

**norme européenne****FD ENV 1993-1-6****Septembre 2002**

norme française

Indice de classement : P 22-316

ICS : 91.010.30 ; 91.080.10

Eurocode 3

**Calcul des structures en acier****Partie 1-6 : Règles générales — Règles supplémentaires  
pour la résistance et la stabilité des structures en coque**E : Eurocode 3 — Design of steel structures — Part 1-6: General rules —  
Supplementary rules for the shell structuresD : Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten —  
Teil 1-6: Allgemeine Bemessungsregeln — Ergänzende Regeln  
für Schalentragerwerke***Fascicule de documentation***

publié par AFNOR en septembre 2002.

***Correspondance***Le présent document reproduit intégralement la Prénorme européenne  
ENV 1993-1-6:1999.***Analyse***Le présent document s'applique au calcul structural des structures en plaques  
d'acier possédant la forme d'une coque de révolution. Il est destiné à être utilisé  
conjointement avec les ENV 1993-1-1, ENV 1993-1-3, ENV 1993-1-4 et avec les par-  
ties d'application appropriée de l'ENV 1993, à savoir les parties 3 et 4.***Descripteurs*****Thésaurus International Technique** : bâtiment, génie civil, construction métallique,  
acier de construction, plaque, forme, définition, symbole, calcul, matériau, géomé-  
trie, résistance des matériaux, stabilité, contrainte.***Modifications******Corrections***

## Membres de la commission de normalisation

Président : M MAITRE

Secrétariat : M PESCATORE — BNCM

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

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

*Le présent document traite du calcul des coques de révolution. Les principales parties applicatives ayant été publiées sous forme de Fascicules de Documentation, il a été décidé de ne pas établir de Document d'Application Nationale (D.A.N.).*

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

## Liste des normes et textes normatifs de référence

Normes européennes ou internationales publiées		Normes pouvant être appliquées avec l'ENV	
Désignation	Intitulé	Désignation	Intitulé
ENV 1090	Exécution des structures en acier	FD ENV 1090-1 XP P 22 501-1	Exécution des structures en acier — 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 1991-2-3	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 sur les structures — Actions thermiques		
ENV 1991-4	Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures — Partie 4 : Actions dans les silos et réservoirs	FD ENV 1991-4 P 06-104	Eurocode 1 : Bases de calcul et actions sur les structures — 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 1993-1-4	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-4 : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables	XP ENV 1993-1-4 P 22-314	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et document d'application nationale — Partie 1-4 : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables
ENV 1993-2	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 2 : Ponts métalliques	XP ENV 1993-2 P 22-320	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et document d'application nationale — Partie 2 : Ponts métalliques
ENV 1993-3-1	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Tours, mâts et cheminées — Partie 3-1 : pylônes et mâts haubanés	XP ENV 1993-3-1 P 22-331	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et Document d'Application Nationale — Tours, mâts et cheminées — Partie 3-1 : pylônes et mâts haubanés
ENV 1993-3-2	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Tours, mâts et cheminées — Partie 3-2 : Cheminées	XP ENV 1993-3-2 P 22-332	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et Document d'Application Nationale — Tours, mâts et cheminées — Partie 3-2 : Cheminées
ENV 1993-4-1	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-1 : Silos, réservoirs et canalisations — Silos	FD ENV 1993-4-1 P 22-341	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-1 : Silos, réservoirs et canalisations — Silos
ENV 1993-4-2	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-2 : Silos, réservoirs et canalisations — Réservoirs	FD ENV 1993-4-2 P 22-342	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-2 : Silos, réservoirs et canalisations — Réservoirs
ENV 1993-4-3	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-3 : Silos, réservoirs et canalisations — Canalisations	FD ENV 1993-4-3 P 22-343	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-3 : Silos, réservoirs et canalisations — Canalisations



**Version française**

**Eurocode 3 : Calcul des structures en acier —  
Partie 1-6 : Règles générales —  
Règles supplémentaires pour la résistance  
et la stabilité des structures en coques**

Eurocode 3 : Bemessung und Konstruktion  
von Stahlbauten —  
Teil 1-6: Allgemeine Bemessungsregeln —  
Ergänzende Regeln für Schalentragerwerke

Eurocode 3 : Design of steel structures —  
Part 1-6: General rules —  
Supplementary rules for the shell structures

La présente prénorme européenne (ENV) a été adoptée par le CEN le 25 décembre 1998 comme norme expérimentale pour application provisoire. La période de validité de cette ENV est limitée initialement à trois ans. Après deux ans, les membres du CEN seront invités à soumettre leurs commentaires, en particulier sur l'éventualité de la conversion de l'ENV en norme européenne (EN).

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

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

**CEN**

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION

Europäisches Komitee für Normung  
European Committee for Standardization

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

## Sommaire

	Page
<b>Avant-propos</b> .....	4
<b>1 Généralités</b> .....	6
1.1 Objet .....	6
1.2 Distinction entre principes et règles d'application .....	7
1.3 Références normatives .....	8
1.4 Définitions .....	8
1.5 Unités .....	11
1.6 Symboles .....	11
1.7 Conventions de signes .....	14
<b>2 Bases de calcul</b> .....	14
2.1 Généralités .....	14
2.2 Types d'analyse .....	15
2.3 Conditions aux limites des coques .....	16
<b>3 Matériaux et géométrie</b> .....	17
3.1 Caractéristiques des matériaux .....	17
3.2 Valeurs de calcul des données géométriques .....	17
3.3 Tolérances géométriques et imperfections géométriques .....	17
<b>4 États limites ultimes dans les coques en acier</b> .....	18
4.1 États limites ultimes à considérer .....	18
4.2 Concepts de justification pour le calcul aux états limites des coques .....	19
<b>5 Sollicitations et contraintes dans les coques</b> .....	22
5.1 Sollicitations dans les coques .....	22
5.2 Modélisation de la coque en vue de l'analyse .....	22
5.3 Type d'analyse .....	24
<b>6 État limite plastique (EL1)</b> .....	25
6.1 Valeurs de calcul des actions .....	25
6.2 Calcul des contraintes .....	25
6.3 Calcul par analyse numérique globale MNA ou GMNA .....	26
6.4 Calcul direct .....	26
<b>7 État limite de plasticité cyclique (EL2)</b> .....	27
7.1 Valeurs de calcul des actions .....	27
7.2 Calcul des contraintes .....	27
7.3 Calcul par analyse numérique globale MNA ou GMNA .....	28
7.4 Calcul direct .....	28
<b>8 État limite de voilement (EL3)</b> .....	28
8.1 Valeurs de calcul des actions .....	28
8.2 Définitions et symboles particuliers .....	28
8.3 Conditions aux limites concernant le voilement .....	29
8.4 Tolérances géométriques concernant le voilement .....	29
8.5 Calcul des contraintes .....	35
8.6 Calcul par analyse numérique globale LA ou GNA .....	37
8.7 Calcul par analyse numérique globale GMNA .....	39
8.8 Calcul par analyse numérique globale GMNIA .....	40

## Sommaire (fin)

	Page
<b>9</b>	<b>État limite de fatigue (EL4)</b> ..... 42
<b>9.1</b>	Valeurs de calcul des actions ..... 42
<b>9.2</b>	Calcul des contraintes ..... 42
<b>9.3</b>	Calcul par analyse numérique globale LA ou GNA ..... 43
<b>Annexe A</b> (normative)	<b>Contraintes de membrane exercées dans les coques</b> ..... 44
<b>A.1</b>	Généralités ..... 44
<b>A.2</b>	Coques cylindriques non raidies ..... 45
<b>A.3</b>	Coques coniques non raidies ..... 46
<b>A.4</b>	Coques sphériques non raidies ..... 47
<b>Annexe B</b> (normative)	<b>Expressions supplémentaires pour les résistances à l'effondrement plastique</b> ... 48
<b>B.1</b>	Généralités ..... 48
<b>B.2</b>	Coques cylindriques non raidies ..... 49
<b>B.3</b>	Coques cylindriques raidies par des ceintures ..... 51
<b>B.4</b>	Jonctions entre coques ..... 53
<b>B.5</b>	Plaques circulaires avec conditions aux limites axisymétriques ..... 55
<b>Annexe C</b> (normative)	<b>Expressions pour les contraintes élastiques linéaires de membrane et de flexion</b> ..... 57
<b>C.1</b>	Généralités ..... 57
<b>C.2</b>	Coques cylindriques non raidies à base encastrée ..... 58
<b>C.3</b>	Coques cylindriques non raidies à base articulée ..... 61
<b>C.4</b>	Conditions intérieures dans les coques cylindriques non raidies ..... 65
<b>C.5</b>	Raidisseur annulaire sur coque cylindrique ..... 67
<b>C.6</b>	Plaques circulaires avec conditions aux limites axisymétriques ..... 69
<b>Annexe D</b> (normative)	<b>Expressions pour le calcul du voilement</b> ..... 71
<b>D.1</b>	Coques cylindriques non raidies à épaisseur de paroi constante ..... 71
<b>D.2</b>	Coques cylindriques non raidies possédant une épaisseur de paroi variable par paliers ..... 78
<b>D.3</b>	Coques coniques non raidies ..... 82

## Avant-propos

Le présent document a été élaboré par le Comité Technique 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, Malte, 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 1-6 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 ;
- NV 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) La présente Partie 1-6 de l'Eurocode 3 complète les Parties 3 et 4 en donnant les règles pour les structures en coque axisymétriques nécessaires dans le calcul des cheminées, pylônes, mâts, silos, réservoirs et tuyauteries.

(18) Étant donné que ces règles ne sont pas spécifiques aux cheminées, silos, réservoirs, etc., elles sont présentées sous forme d'un document séparé faisant partie de l'ENV 1993-1 Règles Générales.

## 1 Généralités

### 1.1 Objet

(1)P La présente Partie 1.6 de l'ENV 1993 s'applique au calcul structural des structures en plaques d'acier possédant la forme d'une coque de révolution. Elle est destinée à être utilisée en conjonction avec les ENV 1993-1-1, ENV 1993-1-3, ENV 1993-1-4 et avec les parties d'application appropriée de l'ENV 1993, comprenant :

- la Partie 3.1 pour les pylônes et mâts ;
- la Partie 3.2 pour les cheminées ;
- la Partie 4.1 pour les silos ;
- la Partie 4.2 pour les réservoirs ;
- la Partie 4.3 pour les tuyauteries.

(2)P Voir les parties appropriées de l'ENV 1993 pour les règles d'application spécifiques concernant la conception et le calcul.

(3)P Voir les parties appropriées de l'ENV 1991 pour les règles générales sur les actions, comprenant :

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

(4) La présente prénorme est destinée à être utilisée en conjonction avec les parties appropriées de l'ENV 1991, comprenant :

- la Partie 1 pour les bases de calcul ;
- la Partie 2.1 pour les poids volumiques, poids propres et charges imposées ;
- la Partie 2.3 pour les charges de neige ;
- la Partie 2.4 pour les charges de vent ;
- la Partie 2.5 pour les actions thermiques ;
- la Partie 4 pour les actions exercées sur les silos et réservoirs.

(5)P Ce document définit les valeurs caractéristiques de la résistance de la structure. En ce qui concerne les coefficients partiels pour la résistance à utiliser dans les expressions de vérifications, voir l'ENV 1993-1-1.

(6)P La présente Partie 1.6 concerne les exigences pour le calcul aux états limites ultimes de :

- plastification ;
- plasticité cyclique ;
- voilement ;
- fatigue.

(7)P L'équilibre global de la structure (glissement, soulèvement, renversement) n'est pas compris dans la présente Partie 1.6, mais il est traité dans l'ENV 1993-1-1. Des considérations particulières concernant des applications spécifiques figurent dans les parties appropriées d'application de l'ENV 1993.

(8) Les dispositions de la présente Partie 1.6 s'appliquent aux coques axisymétriques ainsi qu'aux plaques annulaires ou circulaires, poutres annulaires et raidisseurs verticaux associés lorsqu'ils font partie de la structure complète. Les formes de coques suivantes sont couvertes : cylindres, cônes et dômes sphériques.

(9) Les panneaux cylindriques, coniques et sphériques ne sont pas explicitement couverts par la présente Partie 1.6. Cependant, les dispositions peuvent être applicables si les conditions aux limites appropriées sont dûment prises en compte.

- (10) Cette prénorme est destinée à être appliquée aux structures de coques en acier. Cependant, ses dispositions peuvent être appliquées à d'autres coques métalliques, à condition que les caractéristiques de matériaux appropriées soient dûment prises en compte.
- (11) Les dispositions de la présente Partie 1.6 sont destinées à être appliquées dans la plage de températures définie dans les parties appropriées d'application de l'ENV 1993. La température maximum est limitée de façon à pouvoir négliger les effets du fluage si les effets du fluage à haute température ne sont pas couverts par la partie appropriée de l'application.
- (12) Les dispositions de la présente Partie 1.6 s'appliquent aux structures qui satisfont les dispositions concernant la rupture fragile données dans l'annexe C de l'ENV 1993-2.
- (13)P Les dispositions de la présente Partie 1.6 s'appliquent au calcul structural sous l'effet des actions qui peuvent être traitées comme essentiellement quasi statiques.
- (14) Dans cette prénorme, on suppose que les charges de vent et les flux de matières en vrac peuvent, en général, être traitées comme des actions quasi statiques.
- (15) Il convient de prendre en compte les effets dynamiques conformément à la partie appropriée de l'ENV 1993, y compris les conséquences pour la fatigue. Cependant, les sollicitations provoquées par le comportement dynamique sont traitées dans cette partie comme quasi statiques.
- (16)P Les dispositions de la présente Partie 1.6 s'appliquent aux structures qui sont construites conformément à l'ENV 1090.
- (17)P La présente Partie 1.6 ne couvre pas les aspects concernant les fuites des contenus.
- (18) Cette prénorme n'est pas destinée à être appliquée aux structures dépassant les limites suivantes :
- températures de calcul du métal se situant hors de la plage de  $-200$  à  $+300$  °C ;
  - rapports rayon-épaisseur se situant hors de la plage de 20 à 5000.

## 1.2 Distinction entre principes et règles d'application

- (1)P En fonction du caractère de chaque alinéa, une distinction est faite dans la présente Partie entre principes et règles d'application.
- (2)P Les principes comprennent :
- des déclarations générales ou définitives pour lesquelles il n'existe aucune alternative ;
  - des exigences et des modèles analytiques pour lesquels aucune alternative n'est autorisée sauf mention spécifique.
- (3) Les principes sont identifiés par la lettre P suivant le numéro d'alinéa.
- (4)P Les règles d'application sont en général des règles reconnues qui suivent les principes et satisfont leurs exigences. Il est possible d'utiliser d'autres règles de calcul 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 aboutit à 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 alinéa.

### 1.3 Références normatives

Cette Prénorme Européenne intègre, par référence datée ou 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* ;

Partie 1 : *Règles générales et règles pour les bâtiments* ;

ENV 1991, *Eurocode 1 : Bases de calcul et actions exercées sur les structures* ;

Partie 1 : *Bases de calcul* ;

Partie 2.1 : *Poids volumiques, poids propres et charges d'exploitation* ;

Partie 2.3 : *Charges de neige* ;

Partie 2.4 : *Actions du vent* ;

Partie 2.5 : *Charges thermiques* ;

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* ;

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

Partie 1.4 : *Règles générales — Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables* ;

Partie 2 : *Ponts métalliques* ;

Partie 3.1 : *Pylônes et mâts* ;

Partie 3.2 : *Cheminées* ;

Partie 4.1 : *Silos* ;

Partie 4.2 : *Réservoirs* ;

Partie 4.3 : *Canalisations*.

### 1.4 Définitions

(1) Les termes définis dans l'ENV 1991-1 pour un usage commun dans les Eurocodes Structuraux s'appliquent à la présente Partie 1.6 de l'ENV 1993. Sauf mention contraire, les définitions données dans l'ISO 8930 s'appliquent également à la présente Partie 1.6. En supplément à la Partie 1 de l'ENV 1993, pour l'application de la présente Partie 1.6, les définitions suivantes s'appliquent :

#### 1.4.1 Géométrie et formes de structure

**1.4.1.1 coque** : Structure ou composant structural formé à partir d'une tôle mince incurvée.

**1.4.1.2 coque axisymétrique complète** : Coque dont la forme est définie par la rotation d'une ligne génératrice méridienne autour d'un axe unique sur  $2\pi$  radians. La coque peut avoir une longueur quelconque.

**1.4.1.3 coque de révolution** : Coque composée d'un certain nombre de parties, dont chacune est une coque axisymétrique complète.

**1.4.1.4 segment de coque** : Partie de coque de révolution possédant une épaisseur de paroi constante : cylindre, tronc de cône, tronc de sphère, plaque annulaire, arête toroïdale ou autre forme.

**1.4.1.5 panneau de coque** : Coque axisymétrique incomplète : la forme de coque est définie par une rotation de la génératrice autour de l'axe sur moins de  $2\pi$  radians.

**1.4.1.6 surface médiane** : Surface se trouvant à mi-distance entre les surfaces intérieure et extérieure de la coque en tout point. Lorsque la coque n'est raidie que sur une seule surface, la surface médiane de référence est encore prise égale à la surface médiane de la coque. La surface médiane constitue la surface de référence pour l'analyse, et elle peut être discontinue au niveau des variations d'épaisseur ou des jonctions de coque, entraînant des excentricités qui sont importantes pour le comportement de la coque.

**1.4.1.7 jonction** : Point où deux ou plusieurs segments de coque se rencontrent : peut comprendre ou non un raidisseur. Le point de fixation d'un raidisseur annulaire sur la coque peut être traité comme une jonction.

**1.4.1.8 raidisseur vertical** : Élément de raidissage local suivant le méridien d'une coque, représentant une génératrice de la coque de révolution. Il est destiné à augmenter la stabilité, ou à aider à l'introduction de charges locales. Il n'est pas destiné à offrir une résistance primaire à la flexion provoquée par les charges transversales.

**1.4.1.9 nervure** : Élément local constituant un trajet de descente des charges primaire pour la flexion sur le méridien de la coque, représentant une génératrice de la coque de révolution. On l'utilise pour transmettre ou répartir par flexion les charges transversales.

**1.4.1.10 raidisseur annulaire** : Élément de raidissage local suivant la circonférence de la coque de révolution en un point donné du méridien. Il est supposé ne posséder aucune rigidité dans le plan méridien de la coque. Il est destiné à augmenter la stabilité ou à introduire des charges locales axisymétriques agissant dans le plan de la ceinture par un état de forces normales axisymétriques. Il n'est pas destiné à offrir une résistance primaire à la flexion.

**1.4.1.11 plaque annulaire** : Élément structural suivant la circonférence de la coque de révolution à la base et offrant des moyens de fixation de la coque sur une fondation ou autre élément. Elle est nécessaire pour garantir que les conditions aux limites supposées sont bien réalisées en pratique.

**1.4.1.12 poutre annulaire** : Raidisseur circonférentiel possédant une résistance et une rigidité de flexion à la fois dans le plan de la section circulaire de coque et perpendiculairement à ce plan. Elle constitue un élément porteur principal, destiné à assurer la répartition des charges locales dans la coque.

## 1.4.2 États limites

**1.4.2.1 plastification** : État limite ultime où la structure développe des zones de plastification selon un schéma tel que sa capacité à résister à l'augmentation des charges est supposée épuisée. Il peut être lié à une charge ultime en théorie des petits déplacements ou à un mécanisme plastique de ruine.

**1.4.2.2 rupture en traction** : État limite ultime où la plaque de coque subit une ruine de section brute provoquée par la traction.

**1.4.2.3 plasticité cyclique** : État limite ultime où une plastification répétée est provoquée par des cycles de chargement et de déchargement.

**1.4.2.4 instabilité** : État limite ultime où la structure perd soudainement sa stabilité sous l'effet de la compression et/ou du cisaillement. Il entraîne soit des déplacements importants soit la ruine de la structure.

**1.4.2.5 fatigue** : État limite ultime où le chargement cyclique provoque la fissuration ou la ruine de la plaque de coque.

## 1.4.3 Actions

**1.4.3.1 charge axiale** : Chargement appliqué extérieurement et agissant dans le sens axial.

**1.4.3.2 charge radiale** : Chargement appliqué extérieurement et agissant perpendiculairement à la surface d'une coque cylindrique.

**1.4.3.3 pression intérieure** : Composante du chargement surfacique, agissant asymétriquement, perpendiculairement à la coque vers l'extérieur. Elle peut varier dans le sens méridien.

**1.4.3.4 pression extérieure** : Composante du chargement surfacique, agissant asymétriquement, perpendiculairement à la coque vers l'intérieur. Elle peut varier dans le sens méridien.

**1.4.3.5 pression hydrostatique** : Pression variant linéairement avec la coordonnée axiale de la coque de révolution.

**1.4.3.6 charge de frottement de paroi** : Composante méridienne du chargement surfacique agissant le long de la paroi en raison du frottement lié à la pression intérieure.

**1.4.3.7 charge locale** : Effort appliqué ponctuel ou charge répartie agissant sur une partie limitée de la circonférence de la coque et sur une hauteur limitée.

**1.4.3.8 charge partiellement répartie** : Charge répartie localement agissant perpendiculairement à la coque.

**1.4.3.9 succion** : Pression extérieure constante provoquée par l'effet de succion de l'action du vent exercée sur une coque comportant des ouvertures ou des événements.

**1.4.3.10 vide partiel** : Pression extérieure constante provoquée par l'évacuation de matières solides ou liquides stockées dans un conteneur dont la ventilation est inadaptée.

**1.4.3.11 action thermique** : Variation de température sur ou autour de la coque ou dans l'épaisseur de la coque.

#### 1.4.4 Types d'analyse

**1.4.4.1 analyse globale** : Analyse incluant la structure complète plutôt que des éléments structuraux individuels traités séparément.

**1.4.4.2 analyse par la théorie de membrane** : Analyse prévoyant le comportement des coques à parois minces sous l'effet de charges réparties en considérant un ensemble d'efforts de membrane satisfaisant l'équilibre avec les charges extérieures.

**1.4.4.3 analyse de coque élastique linéaire (LA)** : Analyse prévoyant le comportement d'une structure en coque à parois minces sur la base de la théorie de flexion élastique linéaire des coques en petits déplacements, par rapport à la géométrie parfaite de la surface médiane de la coque.

**1.4.4.4 analyse élastique géométriquement non linéaire (GNA)** : Analyse basée sur les principes de la théorie de flexion des coques appliquée à la structure parfaite, faisant appel à une loi de matériaux élastique linéaire mais incluant une théorie des grands déplacements.

**1.4.4.5 analyse matériellement non linéaire (MNA)** : Analyse basée sur les principes de la théorie de flexion des coques appliquée à la structure parfaite, faisant appel à l'hypothèse des petits déplacements, comme en 1.4.4.3, mais en adoptant une loi de matériaux élasto-plastique non linéaire.

**1.4.4.6 analyse géométriquement et matériellement non linéaire (GMNA)** : Analyse basée sur la théorie de flexion des coques appliquée à la structure parfaite, faisant appel aux hypothèses des grands déplacements non linéaires et à une loi de matériaux élasto-plastique non linéaire.

**1.4.4.7 analyse élastique géométriquement non linéaire incluant les imperfections (GNIA)** : Analyse incluant les imperfections, similaire à une analyse GNA telle que définie en 1.4.4.4, mais adoptant un modèle de structure incluant la géométrie imparfaite (c'est-à-dire que la géométrie de la surface médiane inclut les écarts non voulus par rapport à la forme idéale).

**1.4.4.8 analyse géométriquement et matériellement non linéaire incluant les imperfections (GMNIA)** : Analyse incluant les imperfections, similaire à une analyse GMNA telle que définie en 1.4.4.6, mais adoptant un modèle de structure incluant la géométrie imparfaite (c'est-à-dire que la géométrie de la surface médiane inclut les écarts non voulus par rapport à la forme idéale).

#### 1.4.5 Définitions particulières pour les calculs de voilement

**1.4.5.1 résistance au voilement critique** : Charge limite ou de bifurcation la plus faible déterminée en prenant pour hypothèse les conditions idéalisées de comportement élastique des matériaux, une géométrie parfaite, une application des charges parfaite, un appui parfait, l'isotropie des matériaux et l'absence de contraintes résiduelles (analyse LA ou GNA).

**1.4.5.2 contrainte de voilement critique** : Contrainte de membrane nominale associée à la résistance au voilement critique élastique.

**1.4.5.3 contrainte de voilement caractéristique** : Contrainte de membrane nominale associée au voilement en présence d'un comportement inélastique des matériaux, des imperfections géométriques et structurales inévitables en pratique en construction métallique, et des effets de charges consécutifs.

**1.4.5.4 contrainte de voilement de calcul** : Valeur de calcul de la contrainte de voilement, obtenue en divisant la contrainte de voilement caractéristique par le coefficient partiel pour la résistance.

**1.4.5.5 valeur-clé de la contrainte** : Valeur de contrainte dans un champ de contraintes non-uniforme utilisée pour caractériser les valeurs de contraintes dans une évaluation à l'EL3.

**1.4.5.6 classe de qualité de tolérances de fabrication** : Catégorie d'exigences de tolérances de fabrication prise pour hypothèse dans le calcul.

## 1.5 Unités

(1)P Les Unités SI doivent être utilisées conformément à l'ISO 1000.

(2) Pour les calculs, il convient d'utiliser l'un ou l'autre des ensembles d'unités cohérentes suivants :

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

## 1.6 Symboles

(1) Les symboles suivantes sont utilisés dans le cadre de la présente prénorme, outre les symboles définis dans l'ENV 1993-1-1 :

(2) Système de coordonnées (voir Figure 1.1)

$r$	coordonnée radiale, perpendiculairement à l'axe de révolution ;
$x$	coordonnée méridienne ;
$z$	coordonnée axiale ;
$\theta$	coordonnée circonférentielle ;
$\phi$	penne méridienne : angle entre l'axe de révolution et la perpendiculaire au méridien de la coque ;

(3) Pressions :

$p_n$	normale à la coque ;
$p_x$	chargement de surface méridien parallèlement à la coque ;
$p_\theta$	chargement de surface circonférentiel parallèlement à la coque ;

(4) Forces linéaires :

$P_n$	charge par unité de circonférence normale à la coque ;
$P_x$	charge par unité de circonférence agissant dans le sens méridien ;
$P_\theta$	charge par unité de circonférence agissant tangentiellment sur la coque ;

(5) Efforts de membrane :

$n_x$	effort méridien de membrane ;
$n_\theta$	effort circonférentiel de membrane ;
$n_{x\theta}$	effort de cisaillement de membrane ;

(6) Efforts de flexion :

- $m_x$  moment fléchissant méridien par unité de largeur ;
- $m_\theta$  moment fléchissant circonférentiel par unité de largeur ;
- $m_{x\theta}$  moment de torsion par unité de largeur ;
- $q_{xn}$  effort tranchant transversal associé à la flexion méridienne ;
- $q_{\theta n}$  effort tranchant transversal associé à la flexion circonférentielle ;

(7) Contraintes :

- $\sigma_x$  contrainte méridienne ;
- $\sigma_\theta$  contrainte circonférentielle ;
- $\sigma_{eq}$  contrainte équivalente de Von Mises (peut être négative dans des conditions de chargement cyclique) ;
- $\tau, \tau_{x\theta}$  contrainte de cisaillement dans le plan ;
- $\tau_{xn}, \tau_{\theta n}$  contraintes de cisaillement transverses méridiennes, circonférentielles associées à la flexion ;

(8) Déplacements :

- $u$  déplacement méridien ;
- $v$  déplacement circonférentiel ;
- $w$  déplacement perpendiculairement à la surface de la coque ;
- $\beta_\phi$  rotation méridienne (voir 5.2.2) ;

(9) Dimensions de coque :

- $d$  diamètre intérieur de coque ;
- $L$  longueur totale de la coque ;
- $\ell$  longueur de segment de coque ;
- $\ell_g$  longueur-étalon pour la mesure d'imperfections ;
- $\ell_{g\theta}$  longueur-étalon pour la mesure d'imperfections dans le sens circonférentiel ;
- $\ell_{gw}$  longueur-étalon pour la mesure d'imperfections transversalement aux soudures ;
- $l_R$  longueur de coque limitée pour l'évaluation de la résistance au voilement ;
- $r$  rayon de la surface médiane, perpendiculairement à l'axe de révolution ;
- $t$  épaisseur de paroi de coque ;
- $\beta$  demi-angle au sommet d'un cône ;

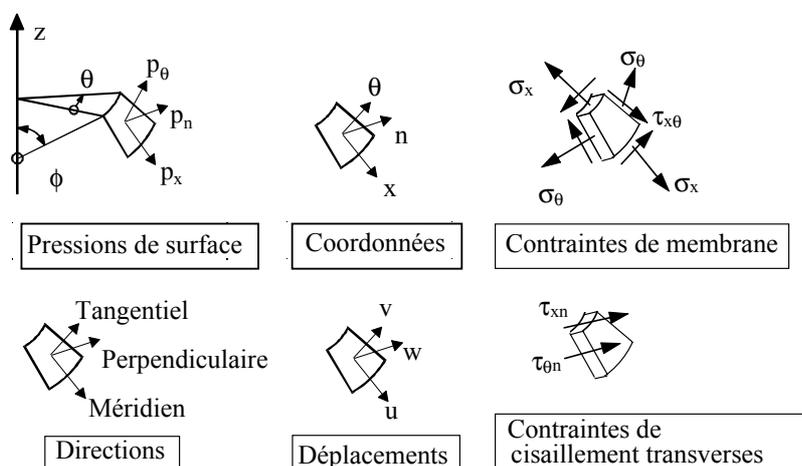


Figure 1.1 : Symboles utilisés dans les coques de révolution

(10) Tolérances (voir 8.4)

- $e$  excentricité entre les surfaces médianes de plaques jointives ;
- $U_e$  paramètre de tolérance d'excentricité accidentelle ;
- $U_t$  paramètre de tolérance de défaut de rotondité ;
- $U_n$  paramètre d'amplitude d'imperfection en fossette initiale pour les calculs numériques ;
- $U_0$  paramètre de tolérance de fossette initiale ;
- $w_0$  tolérance perpendiculairement à la surface de coque ;

(11) Caractéristiques des matériaux :

- $E$  module de Young ;
- $f_{eq}$  résistance équivalente de Von Mises ;
- $f_y$  limite d'élasticité ;
- $f_u$  résistance ultime ;
- $\nu$  coefficient de Poisson ;

(12) Paramètres utilisés dans l'évaluation de la résistance :

- $C$  coefficient utilisé dans l'évaluation de la résistance au voilement ;
- $D$  dommages cumulés utilisés dans les évaluations de la fatigue ;
- $F$  action généralisée ;
- $R$  résistance calculée (utilisé avec indices identifiant la base) ;
- $R_{pl}$  résistance de référence plastique (définie comme un facteur de charge à appliquer aux charges de calcul) ;
- $R_{cr}$  résistance au voilement critique élastique (définie comme un facteur de charges à appliquer aux charges de calcul) ;
- $k$  facteur d'étalonnage pour les analyses non linéaires ;
- $k$  exposant utilisé dans les expressions d'interaction de résistance au voilement ;
- $n$  nombre de cycles de chargement ;
- $\alpha$  facteur de réduction d'imperfection élastique utilisé dans l'évaluation de la résistance au voilement ;
- $\beta$  facteur de domaine plastique utilisé dans l'interaction de voilement ;
- $\gamma$  coefficient partiel ;
- $\Delta$  étendue de variation d'un paramètre lorsque des actions alternées ou cycliques sont concernées ;
- $\varepsilon_p$  déformation plastique ;
- $\eta$  exposant d'interaction pour le voilement ;
- $\bar{\lambda}$  élancement réduit de coque ;
- $\bar{\lambda}_{ov}$  élancement réduit global pour la structure entière (segments multiples) ;
- $\bar{\lambda}_o$  élancement réduit à la limite d'affaissement (valeur de  $\bar{\lambda}$  pour laquelle des réductions de stabilité apparaissent) ;
- $\bar{\lambda}_p$  élancement réduit à la limite plastique (valeur de  $\bar{\lambda}$  en dessous de laquelle la plasticité affecte la stabilité) ;
- $\omega$  paramètre de longueur relative pour la coque ;
- $\chi$  coefficient de réduction de résistance au voilement ;
- $\chi_{ov}$  coefficient de réduction de résistance au voilement globale pour la structure entière ;

(13) Indices :

- E valeur de contrainte ou de déplacement (résultant des actions de calcul) ;
- F actions ;
- M matériau ;
- R résistance ;
- S valeur de sollicitation (provoquées par les actions de calcul) ;
- cr valeur d'instabilité critique ;
- d valeur de calcul ;
- int interne/intérieur ;
- k valeur caractéristique ;
- max valeur maximum ;
- min valeur minimum ;
- nom valeur nominale ;
- pl plastique ;
- u ultime ;
- y plastification/écoulement.

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

## 1.7 Conventions de signes

(1) Le sens vers l'extérieur est positif : pression intérieure positive, déplacement vers l'extérieur positif, sauf comme indiqué en (4).

(2) Les contraintes de traction sont positives, sauf comme indiqué en (4).

NOTE La compression est considérée comme positive dans l'ENV 1993-1-1.

(3) Les contraintes de cisaillement sont positives comme indiqué dans les Figures 1.1 et D.1.

(4) Pour des raisons de simplicité, dans la section 8 et l'annexe D, les contraintes de compression sont considérées comme positives. Pour ces cas, les pressions extérieures ainsi que les pressions intérieures sont considérées comme positives lorsqu'elles existent.

## 2 Bases de calcul

### 2.1 Généralités

(1)P Les bases de calcul doivent être conformes à l'ENV 1991-1, complétées par les dispositions suivantes.

(2)P En particulier, la coque doit être calculée de telle sorte qu'elle puisse supporter toutes les actions et satisfaire les exigences suivantes :

- équilibre global ;
- équilibre entre les actions et les sollicitations (voir sections 6 et 8) ;
- limitation des fissures provoquées par la plastification cyclique (voir section 7) ;
- limitation des fissures provoquées par la fatigue (voir section 9).

(3)P La conception de la coque doit satisfaire les exigences de service fixées dans la prénorme d'application appropriée (ENV 1993 Parties 3.1, 3.2, 4.1, 4.2, 4.3).

(4) La coque peut être dimensionnée au moyen d'un calcul assisté par l'expérimentation. Selon le cas, les exigences sont fixées dans la norme d'application appropriée (ENV 1993 Parties 3.1, 3.2, 4.1, 4.2, 4.3).

(5) Il convient d'introduire toutes les actions en utilisant leurs valeurs de calcul conformément à l'ENV 1991 et à l'ENV 1993 Parties 3.1, 3.2, 4.1, 4.2, 4.3 selon le cas.

## 2.2 Types d'analyse

### 2.2.1 Généralités

(1) Il convient d'utiliser un ou plusieurs types d'analyse parmi les suivants, comme indiqué dans la section 4, en fonction de l'état limite et autres considérations :

- analyse globale (voir 2.2.2) ;
- analyse par théorie de membrane (voir 2.2.3) ;
- analyse de coque élastique linéaire (voir 2.2.4) ;
- analyse élastique géométriquement non linéaire (voir 2.2.5) ;
- analyse matériellement non linéaire (voir 2.2.6) ;
- analyse géométriquement et matériellement non linéaire (voir 2.2.7) ;
- analyse élastique géométriquement non linéaire avec imperfections (voir 2.2.8) ;
- analyse géométriquement et matériellement non linéaire avec imperfections (voir 2.2.9).

### 2.2.2 Analyse globale

(1) Une analyse globale peut comporter des traitements approximatifs de certaines parties de la structure.

### 2.2.3 Analyse par la théorie de membrane

(1) Il convient de ne pas utiliser d'analyse par la théorie de membrane sauf si les conditions suivantes sont satisfaites :

- conditions aux limites appropriées pour la transmission des contraintes de coque aux appuis sans effets de flexion ;
- géométrie de coque variant de forme en continu (sans discontinuités) ;
- répartition régulière des chargements (sans charges ponctuelles ou concentrées locales).

(2) Une analyse par la théorie de membrane ne satisfait pas nécessairement la compatibilité des déformations aux limites ou entre des segments de coque de forme différente ou entre des segments de coque soumis à des chargements différents. Cependant, le champ d'efforts de membrane obtenu satisfait les exigences de contraintes primaires (EL1).

### 2.2.4 Analyse de coque élastique linéaire (LA)

(1) La linéarité de la théorie résulte de la prise des hypothèses de loi de matériaux élastique linéaire et de théorie linéaire des petits déplacements. La théorie des petits déplacements implique que la géométrie supposée reste celle de la structure non déformée.

(2) Une analyse LA satisfait la compatibilité des déformations ainsi que l'équilibre. Le champ de contraintes de flexion et de membrane obtenu correspond aux exigences pour les contraintes primaires et secondaires.

### 2.2.5 Analyse élastique géométriquement non linéaire (GNA)

(1) Une analyse GNA satisfait à la fois l'équilibre et la compatibilité des déplacements dans la mesure où la modification de la géométrie de la structure provoquée par le chargement est prise en compte. Le champ de contraintes obtenu correspond à la définition des contraintes primaires plus secondaires (EL2).

(2) Lorsque les contraintes de compression ou de cisaillement sont prédominantes dans une certaine partie de la structure, une analyse GNA donne la charge de voilement élastique de la structure parfaite, qui peut être utilisée pour la vérification à l'état limite EL3 (voir 8.6.2).

### 2.2.6 Analyse matériellement non linéaire (MNA)

(1) Le résultat d'une analyse MNA donne la charge limite plastique, qui peut être interprétée comme un facteur d'amplification de charges  $R$  à appliquer à la valeur de calcul des charges  $F_{Sd}$ . Ceci peut être utilisé pour la vérification à l'état ultime EL1. Une analyse MNA peut également être utilisée pour obtenir l'incrément de déformation plastique  $\Delta\varepsilon$  pendant un cycle de chargement cyclique. Ceci peut être utilisé pour la vérification à l'état limite EL2.

### 2.2.7 Analyse géométriquement et matériellement non linéaire (GMNA)

(1) Le résultat d'une analyse GMNA, d'une manière analogue à l'article 2.2.5, donne la charge limite plastique géométriquement non linéaire de la structure parfaite et l'incrément de déformation plastique, qui peuvent être utilisés pour la vérification des états limites EL1 et EL2.

(2) Lorsque les contraintes de compression ou de cisaillement sont prédominantes dans une certaine partie de la structure, une analyse GMNA donne la charge de voilement élasto-plastique de la structure parfaite, qui peut être utilisée pour la vérification à l'état limite EL3 (voir 8.7.2).

### 2.2.8 Analyse élastique géométriquement non linéaire incluant les imperfections (GNIA)

(1) Une analyse GNIA est utilisée dans les cas où les contraintes de compression ou de cisaillement sont prédominantes dans la coque. Elle donne les charges de voilement élastique de la structure imparfaite «réelle» qui peuvent être utilisées pour la vérification à l'état limite EL3.

### 2.2.9 Analyse non linéaire géométriquement et matériellement incluant les imperfections (GMNIA)

(1) Une analyse GMNIA est utilisée dans les cas où les contraintes de compression ou de cisaillement sont prédominantes dans la coque. Elle donne les charges de voilement élasto-plastique pour la structure imparfaite «réelle», qui peuvent être utilisées pour la vérification à l'état limite EL3.

## 2.3 Conditions aux limites des coques

(1)P Les conditions aux limites prévues dans le calcul doivent être choisies de façon à garantir qu'elles représentent un modèle réaliste ou sécuritaire de la construction réelle. Une attention particulière doit être accordée non seulement à l'empêchement de déplacements normaux à la paroi de coque (flèches) mais aussi à l'empêchement de déplacements dans le plan de la paroi de coque (méridiens et circonférentiels) en raison de l'effet significatif qu'ils ont sur le voilement et la résistance de la coque.

(2)P Dans les calculs de valeurs propres de voilement de la coque (état limite EL3), la définition des conditions aux limites doit faire référence aux déplacements incrémentaux survenant au cours du processus de voilement, et non aux déplacements totaux induits par les actions appliquées avant le voilement.

(3)P Les conditions aux limites au niveau d'un bord inférieur en appui continu d'une coque doivent prendre en compte le fait que le soulèvement local de la coque est ou non empêché.

(4) Il convient d'examiner particulièrement la rotation des bords de coque dans les coques courtes et pour le calcul des contraintes secondaires dans les coques plus longues (selon les états limites EL2 et EL4).

(5) Il convient d'utiliser les conditions aux limites données en 5.2.2 dans les analyses informatisées et dans le choix des expressions des annexes A à D.

(6) Il convient que les assemblages structuraux entre segments de coque au niveau d'une jonction soient de nature à garantir que les hypothèses de conditions aux limites retenues dans le calcul des segments de coque individuels sont satisfaites.

### 3 Matériaux et géométrie

#### 3.1 Caractéristiques des matériaux

- (1) Il convient que les caractéristiques de matériaux des aciers soient prises dans les normes d'application appropriées.
- (2) Lorsque l'on utilise des matériaux présentant des courbes contraintes-déformations non linéaires et que l'on effectue une analyse du voilement pour la justification des contraintes (voir 8.5), il convient de remplacer la valeur tangente initiale du module de Young  $E$  par une valeur réduite.
- (3) À défaut de meilleure méthode, il convient d'adopter le module sécant au niveau de contraintes approprié.
- (4) Lorsque la température est supérieure à 100 °C, il convient de prendre les caractéristiques des matériaux dans l'ENV 1993-1-2.
- (5) Dans une analyse numérique globale utilisant la non linéarité des matériaux, il convient de prendre la courbe contraintes-déformations dans l'ENV 1993-1-1 annexe E.

#### 3.2 Valeurs de calcul des données géométriques

- (1)P L'épaisseur  $t$  de la coque doit être prise selon la définition de la norme d'application appropriée. Si aucune norme d'application n'est appropriée, c'est l'épaisseur nominale de la paroi, réduite par la valeur prescrite de perte par corrosion, qui doit être utilisée.
- (2)P Les plages d'épaisseur dans lesquels les règles de la présente Partie 1.6 peuvent s'appliquer sont définies dans les parties appropriées de l'ENV 1993.
- (3)P La surface médiane de la coque doit être prise comme surface de référence pour les charges.
- (4)P Le rayon  $r$  de la coque doit être pris égal au rayon nominal de la surface médiane de la coque, mesuré perpendiculairement à l'axe de révolution.
- (5) Il convient de ne pas appliquer les règles de calcul au voilement de la présente Partie 1.6 hors des plages de rapport  $r/t$  données dans la section 8 ou dans l'annexe D ou dans les parties appropriées de l'ENV 1993.

#### 3.3 Tolérances géométriques et imperfections géométriques

- (1)P Les valeurs des tolérances pour les écarts de la géométrie de la surface de coque par rapport aux valeurs nominales sont définies dans les normes d'exécution en fonction des exigences d'exploitation. Les aspects suivants sont pertinents :

- défaut de rotondité (défaut de circularité),
- excentricités (écarts par rapport à une surface médiane continue dans le sens perpendiculaire à la coque le long des joints des plaques),
- fossettes locales (écarts locaux normaux par rapport à la surface médiane nominale).

NOTE Jusqu'à la parution d'une norme européenne d'exécution, les tolérances peuvent être prises dans cette norme ou dans les normes d'application appropriées.

- (2)P Si l'état limite de voilement (EL3, comme décrit en 4.2.3) est l'un des états limites ultimes à considérer, des tolérances géométriques supplémentaires concernant le voilement doivent être observées afin de conserver les imperfections géométriques dans les limites spécifiées. Ces tolérances géométriques concernant le voilement sont quantifiées dans la section 8 ou dans les parties la coque par rapport à la géométrie nominale, selon les exigences concernant les hypothèses d'imperfections géométriques (imperfections globales ou imperfections locales) pour le calcul au voilement par analyse GNIA ou GMNIA (voir 8.8), doivent être calculées à partir des tolérances géométriques spécifiées. Des règles appropriées sont données en 8.8 ou dans les parties appropriées de l'ENV 1993.

## 4 États limites ultimes dans les coques en acier

### 4.1 États limites ultimes à considérer

#### 4.1.1 EL1 : plastification

(1)P L'état limite de plastification doit être considéré comme celui où la capacité de la structure à résister aux actions qui s'exercent sur elle est épuisée par la plastification du matériau. La résistance offerte par la structure à l'état limite de plastification peut être calculée comme la charge d'effondrement plastique obtenue à partir d'un mécanisme basé sur la théorie des petits déplacements.

(2)P L'état limite de rupture en traction doit être considéré comme la condition où la paroi de coque subit une ruine de la section brute par traction, entraînant la séparation des deux parties de la coque.

(3) En l'absence de trous de fixation, la vérification à l'état limite de rupture en traction peut être supposée couverte par la vérification à l'état limite de plastification. Toutefois, lorsqu'il existe des trous de fixation, il convient d'effectuer une vérification supplémentaire conformément à 5.4 de l'ENV 1993-1-1.

(4) Lors de la vérification à l'état limite de plastification, on peut supposer un comportement plastique ou partiellement plastique de la structure (c'est-à-dire que les considérations de compatibilité élastique peuvent être négligées).

NOTE La caractéristique fondamentale de cet état limite est que la charge ou les actions supportées (résistance) ne peuvent être augmentées sans exploiter une modification significative de la géométrie de la structure ou l'écroutissement du matériau.

(5)P Toutes les combinaisons appropriées de charges extrêmes doivent être prises en compte dans la vérification à l'EL1.

(6) Il convient d'utiliser les méthodes d'analyse suivantes (voir 2.2) pour le calcul des contraintes de calcul et des efforts lors de la vérification à l'EL1 :

- théorie de membrane ;
- expressions des annexes A et B ;
- analyse élastique géométriquement non linéaire (GNA), exigée pour les structures susceptibles de subir des déformations importantes ;
- analyse matériellement non linéaire (MNA) ;
- analyse géométriquement et matériellement non linéaire (GMNA).

#### 4.1.2 EL2 : Plasticité cyclique

(1)P L'état limite de plasticité cyclique doit être considéré comme celui où des cycles répétés de chargement et de déchargement produisent une plastification en traction et en compression en un même point, provoquant ainsi un travail plastique répété sur la structure, entraînant à terme une fissuration locale par épuisement de la capacité d'absorption d'énergie du matériau.

NOTE Les contraintes qui sont associées à cet état limite surviennent sous la combinaison de toutes les actions et des conditions de compatibilité pour la structure.

(2)P Toutes les actions variables (telles que les charges imposées et les variations de température) pouvant entraîner une plastification, et qui peuvent être appliquées au-delà de trois cycles dans la durée de vie de la structure, doivent être prises en compte dans la vérification à l'EL2.

(3) Dans la vérification de cet état limite, il convient d'examiner la compatibilité des déformations dans des conditions élastiques ou élastiques-plastiques.

(4) Il convient d'utiliser les méthodes d'analyse suivantes (voir 2.2) pour le calcul des contraintes de calcul et des efforts dans la vérification à l'EL2 :

- expressions de l'annexe C ;
- analyse élastique (LA ou GNA) ;
- MNA ou GMNA et calcul des déformations plastiques.

(5) On peut supposer que la ruine par fatigue oligocyclique est empêchée si les procédures données dans la présente norme sont adoptées.

#### 4.1.3 EL3 : Voilement

(1)P L'état limite de voilement doit être considéré comme celui où des déplacements importants surviennent soudainement dans tout ou partie de la structure perpendiculairement à la surface de la coque, en raison d'une perte de stabilité sous l'effet de contraintes de compression de membrane ou de cisaillement de membrane exercées dans la paroi de coque, entraînant une incapacité de supporter toute augmentation des sollicitations, risquant de provoquer une ruine catastrophique.

(2) Il convient d'utiliser les méthodes d'analyse suivantes (voir 2.2) pour le calcul des contraintes de calcul et des sollicitations lors de la vérification à l'EL3 :

- théorie de membrane pour des conditions axisymétriques uniquement (pour les exceptions, se reporter aux parties d'application appropriées de l'ENV 1993) ;
- analyse élastique linéaire (LA), exigée pour des conditions de chargement générales ;
- GNA, exigée pour les structures susceptibles de subir des déformations importantes ;
- GMNA, en utilisant des facteurs d'effondrement modifiés ;
- GNIA ou GMNIA, en utilisant les facteurs d'étalonnage calculés et les imperfections appropriées.

(3)P Toutes les combinaisons appropriées de charges extrêmes provoquant l'apparition de contraintes de compression de membrane ou de cisaillement de membrane dans la coque doivent être prises en compte dans la vérification à l'EL3.

(4)P Étant donné que la résistance à l'état limite EL3 dépend fortement de la qualité de construction, l'évaluation de la résistance doit prendre en compte les exigences de tolérances de fabrication associées.

NOTE Dans ce but, trois classes de qualité de fabrication sont données dans la section 8.

#### 4.1.4 EL4 : Fatigue

(1)P L'état limite de fatigue doit être considéré comme celui où des cycles répétés d'augmentation et de diminution des contraintes entraîne l'apparition d'une fissure de fatigue.

(2) Il convient d'utiliser les méthodes d'analyse suivantes (voir 2.2) pour le calcul des contraintes de calcul et des sollicitations lors de la vérification à l'EL4 :

- expressions de l'annexe C, en utilisant des facteurs de concentration de contraintes ;
- analyse élastique (LA ou GNA), en utilisant des facteurs de concentration de contraintes.

(3) Il convient de prendre en compte dans la vérification à l'EL4 toutes les actions variables appliquées plus de **10 000** cycles dans la durée de vie de la structure, selon le spectre d'actions approprié de l'ENV 1991 conformément à la partie d'application appropriée de l'ENV 1993-3 ou de l'ENV 1993-4.

## 4.2 Concepts de justification pour le calcul aux états limites des coques

### 4.2.1 Généralités

(1) Il convient d'effectuer la vérification à l'état limite en utilisant l'une des méthodes suivantes :

- calcul des contraintes ;
- calcul direct par application d'expressions standardisées ;
- calcul par analyse numérique globale (par exemple, au moyen de programmes informatiques tels que ceux basés sur la méthode des éléments finis).

(2) Il convient de prendre en compte le fait que les comportements élasto-plastiques des matériaux induits par différentes sollicitations dans la coque ont des effets différents sur les modes de ruine et sur les états limites ultimes. Il convient donc de classer les sollicitations dans des catégories de contraintes comportant des limites différentes. Il convient de traiter les sollicitations satisfaisant les exigences d'équilibre comme plus significatives que les sollicitations induites par la compatibilité des déformations perpendiculairement à la coque. On peut supposer que les contraintes locales provoqués par les effets d'entaille dans les détails constructifs ont une influence limitée négligeable sur la résistance au chargement statique.

(3) Il convient de distinguer les catégories suivantes dans le calcul des contraintes : contraintes primaires, secondaires et locales. Les états de contraintes primaires et secondaires peuvent être remplacés par des sollicitations le cas échéant.

(4) Dans une analyse globale, il convient de remplacer les état de contraintes primaires et secondaires par la charge limite et l'étendue de variation des déformations pour le chargement cyclique.

(5) En règle générale, on peut considérer que les états limites primaires contrôlent l'EL1, tandis que les états de contraintes secondaires affectent l'EL2 et l'EL3, et que les contraintes locales gouvernent l'EL4.

## **4.2.2 Calcul des contraintes**

### **4.2.2.1 Généralités**

(1) Lorsque l'on utilise l'approche par calcul des contraintes, il convient d'évaluer les états limites en fonction de trois catégories de contraintes : primaires, secondaires et locales. Ce classement est effectué, en général, sur la contrainte équivalente de Von Mises exercée en un point, mais les contraintes de voilement ne peuvent être évaluées au moyen de cette valeur.

### **4.2.2.2 Contraintes primaires**

(1)P Il convient de prendre les contraintes primaires comme le système de contraintes nécessaire pour équilibrer le chargement imposé. Elles peuvent être calculées à partir de tout système statiquement admissible réaliste. Il convient de considérer que l'état limite est atteint lorsque la contrainte primaire atteint la limite d'élasticité dans l'épaisseur totale de la paroi en un nombre de points suffisant, de telle sorte que seules la réserve d'écroutissage ou une modification de géométrie entraîneraient une augmentation de la résistance de la structure.

(2) Il convient que le calcul des contraintes primaires soit basé sur tout système de sollicitations cohérent avec les exigences d'équilibre de la structure. Il peut également prendre en compte les avantages de la théorie de la plasticité. Comme alternative, étant donné que l'analyse élastique linéaire satisfait les exigences d'équilibre, ses prévisions peuvent aussi être utilisées comme représentation de l'état limite. On peut appliquer l'une quelconque des méthodes données en 5.3.

(3) Étant donné que le calcul aux états limites prend en compte la plastification totale de la section transversale, les contraintes primaires provoquées par les moments fléchissants peuvent être calculées sur la base du module résistant plastique (voir 6.2.1). Lorsqu'il existe une interaction entre les sollicitations dans la section transversale, des règles d'interaction basées sur le critère d'écoulement de Von Mises peuvent être appliquées.

(4) Il convient de limiter les contraintes primaires au moyen de la valeur de calcul de la limite d'élasticité (voir section 6).

### **4.2.2.3 Contraintes secondaires**

(1)P Dans les structures hyperstatiques, il convient de prendre en compte les contraintes secondaires induites par la compatibilité interne et la compatibilité avec les conditions aux limites, qui sont provoquées par le chargement imposé ou les déplacements imposés (température, précontrainte, tassement, retrait).

NOTE Au fur et à mesure que l'on approche la condition d'écoulement de Von Mises, les déplacements de la structure augmentent sans augmentation supplémentaire de l'état de contraintes.

(2) Lorsque le chargement cyclique développe la plasticité, et lorsqu'il se produit plusieurs cycles de chargement, il convient d'examiner la réduction éventuelle de résistance provoquée par les contraintes secondaires. Lorsque la grandeur du chargement cyclique est telle qu'il se produit une plastification à la fois à la charge maximum et encore au déchargement, il convient de prendre en compte l'éventualité d'une ruine par plasticité cyclique associée aux contraintes secondaires.

(3) Si l'on effectue le calcul des contraintes au moyen d'une analyse élastique linéaire prenant en compte toutes les conditions de compatibilité appropriées (conditions aux limites, jonctions, variations d'épaisseur de paroi, etc.), les contraintes qui varient linéairement dans l'épaisseur peuvent être prises égales à la somme des contraintes primaires et secondaires et utilisées dans une évaluation impliquant le critère d'écoulement de Von Mises (voir 5.3).

NOTE Les contraintes secondaires ne sont jamais nécessaires séparément des contraintes primaires.

(4) Il convient de limiter les contraintes secondaires de la façon suivante :

- Il convient de limiter la somme des contraintes primaires et secondaires (y compris les contraintes de flexion) à  $2f_y$  pour la condition de plasticité cyclique (EL2 : voir section 7) ;
- Il convient de limiter la composante de membrane de la somme des contraintes primaires et secondaires par la résistance au voilement de calcul (EL3 : voir section 8) ;
- Il convient de limiter la somme des contraintes primaires et secondaires (y compris les contraintes de flexion) à la résistance à la fatigue (EL4 : voir section 9).

#### 4.2.2.4 Contraintes locales

(1)P Il convient de prendre en compte les contraintes fortement localisées associées aux pics de contraintes provoqués dans la coque par les effets d'entaille (trous, soudures, décrochements de parois, fixations et joints) dans une évaluation de la fatigue (EL4).

(2) Pour les détails constructifs donnés dans la section 9 de l'ENV 1993-1-1, le calcul de fatigue peut être basé sur les contraintes élastiques linéaires nominales (somme des contraintes primaires et secondaires) au point concerné. Pour tous les autres détails, les contraintes locales peuvent être calculées en appliquant des facteurs de concentration de contraintes (facteurs d'entaille) aux contraintes calculées au moyen d'une analyse des contraintes élastique linéaire.

(3) Il convient de limiter les contraintes locales conformément aux exigences concernant la fatigue (EL4) données dans la section 9.

#### 4.2.3 Calcul direct

(1)P Lorsqu'on utilise le calcul direct, les états limites peuvent être représentés par des expressions standardisées qui ont été dérivées soit de la théorie de membrane, soit de la théorie des mécanismes plastiques, soit de l'analyse élastique linéaire.

(2) Les expressions de la théorie de membrane données dans l'annexe A peuvent être utilisées pour déterminer les contraintes primaires nécessaires pour l'évaluation des EL1 et EL3.

(3) Les expressions pour le calcul plastique données dans l'annexe B peuvent être utilisées pour déterminer les charges limites plastiques nécessaires pour l'évaluation à l'EL1.

(4) Les expressions pour l'analyse élastique linéaire données dans l'annexe C peuvent être utilisées pour déterminer les contraintes du type primaire et du type secondaire nécessaires pour l'évaluation des EL2 et EL4. Une évaluation à l'EL3 peut être basée sur la partie membranaire de ces expressions.

#### 4.2.4 Calcul par analyse numérique globale

(1)P Lorsqu'on utilise une analyse numérique globale, l'évaluation des états limites doit être effectuée au moyen de l'un des types d'analyse alternatifs spécifiés en 2.2 (mais pas par une analyse par théorie de membrane) appliqué à la structure entière.

(2) Une analyse élastique linéaire (LA) peut être utilisée pour déterminer les contraintes ou les sollicitations, en vue de l'utilisation dans l'évaluation de l'EL2 et de l'EL4. Les parties membranaires des contraintes peuvent être utilisées pour l'évaluation de l'EL3. L'EL1 peut être évalué au moyen d'une LA, mais une LA donne seulement une estimation approchée et il convient d'interpréter ses résultats comme indiqué dans la section 5.

(3) Les analyses élastiques géométriquement non linéaires (GNA et GNIA) incluent la prise en compte des déformations de la structure. Une analyse GNA peut être utilisée pour déterminer la charge de voilement élastique de la structure parfaite. Une analyse GNIA peut être utilisée pour déterminer la charge de voilement élastique de la structure imparfaite.

(4) Une analyse matériellement non linéaire (MNA) peut être utilisée pour déterminer les charges limites plastiques qui peuvent être utilisées pour l'évaluation de l'EL1. Sous historique de chargement cyclique, on peut utiliser une analyse MNA pour déterminer les variations incrémentales des déformations plastiques, en vue de l'utilisation pour l'évaluation de l'EL2.

(5) Une analyse géométriquement et matériellement non linéaire (GMNA, GMNIA) peut être utilisée pour déterminer les charges d'effondrement pour la structure parfaite (GMNA) ou imparfaite (GMNIA). Ces charges d'effondrement peuvent être utilisées pour l'évaluation de l'EL1 et de l'EL3. Pour le calcul, il convient d'interpréter les analyses comme indiqué dans les articles 6.3 et 8.7 respectivement. Sous historique de chargement cyclique, les variations incrémentales des déformations plastiques pour la structure parfaite peuvent être utilisées pour l'évaluation de l'EL2.

## 5 Sollicitations et contraintes dans les coques

### 5.1 Sollicitations dans les coques

(1) En principe, il convient de calculer les huit sollicitations exercées dans la paroi de coque en un point quelconque et il convient que l'évaluation de la coque en ce qui concerne chaque état limite prenne toutes en compte. Cependant, les contraintes de cisaillement  $\tau_{xn}$ ,  $\tau_{\theta n}$  provoquées par les efforts tranchants transverses  $q_{xn}$ ,  $q_{\theta n}$  ne sont pas significatives comparées aux autres composantes des contraintes dans presque tous les cas pratiques, et elles peuvent donc être négligées dans le calcul.

(2) En conséquence, pour la plupart des calculs, l'évaluation des états limites peut être effectuée en n'utilisant que les six sollicitations exercées dans la paroi de coque  $n_x$ ,  $n_\theta$ ,  $n_{x\theta}$ ,  $m_x$ ,  $m_\theta$ ,  $m_{x\theta}$ . Lorsque la structure est axisymétrique et soumise uniquement à des conditions d'appui et de chargement axisymétriques, seules les valeurs de  $n_x$ ,  $n_\theta$ ,  $m_x$  et  $m_\theta$  sont nécessaires.

(3) Si une incertitude quelconque apparaît concernant la contrainte à utiliser dans l'une quelconque des vérifications aux états ultimes, il convient d'utiliser la contrainte équivalente de Von Mises exercée sur la surface de la coque.

### 5.2 Modélisation de la coque en vue de l'analyse

#### 5.2.1 Géométrie

(1)P La coque doit être représentée par sa surface médiane.

(2)P Le rayon de courbure doit être pris égal au rayon de courbure nominal. Les imperfections doivent être négligées, sauf comme indiqué dans la section 8 (état limite de voilement EL3).

(3)P Un ensemble de segments de coque ne doit pas être subdivisé en segments distincts pour l'analyse, sauf si les conditions aux limites pour chaque segment sont choisies de sorte à représenter les interactions entre eux de façon sécuritaire.

(4)P Une plaque annulaire destinée à transmettre des forces d'appui locales dans la coque ne doit pas être séparée de la coque qu'elle supporte dans une évaluation de l'état limite EL3.

(5)P Les excentricités et les décrochements de la surface médiane de la coque doivent être inclus dans le modèle d'analyse s'ils induisent des effets de flexion significatifs provoqués par un trajet excentrique des sollicitations de membrane.

(6)P Au niveau des jonctions entre segments de coque, toute excentricité entre les surfaces médianes des segments de coque doit être prise en compte dans la modélisation.

(7) Il convient de traiter un raidisseur annulaire comme un élément structural distinct de la coque, sauf lorsque l'espacement des raidisseurs est inférieur à  $1,5 \sqrt{rt}$ .

(8) Une coque sur laquelle sont fixés des raidisseurs verticaux discontinus peut être traitée comme une coque uniforme orthotrope, à condition que l'espacement des raidisseurs verticaux ne soit pas supérieur à  $5 \sqrt{rt}$ .

(9) Une coque ondulée (verticalement ou horizontalement) peut être traitée comme une coque uniforme orthotrope à condition que la longueur d'onde des ondulations ne soit pas inférieure à  $0,5 \sqrt{rt}$ .

(10) Une ouverture ménagée dans la coque peut être négligée dans la modélisation à condition que sa dimension la plus grande soit inférieure à  $0,5 \sqrt{rt}$ .

(11) Il convient de vérifier la stabilité globale de la structure entière comme indiqué dans l'ENV 1993 Parties 3.1, 3.2, 4.1, 4.2 ou 4.3 selon le cas.

### 5.2.2 Conditions aux limites

(1) Il convient d'utiliser les conditions aux limites appropriées dans les analyses pour l'évaluation des états limites conformément aux conditions données dans le Tableau 5.1. Pour les conditions particulières nécessaires pour les calculs au voilement, il convient de se reporter à 8.4.

(2) Les encastremets en rotation au niveau des limites de la coque peuvent être négligés dans la modélisation pour l'état limite EL1, mais il convient de les inclure dans la modélisation pour les états limites EL2 et EL4. Pour les coques courtes (voir annexe D), il convient d'inclure les encastremets en rotation pour l'état limite EL3.

(3) Il convient de vérifier les conditions aux limites des appuis afin de s'assurer qu'elles n'entraînent pas une non-uniformité excessive des forces transmises ou des forces introduites qui sont excentrées par rapport à la surface médiane de la coque. Il convient de se reporter aux parties d'application appropriées de l'ENV 1993 pour l'application détaillée de cette règle aux silos et réservoirs.

(4) Lorsqu'on utilise une analyse numérique globale, il convient d'utiliser la condition aux limites pour le déplacement normal  $w$  également pour le déplacement circonférentiel  $v$ , sauf lorsque des circonstances particulières rendent ceci inapplicable.

**Tableau 5.1 : Conditions aux limites pour les coques**

Code de condition aux limites	Terme simple	Description	Déplacements normaux	Déplacements verticaux	Rotation méridienne
BC1r	Encastré	encastré radialement encastré méridiennement encastré en rotation	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_{\phi} = 0$
BC1f	Articulé	encastré radialement encastré méridiennement libre en rotation	$w = 0$	$u = 0$	$\beta_{\phi} \neq 0$
BC2r		encastré radialement libre méridiennement encastré en rotation	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\phi} = 0$
BC2f		encastré radialement libre méridiennement libre en rotation	$w = 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\phi} \neq 0$
BC3	À bords libres	libre radialement libre méridiennement libre en rotation	$w \neq 0$	$u \neq 0$	$\beta_{\phi} \neq 0$

NOTE Le déplacement circonférentiel  $v$  est très étroitement lié au déplacement  $w$  perpendiculairement à la surface, et l'alinéa (3) n'identifie donc pas de conditions aux limites distinctes pour ces deux paramètres.

### 5.2.3 Actions et influences de l'environnement

(1)P Les actions doivent être considérées comme agissant au niveau de la surface médiane de la coque. Les excentricités des charges doivent être représentées par des sollicitations équivalentes statiques agissant au niveau de la surface médiane de la coque.

(2)P Les actions locales et les actions partiellement réparties locales ne doivent pas être représentées par des charges uniformes équivalentes, sauf comme indiqué dans la section 8 (EL3 pour le voilement).

(3) Il convient que la modélisation prenne en compte les éléments appropriés parmi les suivants :

- tassement local sous les parois de coque ;
- tassement local sous des appuis discrets ;
- uniformité d'appui de la structure ;
- différentiels thermiques d'un côté à l'autre de la structure ;
- différentiels thermiques entre l'intérieur et l'extérieur de la structure ;
- effets du vent sur les ouvertures et les traversées ;
- interaction des effets du vent sur des groupes de structures ;
- assemblages à d'autres structures ;
- conditions de montage.

### 5.2.4 Sollicitations et contraintes

(1) Sous réserve que le rapport du rayon à l'épaisseur soit supérieur à 25, la courbure de la coque peut être négligée lors du calcul des sollicitations à partir des contraintes exercées dans la paroi de coque.

## 5.3 Type d'analyse

(1) Il convient de baser le calcul sur un ou plusieurs types d'analyse parmi ceux donnés dans le Tableau 5.2. Il convient de se reporter à 2.2 pour les conditions gouvernant l'utilisation de chaque type d'analyse.

**Tableau 5.2 : Types d'analyse de coque**

Type d'analyse	Théorie de coque	Loi de matériau	Géométrie de coque
Théorie de membrane des coques	équilibre de membrane	sans objet	parfaite
Analyse de coque élastique linéaire (LA)	membrane et flexion linéaires	linéaire	parfaite
Analyse élastique géométriquement non linéaire (GNA)	non linéaire	linéaire	parfaite
Analyse matériellement non linéaire (MNA)	linéaire	non linéaire	parfaite
Analyse géométriquement et matériellement non linéaire (GMNA)	non linéaire	non linéaire	parfaite
Analyse élastique géométriquement non linéaire avec imperfections (GNIA)	non linéaire	linéaire	imparfaite
Analyse géométriquement et matériellement non linéaire avec imperfections (GMNIA)	non linéaire	non linéaire	imparfaite

## 6 État limite plastique (EL1)

### 6.1 Valeurs de calcul des actions

(1)P Les valeurs de calcul des actions doivent être basées sur les combinaisons de charges appropriées (incluant les facteurs  $\gamma_F$  et  $\psi$  appropriés) les plus défavorables.

(2) Il n'est nécessaire d'inclure que les seules actions représentant des charges affectant l'équilibre de la structure.

### 6.2 Calcul des contraintes

#### 6.2.1 Valeurs de calcul des contraintes

(1)P Bien que le calcul des contraintes soit basé sur une analyse élastique et ne puisse donc pas représenter précisément l'état limite plastique, il peut être utilisé sur la base du théorème statique, de sorte à obtenir une évaluation sécuritaire de la résistance à l'effondrement plastique qui est utilisé pour représenter l'état limite plastique (voir 4.1.1).

(2) On peut utiliser le critère de plastification d'Ilyushin, comme indiqué en (6), qui s'approche davantage de l'état d'effondrement plastique réel qu'une simple évaluation des contraintes élastiques.

(3) En chaque point de la structure, il convient de prendre la valeur de calcul de la contrainte  $\sigma_{eq,Ed}$  égale à la contrainte primaire la plus forte déterminée dans une analyse de structure considérant l'équilibre entre la charge de calcul imposée et les sollicitations.

(4) La contrainte primaire peut être prise égale à la valeur maximum des contraintes nécessaires pour l'équilibre avec les charges appliquées en un point ou sur une ligne dans la structure de la coque.

(5) Lorsqu'on utilise une analyse par théorie de membrane, le champ de sollicitations bidimensionnelles obtenu  $n_x$ ,  $n_\theta$  et  $n_{x\theta}$  peut être représenté par la contrainte de calcul équivalente  $\sigma_{eq,Ed}$  obtenue par l'expression :

$$\sigma_{eq,Ed} = \frac{1}{t} \sqrt{n_x^2 + n_\theta^2 - n_x n_\theta + 3n_{x\theta}^2} \quad \dots (6.1)$$

(6) Lorsqu'on utilise une analyse LA ou GNA, le champ bidimensionnel de contraintes primaires obtenu peut être représenté par la contrainte de calcul équivalente de Von Mises :

$$\sigma_{eq,Ed} = \sqrt{\sigma_{x,d}^2 + \sigma_{\theta,d}^2 - \sigma_{x,d}\sigma_{\theta,d} + 3(\tau_{x\theta,d}^2 + \tau_{xn,d}^2 + \tau_{\theta n,d}^2)} \quad \dots (6.2)$$

où :

$$\sigma_{x,d} = \frac{n_x}{t} \pm \frac{m_x}{t^2/4}, \quad \sigma_{\theta,d} = \frac{n_\theta}{t} \pm \frac{m_\theta}{t^2/4} \quad \dots (6.3)$$

$$\tau_{x\theta,d} = \frac{n_{x\theta}}{t} \pm \frac{m_{x\theta}}{t^2/4}, \quad \tau_{xn,d} = \frac{q_{xn}}{t}, \quad \tau_{\theta n,d} = \frac{q_{\theta n}}{t} \quad \dots (6.4)$$

NOTE Les expressions ci-dessus donnent une contrainte équivalente sécuritaire simplifiée pour le calcul.

#### 6.2.2 Valeurs de calcul des résistances

(1) Il convient de prendre la résistance de calcul de Von Mises égale à la valeur suivante :

$$f_{eq,Rd} = f_y / \gamma_M \quad \dots (6.5)$$

(2) Il convient de prendre le coefficient partiel pour la résistance  $\gamma_M$  égal à  $\gamma_{M0}$  donné dans l'ENV 1993-1-1.

(3) Il convient de prendre en compte l'effet des trous de fixation conformément à 5.4.3 de l'ENV 1993-1-1 pour la traction et à 5.4.4 de l'ENV 1993-1-1 pour la compression.

### 6.2.3 Limitation des contraintes

(1) Dans chaque vérification de cet état limite, il convient que les contraintes de calcul satisfassent la condition suivante :

$$\sigma_{eq,Ed} \leq f_{eq,Rd} \quad \dots (6.6)$$

### 6.3 Calcul par analyse numérique globale MNA ou GMNA

(1)P La résistance limite plastique de calcul doit être déterminée comme un facteur de charges  $R$  appliqué aux valeurs de calcul de la combinaison d'actions pour le cas de charge concerné.

(2) Il convient de déterminer les valeurs de calcul des actions  $F_{Sd}$  comme indiqué en 6.1. Il convient de former les cas de charge appropriés conformément aux combinaisons de charges exigées.

(3) Dans une analyse MNA ou GMNA basée sur la limite élastique de calcul  $f_{yd}$ , il convient que la coque soit soumise aux valeurs de calcul des cas de charge mentionnés en (2), augmentés progressivement par le rapport de charges  $R$  jusqu'à ce que la condition limite plastique soit atteinte.

(4) Lorsqu'on utilise une analyse MNA, le rapport de charges  $R_{MNA}$  peut être pris égal à la valeur la plus élevée atteinte dans l'analyse, en négligeant les effets d'écroutissage.

(5) Lorsqu'on utilise une analyse GMNA, si l'analyse prévoit une charge maximum suivie par une phase descendante, il convient d'utiliser la valeur maximum pour déterminer le rapport de charges  $R_{GMNA}$ . Lorsqu'une analyse GMNA ne prévoit pas une charge maximum, mais donne une relation actions-déplacements croissant progressivement sans écroutissage du matériau, il convient de prendre le rapport de charges  $R_{GMNA}$  inférieur ou égal à la valeur à laquelle la déformation plastique équivalente de Von Mises maximum atteint la valeur  $\frac{50}{3}$  ( $f_{yd} / E$ ).

(6) Il convient que le résultat de l'analyse donne un rapport de charges  $R$  supérieur à 1,0, c'est-à-dire satisfaisant la condition suivante :

$$F_{Sd} \leq F_{Rd} \quad \dots (6.7)$$

où :

$$F_{Rd} = R F_{Sd} \quad \dots (6.8)$$

### 6.4 Calcul direct

(1) Pour chaque segment de coque de la structure représenté par un cas de charge fondamental comme indiqué dans l'annexe A, il convient de limiter la contrainte de membrane de Von Mises la plus élevée  $\sigma_{eq,Ed}$  déterminée sous l'effet des valeurs de calcul des actions  $F_{Sd}$  à la résistance aux contraintes selon 6.2.2.

(2) Pour chaque segment de plaque ou de coque de la structure représenté par un cas de charge fondamental comme indiqué dans l'annexe B, il convient que la valeur de calcul des actions  $F_{Sd}$  ne soit pas supérieure à la résistance aux charges  $F_{Rd}$  basée sur la limite élastique de calcul  $f_{yd}$ .

(3) Lorsque la ruine de section nette au niveau d'un joint boulonné constitue un critère de calcul, il convient de déterminer la valeur de calcul des actions  $F_{Sd}$  pour chaque joint. Lorsque les contraintes peuvent être représentées par un cas de charge fondamental comme indiqué dans l'annexe A, et lorsque l'état de contraintes obtenu comprend uniquement des contraintes de membrane, il convient que  $F_{Sd}$  ne soit pas supérieure à la résistance aux charges  $F_{Rd}$  basée sur la résistance ultime de calcul  $f_{ud}$  (voir 6.2.2 (3)).

## 7 État limite de plasticité cyclique (EL2)

### 7.1 Valeurs de calcul des actions

- (1) Sous réserve de l'utilisation d'une définition améliorée, il convient de choisir les valeurs de calcul des actions pour chaque cas de charge comme les valeurs caractéristiques des parties des actions totales dont on prévoit qu'elles seront appliquées et retirées plus de trois fois dans la durée de vie de calcul de la structure.
- (2) Lorsqu'on utilise une analyse élastique ou les expressions de l'annexe C, il convient de prendre en compte uniquement la partie des actions variable entre les valeurs extrêmes supérieure et inférieure.
- (3) Lorsqu'on utilise une analyse matériellement non linéaire informatisée, il convient de considérer que la partie des actions variable entre les valeurs extrêmes supérieure et inférieure agit en présence de parties fixes coexistantes de la charge.

### 7.2 Calcul des contraintes

#### 7.2.1 Valeurs de calcul de l'étendue de variation des contraintes

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

$$\Delta\sigma_{eq,Ed,i} = \sqrt{\Delta\sigma_x^2 - \Delta\sigma_x\Delta\sigma_\theta + \Delta\sigma_\theta^2 + 3\Delta\tau_{x\theta}^2} \quad \dots (7.1)$$

- (2) Il convient de prendre la valeur de calcul de la plage de contraintes  $\Delta\sigma_{eq,Ed}$  égale à la plus grande variation parmi les variations de contraintes équivalentes de Von Mises  $\Delta\sigma_{eq,Ed,i}$ , en examinant les deux surfaces de coque.
- (3) Au niveau d'une jonction entre deux segments de coque, lorsque l'analyse modélise l'intersection des surfaces médianes et néglige la dimension finie de la jonction, la variation de contraintes peut être évaluée au premier point physique du segment de coque (par opposition à la valeur calculée à l'intersection des deux surfaces médianes).

NOTE Cette prise en compte est appropriée lorsque la contrainte varie rapidement à proximité de la jonction.

#### 7.2.2 Valeurs de calcul de la résistance

- (1) Il convient de déterminer la résistance à la variation de contraintes équivalentes de Von Mises  $\Delta f_{eq,Rd}$  au moyen de l'expression suivante :

$$\Delta f_{eq,Rd} = 2 f_{yd} \quad \dots (7.2)$$

#### 7.2.3 Limitation de la plage de contraintes

- (1) Dans chaque vérification de cet état limite, il convient que la variation de contrainte de calcul satisfasse la condition suivante :

$$\Delta\sigma_{eq,Ed} \leq \Delta f_{eq,Rd} \quad \dots (7.3)$$

### 7.3 Calcul par analyse numérique globale MNA ou GMNA

#### 7.3.1 Valeurs de calcul de la déformation plastique cumulée totale

(1) Lorsqu'on utilise une analyse numérique globale matériellement non linéaire (MNA ou GMNA), il convient de soumettre la coque aux valeurs de calcul des actions fixes et variables données en 7.1.

(2) Il convient d'évaluer la déformation plastique équivalente de Von Mises cumulée totale  $\varepsilon_{p,eq,Ed}$  à la fin de la durée de vie de calcul de la structure.

(3) La déformation plastique équivalente de Von Mises cumulée totale peut être déterminée au moyen d'une analyse modélisant tous les cycles de chargement au cours de la durée de vie de calcul.

(4) Sous réserve d'une analyse plus fine, la déformation plastique équivalente de Von Mises cumulée totale  $\varepsilon_{p,eq,Ed}$  peut être déterminée par l'expression suivante :

$$\varepsilon_{p,eq,Ed} = n \Delta \varepsilon_{p,eq,Ed} \quad \dots (7.4)$$

où :

$n$  est le nombre de cycles de chargement dans la durée de vie de calcul de la structure ( $3 < n < 10\,000$ ) ;

$\Delta \varepsilon_{p,eq,Ed}$  est l'incrément le plus élevé de la contrainte plastique équivalente de Von Mises au cours d'un cycle de charge complet en un point quelconque de la structure, survenant après le troisième cycle.

(5) On peut considérer que l'expression «en un point quelconque de la structure» signifie en tout point n'étant pas situé à moins de 2 épaisseurs de plaque d'une entaille ou d'une discontinuité locale.

NOTE Il est courant d'utiliser une analyse MNA dans ce cas.

#### 7.3.2 Limitation de la déformation plastique cumulée totale

(1) Sous réserve d'une évaluation de la fatigue à faible nombre de cycles plus sophistiquée, il convient que la valeur de calcul de la déformation plastique équivalente de Von Mises cumulée totale  $\varepsilon_{p,eq,Ed}$  satisfasse la condition suivante :

$$\varepsilon_{p,eq,Ed} \leq 5 (f_{yd} / E) \quad \dots (7.5)$$

### 7.4 Calcul direct

(1) Pour chaque segment de coque de la structure, représenté par un cas de charge fondamental comme indiqué dans l'annexe C, il convient de déterminer la variation de contraintes équivalentes de Von Mises la plus élevée  $\Delta \sigma_{eq,Ed}$  en considérant les deux surfaces de coque sous l'effet des valeurs de calcul des actions  $F_{Sd}$ , au moyen des expressions appropriées données dans l'annexe C. Il convient que la procédure d'évaluation complémentaire soit effectuée selon les indications de 7.2.

## 8 État limite de voilement (EL3)

### 8.1 Valeurs de calcul des actions

(1)P Toutes les combinaisons d'actions appropriées provoquant l'apparition de contraintes de membrane en compression ou de contraintes de membrane en cisaillement dans la paroi de coque doivent être prises en compte.

### 8.2 Définitions et symboles particuliers

(1) Il convient de se référer aux définitions particulières des termes concernant le voilement suivant 1.4.5.

(2) Outre les symboles définis en 1.6, il convient d'utiliser des symboles supplémentaires dans cette section 8 comme indiqué en (3) et (4).

- (3) Il convient de prendre les quantités de sollicitations et composantes de contraintes de la façon suivante :
- $n_x, \sigma_x$  valeurs de calcul de la contrainte et de la sollicitation de membrane méridienne agissante concernant le voilement (positive en compression) ;
  - $n_\theta, \sigma_\theta$  valeurs de calcul de la contrainte et de la sollicitation de membrane circonférentielle (de frettage) agissante concernant le voilement (positive en compression) ;
  - $n_{x\theta}, \tau_{x\theta}$  valeurs de calcul de la contrainte et de la sollicitation de membrane de cisaillement agissante concernant le voilement.
- (4) Il convient de prendre les paramètres de stabilité structurale de la façon suivante :
- $\sigma_{xRcr}$  résistance aux contraintes de voilement critique méridiennes ;
  - $\sigma_{\theta Rcr}$  résistance aux contraintes de voilement critique circonférentielles ;
  - $\tau_{x\theta Rcr}$  résistance aux contraintes de voilement critique par cisaillement ;
  - $\sigma_{xRk}$  résistance aux contraintes de voilement caractéristique méridiennes ;
  - $\sigma_{\theta Rk}$  résistance aux contraintes de voilement caractéristique circonférentielles ;
  - $\tau_{x\theta Rk}$  résistance aux contraintes de voilement caractéristique par cisaillement ;
  - $\sigma_{xRd}$  résistance aux contraintes de voilement de calcul méridiennes ;
  - $\sigma_{\theta Rd}$  résistance aux contraintes de voilement de calcul circonférentielles ;
  - $\tau_{x\theta Rd}$  résistance aux contraintes de voilement de calcul par cisaillement.

NOTE Il s'agit d'une convention particulière pour le calcul des coques différente de celle indiquée dans l'ENV 1993-1-1.

- (5) Il convient de considérer que la convention de signes pour l'utilisation avec l'EL3 est la suivante : compression positive pour les contraintes et sollicitations méridiennes et circonférentielles.

### 8.3 Conditions aux limites concernant le voilement

- (1) Pour l'état limite de voilement, il convient d'accorder une attention particulière aux conditions aux limites qui concernent les incréments de déplacements de voilement (par opposition aux déplacements de prévoilement). Des exemples de conditions aux limites sont illustrés dans la Figure 8.1.

### 8.4 Tolérances géométriques concernant le voilement

#### 8.4.1 Généralités

- (1) Sauf si des tolérances géométriques spécifiques concernant le voilement sont données dans les parties d'application appropriées de l'ENV 1993, il convient de respecter les limites de tolérances suivantes si l'EL3 constitue l'un des états limites à examiner.

NOTE 1 Les contraintes de voilement caractéristiques déterminées ci-après incluent les imperfections qui sont basées sur des tolérances géométriques susceptibles d'être respectées dans l'exécution.

NOTE 2 Les tolérances géométriques données ici sont celles qui sont connues pour avoir un impact important sur la sécurité de la structure.

- (2) Il convient de choisir la classe de qualité de tolérances de fabrication comme Classe A, Classe B ou Classe C en fonction des définitions des tolérances données dans les Tableaux 8.1 à 8.4. La description de chaque classe ne se rapporte qu'à l'évaluation de la résistance.

NOTE Jusqu'à la publication d'une norme d'exécution classifiant les tolérances géométriques en fonction de considérations de sécurité, ces tolérances sont prévues pour être adoptées dans l'exécution.

- (3) Il convient de classer séparément chacun des types d'imperfection : il convient que la classe la moins élevée gouverne alors la totalité du calcul.
- (4) Les différents types de tolérance peuvent être traités indépendamment, et il n'est normalement pas nécessaire d'examiner des interactions.

(5) Il convient d'établir par des vérifications-témoins représentatives que les mesures des imperfections géométriques restent dans les limites des tolérances stipulées suivant 8.4.2 à 8.4.4.

(6) Il convient d'effectuer les vérifications-témoins sur la structure non chargée (sauf pour le poids propre) et, dans la mesure du possible, avec les conditions aux limites opérationnelles.

(7) Si les mesures des imperfections géométriques ne satisfont pas les tolérances géométriques données de 8.4.2 à 8.4.4, il convient que chaque action corrective, telle un redressement, soit étudiée et décidée individuellement.

NOTE Avant qu'une décision soit prise en faveur d'un redressement pour réduire des imperfections géométriques, il est nécessaire de garder présent à l'esprit que cette opération peut entraîner l'apparition de contraintes résiduelles supplémentaires. La mesure dans laquelle les résistances au voilement sont mises à contribution est également pertinente.

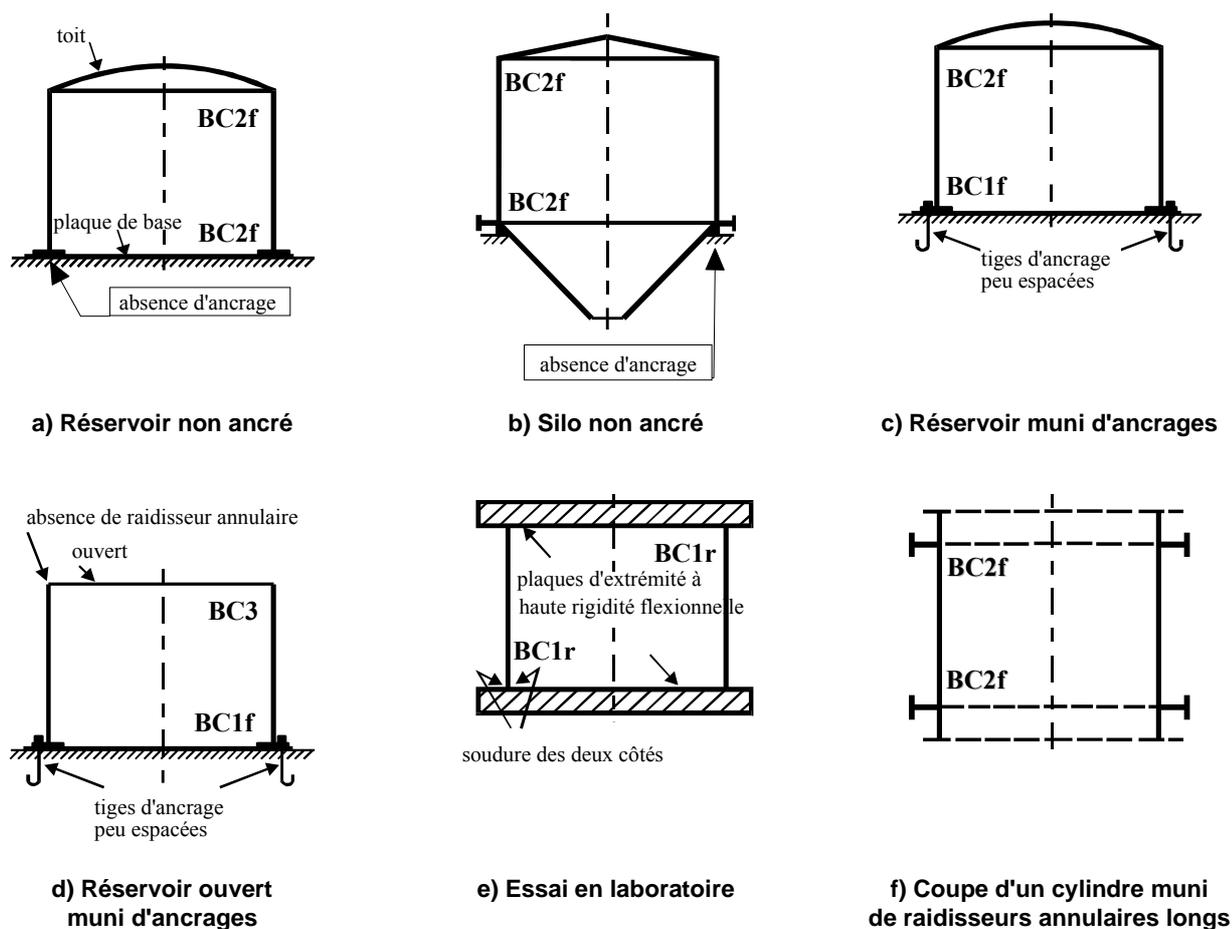


Figure 8.1 : Exemples schématiques de conditions aux limites pour l'état limite EL3

### 8.4.2 Tolérance de défaut de rotondité

(1) Il convient d'évaluer les défauts de rotondité en fonction du paramètre  $U_r$  (voir Figure 8.2) donné par :

$$U_r = \frac{d_{\max} - d_{\min}}{d_{\text{nom}}} \quad \dots (8.1)$$

où :

$d_{\max}$  diamètre intérieur mesuré maximum,

$d_{\min}$  diamètre intérieur mesuré minimum,

$d_{\text{nom}}$  diamètre nominal intérieur.

(2) Il convient de prendre le diamètre intérieur mesuré depuis un point donné égal à la distance la plus grande d'un côté à l'autre de la coque depuis le point donné à un autre point intérieur quelconque situé à la même coordonnée axiale. Il convient de mesurer un nombre approprié de diamètres afin d'identifier les valeurs maximum et minimum.

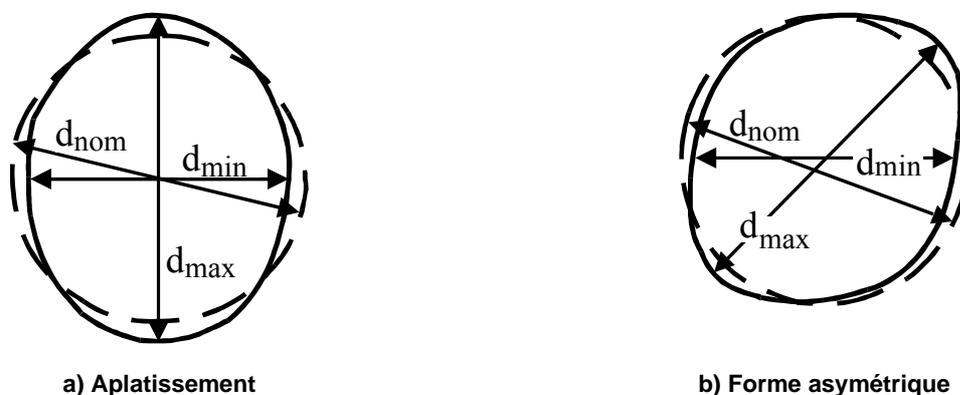


Figure 8.2 : Mesure de diamètres en vue de l'évaluation des défauts de rotondité

(3) Il convient que le paramètre de défaut de rotondité  $U_r$  satisfasse la condition suivante :

$$U_r \leq U_{r,max} \quad \dots (8.2)$$

où le paramètre de tolérance de défaut de rotondité  $U_{r,max}$  est donné pour la classe de qualité de tolérances de fabrication appropriée du Tableau 8.1.

Tableau 8.1 : Valeurs du paramètre de tolérance de défaut de rotondité  $U_{r,max}$

	Plage de diamètres	$d \leq 0,50 \text{ m}$	$0,5 \text{ m} < d < 1,25 \text{ m}$	$1,25 \text{ m} \leq d$
Classe de qualité de tolérances de fabrication	Description	Valeur de $U_{r,max}$		
Classe A	Excellente	0,014	$0,007 + 0,0093 (1,25 - d)$	0,007
Classe B	Élevée	0,02	$0,010 + 0,0133 (1,25 - d)$	0,010
Classe C	Normale	0,03	$0,015 + 0,02 (1,25 - d)$	0,015

### 8.4.3 Tolérance d'excentrement accidentel

(1) Au niveau des joints dans les parois de coques perpendiculairement aux forces de compression de membrane, il convient d'évaluer l'excentrement accidentel à partir de l'excentrement total mesurable  $e_{tot}$  et de l'écart prévu éint au moyen de l'expression suivante :

$$e_a = e_{tot} - e_{int} \quad \dots (8.3)$$

où :

$e_{tot}$  est l'excentrement entre les surfaces médianes des plaques jointives (voir Figure 8.3c) ;

$e_{int}$  est l'écart prévu entre les surfaces médianes des plaques jointives (voir Figure 8.3b) ;

$e_a$  est l'excentrement accidentel entre les surfaces médianes des plaques jointives.

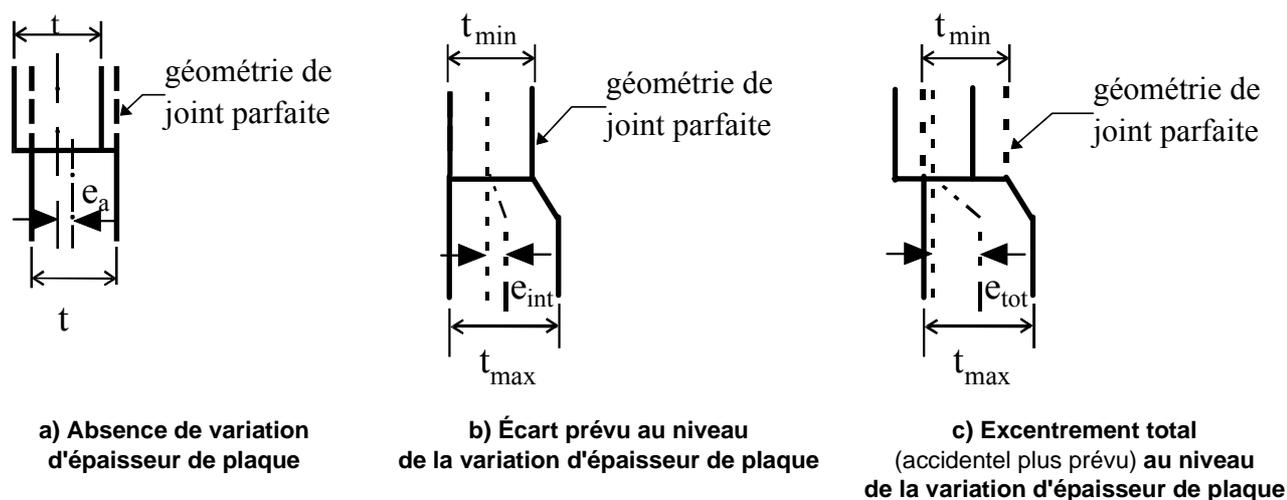
(2) Il convient que l'excentrement accidentel  $e_a$  satisfasse l'exigence d'excentrement admissible maximum donnée dans le Tableau 8.2.

(3) Il convient d'évaluer l'excentrement accidentel  $e_a$  également en fonction du paramètre d'excentrement accidentel  $U_e$  donné par l'expression :

$$U_e = \frac{e_a}{t_{\min}} \quad \text{ou} \quad U_e = \frac{e_a}{t} \quad \dots (8.4)$$

où :

$t_{\min}$  épaisseur de la plaque la plus mince au niveau du joint.



**Figure 8.3 : Excentrement accidentel et écart prévu au niveau d'un joint**

(4) Il convient que le paramètre d'excentrement accidentel  $U_e$  satisfasse la condition suivante :

$$U_e \leq U_{e,\max} \quad \dots (8.5)$$

où :

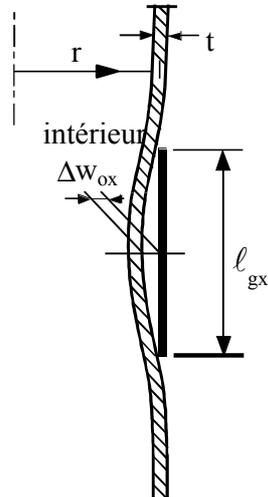
$U_{e,\max}$  est le paramètre de tolérance d'excentrement accidentel, donné pour la classe de qualité de tolérances de fabrication appropriée dans le Tableau 8.2.

**Tableau 8.2 : Valeurs des tolérances d'excentrement accidentel**

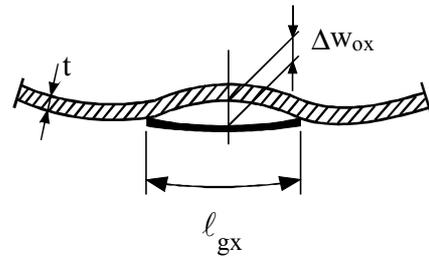
Classe de qualité de tolérances de fabrication	Description	Valeur de $U_{e,\max}$	Excentrement admissible maximum
Classe A	Excellente	0,14	$e_a \leq 2 \text{ mm}$
Classe B	Élevée	0,2	$e_a \leq 3 \text{ mm}$
Classe C	Normale	0,3	$e_a \leq 4 \text{ mm}$

### 8.4.4 Tolérances concernant les fossettes

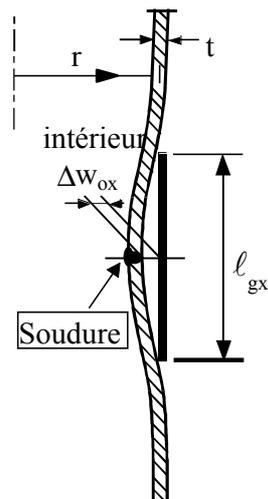
(1) Il convient d'utiliser un calibre de mesure des fossettes en chaque emplacement (voir Figure 8.4) tant dans le sens méridien que dans le sens circonférentiel. Il convient que le calibre méridien soit rectiligne, mais que le calibre utilisé pour les mesures dans le sens circonférentiel présente une courbure égale au rayon de courbure prévu  $r$  de la surface médiane de la coque.



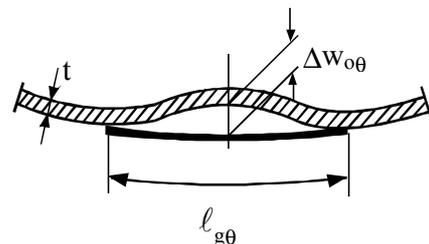
a) Mesure sur un méridien



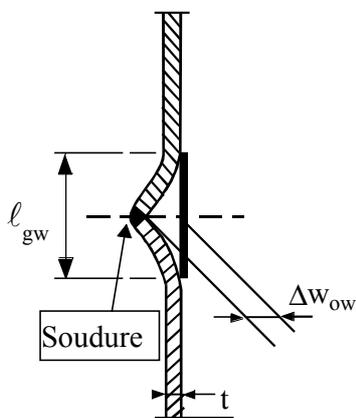
b) Première mesure sur un cercle circonférentiel



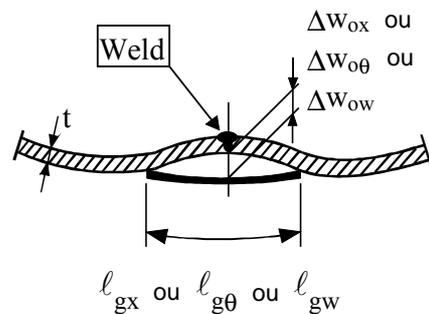
c) Première mesure sur une soudure



d) Seconde mesure sur un cercle circonférentiel



e) Seconde mesure sur soudure avec calibre spécial



f) Mesures sur le cercle circonférentiel sur une soudure

Figure 8.4 : Mesure des profondeurs  $\Delta w_0$  de fossettes initiales

(2) Il convient de mesurer la profondeur  $\Delta w_0$  des fossettes initiales dans la paroi de coque au moyen de calibres de longueur  $\ell_g$  qu'il convient de prendre de la façon suivante :

a) Lorsqu'il existe des contraintes de compression axiale, y compris sur les soudures, dans les sens méridien et circonférentiel :

$$\ell_{gx} = 4 \sqrt{rt} \quad \dots (8.6)$$

b) Lorsqu'il se produit des contraintes de cisaillement ou de compression circonférentielles, il convient d'effectuer les mesures dans le sens circonférentiel au moyen du calibre de longueur  $\ell_{g\theta}$  donnée par l'expression :

$$\ell_{g\theta} = 2,3 (\ell^2 rt)^{0,25}, \quad \text{mais } \ell_{g\theta} \leq r \quad \dots (8.7)$$

où :

$\ell$  longueur axiale du segment de coque.

c) En outre, sur les soudures, dans les sens circonférentiel et méridien, il convient d'utiliser le calibre de longueur  $\ell_{gw}$  :

$$\ell_{gw} = 25 t \quad \text{ou} \quad \ell_{gw} = 25 t_{\min}, \quad \text{mais avec } \ell_{gw} \leq 500 \text{ mm} \quad \dots (8.8)$$

où :

$t_{\min}$  épaisseur de la plaque la plus mince au niveau de la soudure.

(3) Il convient d'évaluer la profondeur des fossettes initiales en fonction des paramètres de fossettes  $U_{0x}$ ,  $U_{0\theta}$ ,  $U_{0w}$  donnés par :

$$U_{0x} = \Delta w_{0x} / \ell_{gx} \quad U_{0\theta} = \Delta w_{0\theta} / \ell_{g\theta} \quad U_{0w} = \Delta w_{0w} / \ell_{gw} \quad \dots (8.9)$$

(4) Il convient que la valeur des paramètres de fossettes  $U_{0x}$ ,  $U_{0\theta}$ ,  $U_{0w}$  satisfassent les conditions suivantes :

$$U_{0x} \leq U_{0,\max} \quad U_{0\theta} \leq U_{0,\max} \quad U_{0w} \leq U_{0,\max} \quad \dots (8.10)$$

où  $U_{0,\max}$  représente le paramètre de tolérance de fossettes pour la classe de qualité de tolérances de fabrication choisie, donné dans le Tableau 8.3.

**Tableau 8.3 : Valeurs du paramètre de tolérance de fossettes  $U_{0,\max}$**

Classe de qualité de tolérances de fabrication	Description	Valeur de $U_{0,\max}$
Classe A	Excellente	0,006
Classe B	Élevée	0,01
Classe C	Normale	0,016

#### 8.4.5 Tolérance de planéité d'interface

(1) Lorsqu'une autre structure supporte de façon continue une coque (telle les fondations), il convient que son écart par rapport à la planéité au niveau de l'interface ne présente pas de pente locale dans le sens circonférentiel supérieure à 0,1 %.

## 8.5 Calcul des contraintes

### 8.5.1 Valeurs de calcul des contraintes

(1) Il convient de prendre les valeurs de calcul des contraintes  $\sigma_{xEd}$ ,  $\sigma_{\theta Ed}$  et  $\tau_{x\theta Ed}$  égales aux valeurs-clés des contraintes de membranes de cisaillement et de compression obtenues par une analyse de coque linéaire (LA). Dans des conditions purement axisymétriques de chargement et d'appui, ainsi que dans d'autres cas de charges simples, la théorie de membrane peut en général être utilisée.

(2) Il convient de prendre les valeurs-clés des contraintes de membrane égales à la valeur maximum de chaque contrainte au niveau de cette coordonnée axiale de la structure, sous réserve de dispositions spécifiques données dans l'annexe D de la présente Partie 1.6 ou dans la partie d'application appropriée de l'ENV 1993.

(3) Pour les cas de charges fondamentaux, les contraintes de membrane peuvent être prises dans l'annexe A ou dans l'annexe C.

(4) Dans les cas particuliers définis dans les règles d'applications appropriées des Parties 3.1, 3.2, 4.1, 4.2 et 4.3, il convient de calculer les contraintes de membrane au moyen d'une analyse élastique géométriquement non linéaire (GNA).

NOTE Dans certains cas (par exemple les parois à décrochement sous compression circonférentielle, voir annexe D.2.3), les valeurs-clés des contraintes de membrane sont fictives et supérieures aux valeurs maximum réelles.

### 8.5.2 Résistance de calcul (résistance au voilement)

(1) Il convient de représenter la résistance au voilement par les contraintes de voilement telles qu'elles sont définies en 1.4.5. Il convient de calculer les contraintes de voilement au moyen des expressions suivantes :

$$\sigma_{xRd} = \sigma_{xRk} / \gamma_M, \quad \sigma_{\theta Rd} = \sigma_{\theta Rk} / \gamma_M, \quad \tau_{x\theta Rd} = \tau_{x\theta Rk} / \gamma_M \quad \dots (8.11)$$

(2) Il convient de prendre le coefficient partiel pour la résistance  $\gamma_M$  comme indiqué dans la partie d'application appropriée de l'ENV 1993.

(3) Il convient de calculer les résistances caractéristiques au voilement en multipliant la limite d'élasticité caractéristique par les coefficients de réduction :

$$\sigma_{xRk} = \chi_x f_{y,k}, \quad \sigma_{\theta Rk} = \chi_\theta f_{y,k}, \quad \tau_{x\theta Rk} = \chi_t f_{y,k} / \sqrt{3} \quad \dots (8.12)$$

(4) Il convient de déterminer les coefficients de réduction  $\chi_x$ ,  $\chi_\theta$  et  $\chi_t$  en fonction de l'élançement réduit de la coque de la façon suivante :

$$\chi = 1 \quad \text{lorsque} \quad \bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0 \quad \dots (8.13)$$

$$\chi = 1 - \beta \left( \frac{\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0}{\bar{\lambda}_p - \bar{\lambda}_0} \right)^\eta \quad \text{lorsque} \quad \bar{\lambda}_0 < \bar{\lambda} < \bar{\lambda}_p \quad \dots (8.14)$$

$$\chi = \frac{\alpha}{\bar{\lambda}^2} \quad \text{lorsque} \quad \bar{\lambda}_p \leq \bar{\lambda} \quad \dots (8.15)$$

où  $\alpha$  représente le facteur de réduction d'imperfection élastique,  $\beta$  le facteur de domaine plastique,  $\eta$  l'exposant d'interaction et  $\bar{\lambda}_0$  l'élançement réduit à la limite d'affaissement, toutes ces valeurs étant à prendre dans l'annexe D. Il convient de déterminer la valeur de l'élançement relatif à la limite plastique  $\bar{\lambda}_p$  au moyen de l'expression suivante :

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{\alpha}{1 - \beta}} \quad \dots (8.16)$$

(5) Il convient de déterminer les paramètres d'élançement réduit de coque pour différentes composantes de contraintes au moyen des expressions suivantes :

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{f_{y,k} / \sigma_{xRc}}, \quad \bar{\lambda}_\theta = \sqrt{f_{y,k} / \sigma_{\theta Rc}}, \quad \bar{\lambda}_\tau = \sqrt{(f_{y,k} / \sqrt{3}) / \tau_{Rc}} \quad \dots (8.17)$$

(6) Il convient de calculer les contraintes de voilement critiques  $\sigma_{xRc}$ ,  $\sigma_{\theta Rc}$  et  $\tau_{Rc}$  au moyen des expressions appropriées de l'annexe D.

### 8.5.3 Limitation des contraintes (vérification de la résistance au voilement)

(1) Bien que le voilement ne soit pas un phénomène de ruine initié purement par les contraintes, dans le cadre de cette section il convient de représenter l'état limite de voilement par la limitation des valeurs de calcul des contraintes de membrane. L'influence des contraintes de flexion sur la résistance au voilement peut être négligée à condition qu'elles soient provoquées par les effets de compatibilité aux limites. Dans le cas de contraintes de flexion provoquées par des charges locales ou des gradients thermiques, il convient de leur accorder une considération particulière.

(2) Selon la situation des contraintes et du chargement, il convient d'effectuer une ou plusieurs des vérifications suivantes pour les valeurs-clés de chaque composante de contraintes de membrane :

$$\sigma_{xE d} \leq \sigma_{xR d}, \quad \sigma_{\theta E d} \leq \sigma_{\theta R d}, \quad \tau_{E d} \leq \sigma_{R d} \quad \dots (8.18)$$

(3) S'il apparaît plus d'une des trois composantes de contrainte de membrane concernant le voilement sous l'effet des actions considérées, il convient d'effectuer la vérification d'interaction suivante pour l'état combiné de contraintes de membrane :

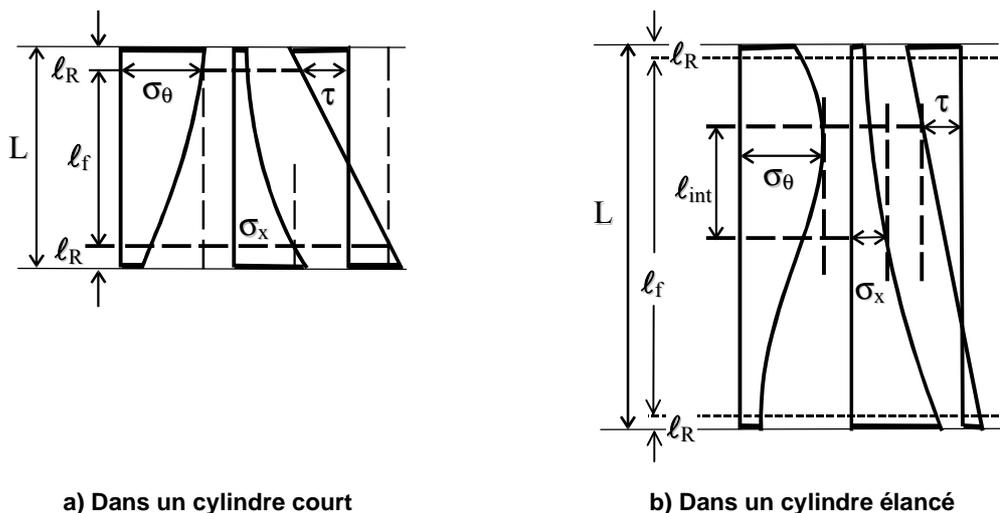
$$\left( \frac{\sigma_{xE d}}{\sigma_{xR d}} \right)^{k_x} + \left( \frac{\sigma_{\theta E d}}{\sigma_{\theta R d}} \right)^{k_{\theta}} + \left( \frac{\tau_{E d}}{\tau_{R d}} \right)^{k_{\tau}} \leq 1 \quad \text{si } \sigma_{xE d} \text{ et } \sigma_{\theta E d} \text{ sont en compression,} \quad \dots (8.19)$$

$$\left( \frac{\sigma_{xE d}}{\sigma_{xR d}} \right)^{k_x} + \left( \frac{\tau_{E d}}{\tau_{R d}} \right)^{k_{\tau}} \leq 1 \quad \text{si } \sigma_{\theta E d} \text{ est nulle ou en traction,} \quad \dots (8.20)$$

$$\left( \frac{\sigma_{\theta E d}}{\sigma_{\theta R d}} \right)^{k_{\theta}} + \left( \frac{\tau_{E d}}{\tau_{R d}} \right)^{k_{\tau}} \leq 1 \quad \text{si } \sigma_{xE d} \text{ est nulle ou en traction.} \quad \dots (8.21)$$

où  $\sigma_{xE d}$ ,  $\sigma_{\theta E d}$  et  $\tau_{E d}$  représentent les groupes des valeurs significatives des contraintes de membrane en cisaillement et en compression concernant l'interaction exercées dans la coque, et  $k_x = k_{\theta} = [1,25]$  et  $k_{\tau} = [2,0]$ .

(4) Si (5) et (6) ne donnent pas de dispositions particulières pour la définition des emplacements relatifs ou des espacements des groupes des composantes de contraintes de membrane concernant l'interaction, il convient d'utiliser la valeur maximum de chacun d'eux, quel que soit son emplacement dans la coque, dans (3).



**Figure 8.5 : Exemples de groupes de composantes de contraintes de membrane concernant l'interaction**

(5) Si la valeur maximum de l'une quelconque des contraintes de membrane exercées dans une coque cylindrique apparaît dans une zone de longueur  $\ell_R$  adjacente à l'une des extrémités du cylindre, la vérification d'interaction peut adopter à sa place la valeur maximum apparaissant sur la longueur libre restante  $\ell_f$  (voir Figure 8.5a), où :

$$\ell_R = 0,1L \quad \text{mais} \quad \ell_R \leq 0,16 r \sqrt{r/t} \quad \dots (8.22)$$

$$\ell_f = L - 2\ell_R \quad \dots (8.23)$$

(6) Pour les cylindres longs tels que définis dans l'annexe D, les groupes concernant l'interaction introduits dans la vérification d'interaction peuvent être restreints au-delà des dispositions de (5). Les contraintes jugées comme faisant partie des groupes concernant l'interaction peuvent alors être restreintes à une section quelconque de longueur  $\ell_{int}$  se situant dans la longueur libre restante  $\ell_f$  pour la vérification d'interaction (voir Figure 8.5b), où :

$$\ell_{int} = 1,3 r \sqrt{r/t} \quad \dots (8.24)$$

## 8.6 Calcul par analyse numérique globale LA ou GNA

### 8.6.1 Valeur de calcul des actions

(1)P Les valeurs de calcul des actions doivent être prises comme spécifié en 8.1 (1)P.

### 8.6.2 Valeur de calcul de la résistance

(1)P La résistance au voilement de calcul doit être déterminée comme un facteur de charge  $R$  appliqué aux valeurs de calcul de la combinaison d'actions pour le cas de charges approprié.

(2) Il convient de calculer la résistance au voilement de calcul  $R_d$  en déterminant la résistance de référence plastique  $R_{pl}$  ainsi que la résistance critique élastique  $R_{cr}$ , et en les combinant pour trouver la résistance au voilement caractéristique  $R_k$ . Il convient d'utiliser ensuite le coefficient partiel  $\gamma_M$  pour obtenir la résistance de calcul.

(3) Il convient de calculer la résistance de référence plastique  $R_{pl}$  (voir Figure 8.6) par une analyse de coque linéaire (LA) sous l'effet des valeurs de calcul de la combinaison d'actions appliquée, au moyen de la procédure suivante. Il convient d'utiliser les sollicitations de membrane  $n_x$ ,  $n_\theta$  et  $n_{x\theta}$  évaluées en tout point de la coque pour calculer la résistance plastique de référence au moyen de l'expression suivante :

$$R_{pl} = \frac{t f_{y,k}}{\sqrt{n_x^2 - n_x n_\theta + n_\theta^2 + 3n_{x\theta}^2}} \quad \dots (8.25)$$

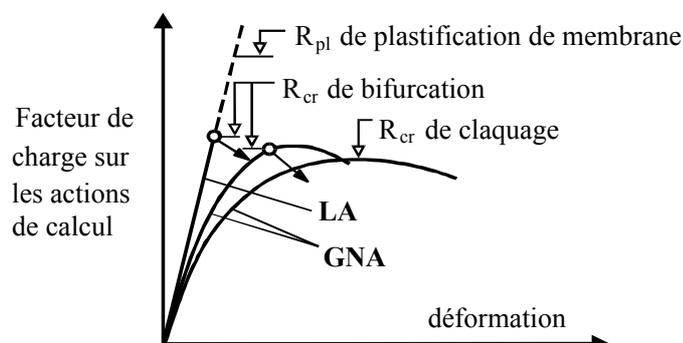


Figure 8.6 : Définition de la résistance plastique de référence  $R_{pl}$  et de la résistance au voilement critique  $R_{cr}$  dérivées d'une analyse globale LA ou GNA

(4) Pour déterminer la résistance au voilement critique  $R_{cr}$ , il convient d'effectuer une analyse de valeurs propres sur l'état de contraintes calculées élastiques linéaires exercées dans la coque géométriquement parfaite (LA) sous l'effet des valeurs de calcul de la combinaison de charges. Il convient de prendre la plus faible valeur propre (bifurcation) comme la résistance au voilement critique  $R_{cr}$ , voir Figure 8.6.

(5) Il convient de vérifier que l'algorithme de valeur eigen utilisé est fiable pour trouver le mode propre donnant la valeur propre la plus faible. En cas de doute, il convient de calculer des valeurs propres avoisinantes et leurs modes, afin d'obtenir une vision plus complète du comportement de bifurcation de la coque. Il convient d'effectuer l'analyse au moyen d'un logiciel éprouvé par rapport à des cas typiques présentant des caractéristiques de voilement physiquement similaires.

(6) Lorsque la structure comporte des parties où les conditions suivantes peuvent s'appliquer, il convient d'utiliser une analyse élastique géométriquement non linéaire (GNA) pour déterminer les résistances de référence  $R_{pl}$  et  $R_{cr}$  :

- dômes coniques et sphériques de faible hauteur ;
- dômes coniques et sphériques reposant sur des appuis pouvant se déplacer (radialement ou axialement) ;
- ensembles de segments de coque cylindriques et coniques dépourvus de raidisseurs annulaires au niveau des jonctions méridiennes et qui sont chargés selon les méridiens.

(7) Lorsque les conditions données en (6) s'appliquent, et lorsqu'aucune bifurcation ne survient avant que la valeur maximum élastique (charge de claquage) soit atteinte, il convient de prendre cette dernière égale à la résistance au voilement critique  $R_{cr}$ , voir figure 8.6.

(8) Il convient de déterminer l'élanement réduit global  $\bar{\lambda}_{ov}$  pour la coque entière par l'expression :

$$\bar{\lambda}_{ov} = \sqrt{R_{pl}/R_{cr}} \quad \dots (8.26)$$

(9) Il convient que l'évaluation du coefficient d'imperfection élastique global  $a_{ov}$ , le facteur de domaine plastique  $\beta_{ov}$ , l'exposant d'interaction  $\eta_{ov}$  et l'élanement réduit à la limite d'affaissement  $\bar{\lambda}_{ov,0}$  (comme exigé en 8.5.2 (4)) prennent en compte la sensibilité aux imperfections ainsi que d'autres aspects du cas de voilement de coque particulier. Il convient de déterminer des valeurs sécuritaires pour ces paramètres par comparaison avec des cas de voilement de coque connus (voir annexe D) présentant des modes de voilement similaires, une sensibilité aux imperfections similaire, une sensibilité à la plastification similaire, et un comportement post-voilement similaire. Il convient que la valeur de  $a_{ov}$  prenne également en compte la classe de qualité de tolérances de fabrication appropriée.

(10) Si les conditions de (9) ne peuvent être réalisées avec une certitude raisonnable, il convient d'effectuer des essais appropriés (voir ENV 1993-1-1, annexe Z).

(11) Si l'on ne dispose pas de valeurs spécifiques selon (9) ou (10) pour  $a_{ov}$ ,  $\beta_{ov}$ ,  $\eta_{ov}$  et  $\bar{\lambda}_{ov,0}$  il est possible d'adopter les valeurs pour un cylindre non raidi subissant une compression axiale (voir D.1.2.2).

(12) Il convient de déterminer le facteur de réduction de stabilité de coque global  $\chi_{ov}$  comme  $\chi_{ov} = f(\bar{\lambda}_{ov}, \bar{\lambda}_{ov,0}, a_{ov}, \beta_{ov}, \theta_{ov})$  selon 8.5.2 (4).

(13) Il convient de calculer la résistance caractéristique au voilement au moyen de l'expression :

$$R_k = \chi_{ov} R_{pl} \quad \dots (8.27)$$

où :

$R_{pl}$  est la résistance plastique de référence.

(14) Il convient de calculer la résistance de calcul au voilement  $R_d$  au moyen de l'expression :

$$R_d = R_k/\gamma_M \quad \dots (8.28)$$

où :

$\gamma_M$  est le coefficient partiel pour la résistance selon 8.5.2 (2).

### 8.6.3 Vérification de la résistance au voilement

(1) Il convient de vérifier que :

$$F_d \leq R_d \quad \dots (8.29)$$

## 8.7 Calcul par analyse numérique globale GMNA

### 8.7.1 Valeurs de calcul des actions

(1)P Les valeurs de calcul des actions doivent être prises selon les spécifications de 8.1 (1)P.

### 8.7.2 Valeur de calcul de la résistance

(1)P La résistance de calcul au voilement doit être déterminée comme un facteur de charge  $R$  appliqué aux valeurs de calcul  $F_d$  de la combinaison d'actions pour le cas de charge approprié.

(2) Il convient de calculer la résistance de calcul au voilement  $R_d$  directement à partir de la résistance au voilement critique élastique-plastique  $R_{GMNA}$  associée au facteur de réduction des imperfections  $\alpha_{ov,GMNA}$  pour trouver la résistance au voilement caractéristique  $R_k$ . Il convient d'utiliser ensuite le coefficient partiel  $\gamma_M$  pour obtenir la résistance de calcul.

(3) Pour déterminer la résistance critique au voilement GMNA,  $R_{GMNA}$ , il convient d'effectuer une analyse GMNA de la coque géométriquement parfaite soumise à la combinaison d'actions appliquée, accompagnée d'une analyse de valeurs propres en utilisant la théorie de déformation de la plasticité pour détecter d'éventuelles bifurcations dans le trajet de chargement.

(4) Il convient que l'évaluation de la charge critique de voilement soit basée sur le plus faible des trois critères suivants, voir Figure 8.7 :

- charge maximum de la courbe charges-déformations (charge limite) ;
- charge de bifurcation, lorsque celle-ci apparaît dans le trajet de chargement avant d'atteindre le point limite de la courbe charges-déformations ;
- déformation tolérable la plus forte, lorsqu'elle se produit dans le trajet de chargement avant d'atteindre la charge de bifurcation ou la charge limite.

(5) Il convient que le facteur de réduction d'imperfections GMNA global,  $\alpha_{ov,GMNA}$ , prenne en compte la sensibilité aux imperfections du cas de voilement de coque particulier et de la qualité de fabrication.

(6) Il convient de déterminer la valeur de  $\alpha_{ov,GMNA}$  comme indiqué en 8.6.2 (9) à (11), mais en prenant en compte la non linéarité matérielle de l'analyse GMNA.

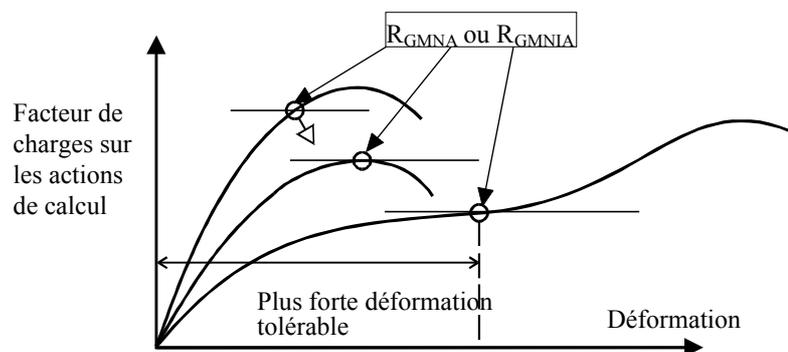


Figure 8.7 : Définition de la résistance au voilement d'après l'analyse globale GMNA ou GMNIA

(7) Il convient de calculer la résistance caractéristique au voilement  $R_k$  au moyen de l'expression :

$$R_k = \alpha_{ov,GMNA} R_{GMNA} \quad \dots (8.30)$$

où :

$\alpha_{ov,GMNA}$  est le facteur global de réduction d'imperfections GMNA,

$R_{GMNA}$  est la résistance critique au voilement élastique-plastique GMNA.

### 8.7.3 Vérification de la résistance au voilement

(1) Il convient de vérifier que :

$$F_d \leq R_d \quad \dots (8.31)$$

## 8.8 Calcul par analyse numérique globale GMNIA

### 8.8.1 Valeurs de calcul des actions

(1)P Les valeurs de calcul des actions doivent être prises selon les spécifications de 8.1 (1)P.

### 8.8.2 Valeur de calcul de la résistance

(1)P La résistance de calcul au voilement doit être déterminée comme un facteur de charge  $R$  appliqué aux valeurs de calcul  $F_d$  de la combinaison d'actions pour le cas de charge approprié.

(2) Il convient de calculer la résistance de calcul au voilement  $R_d$  directement à partir de la résistance critique au voilement élastique-plastique imparfaite  $R_{GMNIA}$  associée à un facteur de calibrage  $k_{GMNIA}$  pour trouver la résistance caractéristique au voilement  $R_k$ . Il convient d'utiliser ensuite le coefficient partiel  $\gamma_M$  pour obtenir la résistance de calcul.

(3) Pour déterminer la résistance critique au voilement imparfaite GMNIA,  $R_{GMNIA}$ , il convient d'effectuer une analyse GMNIA de la coque géométriquement imparfaite soumise à la combinaison d'actions appliquée, accompagnée d'une analyse de valeurs propres utilisant la théorie de la plasticité pour détecter d'éventuelles bifurcations dans le trajet de chargement.

(4) Il convient que l'évaluation de la charge critique de voilement soit basée sur le plus faible des trois critères suivants, voir Figure 8.7 :

- a) charge maximum de la courbe charges-déformations (charge limite) ;
- b) charge de bifurcation, lorsque celle-ci apparaît dans le trajet de chargement avant d'atteindre le point limite de la courbe charges-déformations ;
- c) déformation tolérable la plus forte, lorsqu'elle se produit dans le trajet de chargement avant d'atteindre la charge de bifurcation ou la charge limite.

(5) Lorsque l'on utilise une analyse GMNIA, il convient de prendre en compte de manière appropriée les effets des imperfections qui ne peuvent être évitées en pratique, y compris :

- a) les imperfections géométriques, telles que :
  - écarts par rapport à la forme géométrique nominale de la surface médiane (prédéformations, défaut de rotondité) ;
  - irrégularités au niveau et à proximité des soudures (excentricités mineures, dépressions de retrait, erreurs de courbure au laminage) ;
  - écarts par rapport à l'épaisseur nominale ;
  - défaut de régularité des appuis.
- b) les imperfections matérielles, telles que :
  - contraintes résiduelles provoquées par le laminage, l'emboutissage, le soudage, le redressage, etc. ;
  - défauts d'homogénéité et anisotropies.

NOTE D'autres influences négatives éventuelles sur la résistance critique au voilement GMNIA, tels les tassements du sol ou les flexibilités des assemblages ou des appuis, ne sont pas classés comme imperfections dans le sens de ces dispositions.

(6) Il convient de prendre en compte les imperfections dans l'analyse GMNIA en incluant des quantités additionnelles appropriées dans le modèle numérique.

(7) Il convient en général d'introduire les imperfections au moyen d'imperfections géométriques équivalentes sous forme d'écarts de forme initiale perpendiculairement à la surface médiane de la coque parfaite, sauf si l'on utilise une meilleure technique. Il convient d'obtenir la surface médiane de la coque géométriquement imparfaite par superposition des imperfections géométriques équivalentes sur la géométrie de coque parfaite.

(8) Il convient de choisir le schéma des imperfections géométriques équivalentes de sorte qu'il produise l'effet le plus défavorable sur le comportement au voilement de la coque. Si le schéma le plus défavorable ne peut être identifié avec une certitude raisonnable, il convient d'effectuer l'analyse pour un nombre suffisant de schémas d'imperfections différents, puis d'identifier le cas le plus défavorable.

(9) Il convient d'utiliser un schéma affine au mode propre sauf si un schéma défavorable différent peut être justifié (c'est-à-dire le mode de voilement critique associé à la résistance au voilement critique élastique  $R_{Cr}$  basée sur une analyse GNA de la coque parfaite (voir 8.6.2 (7))).

(10) Il convient que le schéma des imperfections géométriques équivalentes reflète, si possible, les dispositions constructives et les conditions aux limites de manière défavorable.

(11) Nonobstant (9) et (10), des schémas peuvent être exclus de l'étude s'ils peuvent être éliminés parce qu'irréalistes en raison de la méthode de fabrication, de réalisation ou de montage.

(12) Il convient de considérer la modification du mode adopté pour inclure des détails structuraux réalistes (tels des dépressions axisymétriques de soudures).

(13) Il convient de choisir le signe des imperfections géométriques équivalentes de sorte que les écarts de forme initiale maximum soient orientés de façon défavorable vers le centre de courbure de la coque.

(14) Il convient de considérer l'amplitude de l'imperfection géométrique équivalente adoptée comme dépendant de la classe de qualité de tolérances de fabrication. Il convient que l'écart maximum de la géométrie de l'imperfection équivalente par rapport à la forme parfaite  $\Delta w_{0,eff}$  soit égal à la plus grande des deux valeurs suivantes  $\Delta w_{0,eff,1}$  et  $\Delta w_{0,eff,2}$ , où :

$$\Delta w_{0,eff,1} = \ell_g U_{n1} \quad \dots (8.32)$$

$$\Delta w_{0,eff,2} = 100 t U_{n2} \quad \dots (8.33)$$

où :

$\ell_g$  sont toutes longueurs-étalons appropriées selon 8.4.4 (2) ;

$t$  est l'épaisseur de paroi locale de coque ;

$U_{n1}$  et  $U_{n2}$  sont les amplitudes d'imperfection en fossette données dans le Tableau 8.4.

(15) Il convient d'interpréter l'amplitude de l'imperfection géométrique dans le schéma de l'imperfection géométrique équivalente adopté de façon à ce qu'elle soit cohérente avec la méthode de longueur-étalon exposée en 8.4.4 (2), par laquelle elle est définie.

(16) En outre, il convient de vérifier qu'une analyse adoptant une imperfection de 10 % inférieure à la valeur de  $\Delta w_{0,eff,2}$  obtenue en (15) ne donne pas une valeur inférieure pour  $R_{GMNIA}$ . Si cela est le cas, il convient de procéder à une itération de la procédure pour trouver le cas le plus défavorable.

**Tableau 8.4 : Valeurs des amplitudes d'imperfection en fossette initiale  $U_{n1}$  et  $U_{n2}$**

Classe de qualité de tolérances de fabrication	Description	Valeur de $U_{n1}$	Valeur de $U_{n2}$
Classe A	Excellente	0,01	0,01
Classe B	Élevée	0,016	0,016
Classe C	Normale	0,025	0,025

(17) Si des effets de charges suiveuses sont possibles, il convient de les incorporer dans l'analyse ou de vérifier que leur influence est négligeable.

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

a) en utilisant le même programme pour calculer d'autres cas de voilement de coque pour lesquels des valeurs de résistance caractéristique au voilement  $R_{k,known,check}$  sont connues. Il convient que les cas de vérification utilisent fondamentalement des hypothèses d'imperfection similaires et soient similaires dans les paramètres de contrôle du voilement (tels l'élanement réduit de coque, le comportement post-voilement, la sensibilité aux imperfections, le comportement des matériaux) ;

b) en comparant les valeurs calculées ( $R_{GMNIA,check}$ ) avec des résultats d'essais ( $R_{test,known,check}$ ). Il convient que les cas de vérification satisfassent les mêmes conditions de similitude données en (a).

(19) En fonction des résultats des vérifications de fiabilité, il convient d'évaluer le facteur de calibrage  $k_{GMNIA}$ , selon le cas, de la façon suivante :

$$k_{GMNIA} = \frac{R_{k,known,check}}{R_{GMNIA,check}} \quad \text{ou} \quad k_{GMNIA} = \frac{R_{test,known,check}}{R_{GMNIA,check}} \quad \dots (8.34)$$

où :

$R_{k,known,check}$  est la valeur caractéristique du résultat connue ;

$R_{test,known,check}$  est le résultat d'essai connu ;

$R_{GMNIA,check}$  est le résultat du calcul.

(20) Il convient de calculer la résistance caractéristique au voilement par l'expression :

$$R_k = k_{GMNIA} R_{GMNIA} \quad \dots (8.35)$$

où :

$R_{GMNIA}$  est la résistance critique au voilement imparfaite GMNIA calculée ;

$k_{GMNIA}$  est le facteur de calibrage.

### 8.8.3 Vérification de la résistance au voilement

(1) Il convient de vérifier que :

$$F_d \leq R_d \quad \dots (8.36)$$

## 9 État limite de fatigue (EL4)

### 9.1 Valeurs de calcul des actions

(1)P Les valeurs de calcul des actions pour chaque cas de charges doivent être prises comme les parties variables de l'action totale représentant le spectre d'actions anticipé au cours de la durée de vie de la structure.

(2) Il convient de prendre les spectres d'actions appropriés dans l'ENV 1991 conformément aux définitions données dans les parties d'application appropriées de l'ENV 1993.

### 9.2 Calcul des contraintes

#### 9.2.1 Généralités

(1) Il convient d'utiliser l'évaluation de la fatigue présentée dans la section 9 de l'ENV 1993-1-1, sous réserve des dispositions données ici.

(2) Il convient de prendre le coefficient partiel pour la résistance  $\gamma_{Mf}$  dans l'ENV 1993-1-1.

#### 9.2.2 Valeurs de calcul de l'étendue de contraintes

(1)P Les contraintes doivent être déterminées par une analyse élastique linéaire de la structure soumise aux valeurs de calcul des actions de fatigue.

(2) Dans chaque vérification de l'état limite, il convient de prendre la valeur de calcul de la contrainte de fatigue égale à l'étendue de contraintes  $\Delta\sigma$  la plus élevée des valeurs exercées sur les deux surfaces de la coque, et basée sur la somme des contraintes primaires et secondaires.

(3) En fonction de l'évaluation de fatigue effectué conformément à la section 9 de l'ENV 1993-1-1, il convient d'évaluer soit les étendues de contraintes nominales soit les étendues de contraintes géométriques.

(4) Les étendues de contraintes nominales peuvent être utilisées si l'on adopte 9.2.3 (2).

(5) Il convient d'utiliser les étendues de contraintes géométriques pour les détails constructifs qui sont différents de ceux mentionnés en 9.2.3 (2).

(6) L'étendue de contraintes géométriques ne prend en compte que la géométrie globale du joint, à l'exclusion des contraintes locales provoquées par la géométrie des soudures et les effets locaux des soudures. Elle peut être déterminée par l'utilisation de facteurs de concentration des contraintes géométriques donnés par des expressions.

(7) Il convient de décomposer les contraintes utilisées pour le calcul de fatigue des détails constructifs présentant une orientation géométrique linéaire en composantes transversales et parallèles à l'axe du détail.

### 9.2.3 Valeurs de calcul de la résistance (résistance à la fatigue)

(1) Les valeurs de calcul de la résistance obtenues par la méthode suivante peuvent être appliquées aux aciers de construction dans la plage de températures allant jusqu'à 150 °C.

(2)P La résistance à la fatigue des détails constructifs couramment rencontrés dans les structures en coque doit être obtenue au moyen de l'annexe C de l'ENV 1993-3-2 sous forme de classes en fonction de l'étendue de contraintes  $\Delta\sigma_R$ , et où les valeurs sont en outre classifiées en fonction de la qualité des soudures.

(3) Il convient de prendre la résistance à la fatigue des classes de détails dans la section 9 de l'ENV 1993-1-1.

### 9.2.4 Limitation de l'étendue de contraintes

(1) Dans toute vérification de cet état limite, il convient que l'étendue de contraintes de calcul satisfasse la condition suivante :

$$\gamma_{Ff} \Delta\sigma_E \leq \Delta\sigma_R / \gamma_{Mf} \quad \dots (9.1)$$

où :

$\gamma_{Ff}$  est le coefficient partiel pour le chargement de fatigue ;

$\gamma_{Mf}$  est le coefficient partiel pour la résistance à la fatigue ;

$\Delta\sigma_E$  est l'étendue de contraintes d'amplitude constante équivalente du spectre des contraintes de calcul ;

$\Delta\sigma_R$  est l'étendue de contraintes de résistance à la fatigue pour la catégorie de détail et le nombre de cycles du spectre de contraintes appropriés.

(2) Comme alternative à (1), on peut effectuer une évaluation des dommages cumulatifs au moyen de la règle de Palmgren-Miner :

$$D_d \leq 1 \quad \dots (9.2)$$

dans laquelle :

$$D_d = \sum n_i / N_i \quad \dots (9.3)$$

où :

$n_i$  est le nombre de cycles de l'étendue de contraintes  $\Delta\sigma_i$  ;

$N_i$  est le nombre de cycles de l'étendue de contraintes  $\gamma_{Ff} \gamma_{Mf} \Delta\sigma_i$  pour provoquer la ruine pour la catégorie de détail appropriée.

(3) Dans le cas d'une combinaison d'étendues de contraintes normales et de cisaillement, il convient de considérer les effets combinés conformément à la section 9 de l'ENV 1993-1-1.

## 9.3 Calcul par analyse numérique globale LA ou GNA

(1) Il convient que le calcul de la fatigue effectué sur la base d'une analyse élastique (analyse LA ou GNA) respecte les dispositions données en 9.2 pour le calcul des contraintes. Cependant, il convient de déterminer les étendues de contraintes provoquées par le chargement de fatigue au moyen d'une analyse de coque en flexion, en incluant les discontinuités géométriques des joints dans les détails constructifs.

(2) Si l'on utilise une analyse tridimensionnelle par éléments finis, il convient d'éliminer les effets d'entaille provoqués par la géométrie locale des soudures.

## Annexe A (normative)

### Contraintes de membrane exercées dans les coques

#### A.1 Généralités

##### A.1.1 Notation

La notation utilisée dans cette annexe pour les dimensions géométriques, les contraintes et les charges respecte 1.6 et, en outre, la notation suivante est utilisée :

Caractères romains majuscules

$F_x$  charge axiale appliquée sur le cylindre

$M$  moment fléchissant global appliqué sur le cylindre entier (à ne pas confondre avec le moment par unité de largeur exercé dans la paroi de coque  $m$ )

$M_t$  couple de torsion global appliqué sur le cylindre entier

$V$  cisaillement transversal global appliqué sur le cylindre entier

Caractères romains minuscules

$g$  poids unitaire du matériau de la coque

$p_n$  pression normale répartie

$p_x$  traction axiale répartie exercée sur la paroi du cylindre

Caractères grecs minuscules

$\phi$  angle de pente méridienne

$\sigma_x$  contrainte de membrane axiale ou méridienne ( $= n_x/t$ )

$\sigma_\theta$  contrainte de membrane circonférentielle ( $= n_\theta/t$ )

$\tau$  cisaillement de membrane ( $= n_{x\theta}/t$ )

##### A.1.2 Conditions aux limites

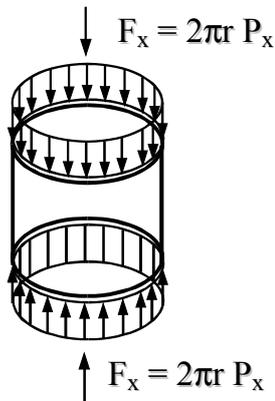
- (1) Il convient d'utiliser les notations de conditions aux limites comme indiqué selon 4.2.2.
- (2) Pour que ces expressions soient strictement valables pour les cylindres, il convient de considérer les conditions aux limites comme libres radialement aux deux extrémités, appuyées axialement à une extrémité, et maintenues en rotation aux deux extrémités.
- (3) Pour les troncs de cônes, les conditions aux limites considérées incluent des composantes de charges transversales à la paroi de coque, de sorte que la résultante de contraintes combinée introduite dans la coque s'exerce uniquement dans le sens du méridien de la coque.
- (4) Pour que ces expressions soient strictement valables pour les cônes, il convient de considérer les conditions aux limites comme libres radialement aux deux extrémités, appuyées méridialement à une extrémité, et maintenues en rotation aux deux extrémités.

##### A.1.3 Convention de signes

- (1) Il convient de prendre la convention de signes pour les contraintes  $\sigma$  de la façon suivante : la traction est partout positive, bien que certaines figures illustrent des cas où la charge extérieure est appliquée dans le sens inverse.

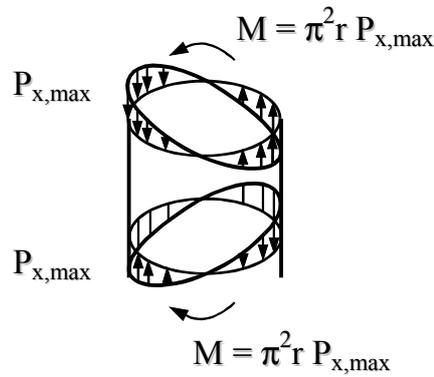
## A.2 Coques cylindriques non raidies

### A.2.1 Charge axiale uniforme



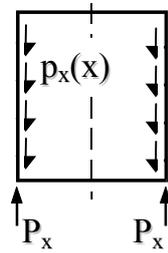
$$\sigma_x = -\frac{F_x}{2\pi r t}$$

### A.2.2 Charge axiale par flexion



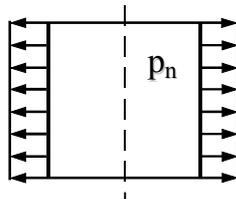
$$\sigma_x = \pm \frac{M}{\pi r^2 t}$$

### A.2.3 Charge de frottement



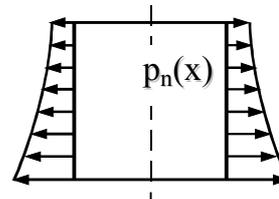
$$\sigma_x = -\frac{1}{t} \int_0^{\ell} p_x dx$$

### A.2.4 Pression intérieure uniforme



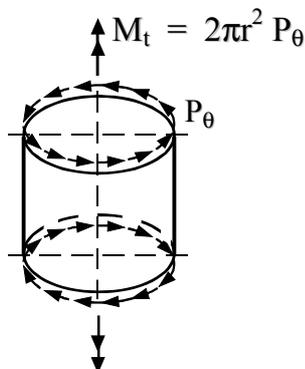
$$\sigma_{\theta} = p_n \frac{r}{t}$$

### A.2.5 Pression intérieure variable



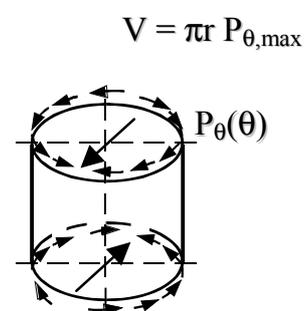
$$\sigma_{\theta}(x) = p_n(x) \frac{r}{t}$$

### A.2.6 Cisaillement uniforme par torsion



$$\tau = \frac{M_t}{2\pi r^2 t}$$

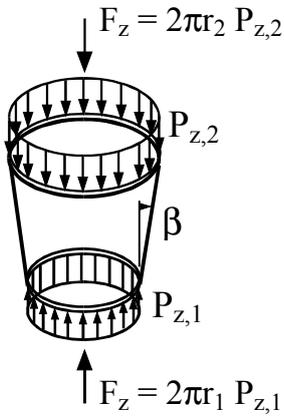
### A.2.7 Cisaillement sinusoïdal par force transversale



$$\tau_{\max} = \pm \frac{V}{\pi r t}$$

### A.3 Coques coniques non raidies

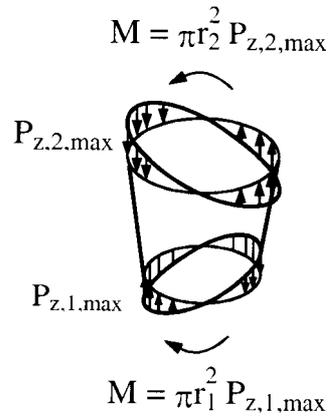
#### A.3.1 Charge axiale uniforme



$$\sigma_x = -\frac{F_z}{2\pi r t \cos \beta}$$

$$\sigma_\theta = 0$$

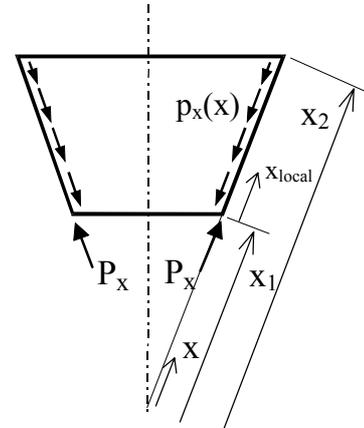
#### A.3.2 Charge axiale par flexion



$$\sigma_{x,max} = \pm \frac{M}{\pi r^2 t \cos \beta}$$

$$\sigma_\theta = 0$$

#### A.3.3 Charge de frottement

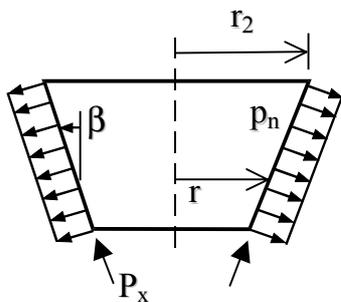


$$x_1 = \frac{r_1}{\sin \beta} \quad x_2 = \frac{r_2}{\sin \beta}$$

$$\sigma_{x1} = -\frac{1}{x_1 t} \int_{x_1}^{x_2} p_x x \, dx$$

$$\sigma_\theta = 0$$

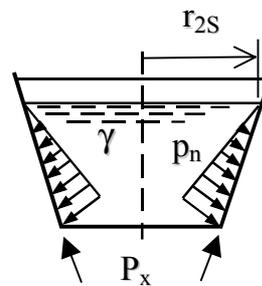
#### A.3.4 Pression intérieure uniforme



$$\sigma_x = -p_n \frac{r}{2t \cos \beta} \left[ \left( \frac{r_2}{r} \right)^2 - 1 \right]$$

$$\sigma_\theta = p_n \frac{r}{t \cos \beta}$$

#### A.3.5 Pression intérieure variant linéairement

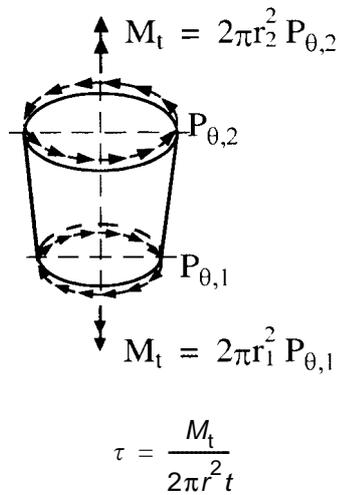


$r_{2s}$  est le rayon à la surface du liquide

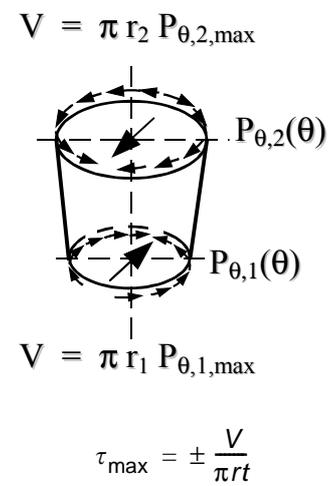
$$\sigma_x = -\frac{r}{t \sin \beta} \left\{ \frac{r_{2s}}{6} \left[ \left( \frac{r_{2s}}{r} \right)^2 - 3 \right] + \frac{r}{3} \right\}$$

$$\sigma_\theta = +\frac{r}{t \sin \beta} (r_{2s} - r)$$

**A.3.6 Cisaillement uniforme par torsion**

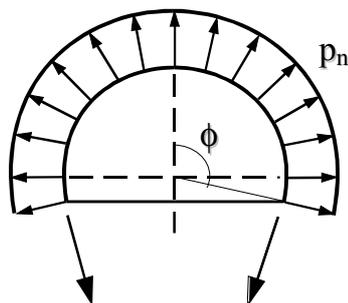


**A.3.7 Cisaillement sinusoïdal par force transversale**



**A.4 Coques sphériques non raidies**

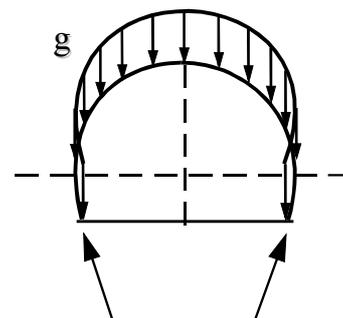
**A.4.1 Pression intérieure uniforme**



$$\sigma_x = \frac{p_n r}{2t}$$

$$\sigma_\theta = \frac{p_n r}{2t}$$

**A.4.2 Charge constante de poids propre**



$$\sigma_x = -\frac{gr}{t} \left( \frac{1}{1 + \cos \phi} \right)$$

$$\sigma_\theta = -\frac{gr}{t} \left( \cos \phi - \frac{1}{1 + \cos \phi} \right)$$

**Annexe B**  
(normative)  
**Expressions supplémentaires**  
**pour les résistances à l'effondrement plastique**

## **B.1 Généralités**

### **B.1.1 Notation**

La notation utilisée dans cette annexe pour les dimensions géométriques, les contraintes et les charges respecte 1.6 et, en outre, la notation suivante est utilisée :

Caractères romains majuscules

$A_r$  aire de section transversale d'une ceinture

$P_R$  résistance de mécanisme plastique selon la théorie des petits déplacements

Caractères romains minuscules

$b$  épaisseur d'une ceinture

$\ell$  longueur efficace de coque agissant avec une ceinture

$r$  rayon du cylindre

$s_e$  paramètre adimensionnel de contrainte équivalente de Von Mises

$s_m$  paramètre adimensionnel de contrainte combinée

$s_x$  paramètre adimensionnel de contrainte axiale

$s_\theta$  paramètre adimensionnel de contrainte circonférentielle

Indices

$r$  concernant une ceinture

$R$  résistance

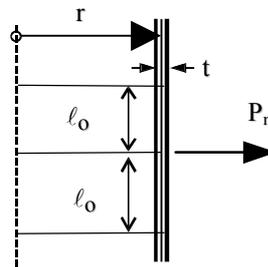
### **B.1.2 Conditions aux limites**

(1) Il convient de prendre les notations de conditions aux limites comme indiqué dans l'article 4.2.2.

(2) Il convient de considérer que le terme « encastré » fait référence à BC1r et que le terme « articulé » fait référence à BC1f.

## B.2 Coques cylindriques non raidies

### B.2.1 Cylindre : charge linéique radiale



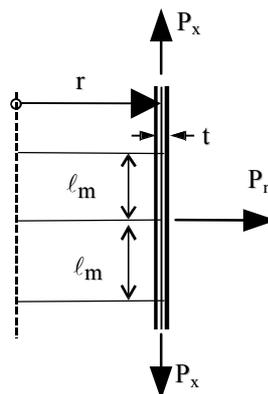
Quantités de référence :

$$l_0 = 0,975 \sqrt{rt}$$

La résistance plastique  $P_{nR}$  (force par unité de circonférence) est donnée par :

$$\frac{P_{nR}}{2l_0} = f_y \frac{t}{r}$$

### B.2.2 Cylindre : charge linéique radiale et charge axiale



Quantités de référence :

$$s_x = \frac{P_x}{f_y t} \quad l_0 = 0,975 \sqrt{rt}$$

Domaine d'application :

$$-1 \leq s_x \leq +1$$

Paramètres dépendants :

Si  $P_n > 0$  (vers l'extérieur) alors :  $A = +s_x - 1,50$

Si  $P_n < 0$  (vers l'intérieur) alors :  $A = -s_x - 1,50$

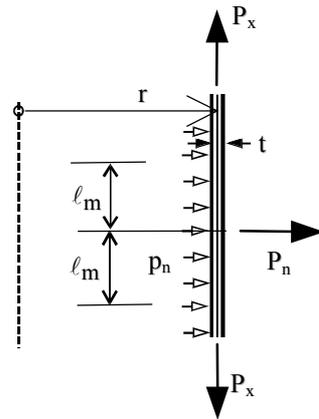
$$s_m = A + \sqrt{A^2 + 4(1 - s_x^2)}$$

Si  $s_x \neq 0$  alors :  $l_m = s_m l_0$

La résistance plastique  $P_{nR}$  (force par unité de circonférence) est donnée par :

$$\frac{P_{nR}}{2l_m} = f_y \frac{t}{r}$$

**B.2.3 Cylindre : charge linéique radiale, pression intérieure constante et charge axiale**



Quantités de référence :

$$s_x = \frac{P_x}{f_y t}$$

$$s_\theta = \frac{p_n r}{f_y t}$$

$$\ell_o = 0,975 \sqrt{rt}$$

$$s_e = \sqrt{s_\theta^2 + s_x^2 - s_x s_\theta}$$

Domaine d'application :

$$-1 \leq s_x \leq +1$$

$$-1 \leq s_\theta \leq +1$$

Paramètres dépendants :

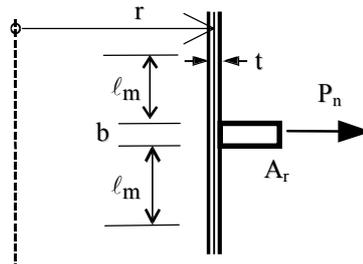
Charge sur ceinture dirigée vers l'extérieur $P_n > 0$		Charge sur ceinture dirigée vers l'intérieur $P_n < 0$	
Condition	Expressions	Condition	Expressions
$s_e < 1,00$ et $s_\theta \leq 0,975$	$A = + s_x - 2s_\theta - 1,50$ $s_m = A + \sqrt{A^2 + 4(1 - s_e^2)}$ $\ell_m = \ell_o \left( \frac{s_m}{1 - s_\theta} \right)$	$s_e < 1,00$ et $s_\theta \geq -0,975$	$A = - s_x + 2s_\theta - 1,50$ $s_m = A + \sqrt{A^2 + 4(1 - s_e^2)}$ $\ell_m = \ell_o \left( \frac{s_m}{1 + s_\theta} \right)$
$s_e = 1,00$ ou $s_\theta > 0,975$	$\ell_m = 0,0$	$s_e = 1,00$ ou $s_\theta < -0,975$	$\ell_m = 0,0$

La résistance plastique est donnée par ( $P_n$  et  $p_n$  toujours positifs vers l'extérieur) :

$$\frac{P_n R}{2\ell_m} + p_n = f_y \frac{t}{r}$$

### B.3 Coques cylindriques raidies par des ceintures

#### B.3.1 Cylindre raidi par une ceinture : charge linéique radiale

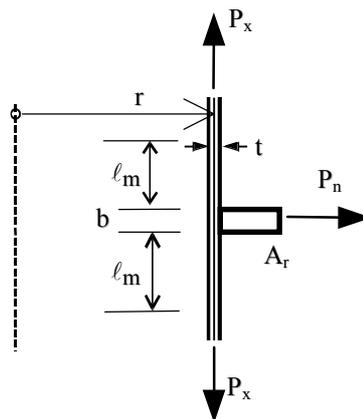


La résistance plastique  $P_{nR}$  (force par unité de circonférence) est donnée par :

$$P_{nR} = f_y \left( \frac{A_r + (b + 2\ell_m)t}{r} \right)$$

$$\ell_m = \ell_o = 0,975 \sqrt{rt}$$

#### B.3.2 Cylindre raidi par une ceinture : charge linéique radiale et charge axiale



Quantités de référence :

$$s_x = \frac{P_x}{f_y t} \quad \ell_o = 0,975 \sqrt{rt}$$

Domaine d'application :

$$-1 \leq s_x \leq +1$$

Paramètres dépendants :

Si  $P_n > 0$  (vers l'extérieur) alors :  $A = + s_x - 1,50$

Si  $P_n < 0$  (vers l'intérieur) alors :  $A = - s_x - 1,50$

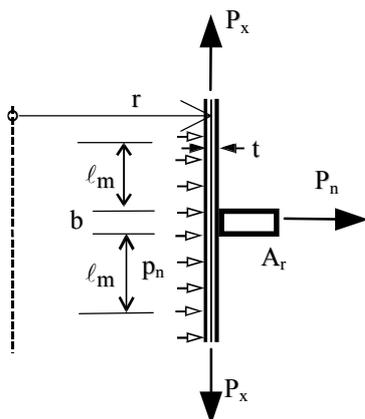
$$s_m = A + \sqrt{A^2 + 4(1 - s_x^2)}$$

Si  $s_x \neq 0$  alors :  $\ell_m = s_m \ell_o$

La résistance plastique  $P_{nR}$  (force par unité de circonférence) est donnée par :

$$P_{nR} = f_y \left( \frac{A_r + (b + 2\ell_m)t}{r} \right)$$

### B.3.3 Cylindre raidi par une ceinture : charge linéique radiale, pression intérieure constante et charge axiale



Quantités de référence :

$$s_x = \frac{P_x}{f_y t}$$

$$s_\theta = \frac{p_n r}{f_y t}$$

$$\ell_o = 0,975 \sqrt{rt}$$

$$s_e = \sqrt{s_\theta^2 + s_x^2 - s_x s_\theta}$$

Domaine d'application :

$$-1 \leq s_x \leq +1$$

$$-1 \leq s_\theta \leq +1$$

Paramètres dépendants :

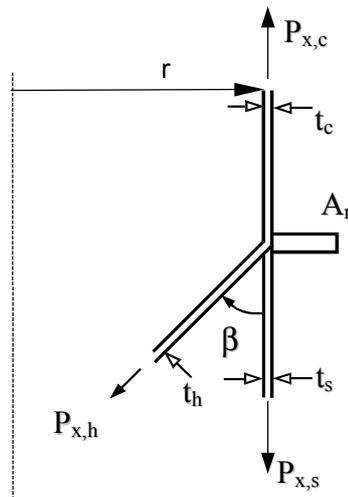
Charge sur ceinture dirigée vers l'extérieur $P_n > 0$		Charge sur ceinture dirigée vers l'intérieur $P_n < 0$	
Condition	Expressions	Condition	Expressions
$s_e < 1,00$ et $s_\theta \leq 0,975$	$A = + s_x - 2s_\theta - 1,50$ $s_m = A + \sqrt{A^2 + 4(1 - s_e^2)}$ $\ell_m = \ell_o \left( \frac{s_m}{1 - s_\theta} \right)$	$s_e < 1,00$ et $s_\theta \geq -0,975$	$A = - s_x + 2s_\theta - 1,50$ $s_m = A + \sqrt{A^2 + 4(1 - s_e^2)}$ $\ell_m = \ell_o \left( \frac{s_m}{1 + s_\theta} \right)$
$s_e = 1,00$ ou $s_\theta > 0,975$	$\ell_m = 0,0$	$s_e = 1,00$ ou $s_\theta < -0,975$	$\ell_m = 0,0$

La résistance plastique est donnée par ( $P_n$  et  $p_n$  toujours positifs vers l'extérieur) :

$$P_{nR} + p_n (b + 2\ell_m) = f_y \left( \frac{A_r + (b + 2\ell_m)t}{r} \right)$$

## B.4 Jonctions entre coques

### B.4.1 Jonction soumise à un chargement méridien uniquement (simplifié)



Domaine d'application :

$$t_c^2 \leq t_s^2 + t_h^2 \quad |P_{xs}| \ll t_s f_y, |P_{xh}| \ll t_h f_y, \text{ et } |P_{xc}| \ll t_c f_y$$

Paramètres dépendants :

$$\eta = \sqrt{\frac{t_c^2}{t_s^2 + t_h^2}} \quad \psi_s = \psi_h = 0,7 + 0,6\eta^2 - 0,3\eta^3$$

Pour le cylindre  $l_{oc} = 0,975 \sqrt{rt_c}$

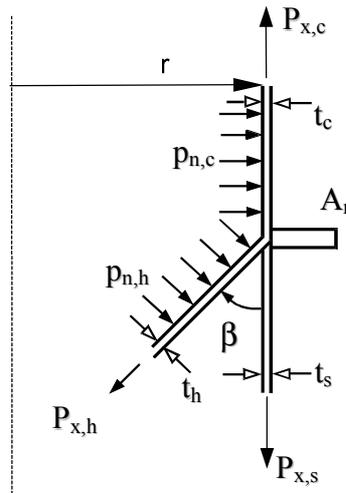
Pour la jupe  $l_{os} = 0,975 \psi_s \sqrt{rt_s}$

Pour le segment conique  $l_{oh} = 0,975 \psi_h \sqrt{\frac{rt_h}{\cos \beta}}$

La résistance plastique est donnée par :

$$P_{xhR} r \sin \beta = f_y (A_r + l_{oc} t_c + l_{os} t_s + l_{oh} t_h)$$

**B.4.2 Jonction soumise à une pression intérieure et à un chargement axial**



Quantités de référence :

$$s_{xc} = \frac{P_{xc}}{f_y t_c} \quad s_{xs} = \frac{P_{xs}}{f_y t_s} \quad s_{xh} = \frac{P_{xh}}{f_y t_h}$$

$$s_{\theta c} = \frac{P_{nc}}{f_y} \frac{r}{t_c} \quad s_{\theta s} = 0 \quad s_{\theta h} = \frac{P_{nh}}{f_y} \frac{r}{t_h \cos \beta}$$

pour  $i = c, s, h$  tour à tour  $s_{ei} = \sqrt{s_{\theta i}^2 + s_{xi}^2} - s_{xi} s_{\theta i}$

Domaine d'application :

$$-1 \leq s_{xi} \leq +1 \quad -1 \leq s_{\theta i} \leq +1$$

Évaluation d'épaisseur équivalente :

Groupe de plaques inférieur plus épais $t_c^2 \leq t_s^2 + t_h^2$	Groupe de plaques supérieur plus épais $t_c^2 > t_s^2 + t_h^2$
$\eta = \sqrt{\frac{t_c^2}{t_s^2 + t_h^2}}$ $\psi_c = 1,0$ $\psi_s = \psi_h = 0,7 + 0,6\eta^2 - 0,3\eta^3$	$\eta = \sqrt{\frac{t_s^2 + t_h^2}{t_c^2}}$ $\psi_c = 0,7 + 0,6\eta^2 - 0,3\eta^3$ $\psi_s = \psi_h = 1,0$

Paramètres dépendants :

Pour les segments cylindriques  $l_{oi} = 0,975 \psi_i \sqrt{rt_i}$

Pour le segment conique  $l_{oh} = 0,975 \psi_h \sqrt{\frac{rt_i}{\cos \beta}}$

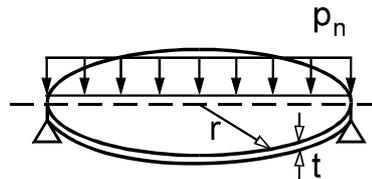
Pour chaque segment de coque i pris séparément	
Condition	Expressions
$s_{ei} < 1,00$ et $s_{\theta i} \geq -0,975$	$A_i = -s_{xi} + 2s_{\theta i} - 1,50$ $s_{mi} = A_i + \sqrt{A_i^2 + 4(1 - s_{ei}^2)}$ $l_{mi} = l_{oi} \left( \frac{s_{mi}}{1 + s_{\theta i}} \right)$
$s_{ei} = 1,00$	$l_{mi} = 0,0$
$s_{\theta i} < -0,975$	$l_{mi} = 0,0$

La résistance plastique est donnée par :

$$P_{xhR} r \sin\beta = f_y (A_r + l_{mc}t_c + l_{ms}t_s + l_{mh}t_h) + r (\rho_{nc}l_{mc} + \rho_{nh}l_{mh} \cos\beta)$$

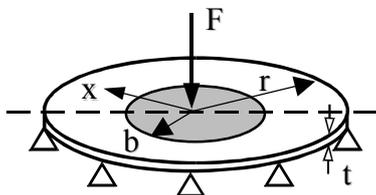
## B.5 Plaques circulaires avec conditions aux limites axisymétriques

### B.5.1 Charge uniforme, appuis simples aux bords



$$p_{n,R} = 1,625 \left( \frac{t}{r} \right)^2 f_y$$

### B.5.2 Charge répartie localement, appuis simples aux bords

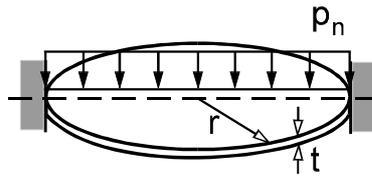


Pression uniforme  $p_n$  sur zone circulaire de rayon  $b$   
 $F = p_n \pi b^2$

$$F_R = K \frac{\pi}{2} t^2 f_y$$

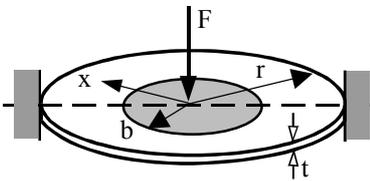
$$\text{avec } K = \min \left[ \begin{array}{l} 1,0 + 1,10 \frac{b}{r} + 1,15 \left( \frac{b}{r} \right)^4 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{b}{t} \end{array} \right]$$

**B.5.3 Charge uniforme, bord encastré**



$$p_{n,R} = 3,125 \left(\frac{t}{r}\right)^2 f_y$$

**B.5.4 Charge répartie localement, bord encastré**



Pression uniforme  $p_n$  sur zone circulaire de rayon  $b$   
 $F = p_n \pi b^2$

$$F_R = K \frac{\pi}{2} t^2 f_y$$

$$\text{avec } K = \min \left[ \begin{array}{l} 1,40 + 2,85 \frac{b}{r} + 2,0 \left(\frac{b}{r}\right)^4 \\ \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{b}{t} \end{array} \right]$$

## Annexe C

(normative)

### Expressions pour les contraintes élastiques linéaires de membrane et de flexion

#### C.1 Généralités

##### C.1.1 Notations

Les notations utilisées dans cette annexe pour les dimensions géométriques, les contraintes et les charges respectent 1.6 et, en outre, les notations suivantes sont utilisées :

Caractères romains

- $b$  rayon auquel la charge locale exercée sur la plaque cesse  
 $r$  rayon extérieur de plaque circulaire  
 $x$  coordonnée axiale sur cylindre ou coordonnée radiale sur plaque circulaire

Symboles grecs

- $\sigma_{eq,m}$  contrainte équivalente de Von Mises associée uniquement à des contraintes de membrane  
 $\sigma_{eq,s}$  contrainte équivalente de Von Mises dérivée des contraintes de surface  
 $\sigma_{MT}$  contrainte de référence dérivée de la théorie de membrane  
 $\sigma_{bx}$  contrainte de flexion méridienne  
 $\sigma_{b\theta}$  contrainte de flexion circonférentielle  
 $\sigma_{sx}$  contrainte de surface méridienne  
 $\sigma_{s\theta}$  contrainte de surface circonférentielle  
 $\tau_{xn}$  contrainte de cisaillement transversale associée à une flexion méridienne

Indices

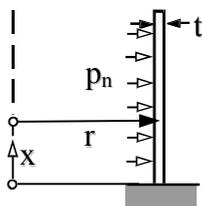
- R résistance  
n normal  
r concernant une ceinture  
y valeur de première plastification

##### C.1.2 Conditions aux limites

- (1) Il convient de prendre les notations de conditions aux limites comme indiqué suivant 4.2.2.
- (2) Il convient de considérer que le terme «encasté» fait référence à BC1r et que le terme «articulé» fait référence à BC1f.

## C.2 Coques cylindriques non raidies à base encastrée

### C.2.1 Cylindre, encastré : pression intérieure uniforme

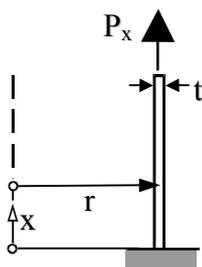


$$\sigma_{MT\theta} = p_n \frac{r}{t}$$

BC1r

$\sigma_{sx}$ maximum	$\sigma_{s\theta}$ maximum	$\tau_{xn}$ maximum	$\sigma_{eq,s}$ maximum	$\sigma_{eq,m}$ maximum
$\pm 1,816 \sigma_{MT\theta}$	$+ 1,080 \sigma_{MT\theta}$	$1,169 \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$1,614 \sigma_{MT\theta}$	$1,043 \sigma_{MT\theta}$

### C.2.2 Cylindre, agrafé : chargement axial

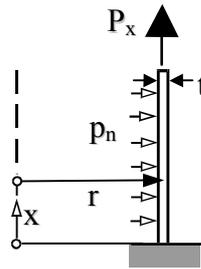


$$\sigma_{MTx} = \frac{P_x}{t}$$

BC1r

$\sigma_{sx}$ maximum	$\sigma_{s\theta}$ maximum	$\tau_{xn}$ maximum	$\sigma_{eq,s}$ maximum	$\sigma_{eq,m}$ maximum
$1,545 \sigma_{MTx}$	$+ 0,455 \sigma_{MTx}$	$0,351 \sqrt{t/r} \sigma_{MTx}$	$1,373 \sigma_{MTx}$	$1,000 \sigma_{MTx}$

**C.2.3 Cylindre, encastré : pression intérieure uniforme avec chargement axial**



$$\sigma_{MT\theta} = p_n \frac{r}{t}$$

$$\sigma_{MTx} = \frac{P_x}{t}$$

BC1r

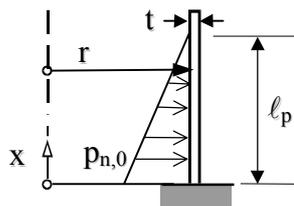
$$\text{Maximum } \sigma_{eq,m} = \sigma_{MT\theta} \sqrt{1 - \left( \frac{\sigma_{MTx}}{\sigma_{MT\theta}} \right)^2 + \left( \frac{\sigma_{MTx}}{\sigma_{MT\theta}} \right)^2}$$

$$\text{Maximum } \sigma_{eq,m} = k \sigma_{MT\theta}$$

$\left( \frac{\sigma_{MTx}}{\sigma_{MT\theta}} \right)$	-2,0	0	0	2,0
	La surface extérieure gouverne		La surface intérieure gouverne	
$k$	4,360	1,614	1,614	2,423

On peut utiliser l'interpolation linéaire entre les valeurs pour lesquelles la même surface gouverne.

### C.2.4 Cylindre, encastré : pression intérieure hydrostatique



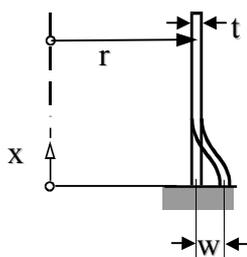
$$\sigma_{MT\theta} = p_{n0} \frac{r}{t}$$

BC1r

$\sigma_{sx}$ maximum	$\sigma_{s\theta}$ maximum	$\tau_{xn}$ maximum	$\sigma_{e\theta,s}$ maximum	$\sigma_{e\theta,m}$ maximum
$k_x \sigma_{MT\theta}$	$k_\theta \sigma_{MT\theta}$	$k_\tau \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,s} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,m} \sigma_{MT\theta}$

$\left(\frac{\sqrt{rt}}{l_p}\right)$	$k_x$	$k_\theta$	$k_\tau$	$k_{eq,s}$	$k_{eq,m}$
0	1,816	1,080	1,169	1,614	1,043
0,2	1,533	0,733	1,076	1,363	0,647

### C.2.5 Cylindre, encastré : déplacement radial vers l'extérieur

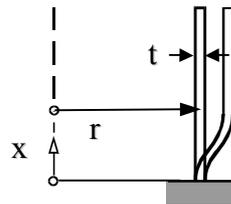


$$\sigma_{MT\theta} = \frac{wE}{r}$$

BC1r

$\sigma_{sx}$ maximum	$\sigma_{s\theta}$ maximum	$\tau_{xn}$ maximum	$\sigma_{eq,s}$ maximum	$\sigma_{eq,m}$ maximum
$1,816 \sigma_{MT\theta}$	$1,545 \sigma_{MT\theta}$	$1,169 \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$2,081 \sigma_{MT\theta}$	$1,000 \sigma_{MT\theta}$

### C.2.6 Cylindre, encastré : élévation uniforme de température



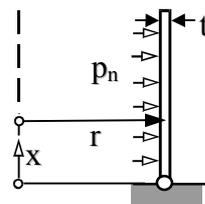
$$\sigma_{MT\theta} = \alpha ET$$

BC1r

$\sigma_{sx}$ maximum	$\sigma_{s\theta}$ maximum	$\tau_{xn}$ maximum	$\sigma_{eq,s}$ maximum	$\sigma_{eq,m}$ maximum
$1,816 \sigma_{MT\theta}$	$1,545 \sigma_{MT\theta}$	$1,169 \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$2,081 \sigma_{MT\theta}$	$1,000 \sigma_{MT\theta}$

## C.3 Coques cylindriques non raidies à base articulée

### C.3.1 Cylindre, articulé : pression intérieure uniforme

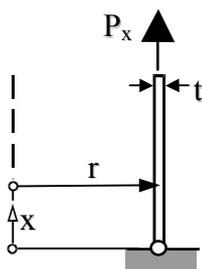


$$\sigma_{MT\theta} = p_n \frac{r}{t}$$

BC1f

$\sigma_{sx}$ maximum	$\sigma_{s\theta}$ maximum	$\tau_{xn}$ maximum	$\sigma_{eq,s}$ maximum	$\sigma_{eq,m}$ maximum
$\pm 0,585 \sigma_{MT\theta}$	$+ 1,125 \sigma_{MT\theta}$	$0,583 \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$1,126 \sigma_{MT\theta}$	$1,067 \sigma_{MT\theta}$

### C.3.2 Cylindre, articulé : chargement axial

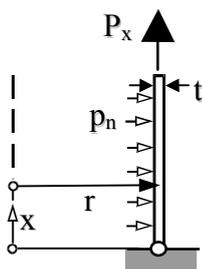


$$\sigma_{MTx} = \frac{P_x}{t}$$

BC1f

$\sigma_{sx}$ maximum	$\sigma_{s\theta}$ maximum	$\tau_{xn}$ maximum	$\sigma_{eq,s}$ maximum	$\sigma_{eq,m}$ maximum
+ 1,176 $\sigma_{MTx}$	+ 0,300 $\sigma_{MTx}$	0,175 $\sqrt{t/r}$ $\sigma_{MTx}$	1,118 $\sigma_{MTx}$	1,010 $\sigma_{MTx}$

### C.3.3 Cylindre, articulé : pression intérieure uniforme avec chargement axial



$$\sigma_{MT\theta} = p_n \frac{r}{t}$$

$$\sigma_{MTx} = \frac{P_x}{t}$$

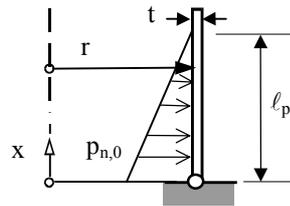
BC1f

$$\text{Maximum } \sigma_{eq,m} = \sigma_{MT\theta} \sqrt{1 - \left( \frac{\sigma_{MTx}}{\sigma_{MT\theta}} + \left( \frac{\sigma_{MTx}}{\sigma_{MT\theta}} \right)^2 \right)}$$

$$\text{Maximum } \sigma_{eq,s} = k \sigma_{MT\theta}$$

$\left( \frac{\sigma_{MTx}}{\sigma_{MT\theta}} \right)$	- 2,0	- 1,0	- 0,5	0,0	0,25	0,50	1,00	2,0
k	3,146	3,075	1,568	1,126	0,971	0,991	1,240	1,943

### C.3.4 Cylindre, articulé : pression intérieure hydrostatique



$$\sigma_{MT\theta} = p_{n0} \frac{r}{t}$$

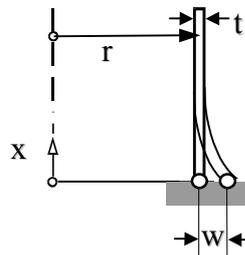
BC1f

$\sigma_{sx}$ maximum	$\sigma_{s\theta}$ maximum	$\tau_{xn}$ maximum	$\sigma_{eq,s}$ maximum	$\sigma_{eq,m}$ maximum
$k_x \sigma_{MT\theta}$	$k_\theta \sigma_{MT\theta}$	$k_\tau \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,s} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,m} \sigma_{MT\theta}$

$\left(\frac{\sqrt{rt}}{l_p}\right)$	$k_x$	$k_\theta$	$k_\tau$	$k_{eq,s}$	$k_{eq,m}$
0	0,585	1,125	0,583	1,126	1,067
0,2	0,585	0,873	0,583	0,919	0,759

On peut utiliser une interpolation linéaire en  $\left(\frac{\sqrt{rt}}{l_p}\right)$  pour des valeurs de  $l_p$  différentes.

### C.3.5 Cylindre, articulé : déplacement radial vers l'extérieur

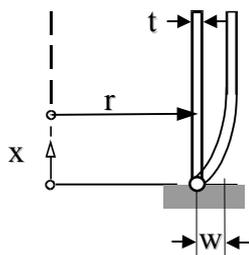


$$\sigma_{MT\theta} = \frac{wE}{r}$$

BC1f

$\sigma_{sx}$ maximum	$\sigma_{s\theta}$ maximum	$\tau_{xn}$ maximum	$\sigma_{eq,s}$ maximum	$\sigma_{eq,m}$ maximum
$\pm 0,585 \sigma_{MT\theta}$	$1,000 \sigma_{MT\theta}$	$0,583 \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$1,000 \sigma_{MT\theta}$	$1,000 \sigma_{MT\theta}$

### C.3.6 Cylindre, articulé : élévation de température uniforme



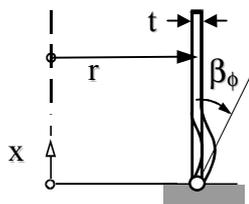
$$\sigma_{MT\theta} = \alpha ET$$

$$w = \alpha r T$$

BC1f

$\sigma_{sx}$ maximum	$\sigma_{s\theta}$ maximum	$\tau_{xn}$ maximum	$\sigma_{eq,s}$ maximum	$\sigma_{eq,m}$ maximum
$\pm 0,585 \sigma_{MT\theta}$	$1,000 \sigma_{MT\theta}$	$0,583 \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$1,000 \sigma_{MT\theta}$	$1,000 \sigma_{MT\theta}$

### C.3.7 Cylindre, articulé : rotation de la base



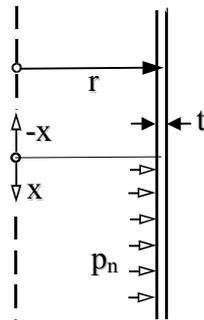
$$\sigma_{MT\theta} = E \sqrt{\frac{t}{r}} \beta_\phi$$

BC1f

$\sigma_{sx}$ maximum	$\sigma_{s\theta}$ maximum	$\tau_{xn}$ maximum	$\sigma_{eq,s}$ maximum	$\sigma_{eq,m}$ maximum
$\pm 1,413 \sigma_{MT\theta}$	$0,470 \sigma_{MT\theta}$	$0,454 \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$1,255 \sigma_{MT\theta}$	$0,251 \sigma_{MT\theta}$

## C.4 Conditions intérieures dans les coques cylindriques non raidies

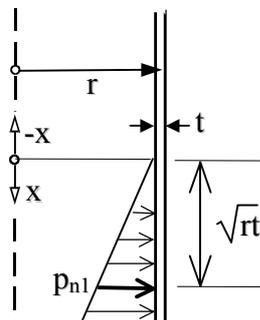
### C.4.1 Cylindre : variation de la pression intérieure par paliers



$$\sigma_{MT\theta} = p_n \frac{r}{t}$$

$\sigma_{sx}$ maximum	$\sigma_{s\theta}$ maximum	$\tau_{xn}$ maximum	$\sigma_{eq,s}$ maximum	$\sigma_{eq,m}$ maximum
$\pm 0,293 \sigma_{MT\theta}$	$1,062 \sigma_{MT\theta}$	$0,467 \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$1,056 \sigma_{MT\theta}$	$1,033 \sigma_{MT\theta}$

### C.4.2 Cylindre : cessation de la pression intérieure hydrostatique



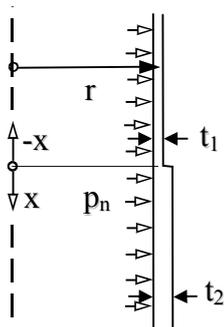
$$\sigma_{MT\theta} = p_{n1} \frac{r}{t}$$

$p_{n1}$  représente la pression à une profondeur de  $\sqrt{rt}$  sous la surface

$\sigma_{sx}$ maximum	$\sigma_{s\theta}$ maximum	$\tau_{xn}$ maximum	$\sigma_{eq,s}$ maximum	$\sigma_{eq,m}$ maximum
$k_x \sigma_{MT\theta}$	$k_\theta \sigma_{MT\theta}$	$k_\tau \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,s} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,m} \sigma_{MT\theta}$

$k_x$	$k_\theta$	$k_\tau$	$k_{eq,s}$	$k_{eq,m}$
- 1,060	0,510	0,160	1,005	0,275

**C.4.3 Cylindre : variation de l'épaisseur par paliers**



$$\sigma_{MT\theta} = p_n \frac{r}{t_1}$$

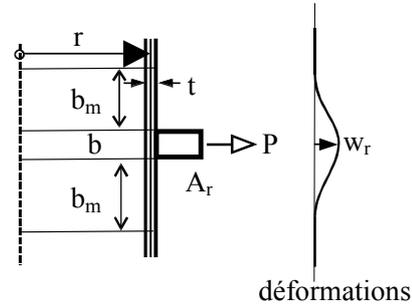
$\sigma_{sx}$ maximum	$\sigma_{s\theta}$ maximum	$\tau_{xn}$ maximum	$\sigma_{eq,s}$ maximum	$\sigma_{eq,m}$ maximum
$k_x \sigma_{MT\theta}$	$k_\theta \sigma_{MT\theta}$	$k_\tau \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,s} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,m} \sigma_{MT\theta}$

$\left(\frac{t_1}{t_2}\right)$	$k_x$	$k_\theta$	$k_\tau$	$k_{eq,s}$	$k_{eq,m}$
1,0	0,0	1,0	0,0	1,0	1,0
0,8	0,0256	1,010	0,179	1,009	0,895
0,667	0,0862	1,019	0,349	1,015	0,815
0,571	0,168	1,023	0,514	1,019	0,750
0,5	0,260	1,027	0,673	1,023	0,694

## C.5 Raidisseur annulaire sur coque cylindrique

### C.5.1 Cylindre à raidisseur annulaire : force radiale exercée sur le raidisseur

Il convient de déterminer les contraintes exercées dans la coque au moyen de la valeur de  $w$  calculée ci-après, introduite dans les expressions données en C.2.5.

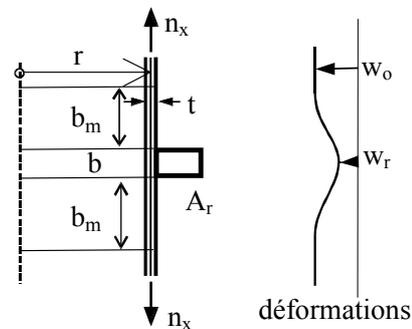


$$w = w_r \quad \left(\frac{wE}{r}\right) = \frac{Pr}{A_r + (b + 2b_m)t}$$

$$b_m = 0,778 \sqrt{rt} \quad \sigma_{\theta r} = \frac{Pr}{A_r + (b + 2b_m)t}$$

### C.5.2 Cylindre à raidisseur annulaire : charges axiales

Il convient de déterminer les contraintes exercées dans la coque au moyen de la valeur de  $w$  calculée ci-après, introduite dans les expressions données en C.2.5 et C.2.2.



$$\sigma_{MTx} = \frac{n_x}{t} \quad w_r = w_o \frac{(b + 2b_m)t}{A_r + (b + 2b_m)t}$$

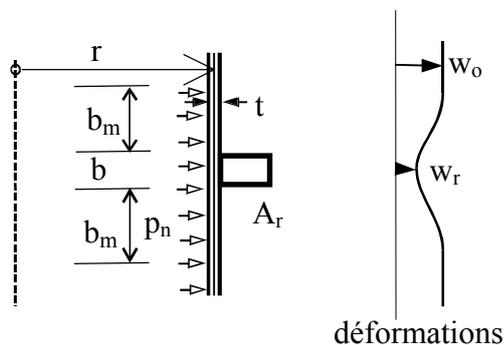
$$w = w_r - w_o \quad w = -w_o \frac{A_r}{A_r + (b + 2b_m)t}$$

$$w_o = -\nu \sigma_{MTx} \frac{r}{E} \quad \sigma_{\theta r} = E \frac{w_r}{r}$$

$$b_m = 0,778 \sqrt{rt}$$

### C.5.3 Cylindre à raidisseur annulaire : pression intérieure uniforme

Il convient de déterminer les contraintes exercées dans la coque au moyen de la valeur de  $w$  calculée ci-après, introduite dans les expressions données en C.2.5 et C.2.1.



$$\sigma_{MT\theta} = \frac{p_n r}{t} \quad w_r = w_o (1 - \kappa)$$

$$w = w_r - w_o \quad w = -w_o \kappa$$

$$w_o = \sigma_{MT\theta} \frac{r}{E} \quad \kappa = \frac{A_r}{A_r + (b + 2b_m)t}$$

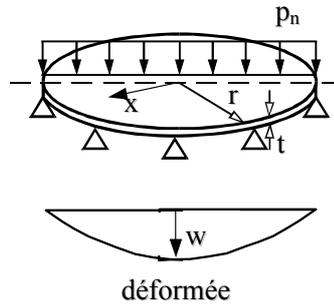
$$b_m = 0,778 \sqrt{rt} \quad \sigma_{\theta r} = E \frac{w_r}{r}$$

$\sigma_{sx}$ maximum	$\sigma_{s\theta}$ maximum	$\tau_{xn}$ maximum	$\sigma_{eq,s}$ maximum	$\sigma_{eq,m}$ maximum
$k_x \sigma_{MT\theta}$	$k_\theta \sigma_{MT\theta}$	$k_\tau \sqrt{t/r} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,s} \sigma_{MT\theta}$	$k_{eq,m} \sigma_{MT\theta}$

$\kappa$	$k_x$	$k_\theta$	$k_\tau$	$k_{eq,s}$	$k_{eq,m}$
1,0	1,816	1,080	1,169	1,614	1,043
0,75	1,312	1,060	0,877	1,290	1,032
0,50	0,908	1,040	0,585	1,014	1,021
0,0	0,0	1,000	0,0	1,000	1,000

## C.6 Plaques circulaires avec conditions aux limites axisymétriques

### C.6.1 Plaque sur appui simple : charge uniforme



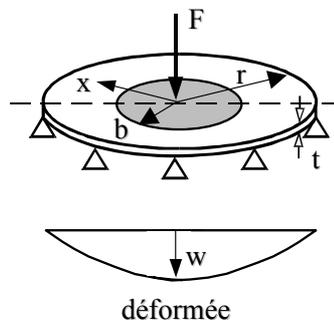
$$w = 0,696 \frac{p_n r^4}{Et^3}$$

$$\max \cdot \sigma_{xb} = 1,238 p_n \left(\frac{r}{t}\right)^2$$

$$\max \cdot \sigma_{\theta b} = 1,238 p_n \left(\frac{r}{t}\right)^2$$

$$p_{n,y} = 0,808 \left(\frac{t}{r}\right)^2 f_y$$

### C.6.2 Plaque avec charge localement répartie : sur appui simple



Pression uniforme  $p_n$  exercée sur zone circulaire de rayon  $b$

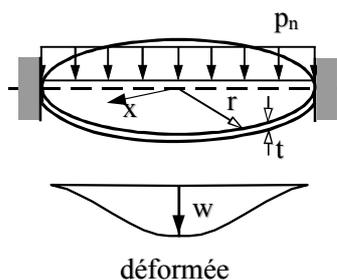
$$F = p_n \pi b^2 \quad b < 0,2 r$$

$$w = 0,606 \frac{F r^2}{Et^3}$$

$$\max \cdot \sigma_{xb} = \max \cdot \sigma_{\theta b} = 0,621 \frac{F}{t^2} \left( \ln \frac{b}{r} + 0,769 \right)$$

$$F_y = 1,611 \frac{t^2}{\left( \ln \frac{b}{r} + 0,769 \right)} f_y$$

### C.6.3 Plaque encastrée : charge uniforme



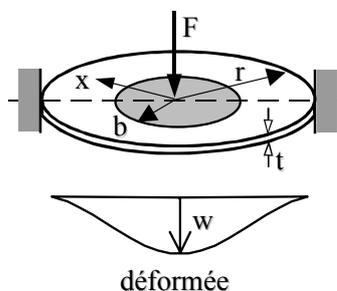
$$w = 0,171 \frac{p_n r^4}{Et^3}$$

$$\sigma_o = p_n \left(\frac{r}{t}\right)^2$$

$$p_{n,y} = 1,50 \left(\frac{t}{r}\right)^2 f_y \text{ (en rive)}$$

$\sigma_{bx}$ maximum au centre	$\sigma_{b\theta}$ maximum au centre	$\sigma_{eq}$ maximum au centre	$\sigma_{bx}$ maximum au bord	$\sigma_{b\theta}$ maximum au bord	$\sigma_{eq}$ maximum au bord
$0,488 \sigma_o$	$0,488 \sigma_o$	$0,488 \sigma_o$	$0,75 \sigma_o$	$0,225 \sigma_o$	$0,667 \sigma_o$

### C.6.4 Plaque encastrée : charge localement répartie



Pression uniforme  $p_n$  exercée sur zone circulaire de rayon  $b$

$$F = p_n \pi b^2 \quad b < 0,2 r$$

$$w = 0,217 \frac{F r^2}{Et^3}$$

$$\sigma_o = \frac{F}{t^2} \quad F_y = 1,611 \frac{t^2}{\left(\ln \frac{b}{r}\right)} f_y \text{ (au centre)}$$

$\sigma_{bx}$ maximum au centre	$\sigma_{b\theta}$ maximum au centre	$\sigma_{eq}$ maximum au centre	$\sigma_{bx}$ maximum au bord	$\sigma_{b\theta}$ maximum au bord	$\sigma_{eq}$ maximum au bord
$0,621 \left(\ln \frac{b}{r}\right) \sigma_o$	$0,621 \left(\ln \frac{b}{r}\right) \sigma_o$	$0,621 \left(\ln \frac{b}{r}\right) \sigma_o$	$0,477 \sigma_o$	$0,143 \sigma_o$	$0,424 \sigma_o$

**Annexe D**  
(normative)

**Expressions pour le calcul du voilement**

**D.1 Coques cylindriques non raidies à épaisseur de paroi constante**

**D.1.1 Notation et conditions aux limites**

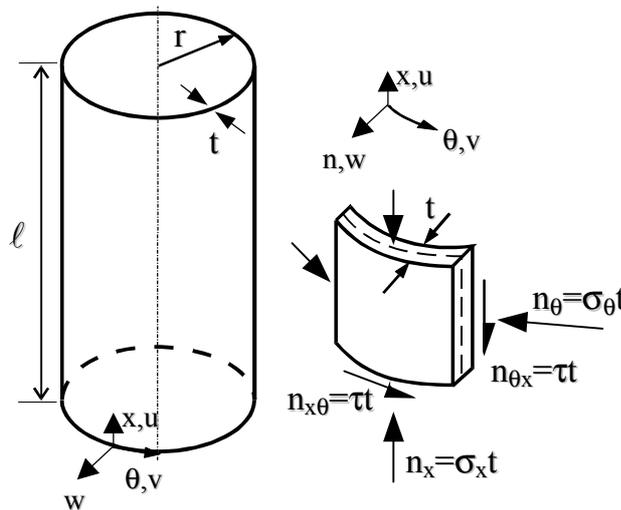
(1) Quantités géométriques

$\ell$  longueur de cylindre entre limites définies

$r$  rayon de surface médiane de cylindre

$t$  épaisseur de coque

$\Delta w_k$  amplitude d'imperfection caractéristique



**Figure D.1 : Géométrie de cylindre, contraintes et sollicitations de membrane**

(2) Les conditions aux limites sont fixées en 2.3, 5.2.2 et 8.3.

**D.1.2 Compression méridienne (axiale)**

**D.1.2.1 Contraintes critiques de voilement méridiennes**

(1) Les expressions suivantes ne peuvent être utilisées que pour les coques possédant les conditions aux limites BC1 ou BC2 au niveau des deux bords.

(2) La longueur du segment de coque est caractérisée en fonction du paramètre adimensionnel de longueur  $\omega$  :

$$\omega = \frac{\ell}{r} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{\ell}{\sqrt{rt}} \quad \dots (D.1)$$

(3) Il convient de calculer la contrainte critique de voilement méridienne, utilisant une valeur de  $C_x$  tirée de (4), (5) ou (6), au moyen de l'expression suivante :

$$\sigma_{xRC} = 0,605 EC_x \frac{t}{r} \quad \dots (D.2)$$

(4) Pour les cylindres de longueur moyenne avec :

$$1,7 \leq \omega \leq < 0,5 \frac{r}{t} \quad \dots \text{(D.3)}$$

il convient de prendre le facteur  $C_x$  de la façon suivante :

$$C_x = 1,0 \quad \dots \text{(D.4)}$$

(5) Pour les cylindres courts avec :

$$\omega \leq 1,7 \quad \dots \text{(D.5)}$$

le facteur  $C_x$  peut être pris de la façon suivante :

$$C_x = 1,36 - \frac{1,83}{\omega} + \frac{2,07}{\omega^2} \quad \dots \text{(D.6)}$$

(6) Pour les cylindres longs avec :

$$\omega > 0,5 \frac{r}{t} \quad \dots \text{(D.7)}$$

il convient de calculer le facteur  $C_x$  au moyen de l'expression suivante :

$$C_x = 1 + \frac{0,2}{C_{xb}} \left[ 1 - 2\omega \frac{t}{r} \right] \quad \text{mais} \quad C_x \geq 0,6 \quad \dots \text{(D.8)}$$

où  $C_{xb}$  est un paramètre dépendant des conditions aux limites tiré du Tableau D.1.

**Tableau D.1 : Paramètre  $C_{xb}$  pour l'effet des conditions aux limites sur la contrainte de voilement méridienne critique dans les cylindres longs**

Cas	Extrémité de cylindre	Conditions aux limites	$C_{xb}$
1	extrémité 1	BC 1	6
	extrémité 2	BC 1	
2	extrémité 1	BC 1	3
	extrémité 2	BC 2	
3	extrémité 1	BC 2	1
	extrémité 2	BC 2	

#### D.1.2.2 Paramètres de voilement méridien

(1) Il convient de calculer le facteur d'imperfection élastique méridienne au moyen de l'expression :

$$a_x = \frac{0,62}{1 + 1,91 \left( \Delta w_k / t \right)^{1,44}} \quad \dots \text{(D.9)}$$

où  $\Delta w_k$  représente l'amplitude d'imperfection caractéristique :

$$\Delta w_k = \frac{1}{Q} \sqrt{\frac{r}{t}} t \quad \dots \text{(D.10)}$$

où Q représente le paramètre de qualité de fabrication pour la compression méridienne.

(2) Il convient de prendre le paramètre de qualité de fabrication  $Q$  dans le Tableau D.2 pour la classe de qualité de tolérances de fabrication spécifiée.

**Tableau D.2 : Valeurs du paramètre de qualité de fabrication  $Q$**

Classe de qualité de tolérances de fabrication	Description	$Q$
Classe A	Excellente	40
Classe B	Élevée	25
Classe C	Normale	16

(3) Il convient de prendre l'élanement limite d'affaissement méridien  $\bar{\lambda}_{x0}$ , le facteur de domaine plastique  $\beta$  et l'exposant d'interaction  $\eta$  égaux aux valeurs suivantes :

$$\bar{\lambda}_{x0} = 0,20 \quad \beta = 0,60 \quad \eta = 1,0 \quad \dots \text{(D.11)}$$

(4) Il n'est pas nécessaire de vérifier le voilement de coque méridien des cylindres s'ils satisfont la condition suivante :

$$\frac{r}{t} \leq 0,004 \frac{E}{f_{y,k}} \quad \dots \text{(D.12)}$$

### D.1.3 Compression circonférentielle (de frettage)

#### D.1.3.1 Contraintes critiques de voilement circonférentiel

(1) Les expressions suivantes peuvent être appliquées aux coques possédant des conditions aux limites quelconques.

(2) Il convient de caractériser la longueur du segment de coque en fonction du paramètre de longueur dimensionnel  $\omega$  :

$$\omega = \frac{\ell}{r} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{\ell}{\sqrt{rt}} \quad \dots \text{(D.1bis)}$$

(3) Pour les cylindres de longueur moyenne avec :

$$20 \leq \frac{\omega}{C_\theta} \leq 1,63 \frac{r}{t} \quad \dots \text{(D.13)}$$

il convient de calculer la contrainte critique de voilement circonférentiel au moyen de l'expression suivante :

$$\sigma_{\theta Rc} = 0,92 E \frac{C_\theta t}{\omega r} \quad \dots \text{(D.14)}$$

(4) Il convient de prendre le facteur  $C_\theta$  dans le Tableau D.3, avec une valeur dépendant des conditions aux limites (voir 5.2.2 et 8.3).

(5) Pour les cylindres courts avec :

$$\frac{\omega}{C_\theta} < 20 \quad \dots \text{(D.15)}$$

il convient de calculer la contrainte critique de voilement circonférentiel au moyen de l'expression suivante :

$$\sigma_{\theta Rc} = 0,92 E \frac{C_{\theta s} t}{\omega r} \quad \dots \text{(D.16)}$$

(6) Il convient de prendre le facteur  $C_{\theta s}$  dans le Tableau D.4 avec une valeur dépendant des conditions aux limites (voir 5.2.2 et 8.3) :

**Tableau D.3 : Facteurs de voilement sous pression extérieure pour les cylindres de longueur moyenne  $C_{\theta}$**

Cas	Extrémité de cylindre	Conditions aux limites	Valeur de $C_{\theta}$
1	extrémité 1 extrémité 2	BC 1 BC 1	1,5
2	extrémité 1 extrémité 2	BC 1 BC 2	1,25
3	extrémité 1 extrémité 2	BC 2 BC 2	1,0
4	extrémité 1 extrémité 2	BC 1 BC 3	0,6
5	extrémité 1 extrémité 2	BC 2 BC 3	0
6	extrémité 1 extrémité 2	BC 3 BC 3	0

**Tableau D.4 : Facteurs de voilement sous pression extérieure pour les cylindres courts  $C_{\theta s}$**

Cas	Extrémité de cylindre	Conditions aux limites	$C_{\theta s}$
1	extrémité 1 extrémité 2	BC 1 BC 1	$1,5 + \frac{10}{\omega^2} - \frac{5}{\omega^3}$
2	extrémité 1 extrémité 2	BC 1 BC 2	$1,25 + \frac{8}{\omega^2} - \frac{4}{\omega^3}$
3	extrémité 1 extrémité 2	BC 2 BC 2	$1,0 + \frac{3}{\omega^{1,35}}$
4	extrémité 1 extrémité 2	BC 1 BC 3	$0,6 + \frac{1}{\omega^2} - \frac{0,3}{\omega^3}$
où $\omega = \frac{l}{\sqrt{rt}}$ .			

(7) Pour les cylindres longs avec :

$$\frac{\omega}{C_{\theta}} > 1,63 \frac{r}{t} \quad \dots \text{(D.17)}$$

il convient de calculer la contrainte critique de voilement circonférentiel au moyen de l'expression :

$$\omega_{\theta Rc} = E \left( \frac{t}{r} \right)^2 \left[ 0,275 + 2,03 \left( \frac{C_{\theta}}{\omega} \frac{r}{t} \right)^4 \right] \quad \dots \text{(D.18)}$$

**D.1.3.2 Paramètres de voilement circonférentiel**

(1) Il convient de prendre le facteur d'imperfection élastique circonférentielle dans le Tableau D.5 pour la classe de qualité de tolérances de fabrication spécifiée.

**Tableau D.5 : Valeurs de  $\alpha_\theta$  en fonction de la qualité de fabrication**

Classe de qualité de tolérances de fabrication	Description	$\alpha_\theta$
Classe A	Excellente	0,75
Classe B	Élevée	0,65
Classe C	Normale	0,50

(2) Il convient de prendre l'élancement limite d'affaissement tangentiel  $\bar{\lambda}_{\theta 0}$ , le facteur de domaine plastique  $\beta$  et l'exposant d'interaction  $\eta$  égaux aux valeurs suivantes :

$$\bar{\lambda}_{\theta 0} = 0,40 \quad \beta = 0,60 \quad \eta = 1,0 \quad \dots \text{(D.19)}$$

(3) Il n'est pas nécessaire de vérifier le voilement de coque circonférentiel des cylindres s'ils satisfont la condition suivante :

$$\frac{r}{t} \leq 0,21 \sqrt{\frac{E}{f_{y,k}}} \quad \dots \text{(D.20)}$$

(4) La répartition non uniforme de pression  $q_w$  résultant des charges de vent extérieures exercées sur les cylindres (voir Figure D.2) peut, pour le calcul au voilement de la coque, être remplacée par une pression extérieure uniforme équivalente :

$$q_{eq} = k_w q_{w,max} \quad \dots \text{(D.21)}$$

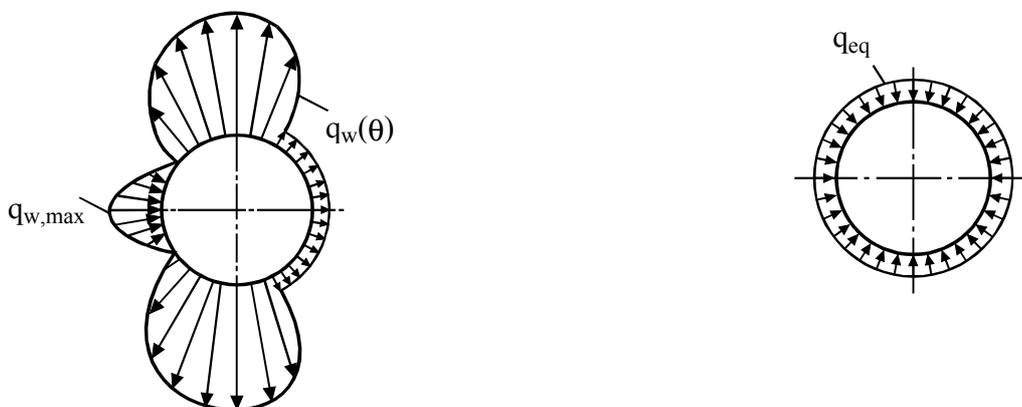
où  $q_{w,max}$  représente la pression de vent maximum, et où il convient de calculer  $k_w$  de la façon suivante :

$$k_w = 0,46 \left( 1 + 0,1 \sqrt{\frac{C_\theta}{\omega} \frac{r}{t}} \right) \quad \dots \text{(D.22)}$$

avec la valeur de  $k_w$  restant dans la plage  $0,65 \leq k_w \leq 1$ , et avec  $C_\theta$  tiré du Tableau D.3 en fonction des conditions aux limites.

(5) La contrainte de calcul circonférentielle à introduire en 8.5 est dérivée de l'expression :

$$\sigma_{\theta Ed} = q_{eq} \frac{r}{t} \quad \dots \text{(D.23)}$$



a) Répartition de la pression du vent autour de la circonférence de la coque

b) Répartition de pression axisymétrique équivalente

**Figure D.2 : Transformation de la répartition des charges de pression extérieure du vent typique**

## D.1.4 Cisaillement

### D.1.4.1 Contraintes critiques de voilement par cisaillement

(1) Il convient d'appliquer les expressions suivantes uniquement aux coques affectées des conditions aux limites BC1 ou BC2 au niveau des deux bords.

(2) Il convient de caractériser la longueur du segment de coque en fonction du paramètre de longueur dimensionnel  $\omega$  :

$$\omega = \frac{\ell}{r} \sqrt{\frac{r}{t}} = \frac{\ell}{\sqrt{rt}} \quad \dots \text{(D.1bis)}$$

(3) Il convient de calculer la contrainte critique de voilement par cisaillement au moyen de l'expression :

$$\tau_{RC} = 0,75 E C_{\tau} \sqrt{\frac{1}{\omega} \frac{t}{r}} \quad \dots \text{(D.24)}$$

(4) Pour les cylindres de longueur moyenne avec :

$$10 \leq \omega \leq 8,7 \frac{r}{t} \quad \dots \text{(D.25)}$$

le facteur  $C_{\tau}$  peut être pris de la façon suivante :

$$C_{\tau} = 1,0 \quad \dots \text{(D.26)}$$

(5) Pour les cylindres courts avec :

$$\omega < 10 \quad \dots \text{(D.27)}$$

le facteur  $C_{\tau}$  peut être calculé de la façon suivante :

$$C_{\tau} = \sqrt{1 + \frac{42}{\omega^3}} \quad \dots \text{(D.28)}$$

(6) Pour les cylindres longs avec :

$$\omega > 8,7 \frac{r}{t} \quad \dots \text{(D.29)}$$

le facteur  $C_{\tau}$  peut être calculé de la façon suivante :

$$C_{\tau} = \frac{1}{3} \sqrt{\omega \frac{t}{r}} \quad \dots \text{(D.30)}$$

### D.1.4.2 Paramètres de voilement par cisaillement

(1) Il convient de prendre le facteur d'imperfection élastique de cisaillement dans le Tableau D.6 pour la classe de qualité de tolérances de fabrication spécifiée.

**Tableau D.6 : Valeurs de  $a_{\tau}$  en fonction de la qualité de fabrication**

Classe de qualité de tolérances de fabrication	Description	$a_{\tau}$
Classe A	Excellente	0,75
Classe B	Élevée	0,65
Classe C	Normale	0,50

(2) Il convient de prendre l'élanement limite d'affaissement par cisaillement  $\bar{\lambda}_{\tau 0}$ , le facteur de domaine plastique  $\beta$  et l'exposant d'interaction  $\eta$  égaux aux valeurs suivantes :

$$\bar{\lambda}_{\tau 0} = 0,40 \quad \beta = 0,60 \quad \eta = 1,0 \quad \dots \text{ (D.31)}$$

(3) Il n'est pas nécessaire de vérifier le voilement par cisaillement des cylindres s'ils satisfont la condition suivante :

$$\frac{r}{t} \leq 0,16 \left[ \frac{E}{f_{y,k}} \right]^{0,67} \quad \dots \text{ (D.32)}$$

## D.1.5 Compression méridienne (axiale) avec pression intérieure coexistante

### D.1.5.1 Contrainte méridienne critique de voilement avec pression

(1) La contrainte méridienne critique de voilement  $\sigma_{xRC}$  peut être considérée comme n'étant pas affectée par la présence d'une pression intérieure, et elle peut être calculée comme spécifié en D.1.2.1.

### D.1.5.2 Paramètres de voilement méridien sous pression

(1) Il convient de vérifier la résistance au voilement méridien sous pression de façon similaire à la résistance au voilement méridien en l'absence de pression comme spécifié en 8.5 et D.1.2.2. Cependant, le facteur d'imperfection élastique en l'absence de pression  $a_x$  peut être remplacé par le facteur d'imperfection élastique sous pression  $a_{xp}$ .

(2) Il convient de prendre le coefficient d'imperfection élastique sous pression  $a_{xp}$  égal à la plus petite des deux valeurs suivantes :

$a_{xpe}$  est le coefficient couvrant la stabilisation élastique induite par la pression ;

$a_{xpp}$  est le coefficient couvrant la déstabilisation plastique induite par la pression.

(3) Il convient de calculer le coefficient  $a_{xpe}$  au moyen des expressions suivantes :

$$a_{xpe} = a_x + \left( 1 - a_x \right) \left[ \frac{\bar{p}}{\bar{p} + 0,3/a_x^{0,5}} \right] \quad \dots \text{ (D.33)}$$

$$\bar{p} = \frac{pr}{t\sigma_{xRC}} \quad \dots \text{ (D.34)}$$

où :

$p$  est la valeur la plus faible de pression intérieure à l'emplacement du point vérifié, et dont la coexistence avec la compression méridienne est certaine,

$a_x$  est le coefficient d'imperfection élastique méridienne en l'absence de pression selon D.1.2.2, et

$\sigma_{xRC}$  est la contrainte méridienne critique de voilement élastique selon D.1.2.1 (3).

(4) Il convient de ne pas appliquer le coefficient  $a_{xpe}$  aux cylindres définis comme longs selon D.1.2.1(6). En outre, il convient de ne pas l'appliquer sauf si :

— le cylindre est de longueur moyenne selon D.1.2.1(4) ;

— le cylindre est court selon D.1.2.1(5) et l'on a adopté  $C_x = 1$  dans D.1.2.1(3).

(5) Il convient de calculer le coefficient  $\alpha_{xpp}$  au moyen des expressions suivantes :

$$\alpha_{xpp} = \left( 1 - \frac{\bar{p}}{\lambda_x^4} \right) \left( 1 - \frac{1}{1,12 + s^{1,5}} \right) \left( \frac{s^2 + 1,21 \bar{\lambda}_x^{-2}}{s(s+1)} \right) \quad \dots \text{(D.35)}$$

$$\bar{p} = \frac{pr}{t\sigma_{xRc}} \quad \dots \text{(D.34bis)}$$

$$s = \frac{1}{400} \frac{r}{t} \quad \dots \text{(D.36)}$$

où :

$p$  est la valeur la plus grande de pression intérieure à l'emplacement du point évalué, et éventuellement coexistante avec la compression méridienne ;

$\bar{\lambda}_x$  est le paramètre d'élanement réduit de coque selon 8.5.2 (5) ;

$\sigma_{xRc}$  est la contrainte méridienne critique de voilement élastique selon D.1.2.1 (3).

## D.2 Coques cylindriques non raidies possédant une épaisseur de paroi variable par paliers

### D.2.1 Généralités

#### D.2.1.1 Notations

Dans cet article, les notations suivantes sont utilisées :

$L$  longueur du cylindre hors-tout

$r$  rayon de la surface médiane du cylindre

$j$  indice entier indiquant les sections de cylindre individuelles d'épaisseur de paroi constante (de  $j = 1$  à  $j = n$ )

$t_j$  épaisseur de paroi constante de la section  $j$  du cylindre

$\ell_j$  longueur de la section  $j$  du cylindre.

#### D.2.1.2 Conditions aux limites

(1) Les expressions suivantes peuvent être utilisées uniquement pour les coques affectées de conditions aux limites BC1 ou BC2 au niveau des deux bords (voir 5.2.2 et 8.3), sans distinctions entre ces deux types de condition.

#### D.2.1.3 Géométrie

(1) À condition que l'épaisseur de paroi du cylindre augmente progressivement par paliers de haut en bas (voir Figure D.4a), les procédures données dans cet article D.2 peuvent être utilisées.

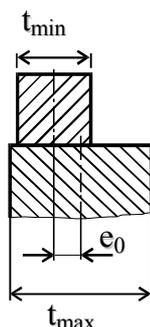


Figure D.3 : Excentrement voulu  $e_0$

### D.2.1.4 Excentrements

- (2) Les excentrements voulus  $e_0$  entre plaques de sections adjacentes (voir Figure D.3) peuvent être considérés comme couverts par les expressions suivantes s'ils ne sont pas supérieurs aux valeurs admissibles  $e_{0,p}$  données dans le Tableau D.7.
- (3) Pour les cylindres présentant des excentrements voulus admissibles entre plaques de sections adjacentes, le rayon  $r$  peut être pris égal à la valeur moyenne de toutes les sections.

**Tableau D.7 : Valeurs d'excentrements voulus admissibles**

Contrainte de membrane concernant le voilement	$e_{0,p}$ admissible
Compression circonférentielle ou cisaillement	$1,1 t_{\min}$
Compression méridienne	$0,5 (t_{\max} - t_{\min})$ ou $0,5 t_{\min}$ en prenant la plus petite de ces deux valeurs
$t_{\max}$ est l'épaisseur de la plaque la plus épaisse au niveau du joint ;	
$t_{\min}$ est l'épaisseur de la plaque la plus mince au niveau du joint.	

### D.2.2 Compression méridienne (axiale)

- (1) Il convient de considérer chaque section de cylindre  $j$  de longueur  $l_j$  comme un cylindre équivalent de longueur hors-tout  $\ell = l_j$  et d'épaisseur de paroi uniforme  $t = t_j$  selon D.1.2.
- (2) Pour les cylindres équivalents longs, selon D.1.2.1(6), il convient de prendre, en sécurité, le paramètre  $C_{xb}$  égal à  $C_{xb} = 1$ , sauf si une meilleure valeur est justifiée par une analyse plus rigoureuse.

### D.2.3 Compression circonférentielle (de frettage)

#### D.2.3.1 Contraintes critiques de voilement circonférentiel

- (1) Si le cylindre est composé de trois sections possédant des épaisseurs de paroi différentes, il convient d'appliquer la procédure de (4) à (7) aux sections réelles a, b et c (voir Figure D.4b).
- (2) Si le cylindre est composé d'une seule section (c'est-à-dire s'il possède une épaisseur de paroi constante), il convient d'appliquer D.1.
- (3) Si le cylindre est composé de deux sections d'épaisseurs de paroi différentes, il convient d'appliquer la procédure de (4) à (7), en considérant deux des trois sections fictives, a et b, comme possédant la même épaisseur.
- (4) Si le cylindre est composé de plus de trois sections d'épaisseurs de parois différentes (voir Figure D.4a), il convient de le remplacer d'abord par un cylindre équivalent comprenant trois sections a, b et c (voir Figure D.4b). Il convient que la longueur de sa section supérieure  $l_a$ , s'étende jusqu'au bord supérieur de la première section qui possède une épaisseur de paroi supérieure à 1,5 fois la plus petite épaisseur de paroi  $t_1$ , mais ne comprenne pas plus de la moitié de la longueur totale  $L$  du cylindre. Il convient de calculer la longueur des deux autres sections  $l_b$  et  $l_c$  de la façon suivante :

$$l_b = l_a \text{ et } l_c = L - 2l_a, \quad \text{si } l_a \leq L/3 \quad \dots \text{ (D.37a)}$$

$$l_b = l_c = 0,5 (L - l_a), \quad \text{si } L/3 < l_a \leq L/2 \quad \dots \text{ (D.37b)}$$

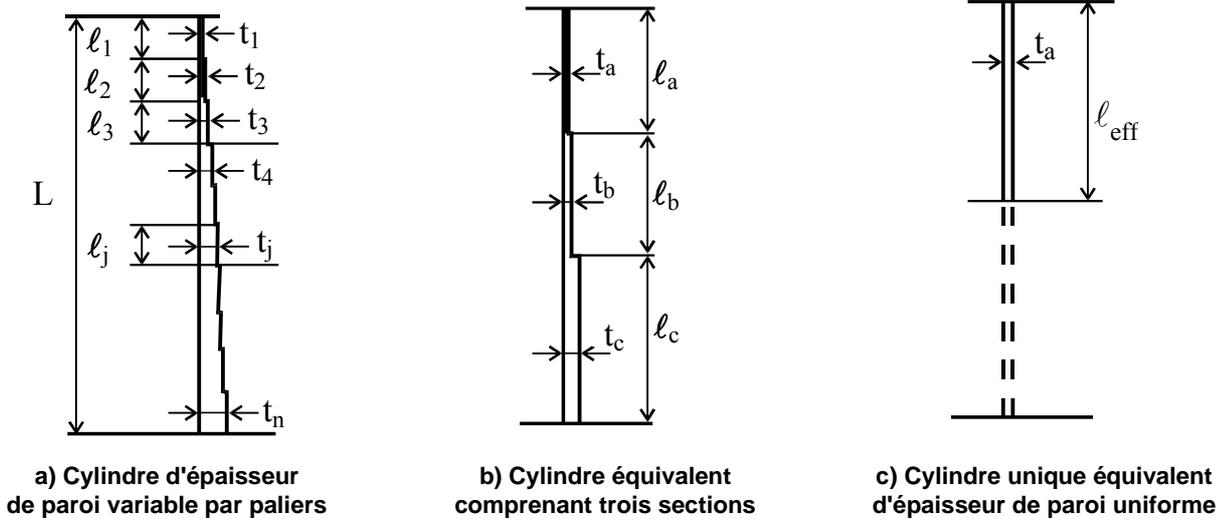


Figure D.4 : Transformation d'un cylindre à épaisseur échelonnée en cylindre équivalent

(5) Il convient de déterminer les épaisseurs de paroi fictives  $t_a$ ,  $t_b$  et  $t_c$  des trois sections comme la moyenne pondérée de l'épaisseur de paroi sur chacune des trois sections fictives :

$$t_a = \frac{1}{\ell_a} \sum_a \ell_j t_j \quad \dots \text{(D.38a)}$$

$$t_b = \frac{1}{\ell_b} \sum_b \ell_j t_j \quad \dots \text{(D.38b)}$$

$$t_c = \frac{1}{\ell_c} \sum_c \ell_j t_j \quad \dots \text{(D.38c)}$$

(6) Il convient de remplacer le cylindre à trois sections (c'est-à-dire le cylindre équivalent ou le cylindre réel respectivement) par un cylindre unique équivalent de longueur efficace  $\ell_{\text{eff}}$  et d'épaisseur de paroi uniforme  $t = t_a$  (voir Figure D.4c). Il convient de déterminer la longueur efficace au moyen de l'expression :

$$\ell_{\text{eff}} = \ell_a / \kappa, \quad \dots \text{(D.39)}$$

où  $\kappa$  représente un facteur adimensionnel tiré de la Figure D.5.

(7) Pour les sections de cylindre de longueur faible ou moyenne, il convient de calculer la contrainte méridienne critique de voilement de chaque section de cylindre  $j$  du cylindre original possédant une épaisseur de paroi variable par paliers, au moyen de l'expression suivante :

$$\sigma_{\theta\text{Rc},j} = \frac{t_a}{t_j} \sigma_{\theta\text{Rc},\text{eff}} \quad \dots \text{(D.40)}$$

où  $\sigma_{\theta\text{Rc},\text{eff}}$  représente la contrainte de voilement méridien critique calculée suivant D.1.3.1 (3), D.1.3.1 (5) ou D.1.3.1 (7), selon le cas, du cylindre unique équivalent de longueur  $\ell_{\text{eff}}$  selon (6). Il convient de donner au facteur  $C_\theta$  de ces expressions la valeur  $C_\theta = 1,0$ .

(8) La longueur du segment de coque est caractérisée en fonction du paramètre adimensionnel de longueur  $\omega_j$  :

$$\omega_j = \frac{\ell_j}{r} \sqrt{\frac{r}{t_j}} = \frac{\ell_j}{\sqrt{r t_j}} \quad \dots \text{(D.1bis)}$$

(9) Lorsque la section de cylindre  $j$  est longue, il convient d'effectuer une seconde évaluation de la contrainte de voilement. Il convient d'utiliser la plus petite des deux valeurs calculées suivant (7) et (10) pour la vérification du calcul au voilement de la section de cylindre  $j$ .

(10) Il convient de considérer la section de cylindre  $j$  comme longue si :

$$\omega_j > 1,63 \frac{r}{t_j} \quad \dots (D.41)$$

auquel cas il convient de déterminer la contrainte circonférentielle critique de voilement au moyen de l'expression :

$$\sigma_{\theta R c, j} = E \left( \frac{t_j}{r} \right)^2 \left[ 0,275 + 2,03 \left( \frac{1}{\omega_j} \frac{r}{t_j} \right)^4 \right] \quad \dots (D.42)$$

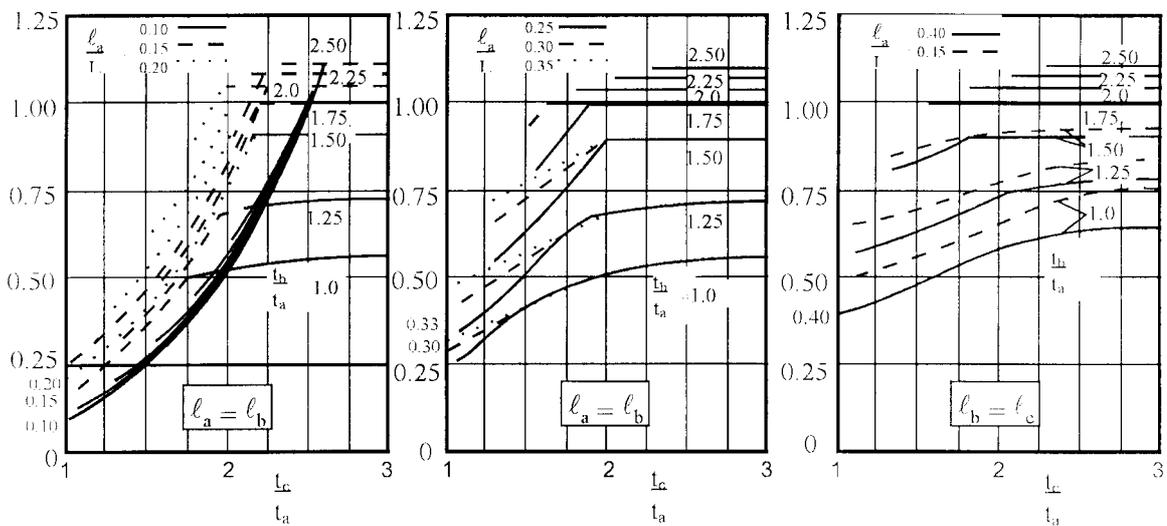


Figure D.5 : Coefficient  $\kappa$  pour la détermination de la longueur efficace  $l_{eff}$

### D.2.3.2 Vérification de la résistance au voilement pour la compression circonférentielle

(1) Pour chaque section de cylindre  $j$ , il convient que la condition de 8.5 soit satisfaite, et il convient d'effectuer la vérification suivante :

$$\sigma_{\theta Ed, j} \leq \sigma_{\theta Rd, j} \quad \dots (D.43)$$

où :

$\sigma_{\theta Ed, j}$  est la valeur-clé de la contrainte de membrane en compression circonférentielle, comme indiqué dans les articles ci-après ;

$\sigma_{\theta Rd, j}$  est la contrainte circonférentielle de calcul de voilement, comme calculée à partir de la contrainte circonférentielle critique de voilement conformément à D.1.3.1.

(2) Sous réserve que la valeur de calcul de la sollicitation circonférentielle  $n_{\theta Sd}$  soit constante sur toute la longueur  $L$ , il convient de prendre la valeur-clé de la contrainte de membrane en compression circonférentielle exercée dans la section  $j$  égale à la valeur simple suivante :

$$\sigma_{\theta Ed, j} = n_{\theta Sd} / t_j \quad \dots (D.44)$$

(3) Si la valeur de calcul de la sollicitation circonférentielle  $n_{\theta Sd}$  varie sur la longueur  $L$ , il convient de prendre la valeur-clé de la contrainte de membrane en compression circonférentielle égale à une valeur fictive  $\sigma_{\theta Ed,j,mod}$  déterminée à partir de la valeur maximum de la sollicitation circonférentielle  $n_{\theta Sd}$  en un point quelconque de la longueur  $L$  divisée par l'épaisseur locale  $t_j$  (voir Figure D.6), déterminée par :

$$\sigma_{\theta Ed,j,mod} = \max (n_{\theta Sd}) / t_j \quad \dots (D.45)$$

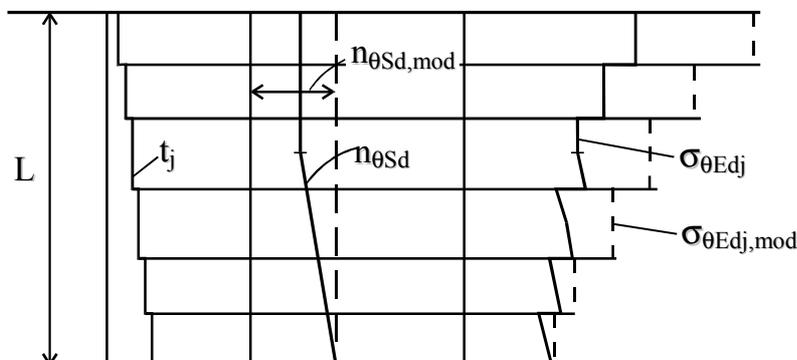


Figure D.6 : Valeurs-clés de la contrainte de membrane en compression circonférentielle dans les cas où  $n_{\theta Sd}$  varie sur la longueur  $L$

### D.3 Coques coniques non raidies

#### D.3.1 Généralités

##### D.3.1.1 Notation

Dans cet article, les notations suivantes sont utilisées :

- $h$  longueur axiale (hauteur) du tronc de cône ;
- $L$  longueur méridienne du tronc de cône ;
- $r$  rayon de la surface moyenne du cône, perpendiculairement à l'axe longitudinal, variant linéairement sur la longueur ;
- $r_1$  rayon à la plus petite extrémité du cône ;
- $r_2$  rayon à la plus grande extrémité du cône ;
- $\beta$  demi-angle au sommet du cône.

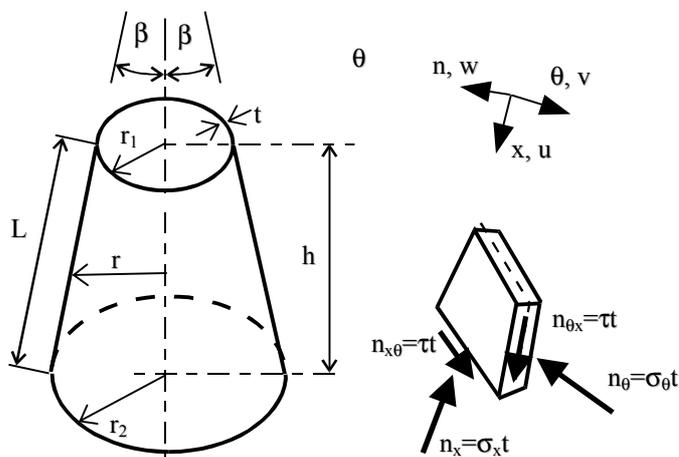


Figure D.7 : Géométrie du cône, sollicitations et contraintes de membrane

### D.3.1.2 Conditions aux limites

(1) Il convient d'utiliser les expressions suivantes uniquement pour les coques affectées des conditions aux limites BC1 ou BC2 au niveau des deux extrémités (voir 5.2.2 et 8.3), sans distinctions entre ces deux types de condition. Il convient de ne pas les utiliser pour une coque où une des condition aux limites est BC3.

(2) Il convient d'utiliser les règles données dans cet article D.3.1 uniquement pour les deux conditions aux limites en déplacement radial suivantes, à l'une quelconque des extrémités du cône :

«condition de cylindre»  $w = 0$  ;

«condition de ceinture»  $u \sin \beta + w \cos \beta = 0$ .

### D.3.1.3 Géométrie

(1) Seuls les troncs de cône possédant une épaisseur de paroi uniforme et un angle au sommet  $\beta \leq 65^\circ$  (voir Figure D.7) sont couverts par les règles ci-après.

## D.3.2 Contraintes de voilement de calcul

### D.3.2.1 Cylindre équivalent

(1) Les contraintes de calcul au voilement qui sont nécessaires à la vérification de la résistance au voilement selon 8.5 peuvent être calculées à partir d'un cylindre équivalent de longueur  $\ell_e$  et de rayon  $r_e$  où  $\ell_e$  et  $r_e$  selon le type de contrainte.

### D.3.2.2 Compression méridienne

(1) Pour les cônes soumis à une compression méridienne, il convient de prendre la longueur de cylindre équivalent égale à :

$$\ell_e = L \quad \dots \text{(D.46)}$$

(2) Il convient de prendre le rayon de cylindre équivalent égal à :

$$r_e = \frac{r}{\cos \beta} \quad \dots \text{(D.47)}$$

### D.3.2.3 Compression circonférentielle (de frettage)

(1) Pour les cônes soumis à une compression circonférentielle, il convient de prendre la longueur de cylindre équivalent égale à :

$$\ell_e = L \quad \dots \text{(D.48)}$$

(2) Il convient de prendre le rayon de cylindre équivalent égal à :

$$r_e = \frac{(r_1 + r_2)}{2 \cos \beta} \quad \dots \text{(D.49)}$$

### D.3.2.4 Cisaillement

(1) Pour les cônes soumis à un cisaillement, il convient de prendre la longueur de cylindre équivalent égale à :

$$\ell_e = h \quad \dots \text{(D.50)}$$

(2) Il convient de prendre le rayon de cylindre équivalent égal à :

$$r_e = \left[ 1 + \rho - \frac{1}{\rho} \right] r_1 \cos \beta \quad \dots \text{(D.51)}$$

où :

$$\rho = \sqrt{\frac{r_1 + r_2}{2r_1}} \quad \dots \text{(D.52)}$$

### D.3.3 Vérification de la résistance au voilement

#### D.3.3.1 Compression méridienne

(1) Il convient d'effectuer la vérification du calcul au voilement au point du cône où la combinaison de la contrainte méridienne de calcul et de la contrainte de voilement de calcul agissantes, selon D.3.2.2, est la plus critique.

(2) Dans le cas de compression méridienne provoqué par une force axiale constante exercée sur un tronc de cône, il convient de considérer tant le petit rayon  $r_1$  que le grand rayon  $r_2$  comme donnant éventuellement l'emplacement de la position la plus critique.

(3) Dans le cas de compression méridienne provoquée par un moment fléchissant global constant exercé sur le cône, il convient de considérer le petit rayon  $r_1$  comme le plus critique.

(4) Il convient de déterminer la contrainte de voilement de calcul pour le cylindre équivalent conformément à D.1.2.

#### D.3.3.2 Compression circonférentielle (de frettage)

(1) Lorsque la compression circonférentielle est provoquée par une pression extérieure uniforme, il convient d'effectuer la vérification du calcul au voilement en utilisant la contrainte circonférentielle de calcul agissante  $\sigma_\theta$  au point où  $r = r_e / \cos \beta$  ainsi que la contrainte de voilement de calcul selon D.3.2.1 et D.3.2.3.

(2) Lorsque la compression circonférentielle est provoquée par des actions autres qu'une pression extérieure uniforme, il convient de remplacer la répartition des contraintes calculée  $\sigma_\theta(x)$  par une répartition des contraintes  $\sigma_{\theta,env}(x)$  excédant partout la valeur calculée, mais qui serait provoquée par une pression extérieure uniforme fictive. Il convient d'effectuer ensuite la vérification au voilement comme indiqué dans l'alinéa (1), mais en utilisant  $\sigma_{\theta,env}$  au lieu de  $\sigma_\theta$ .

(3) Il convient de déterminer la contrainte de voilement de calcul pour le cylindre équivalent conformément à D.1.3.

#### D.3.3.3 Cisaillement

(1) Dans le cas d'un cisaillement provoqué par un couple de torsion global constant exercé sur le cône, il convient d'effectuer la vérification du calcul au voilement en utilisant la contrainte de voilement de calcul agissante  $\tau$  au point où  $r = r_e / \cos \beta$  ainsi que la contrainte de voilement de calcul selon D.3.2.1 et D.3.2.4.

(2) Lorsque le cisaillement est provoqué par des actions autres qu'un couple de torsion global constant (tel un effort tranchant global exercé sur le cône), il convient de remplacer la répartition des contraintes calculée  $\tau(x)$  par une répartition des contraintes fictive  $\tau_{env}(x)$  excédant partout la valeur calculée, mais qui serait provoquée par un couple de torsion global fictif. Il convient d'effectuer ensuite la vérification du calcul au voilement comme indiqué dans l'alinéa (1), mais en utilisant  $\tau_{env}$  au lieu de  $\tau$ .

(3) Il convient de déterminer la contrainte de voilement de calcul pour le cylindre équivalent conformément à D.1.4.