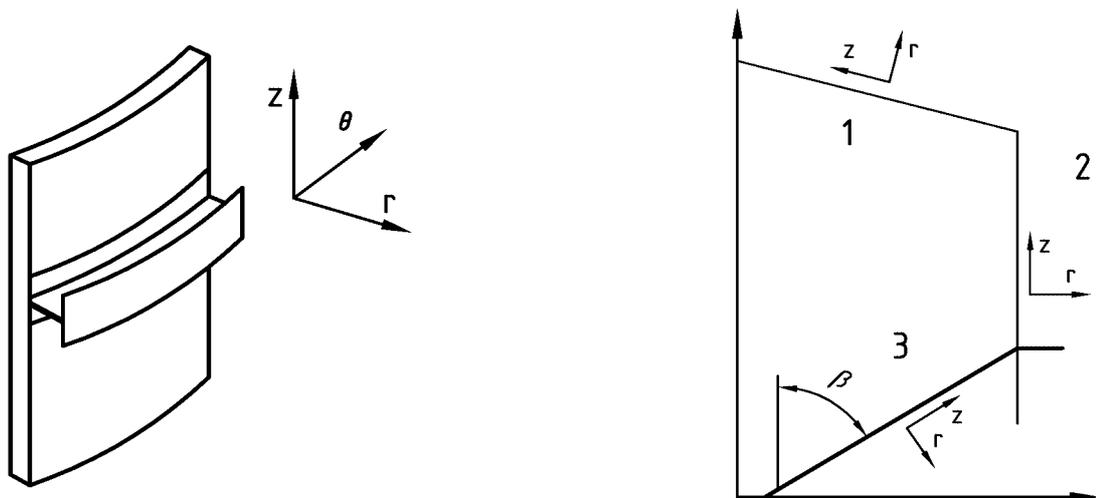
b) Axes locaux dans différents segments

**Figure 1.4 — Systèmes de coordonnées locaux pour les raidisseurs méridiens sur une coque ou un caisson**

(3) La convention pour les éléments structuraux courbes circonférentiels (voir Figure 1.5a) fixés sur une paroi de coque est la suivante :

Axe de coordonnée circonférentielle (courbe)	$\theta$
Axe radial (axe pour la flexion dans le plan vertical)	$r$
Axe vertical (axe pour la flexion circonférentielle)	$z$

NOTE Un raidisseur circonférentiel ou ceinture est soumis à une flexion selon son axe vertical  $z$  lorsque la flexion est compatible avec la flexion circonférentielle dans le cylindre ( $m_\theta$ ). Il est soumis à des moments fléchissants selon son axe radial  $r$  lorsqu'il agit comme une poutre annulaire, ou lorsqu'il est soumis à des forces radiales agissant en un point excentré par rapport au centre de gravité de la ceinture.



**Légende**

- 1 Toit
- 2 Robe
- 3 Trémie

**a) Raidisseur et axes de flexion**

**b) Axes locaux dans différents segments**

**Figure 1.5 — Systèmes de coordonnées locaux pour les raidisseurs circonférentiels sur une coque ou un caisson**

- (4) La convention pour les éléments structuraux rectilignes circonférentiels fixés sur un caisson est la suivante :
- |                     |   |
|---------------------|---|
| Axe circonférentiel | x |
| Axe horizontal      | y |
| Axe vertical        | z |

NOTE Un raidisseur rectiligne circonférentiel situé sur un caisson est soumis à une flexion selon son axe vertical z lorsque la flexion s'effectue hors du plan de la paroi du caisson, ce qui constitue la condition normale.

**1.8.4 Conventions pour les efforts pour les silos circulaires et les silos rectangulaires**

- (1) La convention utilisée pour les indices indiquant les efforts de membrane est la suivante :  
«L'indice découle de la direction suivant laquelle la contrainte directe est induite par la force»

Efforts de membrane :

- $n_x$  effort de membrane méridienne
- $n_\theta$  effort de membrane circonférentielle dans les coques
- $n_y$  effort de membrane circonférentielle dans les caissons rectangulaires
- $n_{xy}$  ou  $n_{x\theta}$  effort de cisaillement de membrane

Contraintes de membrane :

- $\sigma_{mx}$  contrainte de membrane méridienne
- $\sigma_{m\theta}$  contrainte de membrane circonférentielle dans les coques
- $\sigma_{my}$  contrainte de membrane circonférentielle dans les caissons rectangulaires
- $\tau_{mxy}$  ou  $\tau_{mx\theta}$  contrainte de cisaillement de membrane

(2) La convention utilisée pour les indices affectant les moments est la suivante :

«L'indice découle de la direction de la contrainte directe induite par les moments»

NOTE Cette convention pour les coques et plaques est différente de celle donnée pour les poutres et les poteaux dans l'Eurocode 3 parties 1-1 et 1-3. Il convient d'être prudent lorsque l'on utilise les parties 1-1 et 1-3 en même temps que les présentes règles.

Efforts de flexion :

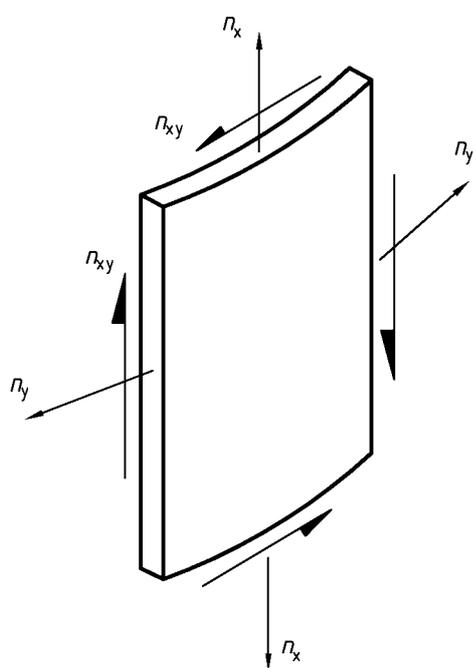
- $m_x$  moment fléchissant méridien par unité de largeur
- $m_\theta$  moment fléchissant circonférentiel par unité de largeur dans les coques
- $m_y$  résultante de contrainte de flexion circonférentielle dans les caissons rectangulaires
- $m_{xy}$  ou  $m_{x\theta}$  moment de torsion par unité de largeur

Contraintes de flexion :

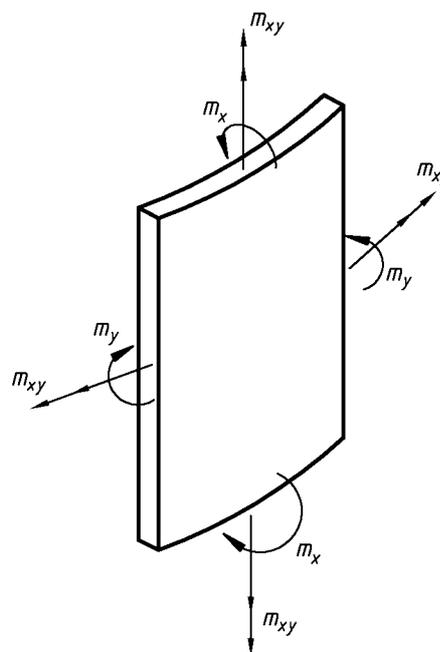
- $\sigma_{bx}$  contrainte de flexion méridienne
- $\sigma_{b\theta}$  contrainte de flexion circonférentielle dans les coques
- $\sigma_{by}$  contrainte de flexion circonférentielle dans les caissons rectangulaires
- $\tau_{bxy}$  ou  $\tau_{bx\theta}$  contrainte de cisaillement par torsion

Contraintes sur les surfaces intérieure et extérieure :

- $\sigma_{sox}$  contrainte méridienne sur la surface extérieure
- $\sigma_{so\theta}$  contrainte circonférentielle sur la surface extérieure dans les coques
- $\sigma_{soy}$  contrainte circonférentielle sur la surface extérieure dans les caissons rectangulaires
- $\tau_{soxy}$  ou  $\tau_{sox\theta}$  contrainte de cisaillement sur la surface extérieure



a) Efforts de membrane



b) Efforts de flexion

Figure 1.6 — Résultantes de contraintes dans les parois des silos (coques et caissons)

## 2 Bases de calcul

### 2.1 Exigences fondamentales

(1)P Un silo doit être dimensionné, construit et entretenu conformément aux exigences de la section 2 de l'ENV 1991-1 complétées des dispositions suivantes.

(2) Il convient que la totalité des sections de coques et de plaques de la structure, y compris les raidisseurs, nervures, ceintures et fixations soient considérées dans la structure de silo.

(3) Il convient que la structure porteuse ne soit pas traitée comme partie de la structure de silo. Il convient de considérer la limite entre le silo et ses appuis comme indiqué dans la Figure 1.1. De même, il convient de traiter d'autres structures supportées par le silo comme commençant au point où s'achève la paroi ou les fixations du silo.

(4) Des exigences particulières pour des applications spéciales peuvent faire l'objet d'un accord entre le concepteur, le client et l'autorité compétente.

### 2.2 Hypothèses

(1)P Les hypothèses données dans l'ENV 1993-1-1 peuvent être appliquées dans le calcul à la présente partie 4-1 de l'ENV 1993.

### 2.3 Différentiation de la fiabilité

(1) Il convient d'utiliser différents niveaux de sévérité dans la justification des structures de silos, en fonction de la fiabilité de la disposition structurale et de la sensibilité à différents modes de ruine.

(2) Il convient d'effectuer le dimensionnement des silos conformément aux exigences de l'une des trois classes de fiabilité suivantes utilisées dans cette partie, qui donnent des dimensionnements comportant des risques essentiellement égaux dans les évaluations, et en examinant les coûts et modes opératoires nécessaires pour réduire le risque de ruine des différentes structures : Classes 1, 2 et 3.

**Tableau 2.1 — Classification des situations de dimensionnement**

Classe de fiabilité	Description
Classe de fiabilité 3	Silos reposant sur le sol ou silos reposant sur une jupe complète s'étendant jusqu'au sol avec une capacité supérieure à 5 000 tonnes Silos à appuis discrets d'une capacité supérieure à 1 000 tonnes Silos de capacité supérieure à 200 tonnes où l'une des situations de dimensionnement suivantes peut se produire : a) déchargement excentré b) charges locales partiellement réparties c) remplissage asymétrique
Classe de fiabilité 2	Tous silos couverts par cette Prénorme et n'appartenant pas à une autre classe
Classe de fiabilité 1	Silos de capacité entre 10 tonnes *) et 100 tonnes
*) Les silos de capacité inférieure à 10 tonnes ne sont pas couverts par l'Eurocode 3 partie 4-1.	

(3) Il est toujours possible d'adopter une Classe de Fiabilité supérieure à celle exigée dans le Tableau 2.1.

(4) Il convient que le choix de la Classe de Fiabilité minimale fasse l'objet d'un accord entre le concepteur, le client et l'autorité compétente.

(5) Il convient d'utiliser la Classe de Fiabilité 3 pour les charges locales partiellement réparties, qui fait référence à un cas de charge de stockage de matières provoquant une charge partiellement répartie s'étendant sur moins de la moitié de la circonférence du silo, comme défini dans l'ENV 1991-4.

(6) Pour la Classe de Fiabilité 1, il est possible d'adopter des dispositions simplifiées.

NOTE Des dispositions appropriées pour la Classe de Fiabilité 1 sont données dans l'Annexe B.

## 2.4 États limites

- (1) Il convient d'adopter les états limites définis dans l'ENV 1993-1-6 pour cette partie.

## 2.5 Actions et influences de l'environnement

### 2.5.1 Généralités

- (1) Il convient de satisfaire les exigences générales données dans la section 4 de l'ENV 1991-1.

### 2.5.2 Action du vent

(1) Étant donné que les actions du vent données dans l'ENV 1991-2-4 ne sont pas complètes pour certains cas de dimensionnement de silos légers reposant au sol isolés et en groupes, il convient de les compléter le cas échéant.

(2) Étant donné que ces grandes structures légères sont sensibles aux détails de la répartition de la pression du vent sur leurs parois, tant en ce qui concerne la résistance au voilement à vide que les détails d'ancrage exigés au niveau des fondations, il est possible d'utiliser des informations supplémentaires pour compléter les données de vent fondamentales données dans l'ENV 1991-2-4 pour les besoins spécifiques de constructions particulières.

NOTE Des informations supplémentaires appropriées concernant les répartitions de pression du vent sont données dans l'annexe D.

### 2.5.3 Combinaison des pressions des matières avec d'autres actions

(1) Il convient d'utiliser les coefficients partiels concernant les actions exercées dans les silos et les réservoirs, qui sont données en 2.10.2.1.

NOTE Etant donné que les combinaisons d'actions données dans l'ENV 1991-4 peuvent ne pas fournir d'informations spécifiques suffisantes pour la combinaison d'actions dans le cas de certains silos, des procédures recommandées pour les combinaisons d'actions sont données dans l'annexe A.

## 2.6 Propriétés des matériaux

(1) Il convient de respecter les exigences générales pour les propriétés des matériaux données dans l'ENV 1991-1.

(2) Il convient d'utiliser les propriétés des matériaux spécifiques pour les silos données dans la section 3 de la présente partie.

## 2.7 Données géométriques

(1) Il convient de suivre les dispositions concernant les données géométriques données dans la section 6 de l'ENV 1991-1.

(2) Il convient d'appliquer également les informations supplémentaires spécifiques aux structures de coque données dans l'ENV 1993-1-6.

(3) Il convient de prendre l'épaisseur de tôle de coque égale à l'épaisseur nominale. Dans le cas de tôle revêtue de métal à bain chaud conforme à l'EN 10147, il convient de prendre l'épaisseur nominale égale à l'épaisseur nominale du noyau, calculée comme l'épaisseur extérieure nominale diminuée de l'épaisseur totale de revêtement de zinc sur les deux faces.

(4) Il convient d'inclure dans le calcul, conformément à 4.1.4, les effets de la corrosion et de l'abrasion sur l'épaisseur des tôles des parois des silos.

## 2.8 Modélisation du silo pour la détermination des effets d'actions

- (1) Il convient de respecter les exigences générales données dans la section 7 de l'ENV 1991-1.
- (2) Il convient de respecter les exigences spécifiques d'analyse structurale aux états limites ultimes données dans les sections 4 à 9 de la présente partie pour chaque segment de la structure.
- (3) Il convient de respecter les exigences spécifiques d'analyse structurale aux états limites ultimes données dans les sections 4 à 9 de la présente partie, et, de façon plus détaillée, dans l'ENV 1993-1 et ENV 1993-1-7.

## 2.9 Dimensionnement assisté par l'expérimentation

- (1) Il convient de respecter les exigences générales données dans la section 8 de l'ENV 1991-1.
- (2) Pour les silos «standardisés» (production industrielle), qui sont soumis à des essais en grandeur réelle, il est possible d'adopter pour le calcul des critères «considérés comme satisfaits».

## 2.10 Effets des actions pour les vérifications aux états limites ultimes

### 2.10.1 Généralités

- (1) Il convient de satisfaire les exigences données dans la section 9 de l'ENV 1991-1.

### 2.10.2 Coefficients partiels pour les états limites ultimes

#### 2.10.2.1 Coefficients partiels pour les actions exercées sur les silos

- (1) Pour les situations de projet durables et transitoires, il convient d'utiliser les coefficients partiels  $\gamma_F$  donnés dans le Tableau 2.2.
- (2) Pour les situations de projet accidentelles, il convient de prendre les coefficients partiels pour les actions variables égaux à  $\boxed{1,0}$ .
- (3) Lorsque les composantes d'un effet vectoriel peuvent varier indépendamment, il convient de multiplier les composantes favorables par le coefficient de réduction  $\psi_{vec}$  :

$$\psi_{vec} = \boxed{0,8} \quad \dots (2.1)$$

**Tableau 2.2 — Coefficients partiels pour les actions exercées sur les silos pour les situations de projet durables et transitoires**

Effet d'action	Type de matières ensilées	Actions variables ( $\gamma_F$ )	Actions permanentes ( $\gamma_F$ )
Effet défavorable	Matières dangereuses, corrosives ou toxiques	$\boxed{1,75}$	$\boxed{1,35}$
Effet défavorable	Autres matières	$\boxed{1,50}$	$\boxed{1,35}$
Effet favorable	Toutes matières	$\boxed{0,00}$	$\boxed{0,80}$

- (4) Les coefficients de sécurité pour les silos «standardisés» (production industrielle) peuvent être spécifiés par les autorités concernées.

NOTE Lorsqu'ils sont appliqués à des silos «standardisés», les coefficients du Tableau 2.2 ne sont donnés qu'à titre indicatif. Ils servent à montrer les niveaux probables nécessaires pour obtenir une fiabilité cohérente avec d'autres calculs.

### 2.10.2.2 Coefficients partiels pour les résistances

- (1) Lorsque les caractéristiques structurales sont déterminées par des essais, il convient d'adopter les exigences et procédures de l'ENV 1991-1.
- (2) Il convient que les vérifications de fatigue satisfassent la section 9 de l'ENV 1993-1-6.
- (3) Il convient de prendre le coefficient partiel  $\gamma_M$  dans l'ENV 1993-1-1 ou dans le Tableau 2.3.

**Tableau 2.3 — Coefficients partiels pour la résistance**

Résistance au mode de ruine	$\gamma$ approprié	Valeur de $\gamma$
Résistance de paroi de coque boulonnée ou soudée à l'état limite de plastification	$\gamma_{M1a}$	1,10
Résistance de paroi de coque boulonnée ou soudée à la rupture	$\gamma_{M1b}$	1,25
Résistance de paroi de coque à la plasticité cyclique	$\gamma_{M2}$	1,00
Résistance de paroi de coque à l'instabilité	$\gamma_{M3}$	1,10
Résistance de paroi de coque à la fatigue	$\gamma_{M4}$	1,10
Résistance des assemblages	$\gamma_{M5}$	1,25

### 2.10.3 États limites de service

- (1) Lorsque des règles de conformité simplifiées sont données dans les dispositions appropriées traitant des états limites de service, il n'est pas nécessaire d'effectuer des calculs détaillés utilisant des combinaisons d'actions.
- (2) Il convient de prendre les valeurs de  $\gamma_M$  égales à 1,0 pour tous les états limites de service, sauf mention contraire dans des cas particuliers.

### 2.11 Durabilité

- (1) Il convient de respecter les exigences générales de 2.5 de l'ENV 1991-1.

### 2.12 Résistance au feu

- (1) Il convient de respecter les dispositions données dans l'ENV 1993-1-2 pour la résistance au feu.

### 3 Propriétés des matériaux

#### 3.1 Généralités

- (1)P Tous les aciers utilisés pour les silos doivent être aptes au soudage.
- (2)P Tous les aciers utilisés pour les silos de forme en plan circulaire doivent être aptes au formage à froid de tôles ou d'éléments courbes.
- (3)P Les aciers utilisés pour les constructions galvanisées doivent être aptes à la galvanisation.
- (4) Il convient de traiter les propriétés de matériaux données dans cette section comme des valeurs nominales à adopter comme valeurs caractéristiques dans le dimensionnement.
- (5) Les autres propriétés des matériaux sont données dans les Normes de Référence appropriées définies dans l'annexe B de l'ENV 1993-1-1.

#### 3.2 Aciers de construction

##### 3.2.1 Propriétés de matériau pour les aciers de construction

- (1) Les méthodes de dimensionnement par calculs données dans la présente partie 4-1 de l'ENV 1993 peuvent être utilisées pour les aciers de construction tels que définis dans l'ENV 1993-1-1 qui respectent les Normes Européennes et les Normes Internationales données dans le Tableau 3.1 pour des épaisseurs de plaques ne dépassant pas 40 mm.
- (2) Il convient d'obtenir les propriétés mécaniques des aciers de construction conformes à l'EN 10025, EN 10113 ou EN 10137, d'après l'ENV 1993-1-1 ou autres sources appropriées.
- (3) Les prises en compte de la corrosion et de l'abrasion sont données dans les sections 4 à 9 de la présente partie 4-1 pour les segments structuraux spécifiques.
- (4) Il convient de supposer que les propriétés de l'acier tendu sont les mêmes que celles de l'acier comprimé.
- (5) Pour les aciers couverts par la présente partie 4-1 de l'ENV 1993, il convient de prendre les autres propriétés de matériau à utiliser dans les calculs égales aux valeurs suivantes :

— module d'élasticité :	$E = 200\,000 \text{ N/mm}^2$
— coefficient de Poisson :	$\nu = 0,30$
— module de cisaillement :	$G = 0,5 E/(1 + \nu) = 77\,000 \text{ N/mm}^2$
— coefficient de dilatation thermique :	$\alpha = 12 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$
— masse volumique :	$\rho = 7\,850 \text{ kg/m}^3$

#### 3.3 Aciers inoxydables

##### 3.3.1 Propriétés de matériau pour les aciers inoxydables

- (1) Il convient de prendre les propriétés mécaniques des aciers inoxydables dans l'ENV 1993-1-4.
- (2) Des directives pour le choix des aciers inoxydables en ce qui concerne les actions corrosives et abrasives des matières ensilées peuvent être obtenues dans l'ENV 1993-1-4 ou autres sources appropriées.

### 3.4 Aciers alliés spéciaux

- (1) Il convient de prendre les propriétés mécaniques des aciers alliés spéciaux dans des sources appropriées.
- (2) Des directives pour le choix des aciers alliés spéciaux en ce qui concerne les actions corrosives et abrasives des matières ensilées peuvent être obtenues suivant des sources appropriées.

**Tableau 3.1 — Valeurs nominales de limite d'élasticité  $f_y$  et de résistance ultime à la traction  $f_u$**

Type d'acier	Norme	Nuance	$f_y$ MPa N/mm <sup>2</sup>	$f_u$ MPa N/mm <sup>2</sup>
Tôle d'acier laminée à chaud de qualité de construction	EN 10025	S 235	235	360
		S 275	275	430
		S 355	355	510
Tôle d'acier de construction laminée à chaud à haute limite d'élasticité — Aciers obtenus par laminage thermomécanique	EN 10113-2	S 275 M	275	360
		S 355 M	355	450
		S 420 M	420	500
		S 460 M	460	530
Tôle d'acier de construction laminée à chaud à haute limite d'élasticité — Aciers à l'état normalisé / laminage normalisant	EN 10113-3	S 275 N	275	370
		S 355 N	355	470
		S 420 N	420	520
		S 460 N	460	550
Tôle en acier de construction laminée à froid	ISO 4997	CR 220	220	300
		CR 250	250	330
		CR 320	320	400
Aciers à haute limite d'élasticité pour formage à froid — Aciers à l'état normalisé ou laminage normalisant	EN 10149-2	S 315 MC	315	390
		S 355 MC	355	430
		S 420 MC	420	480
		S 460 MC	460	520
		S 500 MC	500	550
		S 550 MC	550	600
Aciers à haute limite d'élasticité pour formage à froid — Aciers à l'état normalisé/ laminage normalisant	EN 10149-3	S 260 NC	260	370
		S 315 NC	315	430
		S 355 NC	355	470
		S 420 NC	420	530

NOTE les valeurs données dans le Tableau 3.1 ne sont valables que pour des épaisseurs de plaques ne dépassant pas 40 mm.

### 3.5 Exigences concernant la rupture fragile

- (1) Il convient de déterminer les exigences concernant la ténacité pour les aciers conformément à l'annexe C de l'ENV 1993-2 en prenant en compte les conditions de température, d'épaisseur de tôle et de bridage des soudures, ainsi que le niveau de contraintes exercées dans la plaque en acier, en fonction de la classe de fatigue considérée dans le calcul.

## 4 Bases pour l'analyse structurale

### 4.1 États limites ultimes

#### 4.1.1 Bases

(1)P Les éléments et les structures en acier doivent être dimensionnés de telle sorte que les exigences de calcul fondamentales données dans la section 2 soient satisfaites.

#### 4.1.2 Vérifications exigées

(1) Pour chaque état limite approprié, il convient que le dimensionnement satisfasse la condition suivante :

$$S_d < R_d \quad \dots (4.1)$$

où  $S$  et  $R$  représentent tout paramètre approprié.

#### 4.1.3 Fatigue et plasticité cyclique — Fatigue oligocyclique

(1) Il convient que les parties de la structure soumises à une flexion locale sévère fasse l'objet de vérifications aux états limites de fatigue et de plasticité cyclique au moyen des procédures de l'ENV 1993-1-6 et de l'ENV 1993-1-7 selon le cas.

(2) Les silos de Classe de Fiabilité 1 ne nécessitent pas de vérification de fatigue ou de plasticité cyclique.

#### 4.1.4 Prise en compte de la corrosion et de l'abrasion

(1) Il convient d'inclure les effets de l'abrasion des matières ensilées sur les parois du réservoir pendant la durée de vie de la structure dans la détermination de l'épaisseur efficace de la paroi pour l'analyse. En l'absence d'informations spécifiques, il convient de considérer qu'une paroi de silo comportant des masses en mouvement perd 2 mm de son épaisseur en raison de l'abrasion en tous points de contact avec les matières en mouvement.

(2)P Les effets de la corrosion sur la paroi en contact avec les matières ensilées pendant la durée de vie de la structure doivent être inclus dans la détermination de l'épaisseur efficace de la paroi pour l'analyse.

NOTE Pour garantir que les hypothèses de calcul sont satisfaites en service, des mesures de contrôle appropriées doivent être instituées.

#### 4.1.5 Prise en compte des effets de la température

(1) Lorsque des matières à haute température sont stockées dans le silo, il convient d'inclure les effets des différences de températures entre les parties de la structure en contact avec le matériau chaud et celles qui se sont refroidies dans la détermination de la répartition des contraintes dans la paroi.

## 4.2 Analyse de la structure d'un silo coque

### 4.2.1 Modélisation de la coque structurale

(1) Il convient que la modélisation de la coque structurale respecte les exigences de l'ENV 1993-1-6. Elles peuvent être considérées comme satisfaites par les dispositions suivantes.

(2) Il convient que la modélisation de la coque structurale intègre la totalité des raidisseurs, ouvertures importantes et fixations.

(3) Il convient dans le dimensionnement de s'assurer que les conditions aux limites supposées sont satisfaites.

## 4.2.2 Méthodes d'analyse

### 4.2.2.1 Généralités

- (1) Il convient d'effectuer l'analyse de la coque de silo conformément aux exigences de l'ENV 1993-1-6.
- (2) Une classe d'analyse supérieure à celle définie par la Classe de Fiabilité peut toujours être utilisée.

### 4.2.2.2 Classe de Fiabilité 3

(1) Pour les silos de Classe de Fiabilité 3 (voir 2.2), il convient de déterminer les sollicitations au moyen d'une analyse numérique validée (analyse de coque par éléments finis) (selon la définition de 1.4.4 et 2.2 de l'ENV 1993-1-6). On peut utiliser les résistances à l'effondrement plastique sous l'effet des états de contraintes primaires concernant l'état limite plastique, comme défini dans l'ENV 1993-1-6.

### 4.2.2.3 Classe de Fiabilité 2

(1) Pour les silos de Classe de Fiabilité 2 dans des conditions d'appui et d'actions axisymétriques, il est possible d'utiliser une des deux analyses alternatives suivantes :

- a) il est possible d'utiliser la théorie de membrane pour déterminer les contraintes primaires. On peut utiliser les expressions élastiques de théorie de flexion pour décrire tous les effets de flexion locaux ;
- b) il est possible d'utiliser une analyse numérique validée (par ex. analyse de coque par élément fini) (selon la définition des articles 1.4.4 et 2.2 de l'ENV 1993-1-6).

(2) Lorsque le chargement provoqué par les matières ensilées n'est pas axisymétrique, il convient d'utiliser une analyse numérique validée.

(3) Par dérogation à (2), lorsque le chargement varie de façon uniforme sur la périphérie de la coque en provoquant uniquement une flexion globale (c'est-à-dire en forme d'harmonique 1), il est possible d'utiliser la théorie de membrane pour déterminer les contraintes primaires.

(4) Pour les analyses des actions provoquées par les charges de vent et/ou le tassement des fondations et/ou des charges partiellement réparties variant de façon uniforme (voir l'ENV 1991-4 pour les silos en éléments minces), il est possible d'utiliser la théorie de membrane ou la théorie de semi-membrane.

(5) Lorsque l'on utilise la théorie de membrane pour calculer les contraintes primaires exercées dans la coque :

- a) des ceintures discrètes fixées sur une coque de silo cylindrique isotrope soumise à une pression intérieure peuvent être considérées comme ayant une aire efficace comprenant une longueur de coque située au-dessus et au-dessous de la ceinture de  $0.78 \sqrt{rt}$  sauf lorsque la ceinture se situe au niveau d'une zone de transition ;
- b) il convient d'évaluer séparément l'effet des contraintes de flexion locales au niveau des discontinuités de la surface de la coque et des appuis.

(6) Lorsque la coque est raidie de façon discontinue par des raidisseurs verticaux, les contraintes exercées dans les raidisseurs et la paroi de la coque peuvent être calculées en traitant les raidisseurs comme diffus sur la paroi de la coque, à condition que l'espacement des raidisseurs ne soit pas supérieur à  $5 \sqrt{rt}$ .

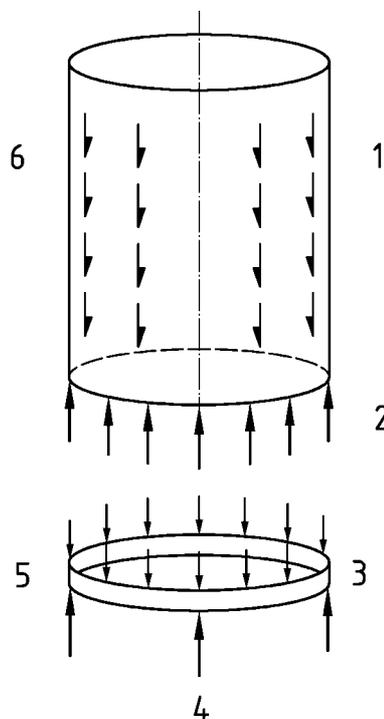
(7) Lorsque l'on utilise des raidisseurs diffus, il convient de déterminer la contrainte exercée dans le raidisseur en prenant dûment en compte la compatibilité entre le raidisseur et la paroi et en incluant l'effet de la contrainte de membrane de la paroi dans le sens orthogonal.

(8) Lorsque l'on utilise une poutre annulaire au-dessus d'appuis discrets, il est possible d'utiliser la théorie de membrane pour déterminer les contraintes primaires, mais il convient de respecter soigneusement les exigences des articles 5.4 et 8.1.5 concernant l'évaluation des contraintes primaires non axisymétriques supplémentaires.

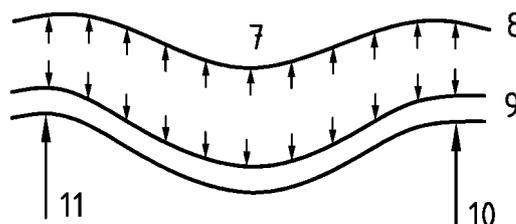
(9) Lorsqu'on utilise une poutre annulaire au-dessus d'appuis discrets, il convient d'examiner la compatibilité des déformations entre la ceinture et les segments de coque adjacents, voir Figure 4.1. Il convient d'accorder une attention particulière à la compatibilité des déformations axiales, étant donné que les contraintes induites pénètrent très haut dans la coque. Lorsqu'on utilise une telle poutre annulaire, il convient d'examiner l'excentricité de l'axe neutre de la poutre annulaire et du centre de cisaillement par rapport à la paroi de la coque et à l'axe central de l'appui, voir 8.1.5.

(10) Lorsque le silo est soumis à une forme quelconque de chargement de matières en vrac asymétrique (charges partiellement réparties, déchargement excentrique, remplissage asymétrique, etc.), il convient que le modèle structural soit conçu pour capturer la transmission du cisaillement de membrane dans la paroi du silo et entre la paroi et les ceintures.

NOTE La transmission du cisaillement entre les parties de la paroi et les ceintures revêt une importance particulière dans les constructions utilisant des boulons ou autres connecteurs discontinus (par ex. entre la paroi et la trémie, entre différentes viroles de la robe).



a) Modèle de calcul traditionnel pour les silos appuyés sur des poteaux



b) Exigence de déformation du cylindre imposée par compatibilité avec la déformation de la poutre

**Légende**

- |  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| 1 Pressions sur fond et charges sur paroi axisymétriques     | 7 Paroi de coque                    |
| 2 Appui uniforme du cylindre par poutre annulaire            | 8 Flèches verticales dans le plan   |
| 3 Chargement uniforme de la poutre annulaire par le cylindre | 9 Forme fléchie de poutre annulaire |
| 4 Appuis locaux discrets                                     | 10 Appui discret                    |
| 5 Poutre annulaire (diverses géométries de sections transv.) | 11 Appui discret                    |
| 6 Coque cylindrique  |                                     |

**Figure 4.1 — Compatibilité de déformation axiale entre poutre annulaire et coque**

(11) Lorsque l'on utilise une poutre annulaire pour transférer les forces exercées sur la paroi de silo dans des appuis discrets, et lorsque l'on utilise des boulons ou des connecteurs discrets pour fixer les éléments structuraux, il convient de déterminer la transmission de l'effort tranchant, dû aux phénomènes de flexion de la coque et de flexion de la poutre annulaire, entre les parties de la ceinture.

(12) Il convient de ne pas prendre en considération la rigidité des matières ensilées dans la résistance de la paroi aux déformations, sauf autorisation spécifique selon 5.3.

#### **4.2.2.4 Classe de Fiabilité 1**

(1) Pour les silos de Classe de Fiabilité 1, il est possible d'utiliser la théorie de membrane pour déterminer les contraintes primaires, avec des facteurs et des expressions simplifiées pour décrire les actions asymétriques et les effets locaux de flexion.

#### **4.2.3 Imperfections géométriques**

(1) Il convient que les imperfections géométriques de la coque satisfassent les limites définies selon 3.3 et 8.4 de l'ENV 1993-1-6.

(2) Pour les silos de Classes de Fiabilité 2 et 3, il convient de mesurer les imperfections géométriques à l'issue de la construction afin de s'assurer que les hypothèses concernant la qualité des tolérances de fabrication ont bien été réalisées.

(3) Il n'est pas nécessaire d'inclure explicitement les imperfections géométriques de la coque dans la détermination des sollicitations, sauf lorsqu'on utilise une analyse GMNIA (AGMNI = Analyse Géométrique et Matérielle Non-Linéaire avec Imperfections) telle que définie suivant 1.4.4 et 2.2 de l'ENV 1993-1-6.

### **4.3 Analyse de la structure de caisson d'un silo rectangulaire**

#### **4.3.1 Modélisation du caisson structural**

(1) Il convient que la modélisation du caisson structural respecte les exigences de l'ENV 1993-1-7, mais celles-ci peuvent être considérées comme satisfaites par les dispositions suivantes.

(2) Il convient que la modélisation du caisson structural comprenne la totalité des raidisseurs, ouvertures importantes et fixations.

(3) Il convient que le calcul s'assure que les conditions aux limites supposées sont satisfaites.

(4) Il convient que les joints entre segments du caisson satisfassent les hypothèses de modélisation pour la résistance et la rigidité.

(5) Il est possible de traiter chaque panneau du caisson comme un segment de plaque individuel à condition :

- a) d'inclure les sollicitations introduites dans chaque panneau par ses voisins, et
- b) d'inclure la rigidité de flexion des panneaux adjacents.

(6) Lorsqu'un panneau de paroi est raidi de façon discrète au moyen de raidisseurs horizontaux, les contraintes exercées dans les raidisseurs et la paroi du caisson peuvent être calculées en traitant les raidisseurs comme de caractéristique équivalente répartie sur la paroi afin de produire une plaque orthotrope, à condition que l'espacement des raidisseurs ne soit pas supérieur à  $40t$ .

(7) Lorsqu'on utilise des raidisseurs de caractéristique équivalente répartie, il convient de déterminer la contrainte exercée dans le raidisseur en prenant dûment en compte l'excentricité du raidisseur par rapport à la plaque de paroi, ainsi que la contrainte de paroi dans le sens orthogonal à l'axe du raidisseur.

(8) Il convient de considérer la largeur efficace de plaque de part et d'autre d'un raidisseur comme n'étant pas supérieure à  $16t$ , où  $t$  représente l'épaisseur de plaque locale.

#### 4.3.2 Imperfections géométriques

- (1) Il convient que les imperfections géométriques du caisson satisfassent les limites définies en 3.2 de l'ENV 1993-1-7.
- (2) Il n'est pas nécessaire d'inclure explicitement les imperfections géométriques du caisson dans la détermination des sollicitations.

#### 4.3.3 Méthodes d'analyse

- (1) Les sollicitations exercées dans les segments de plaques du caisson peuvent en général être déterminées par l'une des méthodes suivantes :
  - a) équilibre statique pour les forces de membrane et théorie de poutre pour la flexion ;
  - b) théorie de membrane et de flexion de plaque linéaire ;
  - c) analyse informatisée basée sur la théorie membrane et de flexion de plaque linéaire.
- (2) Pour les silos de Classe de Fiabilité 1, il est possible d'utiliser la méthode (a) de (1).
- (3) Lorsque la condition de chargement est symétrique par rapport à chaque segment de plaque et lorsque le silo est de Classe de Fiabilité 2, il est possible d'utiliser la méthode (a) de (1).
- (4) Lorsque la condition de chargement n'est pas symétrique et lorsque le silo est de Classe de Fiabilité 2, il convient d'utiliser la méthode (b) ou la méthode (c) de (1).
- (5) Pour les silos de Classe de Fiabilité 3 (2.2), il convient de déterminer les sollicitations au moyen de la méthode (b) ou de la méthode (c) de (1) (selon la définition de 3.2 de l'ENV 1993-1-7).

#### 4.4 Propriétés orthotropes équivalentes des tôles ondulées

- (1) Lorsque l'on utilise des tôles ondulées comme parties de la structure du silo, l'analyse peut être effectuée en traitant les tôles comme une paroi orthotrope uniforme équivalente.
- (2) Il est possible d'utiliser les propriétés suivantes dans une analyse des contraintes et dans une analyse du voilement de la structure, à condition que le profil d'ondulation ait une forme sinusoïdale ou d'arc et tangente. Lorsque l'on utilise d'autres profils d'ondulation, il convient de calculer les caractéristiques correspondantes d'après les principes premiers.
- (3) Il convient de définir les propriétés des tôles ondulées en fonction d'un système de coordonnées  $x, y$  dans lequel l'axe  $y$  est parallèle aux ondulations (lignes droites sur la surface) tandis que l'axe  $x$  est perpendiculaire aux ondulations (creux et sommets). Il convient de définir l'ondulation en fonction des paramètres suivants, quelque soit le profil d'ondulation réel, voir Figure 4.2 :

où :

- $d$  dimension crête à creux ;
- $\ell$  longueur d'onde de l'ondulation ;
- $R_\phi$  rayon local au niveau du sommet ou du creux.

- (4) Toutes les caractéristiques peuvent être traitées comme unidimensionnelles, en ne donnant aucun effet de Poisson entre les différents sens.

(5) Les caractéristiques de membrane équivalentes (rigidités de membrane) peuvent être prises égales aux valeurs suivantes :

$$C_x = Et_x = E \frac{2t^3}{3d^2} \quad \dots (4.2)$$

$$C_y = Et_y = Et \left( 1 + \frac{\pi^2 d^2}{4\ell^2} \right) \quad \dots (4.3)$$

$$C_{xy} = Gt_{xy} = \frac{Gt}{\left( 1 + \frac{\pi^2 d^2}{4\ell^2} \right)} \quad \dots (4.4)$$

où :

$t_x$  épaisseur équivalente pour les forces de membrane de caractéristique équivalente répartie perpendiculairement aux ondulations ;

$t_y$  épaisseur équivalente pour les forces de membrane de caractéristique équivalente répartie parallèlement aux ondulations ;

$t_{xy}$  épaisseur équivalente pour les efforts tranchants de membrane de caractéristique équivalente répartie.

(6) Les caractéristiques de flexion équivalentes (rigidités de flexion) sont définies en fonction de la rigidité de flexion pour les moments provoquant une flexion dans ce sens (non selon un axe), et elles peuvent être prises égales aux valeurs suivantes :

$$D_x = Et_x = \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)} \frac{1}{\left( 1 + \frac{\pi^2 d^2}{4\ell^2} \right)} \quad \dots (4.5)$$

$$D_y = EI_y = 0,13 E t d^2 \quad \dots (4.6)$$

$$D_{xy} = GI_{xy} = \frac{Gt^3}{12} \left( 1 + \frac{\pi^2 d^2}{4\ell^2} \right) \quad \dots (4.7)$$

où :

$I_x$  moment d'inertie de flexion équivalent pour la flexion de caractéristique équivalente répartie perpendiculairement aux ondulations ;

$I_y$  moment d'inertie de flexion équivalent pour la flexion de caractéristique équivalente répartie parallèlement aux ondulations ;

$I_{xy}$  moment d'inertie de flexion équivalent pour le gauchissement.

NOTE 1 La flexion parallèlement aux ondulations implique la rigidité de flexion du profil ondulé et constitue la raison principale de l'utilisation d'une construction ondulée.

NOTE 2 Des expressions alternatives pour les caractéristiques orthotropes équivalentes des tôles ondulées sont disponibles dans les références données dans l'annexe E.

(7) Dans les silos circulaires, où les ondulations suivent la circonférence, il convient de prendre les sens  $x$  et  $y$  dans les expressions ci-dessus comme les sens axial  $\phi$  et circonférentiel  $\theta$  respectivement, voir Figure 1.4 (a). Lorsque les ondulations suivent le méridien, il convient de prendre les sens  $x$  et  $y$  dans les expressions ci-dessus comme les sens circonférentiel  $\theta$  et axial  $\phi$  respectivement.

(8) Il convient de considérer les caractéristiques de cisaillement comme indépendantes de l'orientation de l'ondulation. La valeur de  $G$  peut être prise égale à  $E/2,6$ .

(9) Dans les silos rectangulaires, lorsque les ondulations sont horizontales, il convient de prendre les sens  $x$  et  $y$  dans les expressions ci-dessus comme les sens locaux axial  $x$  et horizontal  $y$  respectivement, voir Figure 1.4(a). Lorsque les ondulations sont verticales ou suivent le méridien, il convient d'invertir sur la structure réelle les sens  $x$  et  $y$  dans les expressions ci-dessus, et de les prendre comme les sens horizontal  $y$  et axial  $x$  respectivement.

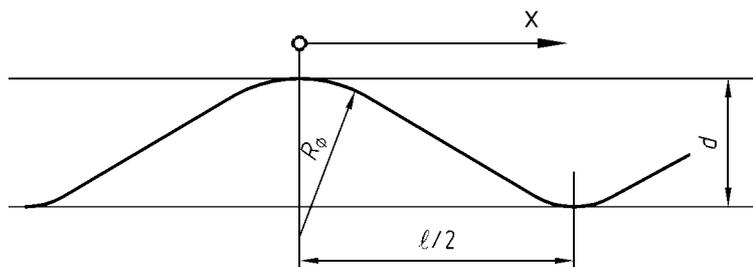


Figure 4.2 — Profil d'ondulation et paramètres géométriques

## 5 Calcul des parois cylindriques

### 5.1 Bases

#### 5.1.1 Généralités

(1)P Les parois cylindriques de silo en acier doivent être dimensionnées de telle sorte que les exigences fondamentales de dimensionnement pour les états limites ultimes données dans la section 2 soient satisfaites.

(2) Il convient de justifier la coque cylindrique en utilisant les dispositions de l'ENV 1993-1-6.

#### 5.1.2 Calcul des parois des silos

(1)P La paroi cylindrique du silo doit être vérifiée en ce qui concerne les phénomènes suivants aux états limites ultimes définis dans l'ENV 1993-1-6 :

— stabilité globale et équilibre statique.

EL1 : état limite plastique

— résistance à l'effondrement par rupture ou mécanisme plastique (plastification excessive) ou explosion ou rupture sous l'effet des pressions internes ;

— résistance des joints (assemblages).

EL2 : plastification cyclique

— résistance à la plastification locale en flexion ;

— effets locaux.

EL3 : voilement

— résistance au voilement sous compression axiale ;

— résistance au voilement sous pression extérieure (vent ou vide) ;

— résistance au voilement sous cisaillement dû à des actions asymétriques ;

— résistance au voilement sous cisaillement à proximité de poteaux solidaires ;

— résistance à la ruine locale au-dessus des appuis ;

— résistance à l'enfoncement local à proximité des ouvertures ;

— résistance au voilement local sous l'effet d'actions asymétriques.

EL4 : fatigue

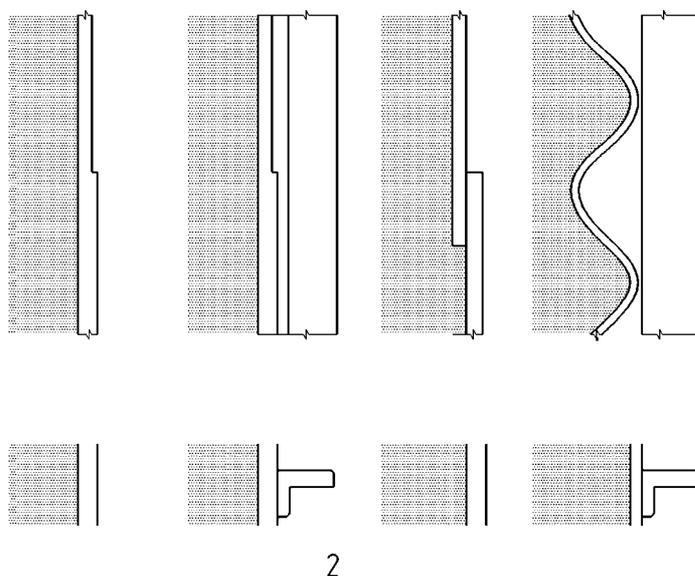
— résistance à la ruine par fatigue.

(2) Il convient que la paroi de coque satisfasse les dispositions de l'ENV 1993-1-6, sauf lorsque 5.3 à 5.7 donnent des conditions qui sont considérées comme satisfaisant les dispositions de cette norme.

(3) Pour les silos de Classe de Fiabilité 1, les états limites de fatigue et de plasticité cyclique peuvent être négligés.

## 5.2 Distinctions entre formes de coques cylindriques

- (1) Pour une paroi de coque construite en tôle d'acier laminée plane, dite «isotrope» (voir Figure 5.1), il convient de déterminer les résistances conformément à 5.3.2.
- (2) Pour une paroi de coque construite en tôles d'acier ondulées dont les ondulations suivent la circonférence du silo, dite «à ondulations horizontales» (voir Figure 5.1), il convient de déterminer les résistances conformément à 5.3.4. Pour une paroi de coque dont les ondulations suivent le méridien, dite «à ondulations verticales», il convient de déterminer les résistances conformément à 5.3.5.
- (3) Pour une paroi de coque comportant des raidisseurs fixés à l'extérieur, dite «à raidisseurs extérieurs», quel que soit l'espacement des raidisseurs, il convient de déterminer les résistances conformément à 5.3.3.
- (4) Pour une paroi de coque comportant des joints à recouvrement formés par l'assemblage de tôles adjacentes dont les sections se recouvrent, dite «à joints à recouvrement» (voir Figure 5.1), il convient de déterminer les résistances conformément à 5.3.2.



### Légende

- 1 Élévation
- 2 Plan

Parois isotrope, à raidisseurs extérieurs, à joints à recouvrement et à ondulations horizontales

Figure 5.1 — Illustrations de formes de coques cylindriques

## 5.3 Résistance des parois cylindriques de silos

### 5.3.1 Généralités

- (1) Il convient que la coque cylindrique satisfasse les dispositions de l'ENV 1993-1-6. Celles-ci peuvent être satisfaites en utilisant les évaluations de la résistance de calcul suivantes.

### 5.3.2 Parois boulonnées ou soudées isotropes

#### 5.3.2.1 Généralités

- (1)P La section transversale de coque doit être dimensionnée pour résister à la ruine par rupture ou effondrement plastique.
- (2)P Les assemblages doivent être dimensionnés pour résister à la rupture sur la section nette en utilisant la résistance ultime à la traction.
- (3) Il convient d'inclure l'excentricité des joints à recouvrement dans l'évaluation de la résistance pour la rupture.
- (4)P La paroi de coque doit être dimensionnée pour résister à une ruine par instabilité.

### 5.3.2.2 Évaluation des sollicitations de calcul

(1)P Sous l'effet de la pression interne et de toutes les charges de calcul appropriées, les sollicitations de calcul doivent être déterminées en chaque point de la coque en utilisant la variation de la pression interne, selon le cas.

(2)P Lorsque l'on utilise la théorie de membrane pour évaluer les contraintes de calcul exercées dans la paroi de coque, la résistance de la coque doit être adéquate pour résister à la pression la plus élevée en chaque point.

(3) Étant donné que des pressions hautement localisées induisent des efforts de membrane de calcul plus faibles que celles que donnerait l'utilisation de la théorie de membrane, on peut utiliser les dispositions de l'ENV 1993-1-6 pour le calcul des contraintes, le calcul plastique ou le calcul informatisé afin d'obtenir une solution de dimensionnement plus économique.

(4) Lorsqu'on utilise une analyse par théorie de membrane, le champ bidimensionnel des efforts  $n_{xSd}$ ,  $n_{\theta Sd}$  et  $n_{x\theta Sd}$  obtenu peut être évalué au moyen de la contrainte de calcul équivalente :

$$\sigma_{e,Ed} = \frac{1}{t} \sqrt{n_{xSd}^2 + n_{\theta Sd}^2 - n_{xSd} n_{\theta Sd} + 3n_{x\theta Sd}^2} \quad \dots (5.1)$$

(5) Lorsqu'on utilise une analyse élastique de flexion (analyse élastique linéaire AL ou analyse élastique géométrique non-linéaire AGN), le champ de contraintes bidimensionnel des sollicitations primaires  $n_{xSd}$ ,  $n_{\theta Sd}$ ,  $n_{x\theta Sd}$ ,  $m_{xSd}$ ,  $m_{\theta Sd}$ ,  $m_{x\theta Sd}$  obtenu peut être transformé pour obtenir les composantes de contraintes fictives :

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{n_{xSd}}{t} \pm \frac{m_{xSd}}{t^2/4}, \quad \sigma_{\theta,Ed} = \frac{n_{\theta Sd}}{t} \pm \frac{m_{\theta Sd}}{t^2/4} \quad \dots (5.2)$$

$$\tau_{x\theta,Ed} = \frac{n_{x\theta Sd}}{t} \pm \frac{m_{x\theta Sd}}{t^2/4} \quad \dots (5.3)$$

et la contrainte de calcul équivalente de Von Mises :

$$\sigma_{e,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,Ed}^2 + \sigma_{\theta,Ed}^2 - \sigma_{x,Ed} \sigma_{\theta,Ed} + 3\tau_{x\theta,Ed}^2} \quad \dots (5.4)$$

NOTE Les expressions ci-dessus (critère d'écoulement de Ilyushin) donnent une contrainte équivalente simplifiée plaçant en sécurité pour le dimensionnement.

### 5.3.2.3 État limite plastique

(1) Il convient d'évaluer la résistance de calcul en fonction des efforts de membrane comme la résistance aux contraintes équivalente pour les constructions soudées  $f_{e,Rd}$  donnée par :

$$f_{e,Rd} = f_y / \gamma_{M1a} \quad \dots (5.5)$$

(2) Il convient d'évaluer de la façon suivante la résistance de calcul à la ruine de section nette dans les constructions boulonnées en fonction des résultantes de contraintes de membrane :

- pour la résistance méridienne  $n_{xRd} = f_u t / \gamma_{M1b}$  (5.6)

- pour la résistance circonférentielle  $n_{\theta Rd} = f_u t / \gamma_{M1b}$  (5.7)

(3) Il convient de traiter la résistance aux charges locales provoquées par les fixations conformément à 5.4.6.

(4) Il convient d'effectuer le calcul des assemblages conformément à l'ENV 1993-1-1 ou ENV 1993-1-3. Il convient de prendre l'efficacité de joint des détails de joints égale à  $j = \boxed{1,0}$ . Il convient de prendre en compte l'effet des trous de fixations conformément à l'ENV 1993-1-1 en utilisant 5.4.3 pour la traction et 5.4.4 pour la compression.

(5) À chaque point de la structure, il convient que les contraintes de calcul satisfassent la condition :

$$\sigma_{e,Ed} \leq f_{e,Rd} \quad \dots (5.8)$$

(6) Au niveau de chaque joint de la structure, il convient que les contraintes de calcul satisfassent les conditions appropriées parmi les suivantes :

$$n_{xSd} \leq n_{xRd} \quad \dots (5.9)$$

$$n_{\theta Sd} \leq n_{\theta Rd} \quad \dots (5.10)$$

$$n_{x\theta Sd} \leq n_{x\theta Rd} \quad \dots (5.11)$$

### 5.3.2.4 Voilement sous compression axiale

(1) Sous compression axiale, il convient de déterminer la résistance de calcul au voilement en chaque point de la coque en utilisant la qualité de tolérance de fabrication spécifiée, l'intensité de la pression interne coexistante garantie,  $p$ , et l'uniformité circonférentielle de la contrainte de compression. Il convient que le calcul examine chaque point de la paroi de la coque, en négligeant tout renforcement associé à la variation verticale de la compression axiale, sauf lorsque les dispositions de l'ENV 1993-1-6 prévoient sa prise en compte. Dans les calculs de voilement, il convient de traiter les forces de membrane exercées en compression comme positives afin d'éviter une utilisation généralisée de nombres négatifs.

(2) Il convient d'évaluer la qualité de tolérance de fabrication spécifiée selon le Tableau 5.1.

**Tableau 5-1 — Classes de qualité de tolérance de fabrication**

Qualité de tolérance de fabrication de la construction	Paramètre de qualité, $Q$	Restrictions concernant la classe de fiabilité
Normale	16	Obligatoire pour Classe 1
Élevée	25	
Excellente	40	Seule autorisée pour Classe 3

(3) Il convient de prendre l'amplitude d'imperfection représentative  $w_{ok}$  égale à :

$$w_{ok} = \frac{t}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} \quad \dots (5.12)$$

(4) Il convient de calculer le facteur d'imperfection élastique hors pression  $\alpha_o$  ainsi :

$$\alpha_o = \frac{0,62}{1 + 1,91 \psi \left( \frac{w_{ok}}{t} \right)^{1,44}} \quad \dots (5.13)$$

où le paramètre de non-uniformité de contrainte  $\psi$  est égal à l'unité dans le cas de compression uniforme le long de la circonférence, mais est donné en (8) pour la compression non uniforme.

(5) Lorsque le silo est en pression, il convient de prendre le facteur d'imperfection élastique  $\alpha$  égal à la plus petite des deux valeurs suivantes :  $\alpha_{pe}$  et  $\alpha_{pp}$ , déterminées en fonction de la valeur locale de la pression intérieure  $p$ . Pour les silos de Classe de Fiabilité 1, il convient de ne pas prendre le facteur d'imperfection élastique  $\alpha$  supérieur à  $\alpha = \alpha_o$ .

(6) Il convient de baser le facteur d'imperfection de pression élastique  $\alpha_{pe}$  sur la pression intérieure locale la plus faible (valeur dont la présence peut être garantie) à l'emplacement du point évalué, et coexistante avec la compression axiale :

$$\alpha_{pe} = \alpha_o + \left( 1 - \alpha_o \right) \left( \frac{\bar{p}}{\bar{p} + \frac{0,3}{\sqrt{\alpha_o}}} \right) \quad \dots (5.14)$$

avec :

$$\bar{p} = \frac{pr}{t\sigma_{xRc}}$$

où :

$p$  valeur locale fiable minimum de pression intérieure.

(7) Il convient de baser le facteur d'imperfection de pression plastique  $\alpha_{pp}$  sur la pression intérieure locale la plus forte à l'emplacement du point évalué, et coexistante avec la compression axiale.

$$\alpha_{pp} = \left\{ 1 - \left( \frac{\bar{p}}{\lambda_x^2} \right)^2 \left[ 1 - \frac{1}{1,12 + s^{3/2}} \left[ \frac{s^2 + 1,21 \lambda_x^2}{s(s+1)} \right] \right] \right\} \quad \dots (5.15)$$

avec :

$$\bar{p} = \frac{pr}{t\sigma_{xRc}}$$

$$s = \left( \frac{1}{400} \right) \left( \frac{r}{t} \right)$$

$$\lambda_x^{-2} = \frac{f_y}{\sigma_{xRc}}$$

où :

$p$  valeur locale maximum de pression intérieure.

(8) Lorsque la contrainte de compression axiale est non-uniforme sur la circonférence, il convient de représenter l'effet par le paramètre  $\psi$ , qu'il convient de déterminer à partir de la répartition en élasticité linéaire des contraintes de compression axiale agissantes. Il convient de transformer la répartition des contraintes de membrane de compression axiale sur la circonférence au niveau en question comme indiqué dans la Figure 5.2. Il convient de prendre la valeur de calcul de la contrainte de membrane de compression axiale  $\sigma_{x,Ed}$  au point en question égale à  $\sigma_{x0,Ed}$ , évaluée comme la valeur la plus forte à cette coordonnée axiale. Il convient de prendre la valeur de calcul de la contrainte de membrane de compression axiale en un point situé à la même coordonnée axiale, mais séparé du point en question par la distance circonférentielle  $r\Delta\theta = 4\sqrt{rt}$ , égale à  $\sigma_{x1,Ed}$ . L'harmonique équivalente de la répartition des contraintes peut alors être obtenue ainsi :

$$\psi = \frac{(1 - b_1j)}{(1 + b_2j)} \quad \dots (5.16)$$

avec :

$$j = 0,25 \sqrt{\frac{r}{t}} \cos^{-1} \left( \frac{\sigma_{x1,Ed}}{\sigma_{x0,Ed}} \right) \quad \dots (5.17)$$

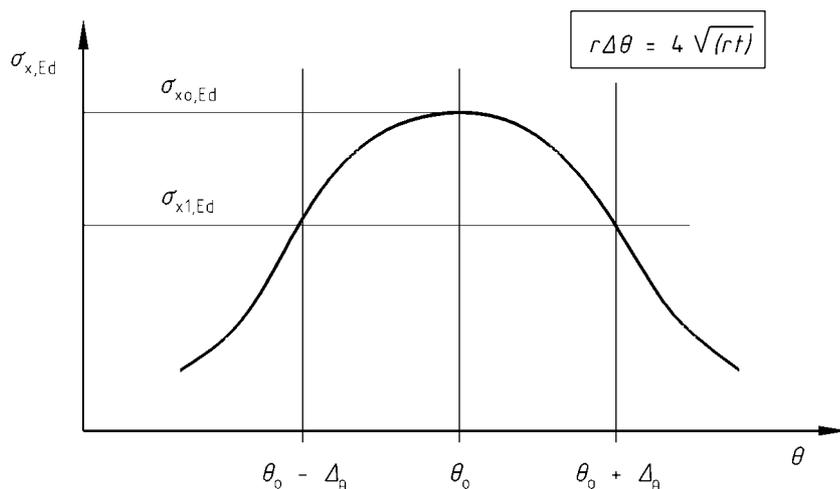
$$b_1 = 0,5 \sqrt{\frac{t}{r}} \quad \dots (5.18)$$

$$b_2 = \frac{(1 - b_1)}{\psi_b} - 1 \quad \dots (5.19)$$

où :

$\psi_b$  réduction effective de l'imperfection représentative pour les conditions de flexion globale, pouvant être prise égale à  $\psi_b = 0,40$ .

(9) La localisation harmonique où il n'y a aucune réduction en dessous de la résistance au flambement critique en raison des imperfections peut être prise égale à  $j_\infty = 1/b_1$ .



**Figure 5.2 — Représentation de la répartition locale de la contrainte axiale de membrane sur la circonférence**

(10) Lorsqu'on utilise un joint à recouvrement horizontal, entraînant un excentrement de la force axiale au droit du joint, il convient de réduire la valeur de  $\alpha$  donnée dans les alinéas (4), (5), (6), (7) et (8) ci-dessus à 70 % de sa valeur précédente si l'excentrement de la surface médiane des plaques l'une par rapport à l'autre est supérieure à  $0,5t$  et si la variation d'épaisseur de tôle au niveau du joint n'excède pas  $0,25t$ , où  $t$  représente l'épaisseur de la plaque la plus mince au niveau du joint. Lorsque l'excentrement est inférieur à cette valeur, ou lorsque la variation d'épaisseur de tôle est supérieure, aucune réduction de la valeur de  $\alpha$  n'est nécessaire.

(11) Il convient de calculer la contrainte de voilement critique de la paroi isotrope ainsi :

$$\sigma_{xRc} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \frac{t}{r} = 0,605 E \frac{t}{r} \quad \dots (5.20)$$

(12) Il convient de calculer la contrainte de voilement caractéristique au moyen de la valeur appropriée de  $\alpha$  de (4), (5), (6), (7) et (8) ci-dessus, de la façon suivante :

$$\sigma_{xRk} = \chi_x f_y \quad \dots (5.21)$$

NOTE La convention particulière utilisant  $\sigma_{Rk}$  et  $\sigma_{Rd}$  pour les résistances au flambement caractéristique et de calcul suit celle de l'ENV 1993-1-6 pour les structures de coques et diffère de celle détaillée dans l'ENV 1993-1-1.

(13) Il convient de déterminer les facteurs de réduction  $\chi_x$ ,  $\chi_\theta$  et  $\chi_t$  en fonction de l'élanement relatif de la coque  $\bar{\lambda}_x$  à partir de :

$$\chi_x = 1 \text{ quand } \bar{\lambda}_x \leq \bar{\lambda}_0 \quad \dots (5.22)$$

$$\chi_x = 1 - 0,6 \left( \frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right) \text{ quand } \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_p \quad \dots (5.23)$$

$$\chi_x = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_x} \text{ quand } \bar{\lambda}_x \leq \bar{\lambda}_x \quad \dots (5.24)$$

avec :

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{xRc}}}$$

$$\bar{\lambda}_0 = 0,2$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{2,5\alpha}$$

(14) Il convient de déterminer la contrainte de voilement de calcul ainsi :

$$\sigma_{xRd} = \sigma_{xRk} / \gamma_{M3} \quad \dots (5.25)$$

où  $\gamma_{M3}$  est donné par 2.10.2.

(15) En chaque point de la structure, il convient que les contraintes de calcul satisfassent la condition :

$$n_{xSd} \leq t \sigma_{xRd} \quad \dots (5.26)$$

(16) Il convient de déterminer l'imperfection mesurable admissible maximum, mesurée selon la procédure de l'ENV 1993-1-6, de la façon suivante :

$$\Delta w_{od} = 0,6 w_{ok} \quad \dots (5.27)$$

(17) Lorsque la paroi comporte un joint à recouvrement satisfaisant les conditions définies en (10), il n'est pas nécessaire que la mesure de l'imperfection mesurable admissible maximum soit prise sur le joint à recouvrement lui-même.

(18) Il convient de justifier la coque vis-à-vis du voilement sous compression axiale au-dessus d'un appui local, à proximité d'une console (destinée par exemple à supporter un portique de convoyeur), et à proximité d'une ouverture, conformément à 5.5.

### 5.3.2.5 Voilement sous l'effet d'une pression extérieure, d'un vide intérieur partiel et du vent

(1) Il convient d'effectuer l'évaluation du voilement en respectant les exigences de l'ENV 1993-1-6, mais celles-ci peuvent être satisfaites par l'évaluation de la résistance de calcul comme suit.

(2) Il convient que le bord inférieur de la coque cylindrique soit efficacement ancré pour résister aux déplacements verticaux, voir 5.4.7.

(3) Sous l'effet du vent ou d'un vide partiel, il convient de diviser la paroi de silo en segments situés entre les raidisseurs annulaires ou les lignes de variation d'épaisseur ou les supports.

(4) Il convient d'effectuer une évaluation du voilement sur chaque segment ou groupe de segments potentiel où un voilement pourrait survenir, en considérant le segment le plus mince et en ajoutant les autres progressivement. Il convient de calculer la pression de voilement de calcul la plus faible à partir de ces évaluations alternatives.

(5) Il convient de calculer la pression extérieure de voilement critique pour une paroi isotrope ainsi :

$$p_{nRcu} = 0,92 C_b C_p E \left( \frac{r}{\ell} \right) \left( \frac{t}{r} \right)^{2,5} \quad \dots (5.28)$$

où :

$t$  épaisseur de la partie la plus mince de la paroi ;

$\ell$  hauteur entre raidisseurs annulaires ou autres limites ;

$p_{nRcu}$  différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur, prise positive lorsqu'elle agit vers l'intérieur.

(6) Il convient d'évaluer le paramètre  $C_b$  sur la base des conditions au bord supérieur selon le Tableau 5.2.

**Tableau 5.2 — Valeurs du paramètre de voilement sous pression extérieure  $C_b$**

Condition au bord supérieur	Toit intégralement fixé à la paroi (continuité)	Ceinture supérieure satisfaisant 5.3.2.5(13)	Bord supérieur ne satisfaisant pas 5.3.2.5(13)
$C_b$	1,0	1,0	0,6

(7) Lorsque le silo se trouve dans un groupe de silos rapprochés, il convient de prendre le paramètre  $C_p$  égal à 1,0.

(8) Lorsque le silo est isolé et soumis uniquement à des charges de vent, il convient de prendre le paramètre  $C_p$  relatif à la génératrice au vent du silo égal à :

$$C_p = \frac{2,2}{\left(1 + 0,1 \sqrt{C_{b\frac{r}{L}} \frac{r}{t}}\right)} \quad \dots (5.29)$$

(9) Lorsque le silo est isolé et lorsqu'il existe une combinaison de charges de vent et de vide intérieur, il convient de déterminer la valeur de  $C_p$  comme une combinaison linéaire de 1,0 et de la valeur calculée donnée en (8), en fonction des proportions de pression extérieure provenant de chaque source.

(10) Il convient d'évaluer la pression extérieure de calcul maximum sous l'effet du vent ou du vide partiel de la façon suivante :

$$p_{nRd} = \alpha_n p_{nRcu} / \gamma_{M3} \quad \dots (5.30)$$

où  $\alpha_n = 0,5$  et  $\gamma_{M3}$  est donné en 2.10.2.

(11) Il convient que la vérification de la résistance satisfasse la condition suivante :

$$p_{Sd} \leq p_{nRd} \quad \dots (5.31)$$

où :

$p_{Sd}$  valeur de calcul de la pression extérieure maximum sous l'effet du vent ou du vide partiel.

(12) Pour que le bord supérieur d'un cylindre soit traité comme efficacement encasté par une ceinture, il convient que la ceinture satisfasse une exigence tant de résistance que de rigidité. Il convient de prendre la valeur de calcul du moment fléchissant égale à :

$$M_{Sd} = \frac{3EI_z}{r^2} w_r \quad \dots (5.32)$$

avec :

$$w_r = 2 \frac{p_{nRd} L^2}{Et} \left(\frac{L}{r}\right)^2 \left[ \frac{a_1}{1 + a_2 a_3} \right] \quad \dots (5.33)$$

$$a_1 = 1 + 2,6 \left(\frac{r}{L}\right)^2 \quad a_2 = 1 + 1,95 \left(\frac{r}{L}\right)^2 \quad a_3 = 48 \frac{I_z}{r^3 t} \left(\frac{L}{r}\right)^3$$

où :

$p_{nRd}$  pression extérieure maximum de calcul (zone de stagnation) sous l'effet du vent ou du vide partiel ;

$I_z$  moment d'inertie de flexion de la ceinture pour la flexion circonférentielle ;

$L$  hauteur totale de la paroi de coque ;

$t$  épaisseur de la virole la plus mince.

(13) Il convient que la rigidité de flexion  $EI_z$  d'une ceinture, située au niveau du bord supérieur du cylindre, selon son axe vertical (flexion circonférentielle) soit supérieure à la plus élevée des valeurs suivantes :

$$EI_{z,\min} = \boxed{0,1} E L t^3 \quad \dots (5.34)$$

et

$$EI_{z,\min} = \frac{ELr^2 t}{48 a_2} \left[ \frac{2 p_{nRd} a_1 r^2}{E w_{r,\max} t} - \left(\frac{r}{L}\right)^2 \right] \quad \dots (5.35)$$

où  $w_{r,\max}$  représente la déformation radiale admissible maximum dans les conditions de service (5.6.2.2).

### 5.3.2.6 Cisaillement de membrane

(1) Lorsqu'une grande partie de la paroi de silo est soumise à une charge de cisaillement (comme dans le cas de chargement excentrique, de charge sismique, etc.), il convient de prendre la résistance au flambement par cisaillement comme celle d'une coque soumise à une torsion à chaque niveau horizontal. La variation axiale de cisaillement peut être prise en compte dans le calcul.

(2) Il convient de calculer la contrainte critique de voilement par cisaillement de la paroi isotrope ainsi :

$$\tau_{x\theta Rc} = 0,75 E \left( \frac{r}{\ell} \right)^{0,5} \left( \frac{t}{r} \right)^{1,25} \quad \dots (5.36)$$

où :

$t$  épaisseur de la partie la plus mince de la paroi ;

$\ell$  hauteur entre raidisseurs annulaires ou autres limites.

(3) Il convient qu'un raidisseur annulaire nécessaire pour délimiter pour une zone de voilement par cisaillement possède une rigidité de flexion  $EI_z$  selon l'axe de flexion autour de la circonférence au moins égale à :

$$EI_{z,\min} = [0,1] E \sqrt{r\ell} t^3 \quad \dots (5.37)$$

où les valeurs de  $\ell$  et  $t$  sont prises égales à celles utilisées dans le mode de voilement le plus critique dans (2).

(4) Lorsque le cisaillement varie linéairement avec la hauteur dans la structure, la résistance au voilement par cisaillement critique au point de cisaillement le plus élevé peut être augmentée à :

$$\tau_{x\theta Rc} = 1,4 E \left( \frac{r}{\ell_o} \right)^{0,5} \left( \frac{t}{r} \right)^{1,25} \quad \dots (5.38)$$

avec  $\ell_o$  déterminé par :

$$\ell_o = \left( \frac{\tau}{\frac{d\tau}{dx}} \right) \quad \dots (5.39)$$

où  $\frac{d\tau}{dx}$  représente la variation axiale du cisaillement moyenne sur la zone.

(5) Lorsque des contraintes de cisaillement locales sont induites par des appuis locaux et des raidisseurs porteurs, la résistance critique au voilement par cisaillement, évaluée en fonction de la valeur locale du cisaillement transmis entre le raidisseur et la coque, peut être évaluée au point de cisaillement le plus élevé de la façon suivante :

$$\tau_{x\theta Rc} = 1,4 E \left( \frac{r}{\ell_o} \right)^{0,5} \left( \frac{t}{r} \right)^{1,25} \quad \dots (5.40)$$

où  $\ell_o$  est calculé ainsi :

$$\ell_o = \frac{\tau}{\left( \frac{d\tau}{dy} \right)} \quad \dots (5.41)$$

où  $\frac{d\tau}{dy}$  représente le taux de variation, moyenné sur la zone, du cisaillement le long de la circonférence.

(6) Il convient de déterminer la contrainte de voilement de calcul de la façon suivante :

$$\tau_{x\theta Rd} = \alpha_t \tau_{x\theta Rc} / \gamma_{M3} \quad \dots (5.42)$$

où  $\alpha_t = 0,80$  et  $\gamma_{M3}$  est donné dans 2.10.2.

(7) En chaque point de la structure, il convient que les contraintes de calcul satisfassent la condition :

$$n_{x\theta Sd} \leq t \tau_{x\theta Rd} \quad \dots (5.43)$$

### **5.3.2.7 Interactions entre compression méridienne, compression circonférentielle et cisaillement de membrane**

- (1) Lorsque l'état des contraintes dans la paroi du silo comprend des composantes significatives de plus d'une contrainte de cisaillement ou de membrane en compression, il convient de respecter les dispositions de l'ENV 1993-1-6.
- (2) Les exigences de cette interaction peuvent être négligées si toutes les composantes de contraintes de calcul sauf une sont inférieures à 20 % de la résistance de calcul au voilement correspondante.

### **5.3.2.8 Fatigue, EL4**

- (1) Pour les silos de Classe de Fiabilité 3, il convient de respecter les dispositions de l'ENV 1993-1-6.
- (2) Pour les autres Classes de Fiabilité, il convient d'effectuer une vérification de la fatigue si la durée de vie de la structure implique plus de 10.000 cycles de remplissage et vidange.

### **5.3.2.9 Plasticité cyclique, EL2**

- (1) Pour les silos de Classe de Fiabilité 3, il convient de respecter les dispositions de l'ENV 1993-1-6. Il convient d'effectuer une vérification de la ruine sous plasticité cyclique au niveau des discontinuités, à proximité des raidisseurs annulaires locaux, et à proximité des fixations.
- (2) Pour les silos appartenant à d'autres Classes de Fiabilité, cette vérification peut être omise.

## **5.3.3 Parois isotropes munies de raidisseurs verticaux**

### **5.3.3.1 Généralités**

- (1) Lorsqu'une paroi isotrope est raidie par des raidisseurs verticaux, il convient de prendre en compte l'effet du raccourcissement de la paroi en raison de la pression interne dans l'évaluation de la contrainte de compression verticale dans la paroi ainsi que dans les raidisseurs.
- (2) Il convient de calculer les résistances et les contraintes de calcul, et d'effectuer les vérifications comme indiqué en 5.3.2, mais en incluant les dispositions supplémentaires données ici.

### **5.3.3.2 État limite plastique**

- (1) Il convient de déterminer la résistance à la rupture sur un joint vertical comme pour une coque isotrope (5.3.2).
- (2) Lorsque un détail d'assemblage structural comprend le raidisseur comme participant à la transmission des tractions circonférentielles, il convient de prendre en compte l'effet de cette traction sur le raidisseur dans l'évaluation de la force exercée dans le raidisseur et de sa sensibilité à la rupture sous l'effet de la traction circonférentielle.

### **5.3.3.3 Voilement sous compression axiale**

- (1) Il convient de calculer la paroi pour les mêmes critères de voilement sous compression axiale que pour la paroi non raidie, sauf si l'espacement des raidisseurs est inférieur à  $2\sqrt{rt}$ , où  $t$  représente l'épaisseur locale de la paroi.
- (2) Lorsque les raidisseurs verticaux sont disposés selon un espacement inférieur à  $2\sqrt{rt}$ , il convient d'évaluer la résistance au voilement de la totalité de la paroi en supposant que (1) ci-dessus s'applique, ou en utilisant la procédure de l'ENV 1993-1-6 pour les coques raidies.
- (3) Il convient d'évaluer la résistance au flambement sous compression axiale des raidisseurs eux-mêmes en utilisant les dispositions de l'ENV 1993-1-1 ou de l'ENV 1993-1-3 (éléments en acier formés à froid) selon le cas.
- (4) Il convient de prendre en compte l'excentrement du raidisseur par rapport à la coque, le cas échéant.

### 5.3.3.4 Voilement sous l'effet de la pression extérieure, d'un vide partiel ou du vent

- (1) Il convient de calculer la paroi pour les mêmes critères de voilement sous pression extérieure que pour la paroi non raidie, sauf si un calcul plus rigoureux est nécessaire.
- (2) Lorsqu'un calcul plus rigoureux est nécessaire, les raidisseurs verticaux peuvent être considérés comme de caractéristique équivalente répartie pour obtenir une paroi orthotrope, et l'évaluation de la contrainte de voilement peut être effectuée au moyen des dispositions de 5.3.4.5 avec  $C_\phi = C_0 = Et$  et  $C_{\phi 0} = 0,38 Et$ .

### 5.3.3.5 Cisaillement de membrane

- (1) Lorsqu'une partie importante de la paroi de silo est soumise à un chargement de cisaillement (comme dans le cas de remplissage excentré, de charges sismiques, etc.), il convient de calculer la résistance au voilement par cisaillement de membrane comme pour une paroi non raidie isotrope (voir 5.3.2.6), mais la résistance peut être augmentée en prenant en compte les raidisseurs. La longueur équivalente  $\ell$  de coque soumise au cisaillement peut être prise égale à la plus petite des deux valeurs suivantes : hauteur entre raidisseurs annulaires ou limites, ou deux fois l'espacement horizontal des raidisseurs verticaux, à condition que chaque raidisseur possède une rigidité de flexion  $EI_y$  pour la flexion dans le sens vertical (autour d'un axe circonférentiel) supérieure à :

$$EI_{y,\min} = \overline{[0,1]} E \sqrt{r\ell} t^3 \quad \dots (5.44)$$

où les valeurs de  $\ell$  et  $t$  sont prises égales à celles utilisées dans le mode de voilement le plus critique.

- (2) Lorsqu'un raidisseur discret s'interrompt sans transition en partie courante de la coque, il convient de considérer que la force exercée dans le raidisseur est uniformément redistribuée dans la coque sur une longueur ne dépassant pas  $4\sqrt{rt}$ .
- (3) Lorsque les raidisseurs s'interrompent comme indiqué ci-dessus, ou lorsqu'ils sont utilisés pour introduire des forces locales dans la coque, il convient que la résistance évaluée pour la transmission du cisaillement entre le raidisseur et la coque ne soit pas supérieure à la valeur donnée en 5.3.2.6 pour le cisaillement variant linéairement.

## 5.3.4 Parois à ondulations horizontales

### 5.3.4.1 Généralités

- (1)P Tous les calculs doivent être effectués avec des épaisseurs excluant les revêtements et les tolérances.
- (2) Il convient que l'épaisseur d'âme d'acier minimum pour les tôles ondulées de la paroi soit de 0,68 mm.
- (3) Lorsque la paroi cylindrique est réalisée à partir de tôles ondulées dont les ondulations sont disposées horizontalement et lorsque des raidisseurs verticaux sont fixés sur la paroi, il convient de supposer que la paroi ondulée ne reprend aucune force verticale sauf si la paroi est traitée comme une coque orthotrope, voir 5.3.4.3.3.
- (4) Il convient de veiller particulièrement à s'assurer que les raidisseurs sont continus en flexion par rapport à la flexion dans le plan méridien perpendiculairement à la paroi, car la continuité de flexion du raidisseur est essentielle pour le développement de la résistance au voilement sous l'effet du vent ou de la pression extérieure, ainsi que lors de l'écoulement des matières ensilées.
- (5) Lorsque la paroi est raidie au moyen de raidisseurs verticaux, il convient de dimensionner les fixations entre les tôles et les raidisseurs de façon à garantir que les charges de cisaillement réparties provoquées par les matières ensilées (traction de frottement) sur chaque partie des tôles de parois sont bien transmises dans les raidisseurs. Il convient de choisir l'épaisseur des tôles de sorte à prévenir toute rupture locale au niveau de ces fixations, en prenant dûment en compte la réduction de résistance en pression diamétrale des fixations dans le cas de tôles ondulées.
- (6) Il convient d'effectuer le calcul des résistances, des sollicitations de calcul et les vérifications comme indiqué en 5.3.2, mais en incluant les dispositions supplémentaires données selon (1)P à (5) ci-dessus.

NOTE Des informations plus détaillées sur le calcul des silos en tôles ondulées sont disponibles dans les références données dans l'annexe E.

NOTE Des dispositions courantes de raidissage des parois sont illustrées dans la Figure 5.3.

### 5.3.4.2 Etat limite plastique

- (1) Il convient que les boulons destinés aux fixations entre panneaux satisfassent les exigences de l'ENV 1993-1-1. Il convient que la dimension des boulons ne soit pas inférieure à M8.
- (2) Il convient que les détails des joints entre les panneaux respectent les dispositions de l'ENV 1993-1-3 pour les boulons travaillant au cisaillement.
- (3) Il convient que l'espacement entre les fixations sur la circonférence ne soit pas supérieur à  $3^\circ$  de la circonférence.
- (4) Lorsque des ouvertures sont ménagées dans la paroi pour des trappes, portes, sondes ou autres dispositifs, il convient d'utiliser localement une tôle ondulée plus épaisse pour garantir que les augmentations de contraintes locales associées aux inégalités de rigidité n'entraînent pas une rupture locale.

NOTE Un détail de disposition de boulons typique pour un panneau est illustré dans la Figure 5.4.

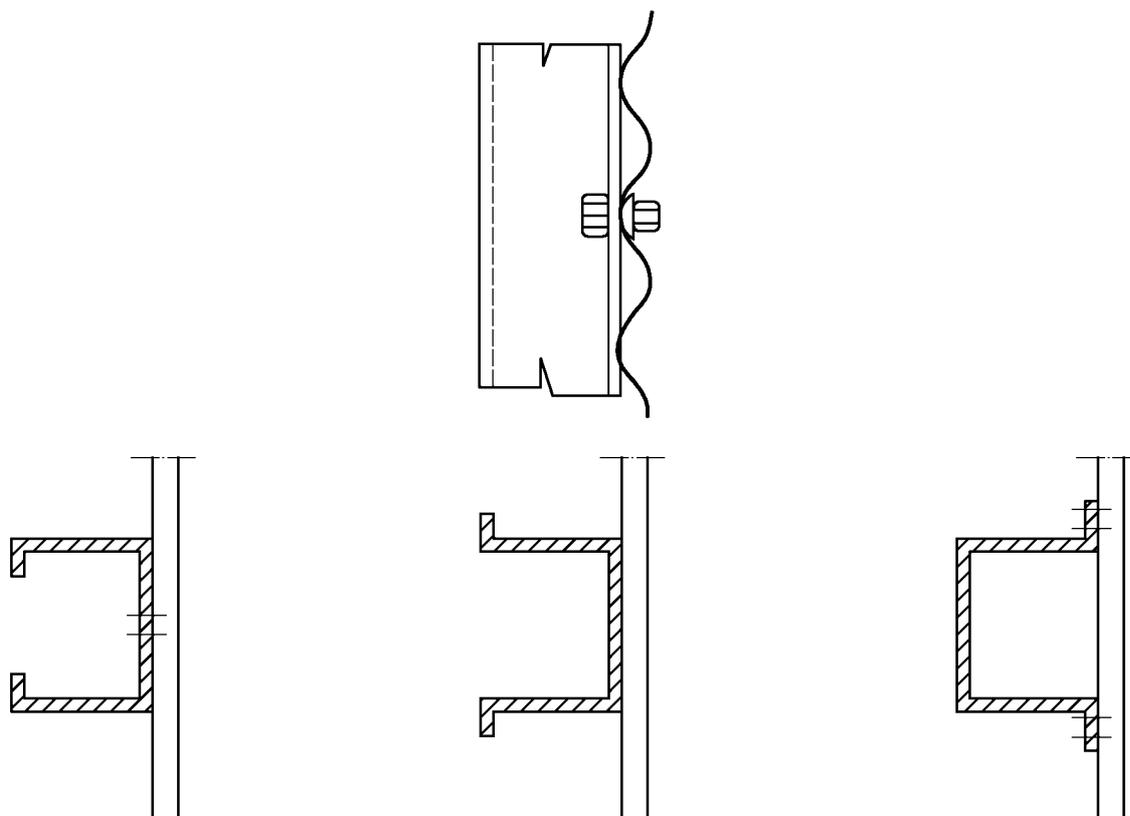


Figure 5.3 — Dispositions courantes de raidisseurs verticaux sur des coques à ondulations horizontales

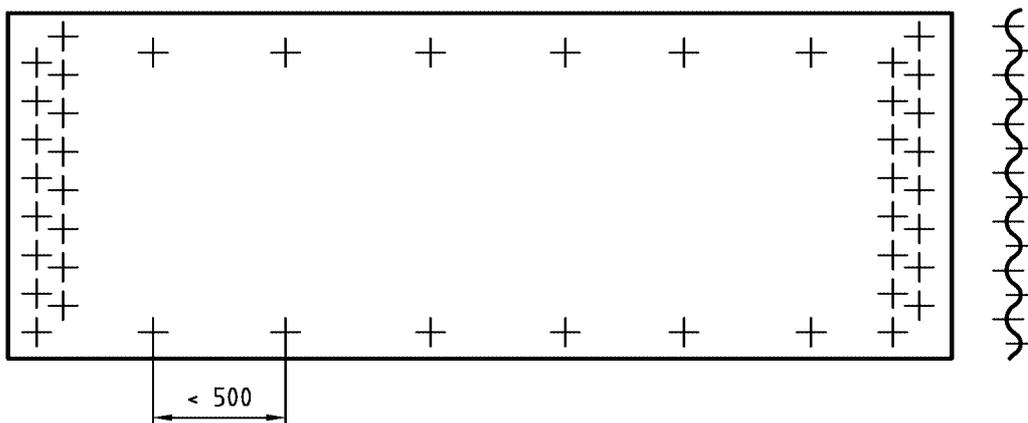


Figure 5.4 — Disposition de boulons typique pour un panneau de silo en tôles ondulées

### 5.3.4.3 Voilement sous compression axiale

#### 5.3.4.3.1 Généralités

(1) Sous compression axiale, il convient de déterminer la résistance de calcul à chaque point de la coque au moyen de la qualité de tolérance de fabrication spécifiée de la construction, de l'intensité de la pression intérieure coexistante garantie  $p$  et de l'uniformité circonférentielle de la contrainte de compression. Il convient que le calcul considère chaque point de la paroi de coque, en négligeant la variation verticale de la compression axiale, sauf lorsque les dispositions de l'ENV 1993-1-6 le prévoient.

(2) Si la paroi est raidie au moyen de raidisseurs verticaux, il convient d'effectuer le calcul au voilement de la paroi par l'une des deux méthodes alternatives suivantes :

- a) voilement de la coque orthotrope équivalente (selon 5.3.4.3.3) si la distance horizontale entre les raidisseurs satisfait 5.3.4.3.3(2) ;
- b) flambement des raidisseurs individuels (en supposant que la paroi ondulée ne supporte aucune force axiale mais qu'elle confère un maintien aux raidisseurs) et selon 5.3.4.3.4 si la distance horizontale entre les raidisseurs ne satisfait pas 5.3.4.3.3(2).

#### 5.3.4.3.2 Paroi non raidie

(1) Si la paroi ondulée n'est pas munie de raidisseurs verticaux, il convient de déterminer la valeur caractéristique de la résistance au voilement plastique local comme la plus grande des deux valeurs suivantes :

$$n_{xRk} = \frac{t^2 f_y}{2d} \quad \dots (5.45)$$

et :

$$n_{xRk} = R_\phi \frac{t}{r} f_y \quad \dots (5.46)$$

où :

$t$  épaisseur de tôle ;

$d$  amplitude sommet-creux de l'ondulation ;

$R_\phi$  courbure locale des ondulations (voir Figure 4.2) ;

$r$  rayon du cylindre.

Il convient de prendre la résistance au voilement plastique local  $n_{xRk}$  comme indépendante de la valeur de la pression intérieure  $p_n$ .

NOTE La résistance au voilement plastique local est la résistance à l'effondrement de l'ondulation, ou «enroulement».

(2) Il convient de déterminer la valeur de calcul de la résistance au voilement plastique local par :

$$n_{xRd} = \alpha_x n_{xRk} / \gamma_{M1} \quad \dots (5.47)$$

où  $\alpha_x = 0,80$  et  $\gamma_{M1}$  est donné dans l'article 2.10.2.

(3) En chaque point de la structure, il convient que les contraintes de calcul satisfassent la condition :

$$n_{xSd} \leq n_{xRd} \quad \dots (5.48)$$

### 5.3.4.3.3 Paroi raidie traitée comme une coque orthotrope

(1) Si l'on traite la paroi comme une coque orthotrope (méthode (a) de 5.3.4.3.1), il convient de prendre les rigidités des tôles dans les différents sens comme indiqué dans 4.4. Il convient de considérer les rigidités de caractéristique équivalente obtenues comme uniformément réparties.

(2) Il convient que la distance horizontale entre raidisseurs  $d_s$  ne soit pas supérieure à  $d_{s,max}$  donnée par :

$$d_{s,max} = 7,4 \left( \frac{r^2 D_y}{C_y} \right)^{0,25} \quad \dots (5.49)$$

où :

$D_y$  rigidité de flexion par unité de largeur de la tôle la plus mince parallèlement aux ondulations ;

$C_y$  rigidité membranaire par unité de largeur de la tôle la plus mince parallèlement aux ondulations ;

$r$  rayon du cylindre.

(3) Il convient d'évaluer l'effort critique de voilement  $n_{xRc}$  par unité de circonférence de la coque orthotrope (méthode (a)) à chaque niveau approprié dans le silo en minimisant l'expression suivante en fonction du nombre d'ondes circonférentielles critique,  $j$  et à la hauteur de voilement  $\ell_i$  :

$$n_{xRc} = \frac{1}{\omega^2} \left( 1 + \frac{EA_s}{C_\phi d_s} \right) \left( A_1 + \frac{A_2}{A_3} \right) \quad \dots (5.50)$$

avec :

$$A_1 = j^4 [\omega^4 C_{44} + 2\omega^2(C_{45} + C_{66}) + C_{55}] + C_{22} + 2j^2 C_{25} \quad \dots (5.51)$$

$$A_2 = 2\omega^2 (C_{12} + C_{33}) (C_{22} + j^2 C_{25}) (C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14}) - (\omega^2 C_{11} + C_{33}) (C_{22} + j^2 C_{25})^2 - \omega^2 (C_{22} + C_{25} + \omega^2 C_{33}) (C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14})^2 \quad \dots (5.52)$$

$$A_3 = (\omega^2 C_{11} + C_{33}) (C_{22} + C_{25} + \omega^2 C_{33}) - \omega^2 (C_{12} + C_{33})^2 \quad \dots (5.53)$$

avec :

$$C_{11} = C_\phi + EA_s / d_s \quad C_{22} = C_\theta + EA_r / d_r$$

$$C_{12} = \sqrt{C_\phi C_\theta} \quad C_{33} = C_{\phi\theta}$$

$$C_{14} = e_s EA_s / (rd_s) \quad C_{25} = -e_r EA_r / (rd_r)$$

$$C_{44} = [D_\phi + EI_s / d_s] / r^2 \quad C_{55} = [D_\theta + EI_r / d_r] / r^2$$

$$C_{45} = \nu \sqrt{D_\phi D_\theta} / r^2 \quad C_{66} = [D_{\phi\theta} + 0,5(GI_{ts} / d_s + GI_{tr} / d_r)] / r^2$$

$$\omega = \frac{\pi r}{j \ell_i}$$

où :

$\ell_i$  demi-longueur d'onde du voilement potentiel dans le sens vertical ;

$A_s$  aire de section transversale d'un raidisseur vertical ;

$I_s$  moment d'inertie de flexion d'un raidisseur vertical autour de l'axe circonférentiel (flexion verticale) ;

$d_s$  espacement entre raidisseurs verticaux ;

$I_{ts}$  constante de torsion uniforme d'un raidisseur vertical ;

$e_s$  excentrement vers l'extérieur, par rapport à la surface centrale de coque, d'un raidisseur vertical ;

$A_r$  aire de section transversale d'un raidisseur annulaire ;

$I_r$  moment d'inertie de flexion d'un raidisseur annulaire autour de l'axe vertical (flexion circonférentielle) ;

$d_r$  espacement entre raidisseurs annulaires ;

$I_{tr}$  constante de torsion uniforme d'un raidisseur annulaire ;

- $e_r$  excentrement vers l'extérieur, par rapport à la surface centrale de coque, d'un raidisseur annulaire ;
- $C_\phi$  rigidité membranaire des tôles dans le sens axial (voir 4.4 (5)) ;
- $C_\theta$  rigidité membranaire des tôles dans le sens circonférentiel (voir 4.4 (5)) ;
- $C_{\phi\theta}$  rigidité membranaire des tôles en cisaillement de membrane (voir 4.4 (5)) ;
- $D_\phi$  rigidité de flexion des tôles dans le sens axial (voir 4.4 (6)) ;
- $D_\theta$  rigidité de flexion des tôles dans le sens circonférentiel (voir 4.4 (6)) ;
- $D_{\phi\theta}$  rigidité de flexion par gauchissement des tôles en gauchissement (voir 4.4 (6)) ;
- $r$  rayon du silo.

NOTE Les caractéristiques ci-dessus pour les raidisseurs ( $A$ ,  $l$ ,  $l_t$ , etc.) concernent la section seule du raidisseur : on ne peut prendre en compte une section « efficace » comprenant des parties de la paroi de coque.

NOTE La limite inférieure de la zone de voilement peut être prise au point de variation de l'épaisseur des tôles ou bien au point de variation de la section transversale du raidisseur : il est nécessaire de vérifier indépendamment la résistance au voilement au niveau de chacune de ces variations.

- (5) Il convient de déterminer la résistance au voilement de calcul  $n_{xRd}$  pour la coque orthotrope (méthode (a) de 5.3.4.3.1) de la façon suivante :

$$n_{xRd} = \alpha_x \frac{1,2}{1 + \frac{5EA_s}{C_\phi d_s}} n_{xRc} / \gamma_{M3} \quad \dots (5.54)$$

où  $\alpha_x = 0,80$  et  $\gamma_{M3}$  sont donnés dans 2.10.2.

- (6) En chaque point de la structure, il convient que les contraintes de calcul satisfassent la condition :

$$n_{xSd} \leq n_{xRd} \quad \dots (5.55)$$

#### 5.3.4.3.4 Paroi raidie traitée comme supportant une compression axiale uniquement dans les raidisseurs

(1) Si l'on suppose que la tôle ondulée ne reprend aucune force axiale (méthode (b) de 5.3.4.3.1) on peut supposer que les tôles maintiennent le raidisseur vis-à-vis du flambement dans le plan de la paroi, et il convient de calculer la résistance au flambement par l'une des deux méthodes alternatives suivantes :

- a) en négligeant l'action porteuse des tôles dans la résistance au flambement perpendiculairement à la paroi ;
- b) en prenant en compte la rigidité des tôles dans la résistance au flambement perpendiculairement à la paroi.

(2) En utilisant la méthode (a) de (1), la résistance d'un raidisseur individuel peut être prise égale à la résistance à la compression centrée exercée sur le raidisseur. Il convient de calculer la résistance au flambement de calcul  $N_{bRd}$  au moyen de l'expression :

$$N_{bRd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M3}} \quad \dots (5.56)$$

où :

$A_{eff}$  aire de section transversale efficace du raidisseur.

Il convient de prendre le coefficient de réduction  $\chi$  dans l'ENV 1993-1-1 pour le flambement par flexion perpendiculairement à la paroi (autour de l'axe circonférentiel) au moyen de la courbe de flambement  $c$  quelle que soit la section adoptée (facteur d'imperfection  $\alpha = 0,49$ ). Il convient de prendre la longueur efficace de poteau utilisée pour la détermination du coefficient de réduction  $\chi$  égale à la distance entre raidisseurs annulaires adjacents.

(3) Si l'on prend en compte le maintien élastique apporté par la paroi contre le flambement du raidisseur, il convient de satisfaire les deux conditions suivantes :

- a) il convient que la section de paroi supposée conférer un maintien soit la longueur de paroi jusqu'aux raidisseurs adjacents (voir Figure 5.5), avec des conditions d'appui simples aux deux extrémités ;
- b) il convient de ne pas prendre en compte la rigidité éventuelle des matières ensilées.

(4) Sauf si l'on effectue des calculs plus précis, il convient de calculer la résistance au flambement  $N_{b,Rd}$  en supposant une compression uniforme sur la section transversale à tout niveau, au moyen de l'expression :

$$N_{b,Rd} = 2 \frac{\sqrt{E I_y K}}{\gamma_{M3}} \quad \dots (5.57)$$

où :

$E I_y$  rigidité de flexion du raidisseur pour la flexion hors du plan de la paroi ( $Nmm^2$ ) ;

$K$  rigidité de flexion de la tôle ( $N/mm$  par  $mm$  de hauteur de paroi) située entre raidisseurs verticaux, comme indiqué dans la Figure 5.5.

(5) Il convient de déterminer la rigidité de flexion de la tôle de paroi  $K$  en considérant la tôle s'étendant jusqu'aux raidisseurs verticaux adjacents de part et d'autre avec des conditions d'appui simple aux limites, voir Figure 5.5. La valeur de  $K$  peut être calculée par l'expression :

$$K = 6 \frac{D_y}{d_s^3} \quad \dots (5.58)$$

où :

$D_y$  rigidité de flexion de la tôle pour la flexion circonférentielle ;

$d_s$  espacement des raidisseurs verticaux.

Si l'ondulation a une forme en arc-et-tangente ou sinusoïdale, la valeur de  $D$  peut être prise selon 4.4(6). Si l'on adopte d'autres sections d'ondulations, il convient de déterminer la rigidité de flexion pour la flexion circonférentielle à partir des principes premiers.

(3) En chaque point du raidisseur, il convient que les contraintes de calcul satisfassent la condition :

$$N_{b,Sd} \leq N_{b,Rd} \quad \dots (5.59)$$

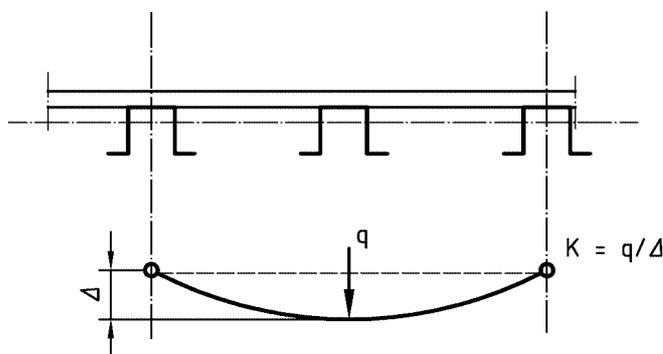


Figure 5.5 — Évaluation de la rigidité de maintien au flambement du raidisseur

#### 5.3.4.4 Voilement local, flambement par distorsion et par torsion-flexion des raidisseurs

(1) Il convient de déterminer la résistance des raidisseurs au voilement local, au flambement par torsion-flexion et distorsion au moyen de l'ENV 1993-1-3 (construction formée à froid).

#### 5.3.4.5 Flambement sous pression extérieure, vide partiel ou charge de vent

(1) Il convient de calculer les caractéristiques de flexion et de membrane équivalentes de la tôle conformément à 4.4.

(2) Il convient de déterminer les caractéristiques d'étirement et de flexion des raidisseurs annulaires et verticaux, et l'excentrement vers l'extérieur du centre de gravité de chacun d'eux par rapport à la surface médiane de la paroi de coque, ainsi que l'espacement entre les raidisseurs  $d_s$ .

- (3) Il convient que la distance horizontale entre raidisseurs  $d_s$  ne soit pas supérieure à  $d_{s,max}$  donnée par :

$$d_{s,max} = 7,4 \left( \frac{r^2 D_y}{C_y} \right)^{0,25} \quad \dots (5.49 \text{ bis})$$

où :

- $D_y$  rigidité de flexion par unité de largeur de la tôle la plus mince parallèlement aux ondulations ;  
 $C_y$  rigidité d'étirement par unité de largeur de la tôle la plus mince parallèlement aux ondulations ;  
 $r$  rayon du cylindre.

- (4) Il convient d'évaluer la contrainte critique de voilement provoquée par la pression extérieure  $p_{nRcu}$  en minimisant l'expression suivante en fonction du nombre d'ondes circonférentielles  $j$  :

$$p_{nRcu} = \frac{1}{rj^2} \left( A_1 + \frac{A_2}{A_3} \right) \quad \dots (5.60)$$

avec :

$$A_1 = j^4 [\omega^4 C_{44} + 2\omega^2(C_{45} + C_{66}) + C_{55}] + C_{22} + 2j^2 C_{25} \quad \dots (5.61)$$

$$A_2 = 2\omega^2 (C_{12} + C_{33}) (C_{22} + j^2 C_{25}) (C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14}) \quad \dots (5.62)$$

$$- (\omega^2 C_{11} + C_{33}) (C_{22} + j^2 C_{25})^2 - \omega^2 (C_{22} + C_{25} + \omega^2 C_{33}) (C_{12} + j^2 \omega^2 C_{14})^2 \quad \dots (5.63)$$

$$A_3 = (\omega^2 C_{11} + C_{33}) (C_{22} + C_{25} + \omega^2 C_{33}) - \omega^2 (C_{12} + C_{33})^2 \quad \dots (5.64)$$

avec :

$$C_{11} = C_\phi + EA_s / d_s \quad C_{22} = C_\theta + EA_r / d_r$$

$$C_{12} = v \sqrt{C_\phi C_\theta} \quad C_{33} = C_{\phi\theta}$$

$$C_{14} = e_s EA_s / (rd_s) \quad C_{25} = -e_r EA_r / (rd_r)$$

$$C_{44} = [D_\phi + EI_s / d_s] / r^2 \quad C_{55} = [D_\theta + EI_r / d_r] / r^2$$

$$C_{45} = v \sqrt{D_\phi D_\theta} / r^2 \quad C_{66} = [D_{\phi\theta} + 0,5(GI_{ts} / d_s + GI_{tr} / d_r)] / r^2$$

$$\omega = \frac{\pi r}{j \ell_i}$$

où  $\ell_i$ ,  $r$ ,  $A_s$ ,  $I_s$ ,  $I_{ts}$ ,  $d_s$ ,  $e_s$ ,  $A_r$ ,  $I_r$ ,  $I_{tr}$ ,  $d_r$  et  $e_r$  ont les significations définies en 5.3.4.3.3(3).

- (5) Lorsque les raidisseurs ou les tôles varient sur la hauteur de la paroi, il convient d'examiner plusieurs longueurs de voilement potentielles  $\ell_i$  pour déterminer laquelle est la plus critique, en supposant toujours que la crête d'un voilement se situe au sommet de la zone de tôle la plus mince.

NOTE Si l'on utilise une zone de tôle plus épaisse au-dessus de la zone comprenant la tôle la plus mince, la crête du voilement potentiel pourrait se former soit au sommet de la zone la plus mince, soit au sommet de la paroi.

- (6) Sauf si l'on effectue des calculs plus précis, il convient de prendre l'épaisseur supposée dans le calcul ci-dessus égale à l'épaisseur de la tôle la plus mince de l'ensemble.

- (7) Lorsque le silo est dépourvu de toit et lorsqu'il est potentiellement sensible à un voilement provoqué par le vent, il convient de réduire la pression calculée ci-dessus par un facteur 0,6.

- (8) Il convient de déterminer la contrainte de voilement de calcul pour la paroi au moyen de la procédure donnée en 5.3.2.5, avec  $C_b = C_p = 1,0$  et en prenant  $\alpha_n = 0,5$ , mais en adoptant la pression de voilement critique  $p_{nRcu}$  de (4) ci-dessus.

#### 5.3.4.6 Cisaillement de membrane

- (1) Il convient de déterminer la résistance au voilement de la coque sous cisaillement de membrane au moyen des dispositions de l'ENV 1993-1-6.

### **5.3.5 Parois à ondulations verticales munies de raidisseurs annulaires**

#### **5.3.5.1 Généralités**

(1) Si la paroi cylindrique est faite de tôles ondulées dont les ondulations sont disposées verticalement, il convient que les deux conditions suivantes soient satisfaites :

- a) il convient que l'on suppose que la paroi ondulée ne supporte aucune force horizontale ;
- b) il convient que l'on suppose que les tôles ondulées s'étendent entre les ceintures attachées, en utilisant l'entraxe d'espacement des ceintures, et en adoptant l'hypothèse de continuité des tôles.

(2) Il convient de concevoir les joints entre les sections de tôles afin de garantir l'obtention de la continuité de flexion.

(3) Il convient que l'évaluation de la force de compression axiale résultant du frottement provoquée par les matières ensilées sur les parois prenne en compte la circonférence totale du silo, en tenant compte de la forme de l'ondulation.

(4) Si les tôles ondulées s'étendent jusqu'au niveau de la base ou sont imposées des conditions aux limites, il convient de considérer la flexion locale des tôles au voisinage de ce niveau, en supposant un maintien radial à ce niveau.

(5) Il convient d'effectuer le calcul des résistances, des contraintes de calcul ainsi que les vérifications conformément à 5.3.2, mais en incluant les dispositions supplémentaires données de 5.3.5.2 à 5.3.5.5.

#### **5.3.5.2 État limite plastique**

(1) Lors de la vérification de l'état limite plastique, il convient de supposer que la paroi ondulée ne reprend aucune force circonférentielle.

(2) Il convient de déterminer l'espacement des raidisseurs annulaires au moyen d'une analyse de flexion de poutre du profil ondulé, en supposant que la paroi est continue sur les anneaux raidisseurs, et en incluant les conséquences de déplacements radiaux différents de raidisseurs annulaires de dimensions différentes. Il convient d'ajouter les contraintes provoquées par cette flexion à celles provoquées par la compression axiale lors de la vérification de la résistance au voilement sous compression axiale.

NOTE On peut analyser la flexion verticale des tôles en les considérant comme une poutre continue passant sur des appuis flexibles au niveau des anneaux. On détermine alors la rigidité de chaque appui à partir de la rigidité de l'anneau au chargement radial.

(3) Il convient de dimensionner les raidisseurs annulaires calculés pour supporter la charge horizontale conformément à l'ENV 1993-1-1 et à l'ENV 1993-1-3 selon le cas.

#### **5.3.5.3 Voilement sous compression axiale**

(1) Il convient de déterminer la contrainte de voilement critique pour la paroi conformément aux dispositions de l'ENV 1993-1-3 (construction formée à froid), et en considérant la section transversale des tôles ondulées comme un poteau agissant entre les raidisseurs annulaires. Il convient de prendre la longueur de flambement au moins égale à l'espacement des centres de gravité des raidisseurs annulaires adjacents.

#### **5.3.5.4 Voilement sous l'effet de la pression extérieure, d'un vide partiel ou du vent**

(1) Il convient d'évaluer la résistance de calcul sous pression extérieure de la même façon que pour les silos à ondulations horizontales (voir 5.3.4.5), mais en prenant en compte l'orientation différente des ondulations comme noté en 4.4 (7).

#### **5.3.5.5 Cisaillement de membrane**

(1) Il convient d'évaluer la résistance de calcul sous cisaillement de membrane comme pour les silos à ondulations horizontales, voir 5.3.4.6.

## 5.4 Conditions d'appui particulières pour les parois cylindriques

### 5.4.1 Coques dont le fond est totalement appuyé ou posé sur un grillage

(1) Lorsque la base de la coque cylindrique est totalement appuyée, on peut supposer que les sollicitations exercées dans la paroi de coque sont uniquement celles induites par les actions asymétriques et les charges partiellement réparties comme indiqué dans l'ENV 1991-4.

(2) Lorsque l'on utilise une construction de paroi raidie, il convient que les raidisseurs verticaux soient totalement supportés par la base et assemblés à la ceinture basse.

### 5.4.2 Coque supportée par une jupe

(1) Si la coque est supportée par une jupe (voir Figure 5.6), on peut supposer que la coque bénéficie d'un appui uniforme à condition que la jupe satisfasse l'une des deux conditions suivantes :

- la jupe est elle-même totalement et uniformément appuyée sur les fondations ;
- l'épaisseur de la jupe est d'au moins 20 % supérieure à celle de la coque, et les procédures de calcul de la poutre annulaire données dans la section 8 sont utilisées pour dimensionner la jupe et ses semelles associées.

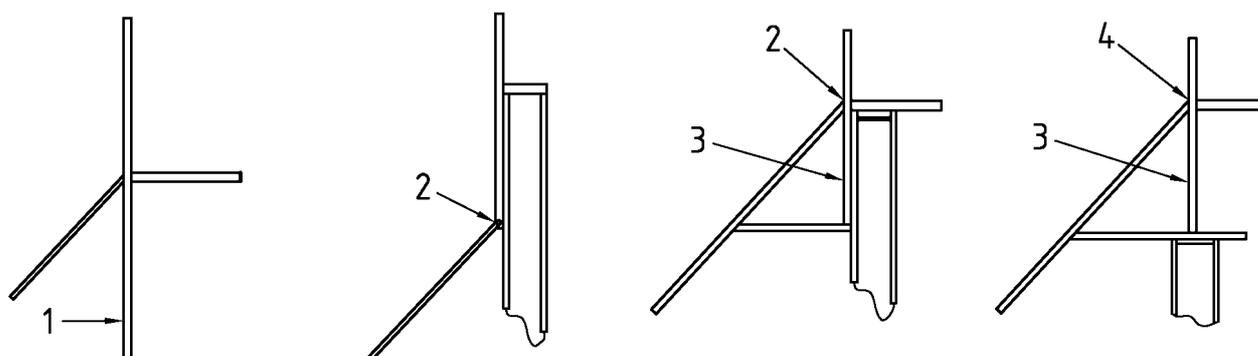
(2) Il convient de calculer la jupe pour qu'elle supporte la compression axiale exercée dans la paroi de silo sans tenir compte de l'effet favorable de la pression interne.

### 5.4.3 Paroi de coque cylindrique munie de poteaux avec prolongement

(1) Si la coque est appuyée sur des poteaux discrets en prolongement de la paroi du cylindre (voir Figure 5.6b), il convient d'inclure les effets des forces discrètes provoquées par ces appuis dans la détermination des sollicitations exercées dans la coque pour les silos de Classes de Fiabilité 2 et 3.

(2) Il convient de déterminer la longueur du prolongement du poteau conformément à l'article 5.4.6.

(3) Il convient de choisir la longueur du montant en prenant en compte l'état limite de flambement en cisaillement au voisinage du raidisseur, voir 5.3.2.6.



#### Légende

- |   |                                    |
|---|------------------------------------|
| 1 | Jupe continue sur la circonférence |
| 2 | Jonction cône/cylindrique          |
| 3 | Jupe                               |
| 4 | Centre du joint                    |

a) Coque appuyée sur une jupe

b) Coque cylindrique avec poteau prolongé

c) Poteau excentré repris sur la jupe

d) Poteau situé sous la jupe ou le cylindre

Figure 5.6 — Dispositions diverses pour l'appui d'un silo muni d'une trémie

#### 5.4.4 Coque cylindrique à appuis discrets

(1) Si la coque repose sur des appuis ou des poteaux discrets, il convient d'inclure les effets des forces discrètes provoquées par ces appuis dans la détermination des sollicitations exercées dans la coque, sauf lorsque les dispositions des alinéas (2) et (3) permettent de les négliger.

(2) Si la coque est analysée uniquement par la théorie de membrane de coques pour un chargement axisymétrique, il convient que les quatre critères suivants soient tous satisfaits :

- a) il convient que l'excentricité de l'appui situé sous la paroi de coque ne soit pas supérieure à  $2,0 t$  ;
- b) il convient que le rapport rayon-épaisseur  $r/t$  ne soit pas supérieur à  $400$  ;
- c) il convient que la paroi cylindrique soit assemblée rigidement sur une trémie possédant une épaisseur de paroi d'au moins  $1,0 t$  au niveau de la transition ;
- d) il convient que la largeur de chaque appui ne soit pas inférieure à  $1,0 \sqrt{rt}$ .

(3) Si la coque est analysée uniquement par la théorie de membrane pour un chargement axisymétrique, il convient que l'un des trois critères suivants soit satisfait :

- a) il convient que le bord supérieur de la coque reste circulaire par assemblage structural sur un toit ;
- b) il convient que le bord supérieur de la coque soit conservé circulaire par l'utilisation sur le bord supérieur d'un raidisseur annulaire possédant une rigidité de flexion  $EI_z$ , pour la flexion dans le plan du cercle, supérieur à  $EI_{z,\min}$  donnée par :

$$EI_{z,\min} = 0,1 Ert^3 \quad \dots (5.65)$$

où il convient de prendre la valeur de  $t$  égale à l'épaisseur de la partie la plus mince de la paroi.

c) il convient que la hauteur de coque  $L$  ne soit pas inférieure à  $L_{s,\min}$ , qui peut être calculée ainsi :

$$L_{s,\min} = 4,0 r \sqrt{\frac{\left(\frac{r}{t}\right)}{n(n^2 - 1)}} \quad \dots (5.66)$$

où  $n$  représente le nombre d'appuis sur la circonférence de la coque.

(4) Si l'on utilise la théorie linéaire de flexion de coque ou une analyse plus précise, il convient d'inclure les effets des contraintes localement élevées exercées au-dessus des appuis dans la vérification à l'état limite de voilement sous compression axiale, comme exposé en détail en 5.3.2.4.

(5) Il convient de dimensionner l'appui destiné à la coque de façon à satisfaire les dispositions de 5.4.5 ou 5.4.6 selon le cas.

#### 5.4.5 Silo à appuis discrets comportant des poteaux situés sous la trémie

(1) Il convient de considérer qu'un silo est appuyé sous sa trémie si la ligne verticale du centre de gravité de l'élément porteur se trouve à une distance supérieure à  $t$  à l'intérieur de la surface médiane de la coque cylindrique située au-dessus.

(2) Il convient qu'un silo appuyé sous sa trémie satisfasse les dispositions de la section 6 concernant le calcul des trémies.

(3) Il convient d'analyser un silo supporté par des poteaux sous sa trémie au moyen de la théorie linéaire de flexion de coque ou par une analyse plus précise. Il convient d'inclure les effets de flexion locale des appuis et de la compression méridienne qui apparaissent dans la partie supérieure de la trémie dans la vérification à l'état limite plastique ainsi qu'à l'état limite de voilement, et il convient d'effectuer ces vérifications conformément à l'ENV 1993-1-6.

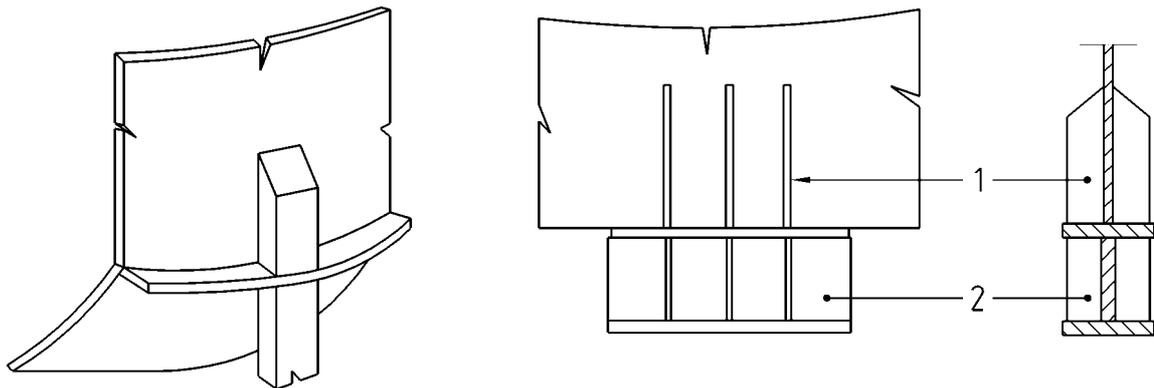
## 5.4.6 Détails d'appuis ponctuels et nervures pour l'introduction des charges dans les parois cylindriques

### 5.4.6.1 Appuis ponctuels situés sous la paroi d'un cylindre

(1)P Une console d'appui local située sous la paroi d'un cylindre doit être dimensionnée de façon à transmettre la force de calcul sans déformation irréversible localisée de l'appui ou de la paroi de coque.

(2) Il convient de dimensionner l'appui afin d'obtenir un maintien en rotation vertical, circonférentiel et méridien approprié du bord du cylindre.

Quelques dispositions d'appui possibles sont illustrés dans la Figure 5.7.



#### Légende

- 1 Raidisseurs sur le cylindre
- 2 Raidisseurs pour l'appui

**Appui ponctuel au niveau de la ceinture de transition avec poteau prolongé**

**Disposition de raidissage possible pour une paroi cylindrique supportant des charges d'appui ponctuelles élevées**

**Figure 5.7 — Dispositions d'appuis typiques**

(3) Il convient de choisir la longueur du prolongement en prenant en compte l'état limite de voilement de la coque en cisaillement au voisinage immédiat du poteau prolongé, voir 5.3.2.6.

(4) Lorsque l'on utilise des appuis discrets sans poutre annulaire, il convient que le raidisseur situé au-dessus de chaque appui soit :

- a) solidaire de la coque jusqu'aux rives, ou
- b) solidaire sur une distance d'au moins  $L_{\min}$ , déterminée par :

$$L_{\min} = 0,4 r \sqrt{\left(\frac{r}{t}\right) \frac{1}{n(n^2 - 1)}} \quad \dots (5.67)$$

où  $n$  représente le nombre d'appuis sur la circonférence de la coque.

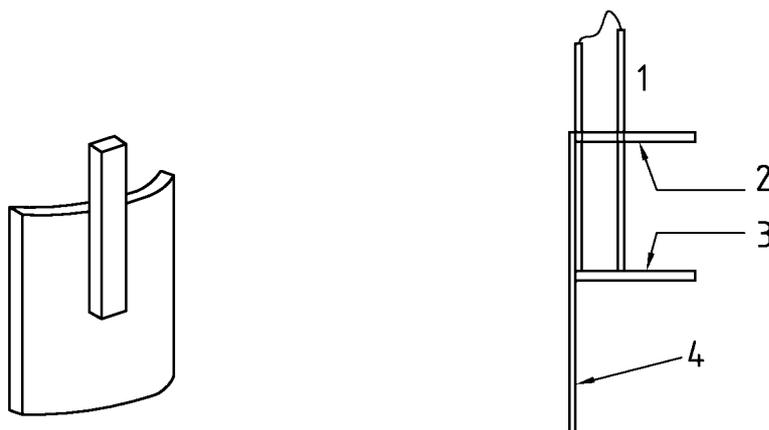
### 5.4.6.2 Nervures locales pour l'introduction des charges dans les parois cylindriques

(1)P Une nervure destinée à l'introduction des charges locales dans la paroi d'un cylindre doit être dimensionnée pour transmettre la force de calcul sans déformation irréversible localisée de l'appui ou de la paroi de coque.

(2) Il convient de choisir la longueur de solidarisation de la nervure en prenant en compte l'état limite de voilement de la coque adjacente à la nervure, voir 5.3.2.6.

(3) Il convient que le calcul de la nervure prenne en compte la nécessité de son maintien en rotation pour prévenir toute déformation radiale locale de la paroi du cylindre. En cas de nécessité, il convient d'utiliser des ceintures pour empêcher les déformations radiales.

NOTE Des détails possibles pour l'introduction des charges dans la coque au moyen de nervures locales sont illustrés dans la Figure 5.8.



**Légende**

- 1 Nervure
- 2 Ceinture supérieure
- 3 Ceinture inférieure
- 4 Paroi de coque

Nervure locale sans ceintures fixée sur la paroi cylindrique

Nervure locale avec raidisseurs annulaires pour résister aux déplacements radiaux

**Figure 5.8 — Dispositions typiques de fixations de nervures de chargement**

**5.4.7 Ancrage à la base d'un silo**

(1)P Le calcul de l'ancrage doit prendre en compte la non-uniformité circonférentielle des actions réelles agissant sur la paroi de coque. Il convient d'accorder une attention particulière aux exigences des ancrages élevées nécessaires pour la résistance locale à l'action du vent.

NOTE Les efforts d'ancrage sont habituellement sous-estimés si le silo est traité comme une poutre en console soumise à une flexion globale.

(2) Il convient que l'espacement entre les ancrages ne soit pas supérieur à la valeur dérivée de l'examen du calcul de la ceinture basse donné en 8.5.3.

(3) Sauf si l'on effectue une évaluation plus complète par une analyse numérique, il convient que le calcul de l'ancrage donne une résistance adéquate pour supporter la valeur locale de la force de soulèvement  $n_{xd}$  par unité de circonférence :

$$n_{xd} = \frac{p_{nRd}L}{2a_2} \left( \frac{L}{r} \right) \left[ 1 + \frac{3a_1}{1 + a_2a_3} \right] \quad \dots (5.68)$$

$$a_1 = 1 + 2,6 \left( \frac{r}{L} \right)^2 \quad a_2 = 1 + 1,95 \left( \frac{r}{L} \right)^2 \quad a_3 = 48 \frac{I_z}{r^3 t} \left( \frac{r}{L} \right)^3$$

où :

$p_{nRd}$  pression extérieure (zone de stagnation) maximale de calcul sous l'action du vent ou d'un vide partiel ;

$L$  hauteur totale de la paroi de coque ;

$t$  épaisseur de la virole la plus mince ;

$I_z$  moment d'inertie de flexion de la ceinture au bord supérieur du cylindre selon son axe vertical (flexion circonférentielle).

## 5.5 Dispositions constructives pour les ouvertures dans les parois cylindriques

### 5.5.1 Généralités

(1) Il convient que les ouvertures ménagées dans la paroi du silo soient renforcées par des raidisseurs verticaux et horizontaux adjacents à l'ouverture. Il convient de négliger dans le calcul toute partie de la coque se trouvant entre l'ouverture et le raidisseur.

### 5.5.2 Ouvertures rectangulaires

(1) Il convient que le renforcement vertical autour d'une ouverture rectangulaire (voir Figure 5.9) soit dimensionné de telle sorte que l'aire de section transversale des raidisseurs ne soit pas inférieure à l'aire de section transversale de la paroi perdue, mais sans être supérieure à deux fois cette valeur.

(2) Il convient que le renforcement horizontal soit dimensionné de telle sorte que l'aire de section transversale des raidisseurs ne soit pas inférieure à l'aire de section transversale de la paroi perdue.

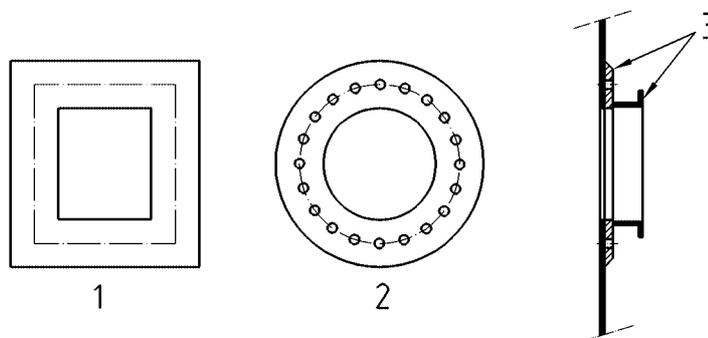
(3) Il convient de choisir la rigidité de flexion des raidisseurs perpendiculairement à un effort de membrane donné de telle sorte que le déplacement relatif  $\delta$  de la paroi de coque, dans le sens de l'effort au niveau de l'axe central de l'ouverture et provoqué par la présence de l'ouverture, ne soit pas supérieur à  $\delta_{\max}$ , déterminé ainsi :

$$\delta_{\max} = \boxed{0,02} \sqrt{\frac{t}{r}} d \quad \dots (5.69)$$

où  $d$  représente la largeur de l'ouverture perpendiculairement au sens de l'effort.

(4) Il convient que les raidisseurs verticaux s'étendent sur une distance au moins égale à  $2 \sqrt{rt}$  au-dessus et au-dessous de l'ouverture.

(5) Il convient de calculer la coque pour qu'elle supporte le voilement local de la paroi à proximité immédiate de l'extrémité des raidisseurs, selon les dispositions des articles 5.4.5 et 5.4.6 pour les charges locales.



#### Légende

- 1 Ouverture rectangulaire
- 2 Ouverture circulaire
- 3 Structure de renforcement (soudée ou boulonnée sur la paroi du silo)

**Figure 5.9 — Dispositions de raidisseurs typiques pour les ouvertures ménagées dans les parois de silos**

## 5.6 États limites de service

### 5.6.1 Bases

(1) Il convient de considérer les états limites de service suivants pour les parois de silos cylindriques en tôles d'acier :

- déformations ou flèches affectant de façon défavorable l'utilisation effective de la structure ;
- déformations, flèches, vibrations ou oscillations entraînant des détériorations des éléments non structuraux.

(2)P Les déformations, flèches et vibrations doivent être limitées pour respecter les critères ci-dessus.

(3) Il convient que des valeurs limites spécifiques appropriées à l'utilisation prévue fassent l'objet d'un accord entre le concepteur, le client et l'autorité compétente, en prenant en compte les prévisions d'utilisation et de nature des matières ensilées.

### 5.6.2 Flèches

(1) Il convient de prendre la valeur limite pour la flèche horizontale globale égale à :

$$w_{\max} = \boxed{0,02} H \quad \dots (5.70)$$

où  $H$  représente la hauteur de la structure mesurée entre la fondation et le toit.

(2) Il convient de prendre la valeur limite pour la déformation radiale locale (écart de la section transversale par rapport à la forme circulaire) sous l'effet du vent égale à la plus petite des deux valeurs suivantes :

$$w_{r,\max} = \boxed{0,05} r \quad \dots (5.71)$$

$$w_{r,\max} = \boxed{20} t \quad \dots (5.72)$$

## 6 Calcul des trémies coniques

### 6.1 Bases

#### 6.1.1 Généralités

(1) Il convient de dimensionner les trémies coniques pour satisfaire les exigences de calcul fondamentales pour les états limites ultimes données dans la section 3.

(2) Il convient de justifier la coque conique selon les dispositions de l'ENV 1993-1-6.

#### 6.1.2 Calcul de la paroi de trémie

(1) Il convient de vérifier les points suivants pour la paroi conique de la trémie :

- résistance à la rupture sous l'effet de la pression intérieure et du frottement sur paroi ;
- résistance à la plastification locale en flexion au niveau de la transition ;
- résistance à la ruine par fatigue ;
- résistance des joints (assemblages) ;
- résistance au voilement sous l'effet des charges transversales provoquées par les alimentations et les fixations ;
- effets locaux.

(2) Il convient que la paroi de coque satisfasse les dispositions de l'ENV 1993-1-6, sauf lorsque 6.3 à 6.7 donnent des conditions qui sont considérées comme satisfaisant les dispositions de cette norme.

(3) Pour les trémies de Classe de Fiabilité 1, les états limites de plasticité cyclique et de fatigue peuvent être négligés, à condition que les deux conditions suivantes soient simultanément satisfaites :

- a) il convient que le calcul pour l'état limite plastique soit effectué au moyen d'un coefficient partiel augmenté  $\gamma_{M1} = \boxed{1,4}$  ;
- b) aucun raidisseur méridien local ou appui n'est fixé sur la paroi de trémie à proximité de la zone de transition.

## 6.2 Distinctions entre formes de coque de trémie

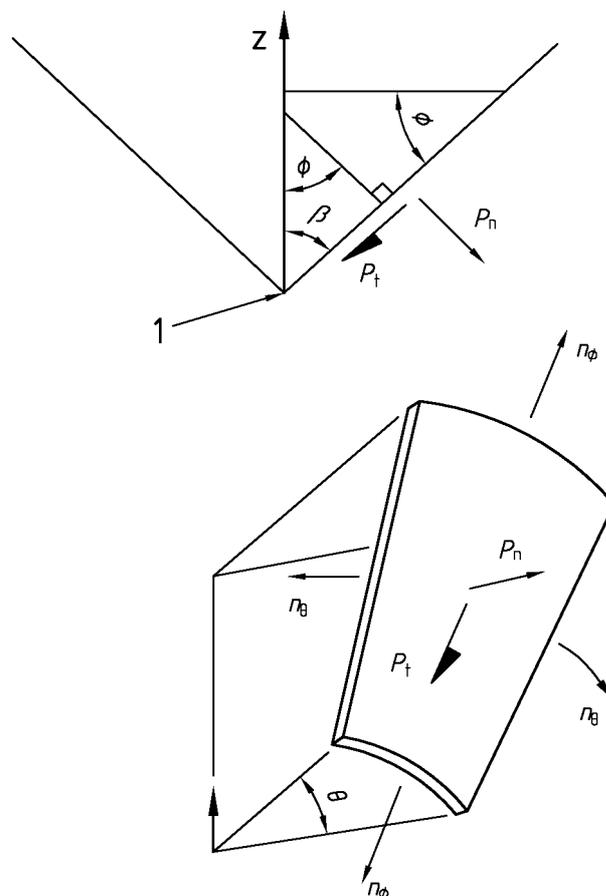
- (1) Il convient qu'une paroi de trémie construite à partir de tôles d'acier laminées planes soit appelée «isotrope».
- (2) Il convient qu'une paroi de trémie comportant des raidisseurs fixés à l'extérieur soit appelée «à raidisseurs extérieurs».
- (3) Il convient qu'une trémie comportant plusieurs orifices de vidange soit appelée «à sorties multiples».
- (4) Il convient qu'une trémie faisant partie d'un silo reposant sur des consoles ou poteaux discrets soit appelée «à appuis discrets», même si les appuis discrets ne sont pas directement situés sous la trémie.

## 6.3 Résistance des trémies coniques

### 6.3.1 Généralités

- (1) Il convient que la trémie conique satisfasse les dispositions de l'ENV 1993-1-6. Comme alternative, celles-ci peuvent être considérées comme satisfaites si l'on utilise les évaluations de la résistance de calcul données en 6.3.
- (2) Il convient d'accorder une attention particulière à l'éventualité que différentes parties de la trémie puissent être dimensionnées par l'effet des schémas de pressions des actions de remplissage ou de vidange.
- (3) Les résultantes des contraintes exercées dans le corps de la trémie peuvent en général être calculées par la théorie de membrane.

NOTE Des informations supplémentaires concernant les schémas de pressions pouvant apparaître et les efforts de la théorie de membrane exercés dans le corps de trémie sont données dans l'annexe C.



#### Légende

- 1 Origine et sommet

Figure 6.1 — Segment de coque de trémie

### 6.3.2 Trémies non raidies isotropes soudées ou boulonnées

#### 6.3.2.1 Généralités

(1)P Une trémie conique doit être traitée comme une structure de coque, en admettant le couplage des actions méridiennes et circonférentielles dans la reprise des charges.

#### 6.3.2.2 Mécanisme plastique ou rupture dans le corps de trémie

(1)P Le calcul à la rupture doit admettre que la trémie peut être soumise à des différences et à des variations des schémas de pressions dans la paroi. Étant donné que la ruine par rupture peut aisément se propager et qu'elle n'est en général pas ductile, chaque point de la trémie doit être capable de résister à la condition de calcul la plus sévère.

(2)P Les joints soudés ou boulonnés s'étendant sur le méridien de la trémie conique doivent être dimensionnés en chaque point de façon à supporter les forces de membrane les plus défavorables provoquées par la répartition des pressions de remplissage ou de vidange.

(3)P Les joints soudés ou boulonnés s'étendant sur la circonférence de la trémie doivent être dimensionnés de façon à supporter le poids total maximum des matières pouvant être appliqué au-dessous de ce point.

NOTE Ceci est en général défini par la répartition des pressions de remplissage.

#### 6.3.2.3 Rupture au niveau de la zone de transition

(1)P Le joint circonférentiel entre la trémie et la zone de transition doit être calculé pour résister à la charge méridienne totale maximum que la trémie peut être amenée à supporter, en prenant en compte des non-uniformités inévitables.

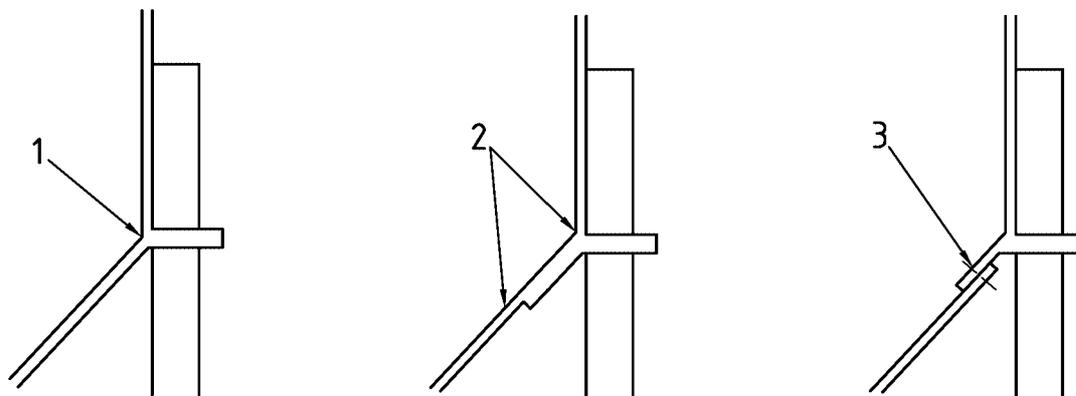
(2) Lorsque le seul chargement considéré est constitué par la gravité et l'écoulement des matières ensilées, il convient que la force méridienne par unité de circonférence devant être transmise par ce joint soit évaluée au moyen de l'équilibre global. Il convient de multiplier la valeur calculée par le facteur supplémentaire 1,2 pour prendre en compte la non-uniformité du chargement.

(3) Pour les silos de Classe de Fiabilité 2, il convient d'effectuer une analyse de flexion élastique de la trémie lorsqu'il existe d'autres charges provoquées par des appuis discrets, des alimentations, des éléments fixés, des pressions de trémie non uniformes, etc. Il convient que cette analyse détermine la valeur locale maximum de la force méridienne par unité de circonférence devant être transmise par la trémie au joint de la zone de transition.

(4) Il convient de prendre la résistance de calcul du joint  $n_{\phi Rd}$  égale à :

$$n_{\phi Rd} = \boxed{0,80} t f_u / \gamma_{M1b} \quad \dots (6.1)$$

où  $f_u$  représente la résistance à la traction.



#### Légende

- 1 Joint critique
- 2 Joints critiques
- 3 Joint critique

a) En construction soudée

b) En construction boulonnée

Figure 6.2 — Joint de transition de trémie : possibilités de rupture

### 6.3.2.4 Mécanisme plastique au niveau des variations d'épaisseur ou au niveau de la transition

(1) Il convient d'évaluer la résistance de la trémie aux mécanismes plastiques en fonction de la valeur locale de la résultante des contraintes de membrane méridienne  $n_\phi$  au niveau du bord supérieur du cône ou au niveau d'une variation d'épaisseur de la tôle.

(2) Il convient de déterminer la résistance de calcul  $n_{\phi Rd}$  au moyen de l'expression :

$$n_{\phi Rd} = \left( \frac{rt f_y}{r - 2,4 \sqrt{\frac{rt}{\cos \beta}} \sin \beta} \right) \left( \frac{0,91 \mu + 0,27}{\mu + 0,15} \right) / \gamma_{M1a} \quad \dots (6.2)$$

où :

$t$  épaisseur de paroi locale ;

$r$  rayon au sommet du mécanisme plastique (sommet de trémie ou variation d'épaisseur de tôle) ;

$\beta$  demi-angle de trémie, voir Figure 6.1 ;

$\mu$  coefficient de frottement de paroi pour la trémie.

(3) À chaque point critique de la structure, il convient que les contraintes de calcul satisfassent la condition suivante :

$$n_{\phi Sd} \leq n_{\phi Rd} \quad \dots (6.3)$$

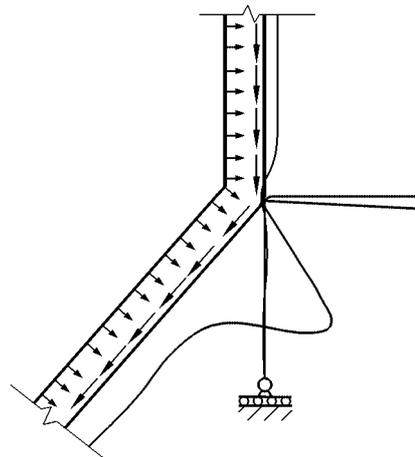


Figure 6.3 — Effondrement plastique de trémie conique

### 6.3.2.5 Flexion locale au niveau de la transition

(1)P Afin d'éviter les ruines par plasticité cyclique et fatigue, la trémie doit être calculée pour résister à la flexion locale sévère provoquée au niveau du sommet de la trémie par les effets d'équilibre et de compatibilité.

(2) Cette exigence peut être négligée pour les silos de Classe de Fiabilité 1.

(3) À défaut d'analyse de structure par éléments finis, il convient d'évaluer la valeur de la contrainte de flexion locale exercée au sommet de la trémie au moyen de la procédure suivante.

(4) Il convient de déterminer le moment  $M_{e,Sd}$  et la force radiale  $F_{e,Sd}$  effectifs agissant sur la ceinture de transition au moyen des expressions suivantes :

$$F_{e,Sd} = n_{\phi Sd} \sin \beta - F_h - F_c \quad \dots (6.4)$$

$$M_{e,Sd} = F_c x_c - F_h x_h \quad \dots (6.5)$$

avec :

$$F_c = 2 x_c p_c \quad \dots (6.6)$$

$$F_h = 2 x_h (0,85 - 0,15 \mu \cot \beta) p_h \quad \dots (6.7)$$

$$x_c = 0,39 \sqrt{r t_c} \quad \dots (6.8)$$

$$x_h = 0,39 \sqrt{\frac{r t_h}{\cos \beta}} \quad \dots (6.9)$$

où (voir Figure 8.4) :

$t_h$  épaisseur locale de paroi de la trémie ;

$t_c$  épaisseur locale de paroi du cylindre au niveau de la zone de transition ;

$r$  rayon de la zone de transition (sommet de la trémie) ;

$\beta$  demi-angle au sommet de la trémie ;

$\mu$  coefficient de frottement de paroi pour la trémie ;

$n_{\phi Sd}$  valeur de calcul de l'effort méridien de membrane au sommet de la trémie ;

$p_h$  valeur locale de pression normale exercée sur la trémie immédiatement au-dessous de la transition ;

$p_c$  valeur locale de pression nominale exercée sur le cylindre immédiatement au-dessus de la transition.

(5) Il convient de déterminer la contrainte de flexion locale  $\sigma_{b\phi h,Ed}$  exercée au sommet de la trémie au moyen de l'expression :

$$\sigma_{b\phi h,Ed} = \left(\frac{6}{\Delta}\right) \left\{ (a_2 - 2a_1 \eta) M_{e,Sd} - \rho (a_3 - a_2 \eta) F_{e,Sd} \right\} - \left(\frac{6}{t_h^2}\right) F_{e,Sd} x_h \quad \dots (6.10)$$

avec :

$$\Delta = 2a_1 a_3 - a_2^2 \quad \dots (6.11)$$

$$\rho = 0,78 \sqrt{r} \quad \dots (6.12)$$

$$\eta = \sqrt{t_h \cos \beta} \quad \dots (6.13)$$

$$a_1 = t_s^{3/2} + t_c^{3/2} + \frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos \beta}} + \frac{A_{ep}}{\rho} \quad \dots (6.14)$$

$$a_2 = t_s^2 - t_c^2 + t_h^2 \quad \dots (6.15)$$

$$a_3 = t_s^{5/2} + t_c^{5/2} + t_h^{5/2} \sqrt{\cos \beta} \quad \dots (6.16)$$

où :

$t_h$  épaisseur locale de paroi de la trémie ;

$t_c$  épaisseur locale de paroi du cylindre au niveau de la zone de transition ;

$t_s$  épaisseur locale de paroi de la jupe au-dessous de la zone de transition ;

$A_{ep}$  aire de section transversale de la ceinture au niveau de la zone de transition ;

$r$  rayon de la zone de transition (sommet de la trémie).

### 6.3.2.6 Trémies faisant partie d'un silo reposant sur des appuis discrets

- (1) Si le silo repose sur des poteaux ou appuis discrets, il convient de prendre en compte la rigidité relative de la ceinture de transition, de la paroi de cylindre et de la trémie lors de l'évaluation de la non-uniformité des contraintes de membrane méridiennes exercées dans la trémie.
- (2) Cette exigence peut être négligée pour les silos de Classe de Fiabilité 1.
- (3) Il convient de calculer la trémie pour qu'elle résiste à la valeur locale de traction méridienne la plus élevée exercée au niveau du sommet de la trémie (à proximité immédiate d'un appui) conformément à 6.3.2.3 et 6.3.2.4.

### 6.3.2.7 Voilement dans les trémies

- (1) Ce critère peut être négligé pour les silos de Classe de Fiabilité 1.
- (2) Il convient d'évaluer la trémie en ce qui concerne sa résistance à la ruine par voilement entraînée par les actions horizontales provoquées par les alimentations ou les structures fixées, ou par les actions verticales asymétriques.
- (3) Il convient de déterminer la résistance de calcul au voilement  $n_{\phi Rd}$  au sommet de la trémie au moyen de l'expression :

$$n_{\phi Rd} = 0,6\alpha_x E \left( \frac{t^2}{r} \right) \cos\beta / \gamma_{M3} \quad \dots (6.17)$$

avec  $\alpha_x = 0,10$  et  $\gamma_{M3}$  tel que donné en 2.10.2.

- (4) Il convient que la force méridienne exercée au sommet de la trémie satisfasse la condition :

$$n_{\phi Sd} \leq n_{\phi Rd} \quad \dots (6.18)$$

## 6.4 Considérations concernant les structures de trémies particulières

### 6.4.1 Structures porteuses

- (1) Il convient de traiter l'effet d'appuis discrets situés sous le silo comme indiqué en 5.4. Il convient de calculer les structures porteuses elles-mêmes conformément à l'ENV 1993-1-1, la limite entre le silo et la structure porteuse étant telle que définie dans 1.1 (4).

### 6.4.2 Trémie appuyée sur des poteaux

- (1) Si le corps de la trémie lui-même repose sur des poteaux ou des appuis discrets ne s'étendant pas jusqu'au bord supérieur de la trémie, il convient d'analyser la structure de la trémie au moyen de la théorie de flexion des coques, voir ENV 1993-1-6.
- (2)P Des dispositions appropriées doivent être prises pour répartir les forces d'appui dans la trémie.
- (3)P Les joints de la trémie doivent être calculés pour la valeur locale la plus élevée des résultantes de contraintes devant être transmises par leur intermédiaire.
- (4)P La trémie doit être évaluée en ce qui concerne la résistance à la ruine par voilement dans les zones où apparaissent des contraintes de membrane en compression, voir ENV 1993-1-6.

### 6.4.3 Trémie asymétrique

- (1) Si l'axe de la trémie n'est pas vertical mais incliné selon un angle  $\omega$  par rapport à la verticale, il convient d'évaluer les contraintes méridiennes accrues exercées sur le côté présentant la pente la plus forte associées à cette géométrie, et de prendre des dispositions adéquates pour obtenir une résistance méridienne locale appropriée.

#### 6.4.4 Cônes raidis

- (1)P Les raidisseurs verticaux doivent être convenablement ancrés au sommet de la trémie.
- (2) Si le cône de la trémie est raidi au moyen de raidisseurs méridiens, il convient d'inclure les effets de compatibilité de déformations entre la paroi et les raidisseurs. Il convient d'inclure l'effet de la traction circonférentielle exercée dans la paroi de trémie dans l'évaluation des forces exercées dans les raidisseurs verticaux et dans la plaque de paroi de la trémie, résultant de l'effet de Poisson.
- (3) Il convient de dimensionner les joints des plaques de la trémie pour qu'ils supportent l'augmentation de traction provoquée par la compatibilité de déformations.
- (4) Il convient de dimensionner la liaison entre le raidisseur et la plaque de trémie pour les forces d'interaction exercées entre eux.

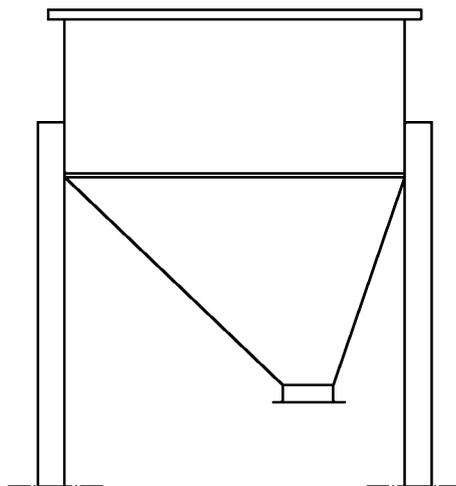


Figure 6.4 — Trémie asymétrique avec poteaux prolongés sur le cylindre

#### 6.4.5 Cônes à segments multiples

- (1) Si un cône de trémie est composé de plusieurs segments présentant des pentes différentes, il convient d'évaluer et d'inclure dans le calcul structural les actions appropriées exercées sur chaque segment par les matières ensilées.
- (2) Il convient d'évaluer les tractions ou compressions circonférentielles locales au niveau des variations de pente de la trémie, et de justifier une résistance appropriée pour les supporter.
- (3) Il convient d'inclure dans le calcul la possibilité d'une usure locale sévère au niveau de ces variations de pente de la trémie.

### 6.5 États limites de service

#### 6.5.1 Bases

- (1) Si des critères de service sont jugés nécessaires, il convient que des valeurs limites spécifiques pour les trémies fassent l'objet d'un accord entre le concepteur et le client.

#### 6.5.2 Vibrations

- (1) Il convient de prendre des dispositions pour s'assurer que la trémie n'est pas soumise à des vibrations excessives en fonctionnement.

## 7 Calcul des structures de toit coniques circulaires

### 7.1 Bases

- (1) Il convient que le calcul des structures de toit prenne en compte les charges durables, transitoires, imposées, de vent, de neige, accidentelles et de vide partiel.
- (2) Il convient que le calcul prenne également en compte la possibilité de forces de soulèvement exercées sur le toit par un remplissage excessif accidentel ou une fluidification imprévue des matières ensilées.

### 7.2 Distinctions entre différentes formes structurales de toits

#### 7.2.1 Terminologie

- (1) Il convient qu'un toit en coque conique formé de tôles laminées et dépourvu de poutres ou ceintures porteuses soit appelé «toit-coque» ou «toit sans appuis».
- (2) Il convient qu'un toit conique dans lequel les tôles sont appuyées sur des poutres ou sur un grillage soit appelé «toit à ossature» ou «toit à appuis».

### 7.3 Résistance des toits de silos coniques circulaires

#### 7.3.1 Toits-coques ou sans appuis

- (1) Il convient de calculer les toits-coques conformément aux exigences de l'ENV 1993-1-6, mais on peut considérer que les dispositions ci-dessous satisfont ces exigences pour les toits coniques d'un diamètre ne dépassant pas 5 m et présentant une inclinaison de toit par rapport à l'horizontale  $\theta$  ne dépassant pas  $40^\circ$ .
- (2) Il convient que les contraintes équivalentes de Von Mises de surface calculées sous la combinaison d'action de flexion et d'action de membrane soit partout limitées à la valeur suivante :

$$f_{eRd} = f_y / \gamma_{M1a} \quad \dots (7.1)$$

où  $\gamma_{M1a}$  est pris selon 2.10.2.

- (3) Il convient de calculer la pression extérieure critique de voilement  $p_{nRc}$  pour un toit conique isotrope au moyen de l'expression :

$$p_{nRc} = 2,65 E \left( \frac{t \cos \theta}{r} \right)^{2,43} \tan^{1,6} \theta \quad \dots (7.2)$$

où :

- $r$  rayon extérieur du toit ;  
 $t$  plus faible épaisseur de coque ;  
 $\theta$  pente du cône par rapport à l'horizontale.

- (4) Il convient de déterminer la pression extérieure de voilement de calcul par l'expression suivante :

$$p_{nRd} = \alpha_p p_{nRc} / \gamma_{M3} \quad \dots (7.3)$$

dans laquelle  $\alpha_p = 0,70$  et  $\gamma_{M3}$  est pris selon 2.10.2.

- (5) Il convient que la pression extérieure maximale de calcul exercée sur le toit par les actions définies dans 7.1 satisfassent la condition suivante :

$$p_{nSd} \leq p_{nRd} \quad \dots (7.4)$$

### 7.3.2 Toits à ossature ou à appuis

(1) Il convient de calculer les toits à ossature ou à appuis, où les tôles du toit reposent sur des poutres ou sur un grillage, conformément aux dispositions de l'ENV 1993-4-2 (Réservoirs).

### 7.3.3 Jonction des rives (jonction entre toit et coque)

(1) Il convient de calculer la jonction entre le toit et la coque, ainsi que le raidisseur annulaire situé au niveau de cette jonction, conformément aux dispositions de l'ENV 1993-4-2 (Réservoirs).

## 8 Calcul des zones de transition et des ceintures

### 8.1 Bases

#### 8.1.1 Généralités

(1) Il convient de dimensionner une poutre annulaire ou une ceinture de transition de telle sorte que les exigences de calcul fondamentales pour l'état limite ultime données dans la section 3 soient satisfaites.

(2) Il convient de justifier la ceinture en respectant les dispositions de l'ENV 1993-1-6, sauf lorsque que les dispositions de la présente Prénorme sont supposées les satisfaire.

(3) Pour les silos de Classe de Fiabilité 1, les états limites de plasticité cyclique et de fatigue peuvent être négligés, sous réserve que les conditions ci-dessous soient satisfaites.

#### 8.1.2 Calcul de la ceinture

(1) Il convient de vérifier la ceinture ou la poutre annulaire en ce qui concerne les points suivants :

- résistance plastique sous compression circonférentielle ;
- résistance au flambement sous compression circonférentielle ;
- résistance à la plastification locale sous contraintes de traction ou de compression ;
- résistance à la ruine locale au-dessus des appuis ;
- résistance à la torsion ;
- résistance des joints (assemblages).

(2) Il convient que la poutre annulaire satisfasse les dispositions de l'ENV 1993-1-6, sauf lorsque 8.2 à 8.5 donnent des conditions supposées satisfaire cette norme.

(3) Pour les silos de Classe de Fiabilité 1, les états limite de plasticité cyclique et de fatigue peuvent être négligés.

#### 8.1.3 Terminologie

(1) Il convient qu'une ceinture destinée uniquement à assurer une résistance aux composantes radiales de forces provoquées par la trémie soit appelée «ceinture de transition».

(2) Il convient qu'une ceinture destinée à assurer la redistribution des forces verticales entre différents composants (par exemple la paroi de cylindre et des appuis discrets) soit appelée «poutre ceinture».

(3) Il convient d'utiliser comme point de référence dans les vérifications à l'état limite le point d'intersection situé entre la surface médiane de la paroi de trémie et la surface médiane de la paroi de coque cylindrique au niveau de la zone de transition, appelé «centre de joint».

(4) Un silo démuné de ceinture identifiée au niveau de la transition (voir Figure 8.1) possède une ceinture effective formée par les segments de coque adjacents, qu'il convient d'appeler «ceinture naturelle».

(5) Il convient qu'une plaque annulaire placée au niveau de la zone de transition soit appelée «ceinture annulaire», voir Figure 8.1.

- (6) Il convient qu'un profil d'acier laminé à chaud utilisé comme raidisseur annulaire au niveau de la transition soit appelé «ceinture à section laminée».
- (7) Il convient qu'un profil en acier laminé disposé sur la circonférence du silo et utilisé pour supporter la coque au-dessous de la transition soit appelé «poutre ceinture laminée».
- (8) Il convient qu'un profil reconstitué à partir de plaques en acier de formes cylindrique et annulaire soit appelé «ceinture reconstituée», voir Figure 8.1.

#### 8.1.4 Modélisation de la jonction

- (1) Dans les calculs manuels, il convient de représenter la jonction uniquement par des plaques annulaires et des segments de coque cylindriques et coniques.
- (2) Lorsque le silo bénéficie d'un appui uniforme, les contraintes circonférentielles exercées dans les plaques annulaires de la jonction peuvent être considérées comme uniformes dans chaque plaque.
- (3) Lorsque le silo repose sur des poteaux ou appuis discrets, il convient de considérer que les contraintes circonférentielles exercées dans les plaques de la jonction varient radialement dans chaque plaque en raison des contraintes de gauchissement.

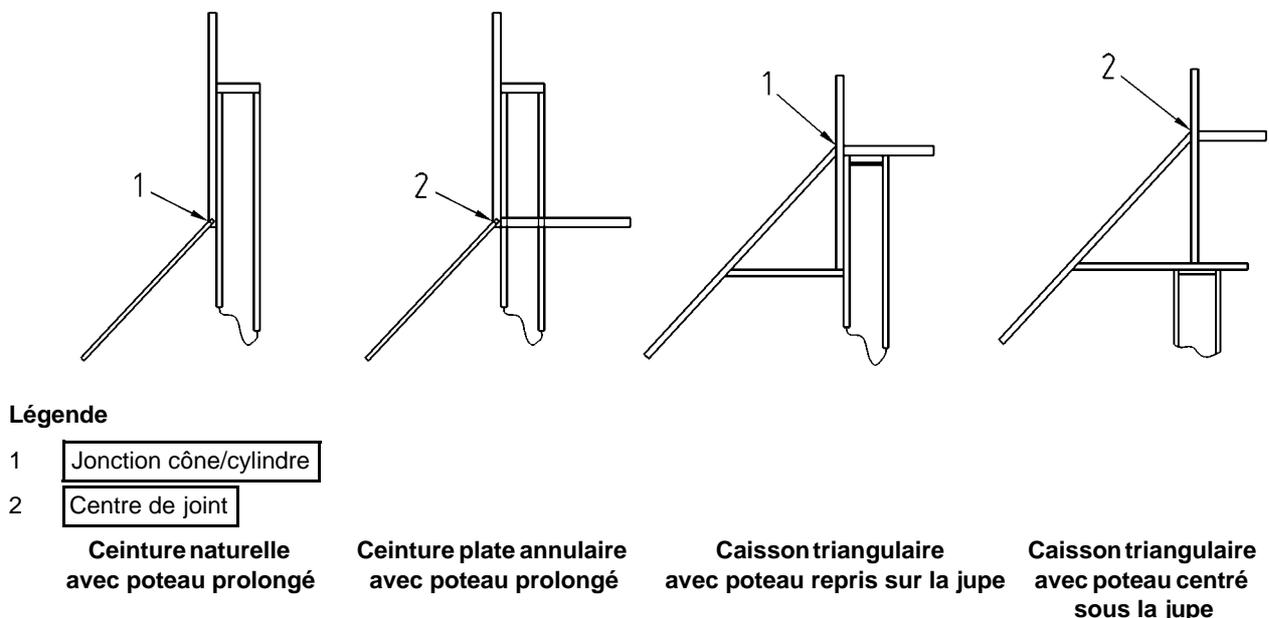


Figure 8.1 — Exemples de formes de ceintures

#### 8.1.5 Limitations concernant l'emplacement des ceintures

- (1) Il convient que l'excentrement vertical d'une ceinture ou plaque annulaire quelconque par rapport au centre de joint ne soit pas supérieur à  $0,2 \sqrt{rt}$ , où  $t$  représente l'épaisseur de la plaque de cylindre, sauf si l'on effectue un calcul de flexion de coque conformément à l'ENV 1993-1-6 pour vérifier l'effet de l'excentrement.

NOTE Cette règle est motivée par l'inefficacité des ceintures placées à une distance supérieure de la jonction, voir Figure 8.2.

- (2) Les règles simplifiées de 8.2 s'appliquent uniquement lorsque cette exigence est satisfaite.

## 8.2 Analyse de la jonction

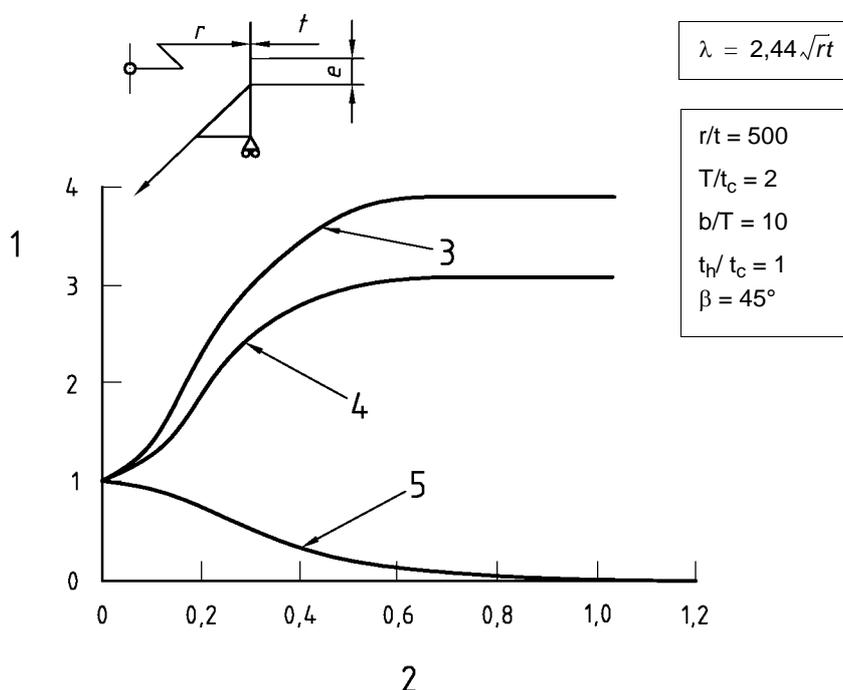
### 8.2.1 Généralités

(1) Pour les silos de Classe de Fiabilité 1, la zone de transition peut être analysée au moyen d'expressions simples et les chargements provoqués par des segments de coque adjacents peuvent être déduits de la théorie de membrane.

(2) Lorsqu'on effectue un calcul informatique de la zone de transition, il convient que ce calcul satisfasse les exigences de l'ENV 1993-1-6.

(3) Lorsque l'on n'utilise pas de calcul informatique et que le silo est appuyé uniformément, l'analyse de la jonction peut être effectuée conformément à 8.2.2.

(4) Lorsque l'on n'utilise pas de calcul informatique et que le silo repose sur des poteaux ou appuis discrets, il convient d'effectuer l'analyse de la jonction selon 8.2.3.



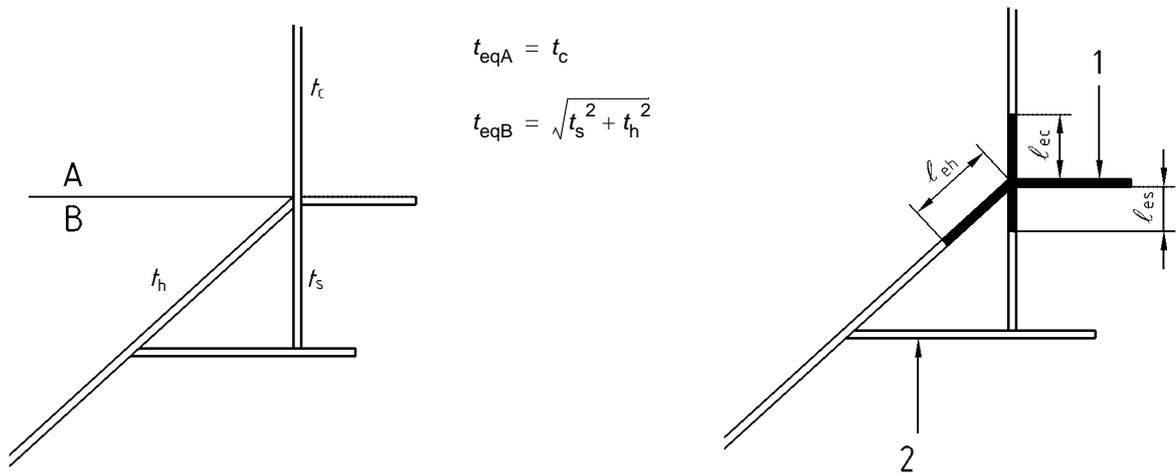
#### Légende

- 1 Rapport des contraintes tangentielles  $\frac{\sigma_{m\theta}}{\sigma_{m\theta}(e=0)}$
- 2 Excentricité adimensionnelle  $e/\lambda$
- 3 Contrainte dans la trémie
- 4 Contrainte dans la jupe
- 5 Contrainte dans la plaque annulaire

**Figure 8.2 — Contraintes de membrane apparaissant dans une ceinture et la coque adjacente lorsque la ceinture est excentrée**

### 8.2.2 Zones de transition uniformément appuyées

(1) Il convient d'évaluer la section efficace de la zone de transition de la façon suivante : il convient de séparer les segments de coque se rencontrant au centre de joint en deux groupes, ceux situés au-dessus (Groupe A) et ceux situés au-dessous (Groupe B), voir Figure 8.3. Il convient de négliger initialement tous les segments de plaque annulaire situés au niveau du centre de joint. Lorsqu'un montant vertical est fixé sur la plaque annulaire à une coordonnée radiale différente du centre de joint, il convient de le traiter comme un segment de coque de la même façon que les autres, voir Figure 8.3.



$$t_{eqA} = t_c$$

$$t_{eqB} = \sqrt{t_s^2 + t_h^2}$$

#### Légende

1 Plaque annulaire

2 Cette semelle n'est pas efficace pour la compression circonférentielle

a) Géométrie

b) Poutre annulaire efficace pour la compression circonférentielle

Figure 8.3 — Section efficace de la transition cylindre/trémie/ceinture

(2) Il convient de déterminer l'épaisseur équivalente  $t_{eqA}$  et  $t_{eqB}$  de chaque groupe par les expressions :

$$t_{eqA} = \sqrt{\sum_A t^2} \quad \dots (8.1)$$

$$t_{eqB} = \sqrt{\sum_B t^2} \quad \dots (8.2)$$

(3) Il convient de déterminer le rapport  $\alpha$  du plus mince au plus épais des groupes de plaques équivalents au moyen de l'expression :

$$\alpha = \frac{(t_{eq})_{mince}}{(t_{eq})_{épais}} \quad \dots (8.3)$$

avec :

$$(t_{eq})_{mince} = \min(t_{eqA}, t_{eqB}) \quad \dots (8.4)$$

$$(t_{eq})_{épais} = \max(t_{eqA}, t_{eqB}) \quad \dots (8.5)$$

(4) Pour le plus mince de ces deux groupes, il convient de déterminer la longueur efficace de chaque segment de coque par l'expression :

$$\ell_{e1} = 0,78 \sqrt{\frac{rt}{\cos\beta}} \quad \dots (8.6)$$

où  $\beta$  représente l'angle entre l'axe central de la coque et l'axe du silo (demi-angle au sommet du cône) pour cette plaque. Il convient de déterminer l'aire de section transversale efficace de chaque segment de coque au moyen de l'expression :

$$A_e = \ell_e t \quad \dots (8.7)$$

Pour le plus épais de ces deux groupes, il convient de déterminer la longueur efficace de chaque segment de coque par l'expression :

$$\ell_e = 0,389 \left[ 1 + 3\alpha^2 - 2\alpha^3 \right] \sqrt{\frac{rt}{\cos\beta}} \quad \dots (8.8)$$

Pour ce groupe, il convient de déterminer l'aire de section transversale efficace de chaque segment de coque au moyen de l'expression :

$$A_e = \ell_e t \quad \dots (8.9)$$

(5) Il convient de déterminer l'aire de section transversale efficace  $A_{ep}$  de la plaque annulaire rejoignant la jonction au niveau du centre de joint par l'expression suivante :

$$A_{ep} = \frac{bt_p}{1 + 0,8 \frac{b}{r}} \quad \dots (8.10)$$

où :

- $r$  rayon de la paroi de cylindre du silo ;
- $b$  largeur radiale de la plaque annulaire ;
- $t_p$  épaisseur de la plaque annulaire.

(6) Il convient de déterminer l'aire efficace totale  $A_{et}$  de la ceinture en compression circonférentielle au moyen de l'expression :

$$A_{et} = A_{ep} + \sum_{\text{Tous segments}} A_e \quad \dots (8.11)$$

(7) Lorsque la jonction n'est composée que d'un cylindre, d'une jupe et d'une trémie (voir Figure 8.4), l'aire efficace totale de la ceinture  $A_{et}$  peut alternativement être calculée par l'expression :

$$A_{et} = A_{ep} + 0,778 \sqrt{r \left\{ t_c^{3/2} + \psi \left( \frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos\beta}} + t_s^{3/2} \right) \right\}} \quad \dots (8.12)$$

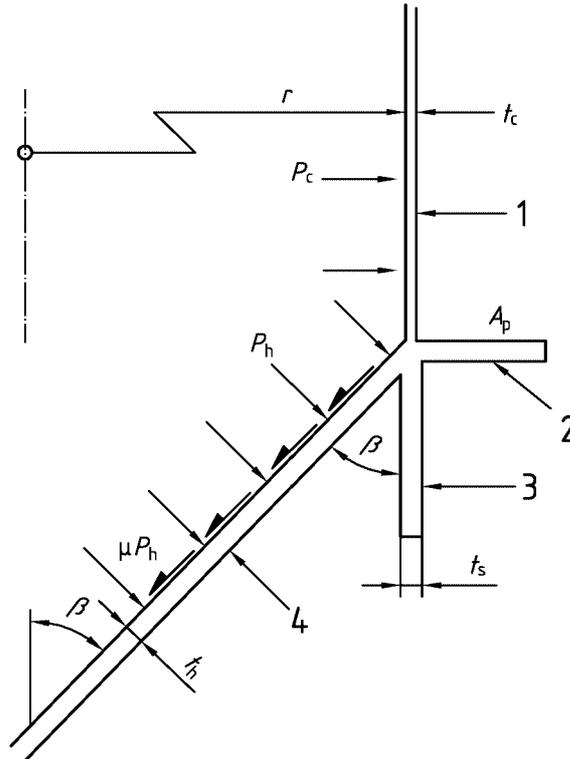
avec :

$$\psi = 0,5 (1 + 3\alpha^2 - 2\alpha^3) \quad \dots (8.13)$$

$$\alpha = \frac{t_c}{\sqrt{t_s^2 + t_h^2}} \quad \dots (8.14)$$

où :

- $r$  rayon de la paroi du cylindre du silo ;
- $t_c$  épaisseur du cylindre ;
- $t_s$  épaisseur de la jupe ;
- $t_h$  épaisseur de la trémie ;
- $A_{ep}$  aire efficace de la plaque annulaire.



**Légende**

- 1 Cylindre
- 2 Ceinture
- 3 Jupe
- 4 Trémie

**Figure 8.4 — Notation pour une zone de transition avec plaque annulaire simple**

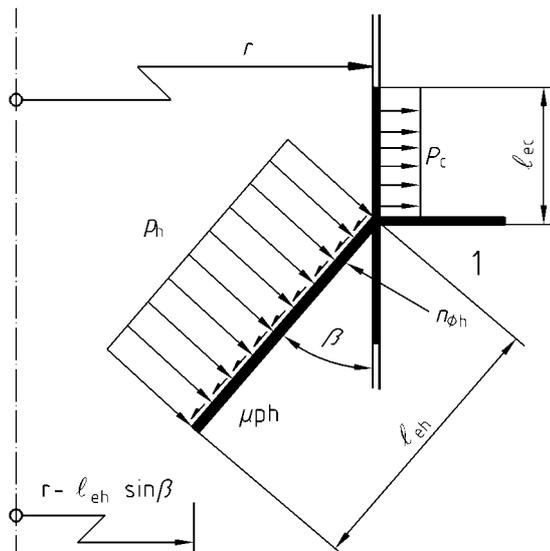
(8) Lorsque l'on utilise des sections de géométrie plus complexe au niveau de la zone de transition, il convient de considérer que seuls les segments de plaque annulaire satisfaisant la condition de 8.1.5 (1) sont efficaces dans l'évaluation de la jonction.

(9) Il convient de déterminer la valeur de calcul de la force de compression circonférentielle efficace  $N_{Sd}$  exercée dans la jonction au moyen de l'expression :

$$N_{Sd} = n_{\phi h, Sd} r \sin \beta - p_c r \ell_{ec} - p_h (\cos \beta - \mu \sin \beta) r \ell_{eh} \quad \dots (8.15)$$

où (voir Figure 8.5) :

- $r$  rayon de la paroi du cylindre du silo ;
- $\beta$  demi-angle de la trémie (au sommet) ;
- $\ell_{ec}$  longueur efficace du segment de cylindre situé au-dessus de la transition (voir (4)) ;
- $\ell_{eh}$  longueur efficace du segment de trémie (voir (4)) ;
- $n_{\phi h, Sd}$  valeur de calcul de la traction méridienne par unité de circonférence au sommet de la trémie ;
- $p_c$  pression locale moyenne sur la longueur efficace du segment de cylindre ;
- $p_h$  pression moyenne sur la longueur efficace du segment de trémie ;
- $\mu$  coefficient de frottement de la paroi de trémie.



**Légende**

1 Déterminée ici

**Figure 8.5 — Pressions locales et efforts de membrane exercés sur la ceinture de transition**

(10) Il convient de déterminer la contrainte de compression de calcul maximum  $\sigma_{u\theta,Ed}$  pour la jonction uniformément appuyé au moyen de l'expression suivante :

$$\sigma_{u\theta,Ed} = \frac{N_{sd}}{\eta A_{et}} \quad \dots (8.16)$$

avec :

$$\eta = 1 + 0,3 \frac{b}{r} \quad \dots (8.17)$$

où :

$N_{sd}$  force de compression circonférentielle efficace, voir (8) ;

$A_{et}$  aire efficace totale de la ceinture, voir (7) ;

$r$  rayon de la paroi du cylindre ;

$b$  largeur de la plaque annulaire.

**8.2.3 Poutre ceinture de zone de transition**

(1) Pour les silos de Classe de Fiabilité 3, il convient d'effectuer une analyse numérique de la structure modélisant tous les éléments de plaques sous forme de segments de coque, et ne supposant aucune action de poutre prismatique dans les éléments incurvés. Il convient que l'analyse prenne en compte la largeur finie des appuis discrets.

(2) Pour les silos d'autres Classes de Fiabilité, il convient de calculer les moments fléchissants et les couples exercés dans la poutre ceinture, en prenant en compte les excentremets du chargement et de l'appui par rapport au centre de gravité de la poutre ceinture.

(3) Il convient de considérer que la compression circonférentielle totale exercée dans la poutre est invariable autour de la circonférence, et de la déterminer par l'expression :

$$N_{Sd} = n_{\phi h, Sd} r_c \sin \beta - p_c r_c \ell_{ec} - p_h (\cos \beta - \mu \sin \beta) r_c \ell_{eh} \quad \dots (8.18)$$

où (voir Figure 8.5) :

$r_c$  rayon de la paroi du cylindre du silo ;

$\beta$  demi-angle de la trémie (au sommet) ;

$\ell_{ec}$  longueur efficace du segment de cylindre situé au-dessus de la transition (voir 8.2.2 (4)) ;

$\ell_{eh}$  longueur efficace du segment de trémie (voir 8.2.2 (4)) ;

$n_{\phi h, Sd}$  valeur de calcul de la traction méridienne par unité de circonférence au sommet de la trémie ;

$p_c$  pression locale moyenne exercée sur la longueur efficace du segment de cylindre ;

$p_h$  pression moyenne exercée sur la longueur efficace du segment de trémie ;

$\mu$  coefficient de frottement de la paroi de trémie.

(4) Il convient de prendre la variation avec la coordonnée circonférentielle  $\theta$  du moment fléchissant de calcul  $M_{r, Sd}$  autour de l'axe horizontal (radial) (positif lorsque le moment comprime la fibre supérieure) et du moment de torsion de calcul  $T_{Sd}$  exercé dans la poutre annulaire égale à la valeur suivante :

$$M_{r, Sd} = n_{xc} (r_g - e_r) \left[ (r_g - e_s) \theta_o (\sin \theta + \cot \theta_o \cos \theta) - r_g + e_r \right] + n_{\phi h, Sd} e_z (r_g - e_r) \quad \dots (8.19)$$

$$T_{Sd} = n_{xc} (r_g - e_r) \left[ (r_g - e_s) \theta_o (\cot \theta_o \sin \theta - \cos \theta) + r_g (\theta_o - \theta) \right] \quad \dots (8.20)$$

avec :

$$\theta_o = \frac{r}{j} \quad \dots (8.21)$$

où (voir Figure 8.6) :

$\theta$  coordonnée circonférentielle (en radians) mesurée depuis une origine au niveau d'un appui ;

$\theta_o$  angle circonférentiel en radians sous-tendu par la demi-portée de la poutre annulaire ;

$j$  nombre d'appuis discrets également espacés ;

$r_g$  rayon du centre de gravité de la poutre annulaire ;

$e_r$  excentrement radial du cylindre par rapport au centre de gravité de la poutre annulaire (positif lorsque le centre de gravité se trouve à un rayon supérieur) ;

$e_s$  excentrement radial de l'appui par rapport au centre de gravité de la poutre annulaire (positif lorsque le centre de gravité se trouve à un rayon supérieur) ;

$e_x$  excentrement vertical du centre de joint par rapport au centre de gravité de la poutre annulaire (positif lorsque le centre de gravité se trouve au-dessous du centre de joint) ;

$n_{xc}$  valeur de calcul de la résultante de membrane en compression à la base du cylindre ;

$n_{\phi h, Sd}$  valeur de calcul de la résultante de membrane en traction au sommet de la trémie.

(5) Il convient de déterminer les valeurs de pointe du moment fléchissant de calcul selon l'axe radial au niveau de l'appui  $M_{rs, Sd}$  et à mi-portée  $M_{rm, Sd}$  au moyen des expressions suivantes :

$$M_{rs, Sd} = n_{xc} (r_g - e_r) \left[ (r_g - e_s) \theta_o \cot \theta_o - r_g + e_r \right] + n_{\phi h, Sd} e_x (r_g - e_r) \quad \dots (8.22)$$

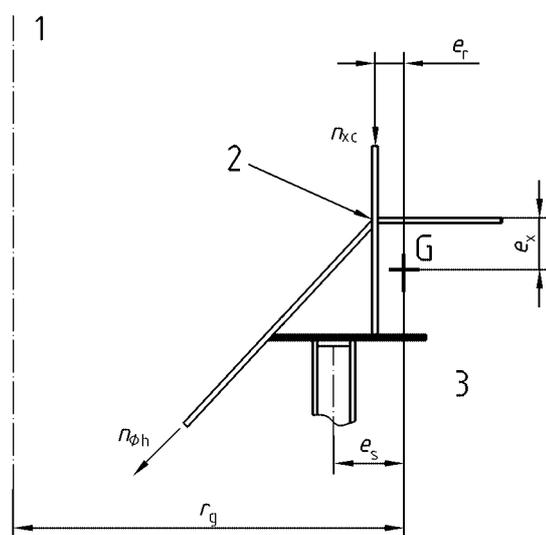
$$M_{rm, Sd} = n_{xc} (r_g - e_r) \left[ (r_g - e_s) \theta_o \operatorname{cosec} \theta_o - r_g + e_r \right] + n_{\phi h, Sd} e_x (r_g - e_r) \quad \dots (8.23)$$

(6) Lorsqu'on utilise une poutre annulaire à profil ouvert, il convient de considérer que le couple est supporté entièrement par gauchissement, sauf si l'on effectue une analyse plus précise. Lorsque c'est le gauchissement qui reprend le couple, il convient de prendre les valeurs de calcul de pointe du moment de semelle autour d'un axe vertical dans chaque semelle égales aux valeurs par  $M_{fs,Sd}$  au niveau de l'appui et par  $M_{fm,Sd}$  à mi-portée, calculées par les expressions suivantes :

$$M_{fs,Sd} = n_{xc} \frac{r_g (r_g - e_r)}{h} \left[ (r_g - e_s) (1 - \theta_o \cot \theta_o) - \frac{r_g \theta_o^2}{3} \right] \quad \dots (8.24)$$

$$M_{fm,Sd} = n_{xc} \frac{r_g (r_g - e_r)}{h} \left[ (r_g - e_s) (1 - \theta_o \operatorname{cosec} \theta_o) + \frac{r_g \theta_o^2}{6} \right] \quad \dots (8.25)$$

où  $h$  représente l'espacement vertical entre les semelles de la poutre annulaire.



#### Légende

- 1 Axe
- 2 Jonction cylindre/cône
- 3 Centre de gravité de la section efficace de la poutre annulaire, G

**Figure 8.6 — Excentrement des charges verticales au niveau d'une poutre annulaire**

(7) Il convient de déterminer les contraintes de membrane circonférentielles  $\sigma_{\theta,Ed}$  qui apparaissent dans chaque semelle de la poutre annulaire à partir de la poussée  $N_{Sd}$ , du moment d'axe radial  $M_{r,Sd}$  et des moments de gauchissement des semelles  $M_{f,Sd}$  au moyen de la théorie de calcul de flexion et de gauchissement et en adoptant les efforts définis de (3) à (6).

(8) Il convient de déterminer la valeur la plus grande de la contrainte de membrane circonférentielle  $\sigma_{\theta,Ed}$  (en traction ou en compression) qui apparaît dans l'une ou l'autre des semelles de la poutre annulaire en un point quelconque sur la circonférence, soit  $\sigma_{m\theta,Ed}$ .

(9) Il convient de déterminer la valeur la plus grande en compression de la contrainte de membrane circonférentielle  $\sigma_{\theta,Ed}$  qui apparaît dans l'une ou l'autre des semelles de la poutre annulaire en un point quelconque sur la circonférence, soit  $\sigma_{c\theta,Ed}$ .

## 8.3 Résistances structurales

### 8.3.1 Généralités

(1) Il convient que la zone de transition satisfasse les dispositions de l'ENV 1993-1-6, mais celles-ci peuvent être satisfaites en utilisant les évaluations de la résistance de calcul ci-après.

### 8.3.2 Résistance à l'état limite plastique

#### 8.3.2.1 Généralités

(1) Il convient de déterminer la valeur de calcul de la résistance conformément aux dispositions de l'ENV 1993-1-6. En lieu et place de ces dispositions, on peut utiliser les évaluations de résistance ci-dessous comme approximation simple et plaçant en sécurité.

#### 8.3.2.2 Résistance basée sur l'évaluation élastique

(1) Il convient de déterminer la valeur de calcul de la résistance au point de la jonction subissant les contraintes les plus élevées.

(2) Il convient de déterminer la valeur de calcul de la résistance à l'état limite plastique au moyen de l'expression :

$$f_{p,Rd} = f_y / \gamma_{M1a} \quad \dots (8.26)$$

#### 8.3.2.3 Résistance basée sur l'évaluation plastique

(1) Il convient de déterminer la valeur de calcul de la résistance en fonction de l'effort de membrane en traction pouvant être atteint dans la trémie au niveau de la jonction,  $n_{\phi h,Rd}$ .

(2) Il convient de déterminer la valeur de calcul de la résistance à l'état limite plastique  $n_{\phi h,Rd}$  au moyen de l'expression suivante :

$$n_{\phi h,Rd} = \frac{1}{\sin\beta} \left\{ \left( \frac{A_p + l_{oc}t_c + l_{os}t_s + l_{oh}t_h}{r} \right) \frac{f_y}{\gamma_{M1a}} + \rho_c l_{oc} + \rho_h (\cos\beta - \mu \sin\beta) l_{eh} \right\} \quad \dots (8.27)$$

avec :

$$\alpha = \frac{\sqrt{t_c^2}}{\sqrt{t_s^2 + t_h^2}} \quad \dots (8.28)$$

$$\psi = 0,7 + 0,6\alpha^2 - 0,3\alpha^3 \quad \dots (8.29)$$

pour le cylindre  $l_{oc} = 0,975 \sqrt{rt_c}$

pour la jupe  $l_{os} = 0,975 \psi \sqrt{rt_s}$

pour le segment de trémie conique  $l_{oh} = 0,975 \psi \sqrt{\frac{rt_h}{\cos\beta}}$

où (voir Figure 8.5) :

$r$  rayon de la paroi du cylindre ;

$t_c$  épaisseur du cylindre ;

$t_s$  épaisseur de la jupe ;

$t_h$  épaisseur de la trémie ;

$A_p$  aire de section transversale de la ceinture ;

$\beta$  demi-angle de la trémie (au sommet) ;

$l_{oc}$  longueur efficace plastique du segment de cylindre situé au-dessus de la transition ;

$l_{oh}$  longueur efficace plastique du segment de trémie ;

$l_{os}$  longueur efficace plastique du segment de jupe situé au-dessous de la transition ;

$n_{\phi h,Rd}$  résistance de membrane méridienne par unité de circonférence au sommet de la trémie ;

$\rho_c$  pression locale moyenne exercée sur la longueur efficace du segment de cylindre ;

$\rho_h$  pression locale moyenne exercée sur la longueur efficace du segment de trémie ;

$\mu$  coefficient de frottement de la paroi de trémie.

### 8.3.3 Résistance au flambement dans le plan

(1) Il convient de déterminer la valeur de calcul de la résistance conformément aux dispositions de l'ENV 1993-1-6. En lieu et place de ces dispositions, on peut utiliser l'évaluation de résistance ci-dessous comme approximation simple et plaçant en sécurité.

(2) Il convient d'évaluer la valeur de calcul de la résistance au point de la jonction subissant les contraintes les plus élevées.

(3) Il convient de déterminer la valeur de calcul de la résistance au flambement dans le plan  $\sigma_{ip,Rd}$  au moyen de l'expression suivante :

$$\sigma_{ip,Rd} = \frac{4 E I_z}{A_{et} r_g^2 \gamma_{M3}} \frac{1}{\gamma_{M3}} \quad \dots (8.30)$$

où :

$E I_z$  rigidité de flexion de la section transversale efficace de la ceinture (voir Figure 8.3) selon son axe vertical ;

$A_{et}$  aire de section transversale efficace de la ceinture, donnée par 8.2.2 ;

$r_g$  rayon du centre de gravité de la section transversale de la ceinture.

(4) L'évaluation de résistance ci-dessus et la vérification du flambement dans le plan selon 8.4 peuvent être omises lorsque le demi-angle du cône  $\beta$  est supérieur à  $10^\circ$ .

### 8.3.4 Résistance au flambement hors du plan

#### 8.3.4.1 Généralités

(1) Il convient de déterminer la valeur de calcul de la résistance conformément aux dispositions de l'ENV 1993-1-6. En lieu et place de ces dispositions, on peut utiliser les évaluations de résistance ci-dessous comme approximation simple et plaçant en sécurité.

#### 8.3.4.2 Zone de transition à plaque annulaire

(1) Pour les jonctions où la ceinture est en forme de plaque annulaire, il convient de déterminer la valeur de calcul de la résistance au flambement hors du plan  $\sigma_{op,Rd}$  au moyen de l'expression suivante :

$$\sigma_{op,Rd} = k E \left( \frac{t_p}{b} \right)^2 \frac{1}{\gamma_{M3}} \quad \dots (8.31)$$

avec :

$$k = \frac{\eta_c k_c + \eta_s k_s}{\eta_c + \eta_s} \quad \dots (8.32)$$

$$k_s = 0,385 + 0,452 \sqrt{\frac{b}{r}} \quad \dots (8.33)$$

$$k_c = 1,154 + 0,56 \frac{b}{r} \quad \dots (8.34)$$

$$\eta_s = 0,43 + 0,1 \left( \frac{r}{20b} \right)^2 \quad \dots (8.35)$$

$$\eta_c = 0,5 \left\{ \left( \frac{t_c}{t_p} \right)^{5/2} + \left( \frac{t_s}{t_p} \right)^{5/2} + \left( \frac{t_h}{t_p} \right)^{5/2} \right\} \quad \dots (8.36)$$

où :

$r$  rayon de la paroi du cylindre du silo ;

$t_c$  épaisseur du cylindre ;

$t_s$  épaisseur de la jupe ;

$t_h$  épaisseur de la trémie ;

- $t_p$  épaisseur de la plaque annulaire ;  
 $b$  largeur de la plaque annulaire ;  
 $k_c$  coefficient de flambement de plaque pour une ceinture dont le bord intérieur est agrafé ;  
 $k_s$  coefficient de flambement de plaque pour une ceinture dont le bord intérieur est à appui simple ;  
 $\gamma_{M3}$  coefficient partiel, voir 2.10.2.

### 8.3.4.3 Zone de transition à profil en T

(1) Il convient d'utiliser l'évaluation suivante lorsque la ceinture est composée d'une plaque annulaire de largeur  $b_p$  comportant une semelle de raidissage verticale disposée symétriquement sur son bord extérieur de hauteur  $b_f$ , formant une ceinture à profil en T dont la base du T est située au centre de joint.

(2) Il convient de déterminer la valeur de calcul de la résistance au flambement hors du plan  $\sigma_{op,Rd}$  d'une poutre annulaire à profil en T sur la base de la contrainte de membrane circonférentielle maximum exercée sur le bord intérieur de la plaque annulaire principale de la ceinture. Il convient de déterminer la valeur de calcul de la résistance au moyen de l'expression :

$$\sigma_{op,Rd} = \frac{\eta_s \sigma_s + \eta_c \sigma_c}{\eta_s + \eta_c} \frac{1}{\gamma_{M3}} \quad \dots (8.37)$$

avec :

$$\eta_s = 0,385 + \left( \frac{r}{175 b_p} \right)^2 \quad \dots (8.38)$$

$$\eta_c = 0,5 \left\{ \left( \frac{t_c}{t_p} \right)^{5/2} + \left( \frac{t_s}{t_p} \right)^{5/2} + \left( \frac{t_h}{t_p} \right)^{5/2} \right\} \quad \dots (8.39)$$

$$\sigma_s = \frac{E I_r}{A r_o^2} \left( 0,2 \frac{b_p}{r} + \frac{G I_t}{E I_r} + 2 \sqrt{\frac{G I_t b_p}{E I_r r}} \right) \quad \dots (8.40)$$

$$\sigma_c = E \left( \frac{t_p}{b_p} \right)^{1,1} \frac{(1 + 5\rho)(1 + 32\rho - 16\rho^2)}{64 \left( 1 + 5 \frac{b_f t_f}{b_p t_p} \right)} \quad \dots (8.41)$$

$$r_o^2 = \frac{I_r + I_z + A x_c^2}{A} \quad \dots (8.42)$$

$$\rho = \frac{b_f}{b_p} \left( \frac{t_f}{t_p} \right)^{1/3} \quad \dots (8.43)$$

où :

- $r$  rayon de la paroi du cylindre ;  
 $t_c$  épaisseur du cylindre ;  
 $t_s$  épaisseur de la jupe ;  
 $t_h$  épaisseur de la trémie ;  
 $t_p$  épaisseur de la plaque annulaire ;  
 $t_f$  épaisseur de la semelle extérieure verticale du profil en T ;  
 $b_p$  largeur de la plaque annulaire ;  
 $b_f$  hauteur (largeur de semelle) de la semelle verticale extérieure du profil en T ;  
 $A$  aire de section transversale de la poutre annulaire à profil en T ;  
 $x_c$  distance entre le centre de gravité du profil en T et son bord intérieur ;  
 $I_r$  Inertie de flexion du profil en T par rapport à l'axe radial ;

- $I_z$  Inertie de flexion du profil en T par rapport à l'axe vertical ;  
 $I_t$  constante de torsion uniforme pour le profil en T ;  
 $\gamma_{M3}$  coefficient partiel, voir 2.10.2.

## 8.4 Vérifications aux états limites

### 8.4.1 Zones de transition uniformément appuyées

(1) Lorsque le silo a été analysé par une analyse informatique, il convient d'utiliser les procédures de l'ENV 1993-1-6. Lorsque l'analyse informatique ne comprend pas d'analyse du flambement, on peut utiliser la section 8.3 pour obtenir les résistances au flambement pour la vérification aux états limites de l'ENV 1993-1-6.

(2) Lorsque le silo est appuyé sur une jupe s'étendant jusqu'à une fondation uniforme (voir 5.4.2) et lorsque les calculs selon 8.2 ont été effectués, la zone de transition peut être considérée comme soumise uniquement à une contrainte de membrane circonférentielle uniforme  $\sigma_{u\theta,Ed}$  telle qu'elle est déterminée en 8.2.2 (10). Il convient d'effectuer alors les vérifications aux états limites ci-dessous.

(3) Lorsque l'état limite de plastification est étudié au moyen d'une évaluation élastique, il convient de vérifier l'expression suivante :

$$\sigma_{u\theta,Ed} \leq f_{p,Rd} \quad \dots (8.44)$$

où :

$\sigma_{u\theta,Ed}$  valeur de calcul de la contrainte prise selon 8.2.2 (10) ;

$f_{p,Rd}$  valeur de calcul de la résistance plastique prise selon 8.3.2.2.

(4) Lorsque l'état limite plastique est étudié au moyen d'une évaluation plastique, il convient de vérifier l'expression suivante :

$$n_{\phi h,Sd} \leq n_{\phi h,Rd} \quad \dots (8.45)$$

où :

$n_{\phi h,Sd}$  valeur de calcul de l'effort de membrane méridienne ;

$n_{\phi h,Rd}$  valeur de calcul de la résistance plastique prise selon 8.3.2.3.

(5) Il convient de vérifier l'état limite de flambement dans le plan pour la jonction par l'expression :

$$\sigma_{u\theta,Ed} \leq \sigma_{ip,Rd} \quad \dots (8.46)$$

où :

$\sigma_{u\theta,Ed}$  valeur de calcul de la contrainte prise selon 8.2.2 (10) ;

$\sigma_{ip,Rd}$  valeur de calcul de la résistance au flambement dans le plan prise selon 8.3.3.

(6) Il convient de vérifier l'état limite de flambement hors du plan pour la jonction par l'expression :

$$\sigma_{u\theta,Ed} \leq \sigma_{op,Rd} \quad \dots (8.47)$$

où :

$\sigma_{u\theta,Ed}$  valeur de calcul de la contrainte prise selon 8.2.2 (10) ;

$\sigma_{op,Rd}$  valeur de calcul de la résistance au flambement hors du plan prise selon 8.3.4.

### 8.4.2 Poutre ceinture de zone de transition

(1) Lorsque le silo a été analysé par une analyse informatique, il convient d'utiliser les procédures de l'ENV 1993-1-6. Lorsque l'analyse informatique ne comprend pas d'analyse du flambement, on peut utiliser la section 8.3 pour obtenir les résistances au flambement pour la vérification aux états limites de l'ENV 1993-1-6.

(2) Lorsque le silo repose sur des appuis discrets, de telle sorte que la zone de transition agit comme une poutre ceinture avec des contraintes de membrane circonférentielle variant dans la section et sur la circonférence, il convient de prendre en compte cette variation dans les vérifications aux états limites. Lorsque les calculs suivant 8.2 ont été effectués, il convient de procéder aux vérifications aux états limites suivantes.

(3) Il convient que l'état limite plastique pour la jonction utilise la contrainte  $\sigma_{m\theta,Ed}$  évaluée selon 8.2.3 (8) et qu'il soit vérifié au moyen de l'expression suivante :

$$\sigma_{m\theta,Ed} \leq f_{p,Rd} \quad \dots (8.48)$$

où :

$\sigma_{m\theta,Ed}$  valeur de calcul de la contrainte évaluée selon 8.2.3 (8) ;

$f_{p,Rd}$  valeur de calcul de la résistance plastique prise selon 8.3.2.2.

(4) Il convient que l'état limite de flambement dans le plan utilise la contrainte  $\sigma_{c\theta,Ed}$  évaluée selon 8.2.3 (9) et qu'il soit vérifié au moyen de l'expression suivante :

$$\sigma_{c\theta,Ed} \leq \sigma_{ip,Rd} \quad \dots (8.49)$$

où :

$\sigma_{c\theta,Ed}$  valeur de calcul de la contrainte évaluée selon 8.2.3 (9) ;

$\sigma_{ip,Rd}$  valeur de calcul de la résistance au flambement dans le plan prise selon 8.3.3.

(5) Il convient que l'état limite de flambement hors du plan utilise la contrainte  $\sigma_{c\theta,Ed}$  évaluée selon 8.2.3 (9) et qu'il soit vérifié au moyen de l'expression suivante :

$$\sigma_{c\theta,Ed} \leq \sigma_{op,Rd} \quad \dots (8.50)$$

où :

$\sigma_{c\theta,Ed}$  valeur de calcul de la contrainte évaluée selon 8.2.3 (9) ;

$\sigma_{op,Rd}$  valeur de calcul de la résistance au flambement hors du plan prise selon 8.3.4.

## 8.5 Considérations concernant les dispositions des appuis pour la jonction

### 8.5.1 Jonctions appuyées sur une jupe

(1) Lorsque le silo est appuyé sur une jupe s'étendant jusqu'à une fondation uniforme (voir 5.4.2), la zone de transition peut être considérée comme supportant uniquement des contraintes de membrane circonférentielles.

(2)P La jupe doit être vérifiée en ce qui concerne la résistance au voilement sous compression axiale, en incluant les effets des ouvertures ménagées dans la jupe.

### 8.5.2 Poutre ceintures et jonctions appuyées sur des poteaux

(1) Lorsque le silo repose sur des poteaux ou des appuis discrets, et lorsqu'une poutre ceinture est utilisée pour répartir les efforts des poteaux dans la coque, il convient que la jonction et la poutre ceinture satisfassent les conditions données en 8.2.3.

(2) Lorsqu'une ceinture de transition est formée par l'assemblage boulonné des moitiés supérieure et inférieure, chacune fixée sur un segment de coque différent, il convient de dimensionner les boulons de telle sorte qu'ils supportent la transmission de la force de calcul totale devant être supportée par le segment de ceinture supérieur, en prenant dûment en compte les actions de flexion agissant dans la ceinture.

### 8.5.3 Embase annulaire

(1) Il convient qu'un silo appuyé au sol de façon continue comporte une embase annulaire et des dispositifs d'ancrage.

(2) Il convient que l'espacement des boulons d'ancrage ou autres points de fixation sur la circonférence ne soit pas supérieur à  $4\sqrt{rt}$ , où  $t$  représente l'épaisseur locale de la tôle de coque.

(3) Il convient que l'embase annulaire possède une rigidité de flexion  $EI_z$  par rapport à un axe vertical (pour supporter la flexion circonférentielle) supérieure à la valeur minimum  $EI_{z,min}$  donnée par l'expression suivante :

$$EI_{z,min} = \boxed{0,1} Ert^3 \quad \dots (8.51)$$

où il convient de prendre la valeur de  $t$  égale à l'épaisseur de la virole de paroi adjacente à l'embase annulaire.

## 9 Calcul des silos rectangulaires et des silos à côtés plans

### 9.1 Bases

(1) Il convient qu'un silo rectangulaire soit calculé soit comme un caisson raidi dans lequel l'action structurale prédominante est la flexion, soit comme une structure de membrane mince dans laquelle l'action prédominante est constituée par les contraintes de membrane se développant à la suite de déformations importantes.

(2)P Lorsque le caisson est calculé pour l'action de flexion, les joints doivent être calculés de sorte à garantir que la continuité supposée dans l'analyse des contraintes est réalisée dans l'exécution.

### 9.2 Classification des formes structurales

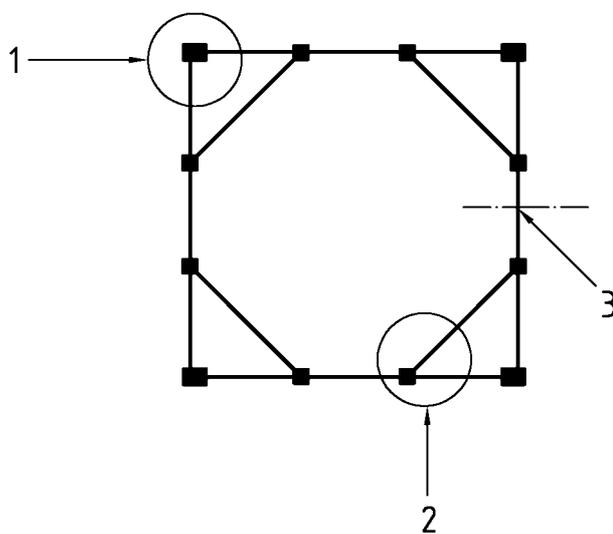
#### 9.2.1 Silos non raidis

(1) Il convient qu'une structure formée à partir de plaques planes en acier sans raidisseurs attachés soit appelée «caisson non raidi».

(2) Il convient qu'une structure raidie uniquement le long des joints entre plaques qui ne sont pas dans le même plan soit appelée également «caisson non raidi».

#### 9.2.2 Silos raidis

(1) Il convient qu'une structure formée à partir de plaques planes sur lesquelles sont fixés des raidisseurs dans l'aire des plaques soit appelée «caisson raidi». Les raidisseurs peuvent être circonférentiels, ou verticaux, ou orthogonaux (bi-directionnels).



#### Légende

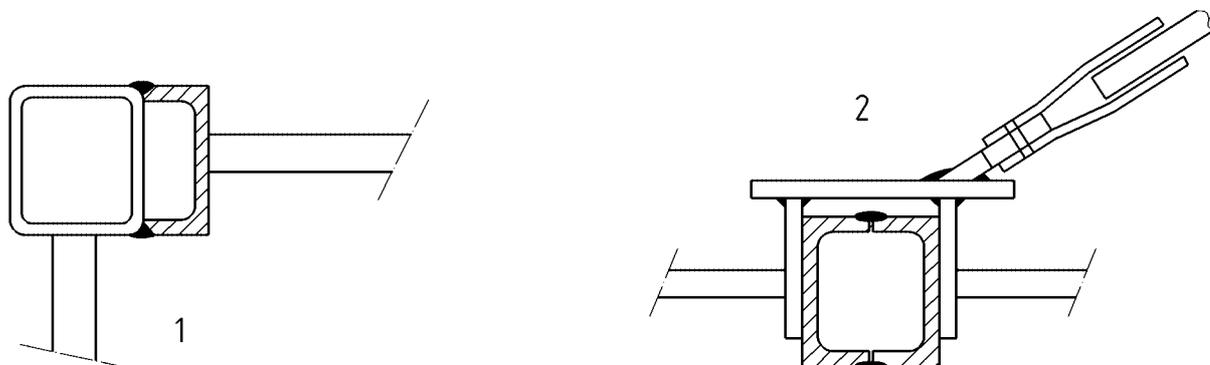
- 1 Détail 1
- 2 Détail 2
- 3 Coupe verticale

Figure 9.1 — Vue en plan d'un silo en caisson rectangulaire à tirants

### 9.2.3 Silos à tirants

(1) Les silos à tirants peuvent être carrés ou rectangulaires.

NOTE Certains composants structuraux typiques pour un silo carré à trois panneaux (cellule unique) sont illustrés (voir Figures 9.1, 9.2 et 9.3).



#### Légende

- 1 Détail 1
- 2 Détail 2

Figure 9.2 — Dispositions typiques d'assemblages de tirants

## 9.3 Résistance des parois verticales

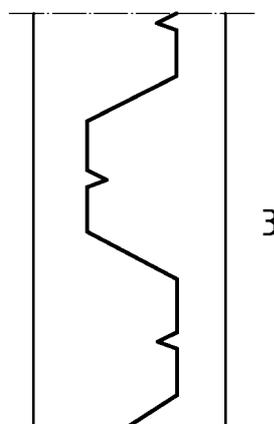
### 9.3.1 Généralités

(1) Il convient d'évaluer la résistance des parois verticales conformément à l'ENV 1993-1-7. Comme alternative, on peut considérer que les dispositions énoncées suivant 9.3.2 à 9.3.6 satisfont les dispositions de cette Prénorme.

### 9.3.2 Calcul des plaques non raidies individuelles

(1)P Les plaques non raidies doivent être calculées pour :

- la flexion de plaque bidimensionnelle due à la matière ensilée ;
- les contraintes provoquées par l'action de diaphragme ;
- l'action de flexion locale provoquée par la matière ensilée et/ou l'équipement.



#### Légende

- 3 Coupe verticale

Figure 9.3 — Coupe typique d'une paroi ondulée de silo rectangulaire

### 9.3.3 Calcul des plaques raidies individuelles

(1)P Les plaques à ondulations horizontales doivent être calculées pour :

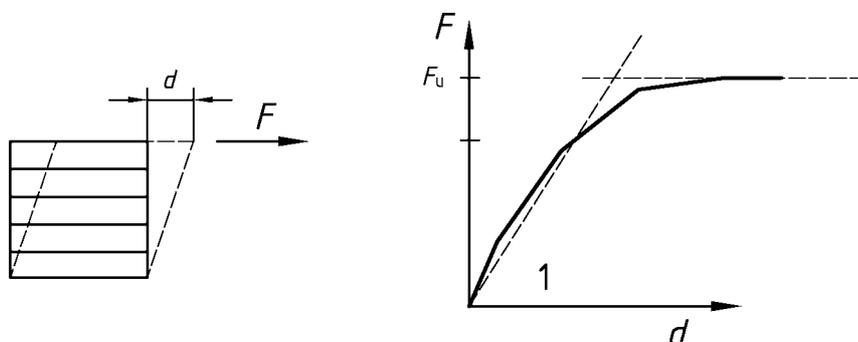
- l'action de flexion générale provoquée par la matière ensilée ;
- les contraintes provoquées par leur action de diaphragme ;
- l'action de flexion locale provoquée par la matière ensilée et/ou l'équipement.

(2) Il convient de calculer les caractéristiques effectives de flexion ainsi que la résistance à la flexion des plaques raidies conformément aux dispositions données dans 4.3.4 de l'ENV 1993-1-3 pour les tôles trapézoïdales munies de raidisseurs intermédiaires.

(3) Il convient de calculer la rigidité et la résistance au cisaillement par des essais ou au moyen d'expressions théoriques appropriées.

(4) Sauf si l'on dispose d'une méthode plus précise, la résistance au voilement par cisaillement peut être évaluée au moyen de 5.3.4.6 et en considérant le rayon de la coque comme infini.

(5) Lorsque l'on utilise des essais, la rigidité de cisaillement appropriée peut être prise égale à la valeur sécante obtenue aux 2/3 de la résistance au cisaillement ultime, voir Figure 9.4.



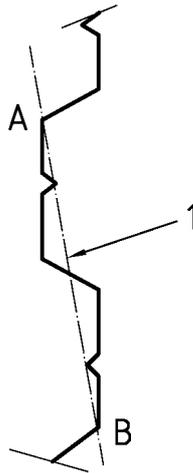
#### Légende

1 Rigidité de cisaillement =  $F / d$

Figure 9.4 — Comportement en cisaillement d'une paroi ondulée

### 9.3.4 Flexion générale provoquée par l'action directe de la matière ensilée

- (1)P La flexion doit être prise en considération lorsqu'une flexion horizontale peut se produire en raison de la pression horizontale ou de la combinaison de pression horizontale et de frottement sur la paroi.
- (2) Pour la flexion provoquée par la pression horizontale seule, il convient que le calcul soit basé sur les caractéristiques efficaces telles que données par l'ENV 1993-1-3.
- (3) Pour la flexion provoquée par la combinaison de pression horizontale et de frottement sur la paroi, le calcul peut être basé sur le concept esquissé dans la Figure 9.5, où l'on suppose la formation de rotules aux emplacements des points A et B.



#### Légende

- 1 Force combinée sur plan AB

**Figure 9.5 — Flexion provoquée par la combinaison de pression horizontale et de frottement**

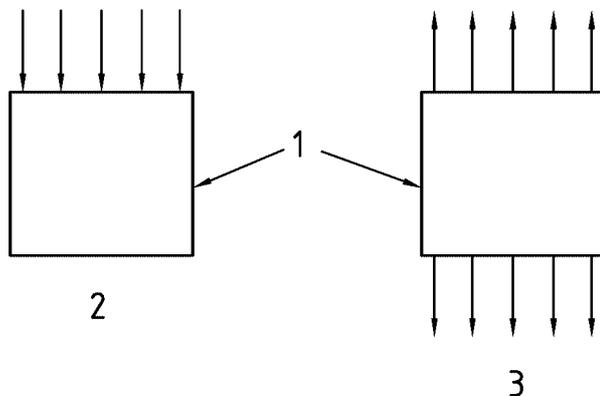
### 9.3.5 Contraintes de membrane provoquées par l'action de diaphragme

- (1) Les contraintes sont provoquées par la pression des matières ensilées et/ou du vent sur les parois perpendiculaires voisines, voir Figure 9.6.
- (2) Comme règle simple, on peut considérer que les contraintes provoquées par la matière ensilée sont uniquement des contraintes horizontales directes (normales), en négligeant les contraintes de cisaillement provoquées par la variation des contraintes normales.
- (3) Les contraintes directes et de cisaillement provoquées par l'action du vent peuvent être déterminées au moyen d'un calcul par éléments finis.

### 9.3.6 Action de flexion locale provoquée par la matière ensilée et/ou l'équipement

(1) Il convient de prendre en compte la présence éventuelle d'effets de flexion locale néfastes dans tout élément structural.

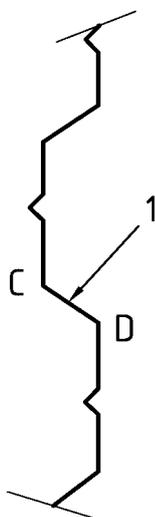
NOTE Dans la situation illustrée dans la Figure 9.7, la vérification de l'élément de plaque CD peut s'avérer critique.



#### Légende

- 1 Action de diaphragme dans ces parois
- 2 Action du vent
- 3 Pression due à la matière ensilée

Figure 9.6 — Forces de membrane induites dans les parois par les pressions des matières ou les charges de vent



#### Légende

- 1 Force combinée sur plaque CD

Figure 9.7 — Actions de flexion locale possibles

## 9.4 Silos à tirants intérieurs

### 9.4.1 Actions locales exercées sur les tirants intérieurs

- (1) Il convient d'évaluer la force exercée par la matière ensilée sur le tirant.  
 (2) Sauf si l'on effectue des calculs plus précis, la force exercée par la matière  $q_t$  par unité de longueur de tirant peut être évaluée au moyen de l'expression suivante :

$$q_t = C_t \rho_v b \quad \dots (9.1)$$

avec :

$$C_t = \frac{C_s \beta}{k} \quad \dots (9.2)$$

où :

- $\rho_v$  pression verticale dans la matière ensilée au niveau du tirant ;
- $b$  largeur horizontale maximum du tirant en millimètres ;
- $C_t$  facteur d'amplification de charge ;
- $C_s$  facteur de forme pour la section transversale du tirant ;
- $k$  facteur d'état de chargement ;
- $\beta$  facteur d'emplacement du tirant, qui dépend de la position du tirant dans la cellule de silo (voir Figures 9.8 et 9.9).

- (3) Il convient de prendre le facteur de forme  $C_s$  de la façon suivante :

— pour les sections lisses circulaires :  $C_s = \boxed{1,0}$  ;

— pour les sections carrées ou rondes inégales :  $C_s = \boxed{1,2}$ .

- (4) Il convient de prendre le facteur d'état de chargement  $k$  de la façon suivante :

— pour le remplissage de matières en vrac :  $k = \boxed{4,0}$  ;

— pour la vidange de matières en vrac :  $k = \boxed{2,0}$ .

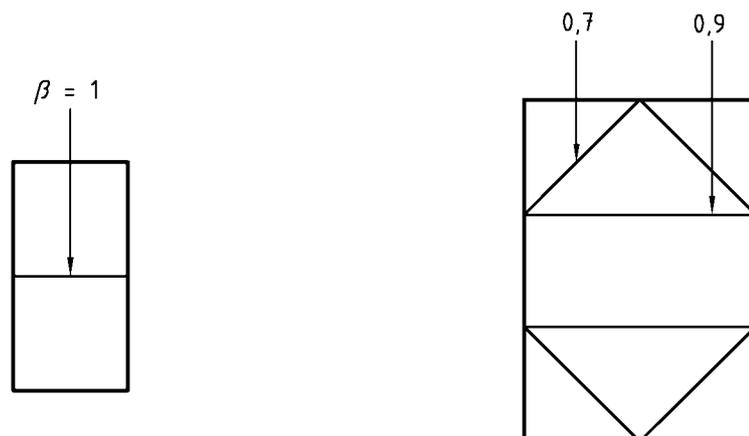


Figure 9.8 — Évaluation du facteur  $\beta$  pour les tirants intérieurs

### 9.4.2 Modélisation des tirants

(1) Il convient de classer les tirants en fonction des principaux moyens par lesquels ils reprennent les charges. Il convient de classer un tirant comme câble s'il possède une rigidité de flexion négligeable. Il convient de le classer comme tige s'il possède à la fois une rigidité axiale et une rigidité de flexion significative. Il convient que l'analyse du tirant soit appropriée au comportement structural du profil de tirant.

(2) Lorsque le tirant est une tige, il convient de prendre en compte les moments fléchissants en plus de la traction axiale.

(3) Il convient d'utiliser une procédure de calcul géométriquement non linéaire pour déterminer la force  $N$  (et pour les tiges les moments  $M$ ) exercée dans le tirant. Il convient que l'analyse prenne en compte les conditions aux limites réelles ainsi que la rigidité de la paroi du silo.

(4) Il convient de prendre les valeurs de calcul de la traction axiale  $N$  et du moment  $M$  comme les valeurs exercées dans le tirant au niveau de l'assemblage sur la paroi.

(5) Il convient que la flèche initiale du tirant fasse l'objet d'un accord entre le concepteur et/ou le fabricant. Pour les câbles (rigidité de flexion négligeable), il convient que la flèche initiale ne soit pas supérieure à  $L/100$  où  $L$  représente la longueur du tirant.

NOTE Dans le passé, la flèche a souvent été fixée à  $L/50$ . La valeur inférieure donnée en (5) est nécessaire pour obtenir une relation entre les pressions et les forces induites quasi linéaire dans la plage d'exploitation.

(6)P Les détails de fixation pour les tirants doivent prendre en compte les composantes tant verticales qu'horizontales de la traction au point de fixation.

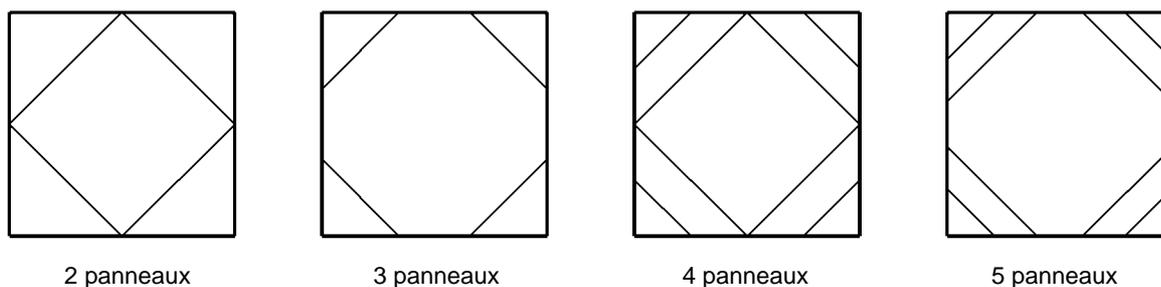


Figure 9.9 — Tirants d'angle pour lesquels  $\beta = 0,7$

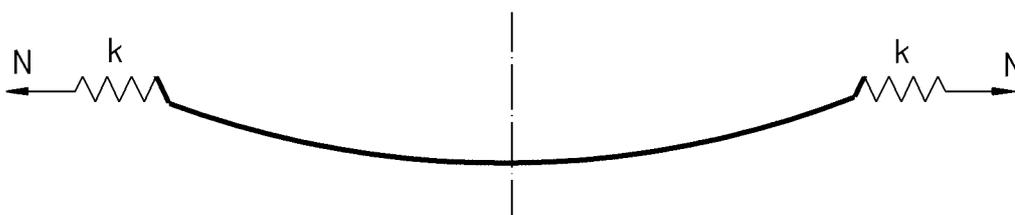


Figure 9.10 — Développement de la force dans un tirant

### 9.4.3 Cas de charges pour les fixations de tirants

(1) Il convient que l'analyse du tirant prenne en compte :

- les actions provoquées par les matières ensilées ;
- les forces transmises aux tirants en raison des déformations des parois provoquées par d'autres cas de charges.

(2) Il convient de vérifier les deux cas de charges suivants pour les sollicitations exercées dans les fixations par un tirant :

- cas de charges 1 : les valeurs de  $q_t$  et  $N$  évaluées suivant 9.4.1 et 9.4.2 ;
- cas de charges 2 : une valeur augmentée de charge transversale  $1,2q_t$  et une valeur réduite de traction dans le tirant  $0,7N$ , où  $q_t$  et  $N$  ont été évaluées conformément à 9.4.1 et 9.4.2.

## 9.5 Résistance des trémies pyramidales

(1) Il convient de considérer les trémies pyramidales comme des structures en caissons, en utilisant les dispositions de l'ENV 1993-1-7.

NOTE Outre les méthodes numériques définies dans l'ENV 1993-1-7, il existe certaines méthodes analytiques approchées pouvant aider le concepteur.

(2) Comme simplification, les moments fléchissants exercés dans les plaques trapézoïdales de la trémie peuvent être déterminés comme indiqué dans les alinéas ci-dessous.

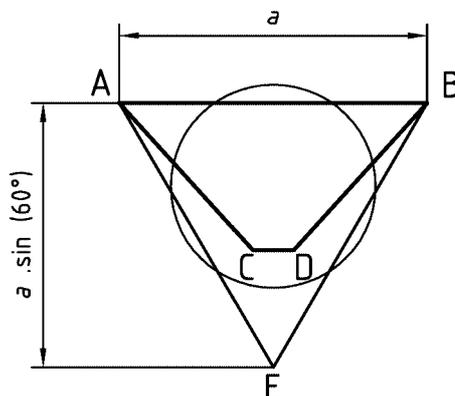


Figure 9.11 — Modèle simple pour la flexion des plaques trapézoïdales

(3) Il convient de tracer un triangle équilatéral ABE d'aire  $A$  sur la plaque de trémie ABCD, et de déterminer le rayon du cercle d'aire égale équivalent au moyen de l'expression suivante :

$$r_{\text{eq}} = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = 0,37a \quad \dots (9.3)$$

où :

$a$  longueur horizontale du bord supérieur de la plaque, voir Figure 9.11.

(4) Il convient de déterminer le moment fléchissant de référence  $M$  au moyen de l'expression :

$$M_0 = \frac{3}{16} p r_{\text{eq}}^2 = 0,026 p a^2 \quad \dots (9.4)$$

où :

$p$  pression moyenne exercée sur la plaque trapézoïdale.

(5) Lorsque la plaque trapézoïdale possède des bords pouvant être considérés comme simplement appuyés, la valeur de calcul du moment fléchissant peut être prise égale à :

$$M_s = M_0 \quad \dots (9.5)$$

(6) Lorsque la plaque trapézoïdale possède des bords pouvant être considérés comme agrafés, le moment fléchissant peut être pris égal à :

$$M_s = 0,8 M_0 \quad \dots (9.6)$$

$$M_e = 0,67 M_s \quad \dots (9.7)$$

## 9.6 Raidisseurs verticaux placés sur des parois en caisson

(1)P Les raidisseurs verticaux placés sur des parois en caisson doivent être calculés pour :

- les actions permanentes ;
- les pressions normales exercées sur la paroi par les matières en vrac ;
- les forces de frottement exercées sur la paroi ;
- les actions variables exercées par le toit.

(2) L'excentrement des forces de frottement par rapport aux axes médians de la plaque et du raidisseur peuvent être négligées.

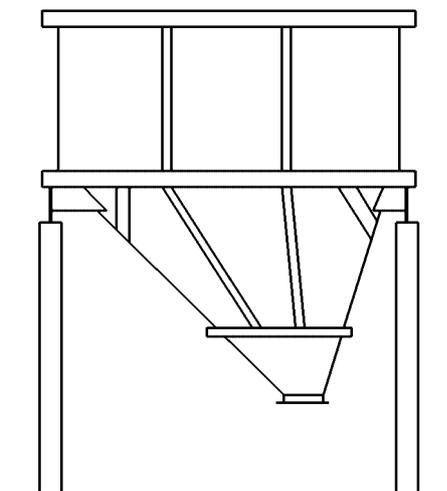


Figure 9.12 — Trémie asymétrique munie de raidisseurs verticaux inclinés

## 9.7 États limites de service

### 9.7.1 Bases

- (1) Il convient de considérer les états limites de service suivants pour les parois de silos rectangulaires :
- déformations ou flèches affectant défavorablement l'utilisation effective de la structure ;
  - déformations, flèches, vibrations ou oscillations provoquant des détériorations des éléments non structuraux.
- (2)P Les déformations, flèches et vibrations doivent être limitées pour satisfaire les critères ci-dessus.
- (3) Il convient que des valeurs limites spécifiques, adaptées à l'utilisation prévue, fassent l'objet d'un accord entre le concepteur, le client et l'autorité compétente, en prenant en compte les prévisions d'utilisation et de nature des matières devant être ensilées.

### 9.7.2 Flèches

- (1) Il convient de prendre la valeur limite de flèche latérale globale égale à la plus petite des deux valeurs suivantes :

$$\delta_{\max} = 0,02 H \quad \dots (9.8)$$

$$\delta_{\max} = 10 t \quad \dots (9.9)$$

où :

$H$  hauteur de la structure mesurée entre la fondation et le toit ;

$t$  épaisseur de la plaque la plus mince de la paroi.

- (2) Il convient que la flèche maximum  $\delta_{\max}$  dans toute section de panneau par rapport à ses bords soit limitée à la valeur suivante :

$$\delta_{\max} < 0,05 L \quad \dots (9.10)$$

où  $L$  représente la dimension la plus courte de la plaque rectangulaire.

## Annexe A

(normative)

### Actions et combinaisons d'actions exercées sur les silos

#### A.1 Actions pour les combinaisons

Il convient de considérer les actions suivantes dans le calcul à l'état limite ultime du silo :

- remplissage et stockage de particules solides (appelées «charges de remplissage» dans l'ENV 1991-4) ;
- vidange de particules solides (appelées «charges de vidange» dans l'ENV 1991-4) ;
- vent lorsque le silo est plein ou vide ;
- neige ;
- déformations ou actions imposées : charges variables ;
- charges thermiques ;
- déformation imposée : tassement des fondations.

#### A.2 Situations de calcul et combinaisons d'actions pour les Classes de Fiabilité 2 et 3

Il convient de prendre l'action dominante ainsi que l'action permanente à leur pleine valeur dans chaque cas de charges, mais les actions concomitantes peuvent être réduites au moyen du coefficient  $\psi$  pour prendre en compte la probabilité réduite d'occurrence simultanée conformément à l'ENV 1991-1. Il convient d'utiliser la combinaison donnée dans le Tableau A.1, avec les actions concomitantes 1 et 2 réduites par leurs coefficients  $\psi$ .

Des combinaisons de charges supplémentaires ou des modifications de celles données ici peuvent être spécifiées dans les Documents d'Application Nationale.

**Tableau A.1 — Situations de calcul et combinaisons d'actions à considérer**

Titre abrégé	Situation de calcul / Action dominante	Actions permanentes	Action concomitante 1	$\psi_0$ †	Action concomitante 2	$\psi_0$ †
VM	Vidange de matières	Poids propre	Tassement des fondations	1,0	Neige ou vent ou thermique	0,6
					Déformation ou charges imposées	0,7
I	Déformation ou charges imposées	Poids propre	Remplissage de matières	1,0	Neige ou vent ou thermique	0,6
N	Neige	Poids propre	Remplissage de matières	1,0		
VP	Vent et plein	Poids propre	Remplissage de matières	1,0		
VV	Vent et vide	Poids propre	Vide de matières	0,0		
T	Thermique	Poids propre	Remplissage de matières	1,0		
F	Tassement des fondations	Poids propre	Vidange de matières	1,0	Neige ou vent ou thermique	0,6
				$\psi_1$ †		$\psi_2$ †
E	Explosion	Poids propre	Remplissage de matières	0,9	Déformation ou charges imposées	0,3
V	Impact de véhicule	Poids propre	Remplissage de matières	0,3	Déformation ou charges imposées	0,3

† Les valeurs de  $\psi$  indiquées sont prises dans l'ENV 1991-4.

### **A.3 Combinaisons d'actions pour la Classe de Fiabilité 1**

Les situations de calcul simplifiées suivantes peuvent être considérées pour les silos de Classe de Fiabilité 1 :

- remplissage ;
- vidange ;
- vent lorsque le silo est vide ;
- remplissage avec vent.

Un traitement simplifié des charges de vent est autorisé.

## Annexe B (informative)

### Règles simplifiées pour les silos circulaires de Classe de Fiabilité 1

Pour les silos circulaires munis de parois cylindriques de Classe de Fiabilité 1, ce traitement simplifié permet un calcul basé uniquement sur l'état limite ultime ne considérant qu'un nombre restreint de cas de charges.

#### B.1 Combinaisons d'actions pour la Classe de Fiabilité 1

Les combinaisons d'actions simplifiées en vue de l'utilisation avec la Classe de Fiabilité 1 sont données dans l'annexe A.

#### B.2 Évaluation des effets d'actions

- (1) Lorsque le calcul est effectué selon les expressions données dans la présente annexe, il convient de multiplier les contraintes de membrane par un facteur  $\boxed{1,1}$  pour prendre en compte les effets de flexion locale.
- (2) Lorsque le calcul est effectué selon les expressions données dans la présente annexe, il convient de multiplier les forces de trémie et de ceinture par un facteur  $\boxed{1,2}$  pour prendre en compte les effets d'asymétrie et de flexion de ceinture.

#### B.3 Évaluation à l'état limite ultime

##### B.3.1 Généralités

- (1) Les dispositions limitées données ici permettent un dimensionnement plus rapide, mais elles sont souvent plus sécuritaires que les dispositions plus complètes de la norme.

##### B.3.2 Parois cylindriques isotropes soudées ou boulonnées

###### B.3.2.1 État limite plastique

- (1) Sous l'effet de la pression intérieure et de toutes les charges de calcul appropriées, il convient de déterminer la résistance de calcul en chaque point en utilisant la variation de la pression intérieure, selon le cas, ainsi que la résistance locale s'y opposant.
- (2) En chaque point de la structure, il convient que les résultantes des efforts de membrane de calcul  $n_{xSd}$  et  $n_{\theta Sd}$  (les deux étant prises positives en traction) satisfassent la condition suivante :

$$\sqrt{n_{xSd}^2 - n_{xSd}n_{\theta Sd} + n_{\theta Sd}^2} \leq t f_y / \gamma_{M1a} \quad \dots \text{(B.1)}$$

où :

$n_{xSd}$  résultante des efforts de membrane verticaux (force par unité de largeur de paroi de coque) calculée par analyse à partir des valeurs de calcul des actions (charges) ;

$n_{\theta Sd}$  résultante des efforts de membrane circonférentiels (force par unité de largeur de paroi de coque) calculée par analyse à partir des valeurs de calcul des actions (charges) ;

$f_y$  limite d'élasticité de la plaque de paroi ;

$\gamma_{M1a}$  coefficient partiel pour l'état limite plastique (= 1,10).

(3) Au niveau de chaque joint boulonné de la structure, il convient que les contraintes de calcul satisfassent les conditions concernant la ruine de section nette :

$$\text{— pour la résistance méridienne} \quad n_{xSd} \leq f_u t / \gamma_{M1b} \quad (\text{B.2})$$

$$\text{— pour la résistance circonférentielle} \quad n_{\theta Sd} \leq f_u t / \gamma_{M1b} \quad \dots (\text{B.3})$$

où :

$f_u$  résistance ultime de la plaque de paroi ;

$\gamma_{M1b}$  coefficient partiel pour la rupture (= 1,25).

(4) Il convient d'effectuer le calcul des assemblages conformément aux ENV 1993-1-1 ou ENV 1993-1-3. Il convient de prendre l'efficacité de joint des détails de joints égale à  $j = \boxed{1,0}$ . Il convient de prendre en compte l'effet des trous de fixation conformément à l'ENV 1993-1-1 en utilisant les dispositions de 5.4.3 pour la traction et 5.4.4 pour la compression.

### B.3.2.2 Compression axiale

(1) Sous compression axiale, il convient de déterminer la résistance de calcul en chaque point de la coque. Il convient de négliger la variation verticale de la compression axiale, sauf lorsque les dispositions de l'ENV 1993-1-6 prévoient sa prise en compte. Dans les calculs du voilement, il convient de considérer les forces de membrane en compression comme positives afin d'éviter un usage généralisé de nombres négatifs.

(2) Lorsqu'on utilise un joint à recouvrement horizontal, entraînant l'excentrement de la force axiale passant par le joint, il convient de réduire la valeur de  $\alpha$  donnée ci-dessous à 70 % de sa valeur précédente si l'excentrement de la surface médiane des plaques entre elles est supérieur à  $t/2$  et si la variation d'épaisseur de plaque au niveau du joint n'excède pas  $t/4$ , où  $t$  représente l'épaisseur de la plaque la plus mince au niveau du joint. Lorsque l'excentrement est inférieur à cette valeur, ou si la variation d'épaisseur de plaque est supérieure, aucune réduction de la valeur de  $\alpha$  n'est nécessaire.

(3) Il convient de calculer le facteur d'imperfection élastique  $\alpha$  de la façon suivante :

$$\alpha = \frac{0,62}{1 + 0,035 \left(\frac{t}{r}\right)^{0,72}} \quad \dots (\text{B.3})$$

où :

$r$  rayon de la paroi du silo ;

$t$  épaisseur de la plaque de paroi à l'emplacement étudié.

(4) Il convient de calculer la contrainte critique de voilement  $\sigma_{xRc}$  en un point quelconque de la paroi isotrope de la façon suivante :

$$\sigma_{xRc} = 0,605 E \frac{t}{r} \quad \dots (\text{B.4})$$

(5) Il convient de calculer la contrainte caractéristique de voilement de la façon suivante :

$$\sigma_{xRk} = \chi_x f_y \quad \dots (\text{B.5})$$

où :

$$\chi_x = 1 \text{ lorsque } \bar{\lambda}_x \leq \bar{\lambda}_0 \quad \dots (\text{B.6})$$

$$\chi_x = 1 - 0,6 \left( \frac{\bar{\lambda}_x - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right) \text{ lorsque } \bar{\lambda}_0 \leq \bar{\lambda}_x \leq \bar{\lambda}_p \quad \dots (\text{B.7})$$

$$\chi_x = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}_x^2} \text{ lorsque } \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda}_x \quad \dots (\text{B.8})$$

$$\text{où } \bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{xRc}}}, \bar{\lambda}_0 = 0,2 \text{ et } \bar{\lambda}_p = \sqrt{2,5\alpha}$$

(6) En chaque point de la structure, il convient que l'effort de membrane de calcul  $n_{xSd}$  (compression positive) satisfasse la condition suivante :

$$n_{xSd} \leq t \sigma_{xRk} / \gamma_{M3} \quad \dots \text{ (B.9)}$$

où  $\gamma_{M3}$  est donné en 2.10.2 (= 1,10).

(7) Il convient de calculer l'imperfection mesurable admissible maximum, en utilisant les procédures de l'ENV 1993-1-6 et en excluant les mesures sur les joints à recouvrement, de la façon suivante :

$$\Delta w_{od} = 0,0375 \sqrt{rt} \quad \dots \text{ (B.10)}$$

(8) Il convient de justifier la coque au voilement sous compression axiale au-dessus d'un appui local, à proximité d'une console (destinée par exemple à supporter un portique de convoyeur) et à proximité d'une ouverture, comme indiqué dans 5.5.

### B.3.2.3 Pression extérieure, vide partiel intérieur et vent

(1) Pour un vide intérieur partiel uniforme (pression extérieure), lorsqu'il existe un toit assemblé structurellement, il convient de calculer la pression extérieure critique de voilement  $p_{nRcu}$  pour la paroi isotrope de la façon suivante :

$$p_{nRcu} = 0,92 E \left( \frac{r}{\ell} \right) \left( \frac{t}{r} \right)^{2,5} \quad \dots \text{ (B.11)}$$

où :

- $r$  rayon de la paroi du silo ;
- $t$  épaisseur de la partie la plus mince de la paroi ;
- $\ell$  hauteur entre raidisseurs annulaires ou limites.

(2) Il convient que la valeur de calcul de la pression extérieure maximum  $p_{nSd}$  agissant sur la structure sous l'effet des actions combinées du vent et du vide partiel satisfasse la condition suivante :

$$p_{nSd} \leq \alpha_n p_{nRcu} / \gamma_{M3} \quad \dots \text{ (B.12)}$$

avec  $\alpha_n = 0,5$  et  $\gamma_{M3} = 1,10$  (donné par 2.10.2).

(3) Si le bord supérieur du cylindre n'est pas assemblé au toit, il convient de remplacer cette procédure simplifiée par celle donnée en 5.3.

### B.3.3 Trémies soudées coniques

(1) La procédure de calcul simplifiée peut être utilisée à condition que les deux conditions suivantes soient satisfaites :

- a) un coefficient partiel majoré  $\gamma_{M1} = \boxed{1,4}$  est utilisé pour la trémie ;
- b) aucun appui ou raidisseur méridien local n'est fixé sur la paroi de trémie à proximité de la zone de transition.

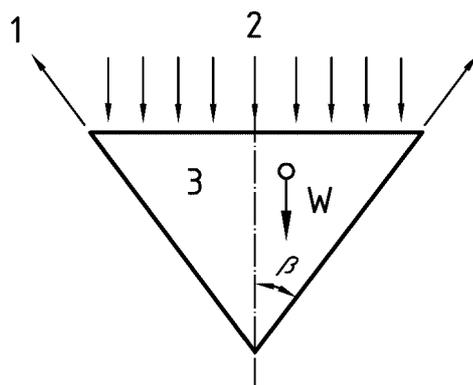
(2) Lorsque le seul chargement considéré est la gravité et la charge d'écoulement des matières ensilées, il convient d'évaluer la force méridienne par unité de circonférence à transmettre par l'intermédiaire de ce joint en utilisant l'équilibre global, voir Figure B.1. Il convient de multiplier la valeur calculée par un facteur additionnel  $\boxed{1,2}$  pour prendre en compte la non-uniformité du chargement se produisant en exploitation.

(3) Il convient que la valeur de calcul de la traction de membrane méridienne exercée au sommet de la trémie  $n_{\phi Sd}$  satisfasse la condition suivante :

$$n_{\phi Sd} \leq \boxed{0,80} t f_u / \gamma_{M1b} \quad \dots \text{ (B.13)}$$

où :

- $t$  épaisseur de la trémie ;
- $f_u$  résistance à la traction ;
- $\gamma_{M1b}$  coefficient partiel pour la rupture (= 1,25).



**Légende**

- 1 Traction méridienne  $n_{\phi}$
- 2 Pression du contenu du cylindre
- 3 Matières ensilées

**Figure B.1 — Équilibre global de la trémie**

**B.3.4 Zone de transition**

(1) Cette méthode de calcul simplifiée peut être utilisée pour les silos de Classe de Fiabilité 1 où la jonction est composée d'une section conique et d'une section cylindrique, avec ou sans la présence de plaque annulaire ou autre ceinture compacte similaire au niveau de la jonction, voir Figure B.2.

(2) Il convient de calculer l'aire totale efficace de la ceinture  $A_{et}$  de la façon suivante :

$$A_{et} = A_p + 0,4 \sqrt{r} \left\{ t_c^{3/2} + t_s^{3/2} + \frac{t_h^{3/2}}{\sqrt{\cos \beta}} \right\} \quad \dots \text{(B.14)}$$

où :

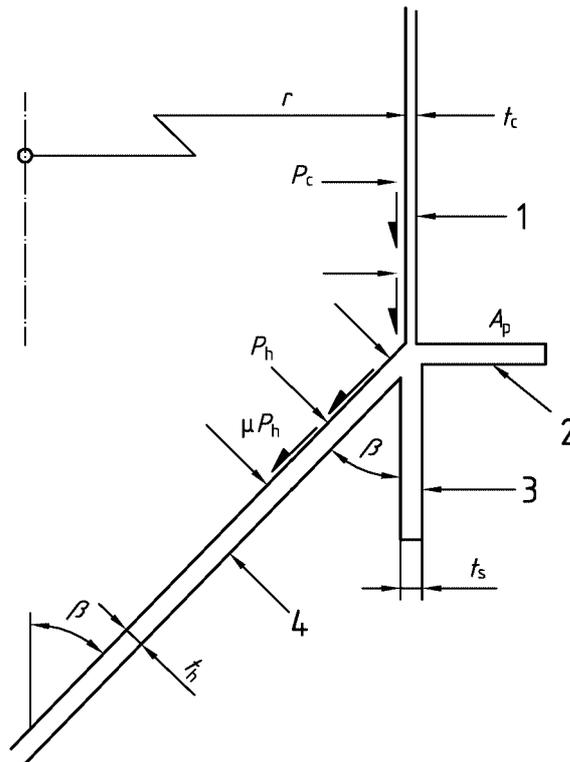
- $r$  rayon de la paroi du cylindre du silo ;
- $t_c$  épaisseur du cylindre ;
- $t_s$  épaisseur de la jupe ;
- $t_h$  épaisseur de la trémie ;
- $\beta$  demi-angle du sommet du cône de la trémie ;
- $A_p$  aire de la ceinture au niveau de la jonction.

(3) Il convient de déterminer la valeur de calcul de la force de compression circonférentielle  $N_{Sd}$  exercée dans la jonction de la façon suivante :

$$N_{Sd} = n_{\phi h, Sd} r \sin \beta \quad \dots \text{(B.15)}$$

où :

- $n_{\phi h, Sd}$  valeur de calcul de la traction méridienne par unité de circonférence au sommet de la trémie, voir B.1.



**Légende**

- 1 Cylindre
- 2 Ceinture
- 3 Jupe
- 4 Trémie

**Figure B.2 — Notation pour une zone de transition simple**

(4) Il convient que la contrainte circonférentielle moyenne exercée dans la ceinture satisfasse la condition :

$$\frac{N_{Sd}}{A_{et}} \leq f_y / \gamma_{M1a} \quad \dots (B.16)$$

où :

$f_y$  limite d'élasticité la plus faible des matériaux de la ceinture et de la coque ;

$\gamma_{M1a}$  coefficient partiel pour la plasticité (= 1,10).

## Annexe C (informative)

### Expressions pour les efforts de membrane exercées dans les trémies coniques

Les expressions données ici permettent de déterminer des contraintes par la théorie de membrane pour les cas qui ne sont pas traités dans les textes courants sur les coques ou les structures de silos. Les expressions de théorie de membrane prévoient de façon précise les contraintes de membrane exercées dans le corps de la trémie (c'est-à-dire aux points qui ne sont pas adjacents à la transition ou à un appui) à condition que les chargements appliqués soient conformes aux schémas définis dans l'ENV 1991-4.

Système de coordonnées avec origine pour  $z$  au sommet.

Hauteur verticale de trémie  $h$ .

#### C.1 Pression uniforme $p_0$ avec frottement de paroi $\mu$

$$\sigma_{\theta} = \frac{p_0 z}{t} \sec \beta \tan \beta \quad \dots \text{ (C.1)}$$

$$\sigma_{\phi} = \frac{p_0 z}{2t} \sec \beta (\tan \beta + \mu) \quad \dots \text{ (C.2)}$$

#### C.2 Pression variant linéairement de $p_1$ au sommet à $p_2$ à la transition avec frottement de paroi $\mu$

$$p = p_1 + \frac{z}{h} (p_2 - p_1) \quad \dots \text{ (C.3)}$$

$$\sigma_{\theta} = \left\{ p_1 + \frac{z}{h} (p_2 - p_1) \right\} \frac{z}{t} \sec \beta \tan \beta \quad \dots \text{ (C.4)}$$

$$\sigma_{\phi} = \left\{ 3p_1 + \frac{2z}{h} (p_2 - p_1) \right\} \frac{z}{6t} \sec \beta (\tan \beta + \mu) \quad \dots \text{ (C.5)}$$

Pour  $\mu = 0$ , la contrainte équivalente de Von Mises maximum survient dans le corps du cône si  $p_2 < 0,48 p_1$  à la hauteur :

$$z = 0,52 \left( \frac{p_1}{p_2 - p_1} \right) h \quad \dots \text{ (C.6)}$$

### C.3 Champ de contrainte radiale avec diagramme triangulaire à la transition

$$p = p_1 \frac{z}{h_1} \quad \text{pour } 0 < z < h_1 \quad \dots \text{ (C.7)}$$

$$p = \frac{p_1(h-z) - p_2(h_1-z)}{h-h_1} \quad \text{pour } h_1 < z < h \quad \dots \text{ (C.8)}$$

$$\sigma_\theta = p_1 \left( \frac{z^2}{3ht} \right) \sec\beta \tan\beta \quad \text{pour } 0 < z < h_1 \quad \dots \text{ (C.9)}$$

$$\sigma_\theta = \left\{ \frac{zp_1(h-z) - p_2(h_1-z)}{t(h-h_1)} \right\} \sec\beta \tan\beta \quad \text{pour } h_1 < z < h \quad \dots \text{ (C.10)}$$

$$\sigma_\phi = \frac{p_1 z^2}{3th_1} \sec\beta (\tan\beta + \mu) \quad \text{pour } 0 < z < h_1 \quad \dots \text{ (C.11)}$$

$$\sigma_\phi = \left\{ \frac{2z^3(p_2 - p_1) + (3z^2 - h_1^2)(hp_1 - h_1p_2)}{6zt(h-h_1)} \right\} \sec\beta (\tan\beta + \mu) \quad \text{pour } h_1 < z < h \quad \dots \text{ (C.12)}$$

### C.4 Pressions selon la théorie de Walker généralisée

Le schéma des pressions peut être défini en fonction de la pression normale  $p$  avec traction par frottement de paroi concomitante  $\mu p$  de la façon suivante :

$$p = Fq \quad \dots \text{ (C.13)}$$

$$q = \frac{\gamma h}{n-1} \left[ \left( \frac{z}{h} \right) - \left( \frac{z}{h} \right)^n \right] + q_t \left( \frac{z}{h} \right)^n \quad \dots \text{ (C.14)}$$

avec :

$$n = 2(F\mu \cot\beta + F - 1) \quad \dots \text{ (C.15)}$$

$F$  représente le rapport de la pression sur la paroi  $p$  à la contrainte verticale dans la matière  $q$  et  $q_t$  représente la contrainte verticale moyenne exercée dans la matière au niveau de la transition :

$$\sigma_\theta = \left[ \frac{\gamma h}{(n-1)} \left( \frac{z}{h} \right)^2 \left( q_t - \frac{\gamma h}{(n-1)} \right) \left( \frac{z}{h} \right)^{n+1} \right] F h \sec\beta \tan\beta \quad \dots \text{ (C.16)}$$

$$\sigma_\phi = \left[ \frac{\gamma h}{3(n-1)} \left( \frac{z}{h} \right)^2 + \frac{1}{(n+2)} \left( q_t - \frac{\gamma h}{(n-1)} \right) \left( \frac{z}{h} \right)^{n+1} \right] F h \sec\beta (\tan\beta + \mu) \quad \dots \text{ (C.17)}$$

## Annexe D (informative)

### Répartition de la pression du vent autour des structures de silo circulaires

La répartition des pressions de vent autour d'un silo circulaire surbaissé ou d'un réservoir reposant sur le sol (voir Figure D.1) peut être importante pour le dimensionnement des ancrages et la résistance au voilement provoqué par le vent. Les valeurs données dans l'ENV 1991-2-4 peuvent ne pas fournir de détails suffisants dans certains cas.

La variation de pression autour d'un silo isolé peut être définie en fonction de la coordonnée circonférentielle  $\theta$ , avec son origine au niveau de la génératrice au vent (voir Figure D.2).

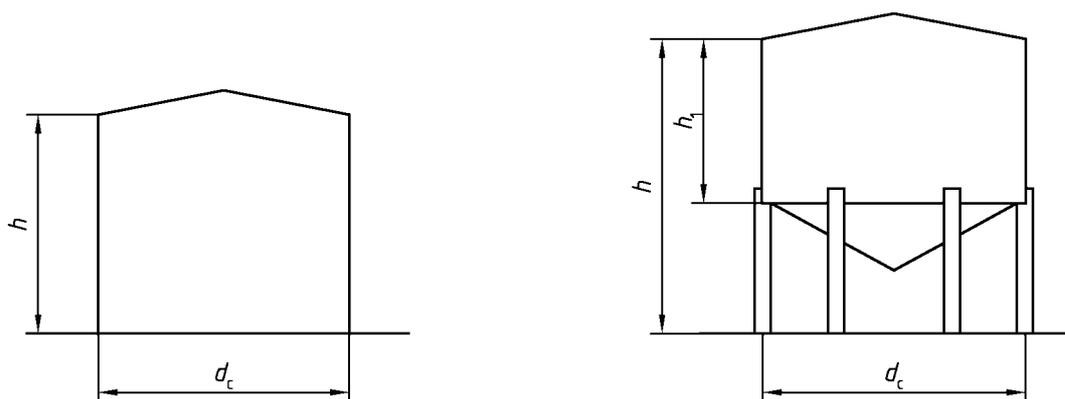
La variation circonférentielle de la répartition de pression sur un silo à toit fermé isolé (voir Figure D.2) est donnée par l'expression :

$$C_p = -0,70 + 0,20(d_c/h) + 0,40\cos\theta + \{1,10 - 0,25(d_c/h)\}\cos2\theta + \{0,42 - 0,06(d_c/h)\}\cos3\theta - \{0,14 - 0,04(d_c/h)\}\cos4\theta - 0,08\cos5\theta \quad \dots (D.1)$$

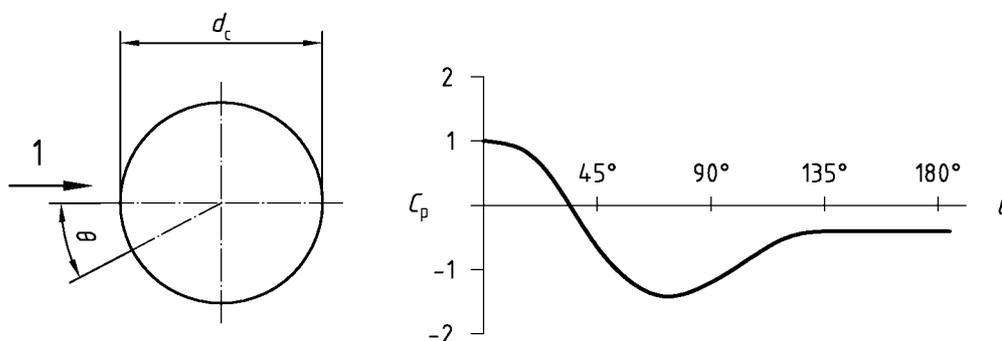
où  $d_c$  représente le diamètre du silo et  $h$  sa hauteur hors-tout ( $h/d_c$  est le coefficient d'aspect) (voir Figure D.1).

La variation circonférentielle de la répartition de pression sur un silo à toit fermé situé au sein d'un groupe (voir Figure D.2) peut être prise égale à :

$$C_p = -0,09 + 0,66\cos\theta + 0,50\cos2\theta - 0,09\cos3\theta - 0,18\cos4\theta \quad \dots (D.2)$$



**Figure D.1 — Silo avec charge de vent**



**Figure D.2 — Variation de pression du vent autour de la demi-circonférence**

Lorsque le silo ne possède pas de toit fermé, les valeurs uniformes supplémentaires suivantes de coefficient de pression  $C_p$  peuvent être ajoutées aux valeurs ci-dessus, réduisant ainsi la pression vers l'intérieur du côté du vent :

- a) pression intérieure supplémentaire de silo à sommet ouvert :  $\Delta C_p = -0,6$  ;
- b) pression intérieure supplémentaire de silo à évent muni d'une petite ouverture :  $\Delta C_p = -0,4$ .

**Annexe E**  
(informative)  
**Références**

**E.1 Références concernant les structures de silos cylindriques**

- [1] Briassoulis, D. and Pecknold, D.A. (1986) «Anchorage Requirements» for Wind-Loaded Silos, J Struct Eng, ASCE, Vol 112, ST2, Feb 1986, pp308-325.
- [2] Brown, C.J. and Nielsen, J. (Eds) (1998) *Silos : Fundamentals of Theory, Behaviour and Design*, E & FN Spon, London.
- [3] Chen, J.F. and Rotter, J.M. (1998) «Effective Cross-sections of Asymmetric Rings on Cylindrical Shells», Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 124, No. 9, Sept, pp 1074-1081.
- [4] Eccleston, P.A. (1987) «The Buckling of Squat Silos after Eccentric Filling», BEng. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Sydney.
- [5] ECCS (1988) European Recommendations for Steel Construction : Buckling of Shells, 4th edition, European Convention for Constructional Steelwork, Brussels.
- [6] Gale, B.R., Hoadley, P.J. and Schmidt, L.C. (1986) «Aspects of Eccentric Discharge of Granular Material from a Circular Silo», 2nd Int Conf Bulk Matls Stor Handl & Tptn, IE Aust., 258-263.
- [7] Gaylord, E.H. and Gaylord, C.N. (1984) Design of Steel Bins for Storage of Bulk Solids, Prentice Hall.
- [8] Gorenc, B.E. «Design of Supports for Steel Bins», in Design of Steel Bins for the Storage of Bulk Solids, edited by J.M. Rotter, University of Sydney, March 1985, pp 184-188.
- [9] Greiner, R. (1983) «Zur Einleitung grosser Einzelkraefte in Stehende Zylindrische Behälter aus Stahl», in Sonderprobleme des Konstruktiven Ingenieurbaus zum 60 Geburtstag von Prof. Fritz Resinger, Heft 3, April 1983, pp 11-62.
- [10] Greiner, R. (1984) «Zur Laengskrafteinleitung in stehende zylindrische Behälter aus Stahl», Stahlbau, Vol. 53, No. 7, pp 210-215.
- [11] Greiner, R. (1991) «Elastic plastic buckling at cone cylinder junctions of silos», in Buckling of Shell Structures on Land, in the Sea and in the Air, ed J.F. Jullien, Villeurbanne, Lyon, France, 17-19 Sept 1991, Elsevier, London, pp 304-312.
- [12] Greiner, R. and Guggenberger, W. (1996) «Buckling Behaviour of Axially Loaded Cylinders on Local Supports — with and without Internal Pressure», Proc., International Conference on Structural Steelwork, Hong Kong, December 1996, pp 741-746.
- [13] Greiner, R. and Ofner, R. (1991) Elastic Plastic Buckling at Cone Cylinder Junctions of Silos. in Jullien, J. F. (ed.) : Buckling of Shell Structures on Land, in the Sea and in the Air. Elsevier, London 1991, pp. 304-312.
- [14] Guggenberger, W. (1991) «Buckling of Cylindrical Shells under Local Axial Loads», Int. Coll. Buckling of Shell Structs on Land, Sea & Air, Lyon, 323-333.
- [15] Guggenberger, W. (1992) «Nichtlineares Beulverhalten von Kreiszyinderschalen unter lokaler Axialbelastung», Doctoral dissertation, Institut für Stahlbau, TU Graz, Austria.
- [16] Guggenberger, W. (1996) «Proposal for Design Rules of Axially Loaded Steel Cylinders on Local Supports», Proc., Int. Conf. on Structural Steelwork, Hong Kong, December 1996, pp 1225-1230.
- [17] Jumikis, P.T. and Rotter, J.M. (1986) «Buckling of Cylindrical Shells under Non-Uniform Torsion», Proc., Tenth Austral. Conf. on the Mechanics of Structures and Materials, Adelaide, pp 211-216.
- [18] Peter, J. (1974) «Zur Stabilität von Kreiszyinderschalen unter ungleichmassig verteilten axialen Randbelastungen», Dissertation, Univ Hannover.
- [19] Roark, R.J. and Young, W.C. (1975) «Formulas for Stress and Strain», 5th edn, McGraw Hill.
- [20] Rotter, J.M. (1982) «Analysis of Ringbeams in Column-Supported Bins», 8th Austral. Conf Mechs of Structs & Matls, Univ. Newcastle, Australia.

- [21] Rotter, J.M. (1983) «Structural Effects of Eccentric Loading in Shallow Steel Bins», 2nd Int. Conf. on Design of Silos for Strength & Flow, Stratford on Avon, 446-463.
- [22] Rotter, J.M. (1985) «Analysis and Design of Ringbeams», in Design of Steel Bins for the Storage of Bulk Solids, ed. J.M. Rotter, Univ. Sydney, 164-183.
- [23] Rotter, J.M. (1986a) «On the Significance of Switch Pressures at the Transition in Elevated Steel Bins», 2nd Int Conf Bulk Matls Stor Handl & Tptn, IE Aust., 82-88.
- [24] Rotter, J.M. (1986b) «The Analysis of Steel Bins Subject to Eccentric Discharge», 2nd Int Conf Bulk Matls Stor Handl & Tptn, IE Aust., 264-271.
- [25] Rotter, J.M. (1988) «Recent Research on the Strength of Circular Steel Silos», Int. Conf. : 'Silos- Forschung und Praxis', Univ. Karlsruhe, 265-286.
- [26] Rotter, J.M. (1990a) «Structural Design of Light Gauge Silo Hoppers», J. Struct. Engg, ASCE, 116, (7), 1907-1922.
- [27] Rotter, J.M. (1990b) «Local Inelastic Collapse of Pressurised Thin Cylindrical Steel Shells under Axial Compression», J. Struct. Engg, ASCE, 116, (7), 1955-1970.
- [28] Rotter, J.M. (1990c) «Critical Design Features of Steel Industrial Storage Structures», in Developments in Structural Engineering, edited by B.H.V. Topping, Spon, London, 1990, pp 909-928.
- [29] Rotter, J.M. (1992) «Structural Problems in Steel Silos», Proc., International Conference on Silos — Forschungs und Praxis, Universität Karlsruhe, 8-9 October 1992, pp 51-63.
- [30] Rotter, J.M. (1997) «Pressurised axially compressed cylinders», Proc., Int. Conf. on Carrying Capacity of Steel Shell Structures, Brno, 1-3 October 1997, pp 354-360.
- [31] Rotter, J.M. (1998) «Development of proposed European design rules for buckling of axially compressed cylinders», Advances in Structural Engineering, Vol. 1, No. 4, July, pp 273-286.
- [32] Rotter, J.M. (1998) «Shell structures : the new European standard and current research needs», Thin-Walled Structures, Vol. 31, pp 3-23.
- [33] Rotter, J.M. (1998) «Metal silos», Progress in Structural Engineering and Materials, Vol. 1, No. 4, July, pp 428-435.
- [34] Rotter, J.M., Coleman, R., Ding, X.L. and Teng, J.G. (1992) «The Measurement of Imperfections in Cylindrical Silos for Buckling Strength Assessment», 4th Int Conf. Bulk Matls Stor Handl & Tptn, IE Aust.
- [35] Rotter, J.M., Greiner, R., Guggenberger, W., Li, H.Y. and She, K.M. (1993) «Proposed Design Rule for Buckling Strength Assessment of Cylindrical Shells under Local Axial Loads», submission to ECCS TWG 8.4 Buckling of Shells, September 1993.
- [36] Rotter, J.M. and Hull, T.S. (1989) «Wall Loads in Squat Steel Silos during Earthquakes», Engineering Structures, 11 (3), 139-147.
- [37] Rotter, J.M., Jumikis, P.T., Fleming, S.P. and Porter, S.J. (1989) «Experiments on the Buckling of Thin-Walled Model Silo Structures», J Constr Steel Res, 13 (4), 271-299.
- [38] Rotter, J.M., Pham, L. and Nielsen, J. (1986) «On the Specification of Loads for the Structural Design of Bins and Silos», Proc., 2nd Int Conf. Bulk Matls Stor Handl & Tptn, IE Aust., July, pp 241-247.
- [39] Rotter, J.M. and Teng, J.G. (1989a) «Elastic Stability of Lap-Jointed Cylinders», J. Struct. Engg, ASCE, 115 (3), 683-697.
- [40] Rotter, J.M. and Teng, J.G. (1989b) «Elastic Stability of Cylindrical Shells with Weld Depressions», J. Struct. Engg, ASCE, 115 (5), 1244-1263.
- [41] Rotter, J.M., Teng, J.G. and Li, H.Y. (1991) «Buckling in Thin Elastic Cylinders on Column Supports», Int. Coll. Buckling of Shell Structs on Land, Sea & Air, Lyon, 334-343.
- [42] Rotter, J.M. and Zhang, Q. (1990) «Elastic Buckling of Imperfect Cylinders containing Granular Solids», J. Struct. Engg, ASCE, 116 (8) 2253-2271.
- [43] Saal, H. (1982) «Buckling of Long Liquid-filled Cylindrical Shells», in Buckling of Shells, Ed. E. Ramm, Springer-Verlag.
- [44] Safarian, S.S. and Harris, E.C. (1985) «Design and Construction of Silos and Bunkers», Van Nostrand Reinhold, New York.

- [45] Samuelson, L.A. (1987) «Design of Cylindrical Shells subjected to Local Loads in Combination with Axial or Radial Pressure», Proc. Int. Colloquium on the Stability of Plate and Shell Structures, Gent, Belgium, 6-8 April, ECCS, pp 589-596.
- [46] She, K.M. and Rotter, J.M. (1993) «Nonlinear and Stability Behaviour of Discretely-Supported Cylinders» Research Report 93-01, Department of Civil Engineering, University of Edinburgh.
- [47] Teng, J.G. and Rotter, J.M. (1989) «Plastic Collapse of Restrained Steel Silo Hoppers», J Constr Steel Res, 14 (2) 139-158.
- [48] Teng, J.G. and Rotter, J.M. (1990) «A Study of Buckling in Column-Supported Cylinders», IUTAM Symp. on Contact Loading & Local Effects in Thin-Walled Plated & Shell Structs, Prague, Prelim. Rpt, 39-48.
- [49] Teng, J.G. and Rotter, J.M. (1991a) «The Strength of Welded Steel Silo Hoppers under Filling and Flow Pressures», J. Struct. Engg, ASCE, 117 (9) 2567-2583.
- [50] Teng, J.G. and Rotter, J.M. (1991b) «The Collapse Behaviour and Strength of Steel Silo Transition Junctions» in two parts, J. Struct. Engg, ASCE, 117 (12) 3587-3604 & 3605-3622.
- [51] Teng, J.G. and Rotter, J.M. (1991c) «The Strength of Welded Steel Silo Hoppers under Filling and Flow Pressures», Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117, No. 9, pp 2567-2583.
- [52] Teng, J.G. and Rotter, J.M. (1992a) «Buckling of Pressurized Axisymmetrically Imperfect Cylinders under Axial Loads», J. Engg Mechs, ASCE, Vol. 118, No. 2, Feb. 1992, pp 229-247.
- [53] Teng, J.G. and Rotter, J.M. (1992b) «Linear Bifurcation of Column-Supported Perfect Cylinders : Support Modelling and Boundary Conditions», Thin-Walled Structs, 14, 241-263.
- [54] Teng, J.G. and Rotter, J.M. (1993) «The Strength of Circular Steel Silos : New Investigations», Proc., Transactions of Civil Engineering, Institution of Engineers, Australia, Vol. CE35, No. 1, March 1993, pp 21-31.
- [55] Teng, J.G. (1993) «Plastic collapse at lap joints in pressurised cylinders under axial load», Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 120, No. 1, Jan., pp. 23-45.
- [56] Teng, J.G. (1994) «Cone-cylinder intersection under internal pressure : axisymmetric failure», Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 120, No. 9, Sept., pp. 1896-1912.
- [57] Teng, J.G. (1995) «Cone-cylinder intersection under internal pressure : nonsymmetric buckling», Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 121, No. 12, Dec., pp. 1298-1305.
- [58] Teng, J.G. (1995) «Internally pressurised cone-cylinder intersections : failure modes», in Structural Stability and Design, Eds Kitipornchai, Hancock and Bradford, Balkema, Rotterdam, pp 365-371.
- [59] Teng, J.G. (1996) «Buckling of thin shells : recent advances and trends», Applied Mechanics Reviews, Vo. 49, No. 4 April, pp 263-274.
- [60] Teng, J.G. (1996) «The effective area method for collapse strength prediction of complex metal shell intersections», Proc., International Conference on Advances in Steel Structures, Hong Kong, 11-14 Dec 1996.
- [61] Teng, J.G. (1996) «Elastic buckling of cone-cylinder intersection under localised circumferential compression», Engineering Structures, Vol. 18, No. 1, pp 41-48.
- [62] Teng, J.G. (1997) «Out-of-plane plastic buckling strength of annular plate ringbeams in steel silos», Proc., Int. Conf. on Carrying Capacity of Steel Shell Structures, Brno, 1-3 October 1997, pp 78-84.
- [63] Teng, J.G. (1998) «Plastic collapse behaviour and strength of cone-cylinder and cone-cone junctions», PVP-Vol. 360, Pressure Vessel and Piping Codes and Standards — 1998, ASME, pp 391-400.
- [64] Teng, J.G. and Chan, F. (1997) «Elastic buckling strength of T-section ringbeams clamped at the inner edge», Proc., Int. Conf. on Carrying Capacity of Steel Shell Structures, Brno, 1-3 October 1997, pp 71-77.
- [65] Trahair, N.S., Abel, A., Ansourian, P., Irvine, H.M. and Rotter, J.M. (1983) Structural Design of Steel Bins for Bulk Solids, Australian Institute of Steel Construction, Sydney.
- [66] Wood, J.G.M. (1983) «The Analysis of Silo Structures Subject to Eccentric Discharge», Proc., Second Internat. Conf. on Design of Silos for Strength and Flow, Stratford-upon-Avon, pp 132-144.
- [67] Yamaki, N. (1984) «Elastic Stability of Circular Cylindrical Shells», North Holland, Elsevier Applied Science Publishers, Amsterdam, 1984.

## **E.2 Références concernant les structures de silos rectangulaires**

- [1] Sokol, L. «Calcul des tirants dans les cadres de silos», Revue Construction Métallique n° 2.
- [2] Sokol L. (1988) «Sollicitations ultimes dans une section circulaire», Revue Construction Métallique n° 2.
- [3] Woolcock, S.T. and Kitipornchai, S. (1975) «Tension members and self weight», Steel Construction, Australian Institute for Steel Construction, Vol. 19 n° 1.
- [4] Regan, P.E. and Salter, P.R. (1984) «Tests on Welded-Angle Tension Members», The Structural Engineer, Volume 62B, N° 2.
- [5] Reimbert, M. and Reimbert, A. (1961) «Silos», Editions Eyrolles (3 ème édition).
- [6] Kroll, D. (1975) «Untersuchungen über die Belattung Horizontaler Zuganker Sowie Vertical Hängependel und Gehänge durch Schüttgüter in Silozellen», Dr.-Ing. Dissertation, TU Braunschweig.
- [7] Essais d'attaches de tirants d'angles de silos. (internal report CEBTP, France).
- [8] Norme AFNOR P 22-630 (1992) «Silos en acier. Calcul des actions dans les cellules», Jan.E.3 — Références concernant les structures de silo en tôles ondulées.

## **E.3 Références concernant les structures de silo en tôles ondulées**

- [1] Briassoulis, D. (1986) «Equivalent Orthotropic Properties of Corrugated Sheets», Computers and Structures, Vol. 23, No. 2, pp 129-138.
- [2] DIN 18914 : «Dünnwandige Rundsilos aus Stahl» (Round thin-walled steel silos) sept. 1985.
- [3] Aribert, J.M., Brozzetti, J. and Rival, J.C. (1985) De l'usage des boulons normaux dans les assemblages sollicités en cisaillement, Construction Métallique, n° 1, 1985.
- [4] Abdel-Sayed, G. (1970) «Critical Shear Loading of Curved Panels of Corrugated Sheets», J. Eng. Mech. Divn, ASCE, Vol. 96, EM6, Dec., pp 895-912.
- [5] Baruch, M. and Singer, J. «Effect of Eccentricity of Stiffeners on the General Instability of Stiffened Cylindrical Shells under Hydrostatic Pressure», Journal of Mechanical Engineering Sciences, Vol. 5, 1963, pp 23-27.
- [6] Mang, H.A., Girya-Vallabhan, V.C. and Smith, H.J. (1976) «Finite Element Analysis of Doubly Corrugated Shells», J. Struct. Divn., ASCE, Vol. 102, ST10, Oct, pp 2033-2051.
- [7] Rotter, J.M. (1990) «Structural Design of Light Gauge Silo Hoppers», J. Struct. Engrg, ASCE, Vol 116, No. 7, July 1990, pp 1907-1922.
- [8] Rotter, J.M., Zhang, Q. and Teng, J.G., «Corrugation Collapse in Circumferentially Corrugated Steel Cylinders», First National Structural Engineering Conference, Melbourne, Institution of Engineers, Australia, August 1987, pp 377-383.
- [9] Trahair, N.S., Abel, A., Ansourian, P., Irvine, H.M. and Rotter, J.M. (1983) Structural Design of Steel Bins for Bulk Solids, Australian Institute of Steel Construction, Sydney.
- [10] Zhang, Q. and Rotter, J.M. «Equivalent Orthotropic Properties of Cylindrical Corrugated Shells», Proc., Eleventh Australasian Conference on the Mechanics of Structures and Materials, Auckland, New Zealand, Aug. 1988, pp 417-422.