

normalisation française

FD ENV 1993-4-2
Mai 2002

Indice de classement : **P 22-342**

ICS : 91.080.10

Eurocode 3

Calcul des structures en acier

Partie 4-2 : Silos, réservoirs et canalisations — Réservoirs

E : Eurocode 3 — Design of steel structures — Part 4-2: Silos, tanks and pipelines — Tanks

D : Eurocode 3 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten — Teil 4-2: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen — Tankbauwerke

Fascicule de documentation

publié par AFNOR en mai 2002.

Correspondance

Le présent document reproduit intégralement la Prénorme européenne ENV 1993-4-2:1999.

Analyse

Le présent document traite des principes et des règles d'application pour le calcul des structures de réservoirs de surface cylindres verticaux en acier destinés au stockage de produits liquides. Il ne traite pas de la fabrication, du montage et des essais, de l'efficacité fonctionnelle et des aspects détaillés comme les trous d'homme, les semelles et les dispositifs de remplissage.

Descripteurs

Thésaurus International Technique : bâtiment, génie civil, construction métallique, acier de construction, réservoir, réservoir de stockage, liquide, définition, symbole, calcul, résistance des matériaux, fiabilité, classification, contrainte, paroi, trémie.

Modifications

Corrections



Membres de la commission de normalisation

Président : M BROZZETTI

Secrétariat : M PESCATORE — BNCM

M	ARIBERT	INSA RENNES
M	BARJON	SERVICE TECHNIQUE DES REMONTEES MECANIQUES
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	LAMADON	BUREAU VERITAS
M	LAPEYRE	C.E.P.
M	LE CHAFFOTEC	SOCOTEC
M	MAITRE	SOCOTEC
M	MARTIN	SNCF
M	MOUTY	
M	PAMIES	CETEN APAVE
MME	PATROUILLEAU	AFNOR
MME	PECHENARD	AFFIX
M	PERNIER	MINISTERE DE L'EQUIPEMENT, DU LOGEMENT, DU TRANSPORT ET DU TOURISME
M	PESCATORE	BNCM
MME	PETROVA	S.F.J.F.
M	RAMEAU	EDF
M	RAOUL	SETRA
M	ROUSSEAU	INSTITUT DE SOUDURE
M	RYAN	CTICM
M	SOKOL	P.A.B.
M	VILLETTE	BAUDIN-CHATEAUNEUF
M	VOISIN	I.N.R.S.

Avant-propos national

Le présent document traite du dimensionnement des réservoirs en acier. Les actions exercées par les produits liquides ont été publiées dans le fascicule de documentation FD ENV 1991-4 (indice de classement : P 06-104). Dans ces conditions, il a été décidé de ne pas établir de Document d'Application Nationale (D.A.N.).

Les observations concernant le présent fascicule de documentation sont à adresser au BNCM / CTICM, Domaine de Saint-Paul — Bâtiment 6 — 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	
<i>Désignation</i>	<i>Intitulé</i>	<i>Désignation</i>	<i>Intitulé</i>
ENV 1993-1-1	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments</i>	XP ENV 1993-1-1 P22-311	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier et document d'application nationale — Partie 1-1 : règles générales et règles pour les bâtiments</i>
ENV 1993-1-3	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-3 : Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid</i>	XP ENV 1993-1-3 P22-313	<i>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</i>
ENV 1993-1-6	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-6 : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en coque</i>	FD ENV 1993-1-6 *) P22-316	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-6 : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en coque</i>
ENV 1993-1-7	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-7 : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en plaques raidies chargées hors de leur plan</i>	FD ENV 1993-1-7 *) P22-317	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 1-7 : Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en plaques raidies chargées hors de leur plan</i>
ENV 1993-4-1	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-1 : Silos, réservoirs et canalisations — Silos</i>	FD ENV 1993-4-1 *) P22-341	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-1 : Silos, réservoirs et canalisations — Silos</i>
ENV 1993-4-2	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-2 : Silos, réservoirs et canalisations — Réservoirs</i>	FD ENV 1993-4-2 *) P22-342	<i>Eurocode 3 : Calcul des structures en acier — Partie 4-2 : Silos, réservoirs et canalisations — Réservoirs</i>
ENV 1997	<i>Eurocode 7 : Calcul géotechnique</i>	XP ENV 1997-1 P94-250-1	<i>Eurocode 7 : Calcul géotechnique — Partie 1 : Règles générales</i>
ENV 1998-4	<i>Eurocode 8 : Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes — Partie 4 : Silos, réservoirs et canalisations</i>	XP ENV 1998-4 *) P06-034	<i>Eurocode 8 : Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes et document d'application nationale — Partie 4 : Silos, réservoirs et canalisations</i>
prEN 265001	<i>Norme pour la conception et la fabrication de réservoirs métalliques soudés, aériens à fond plat, cylindriques, verticaux, construits sur site, destinés au stockage des liquides à température ambiante</i>	prNF EN 14015-1	<i>Normes pour la conception et la fabrication de réservoirs métalliques soudés, aériens à fond plat, cylindriques, verticaux, construits sur site, destinés au stockage des liquides à température ambiante ou supérieure — Partie 1 : Réservoirs en acier</i>
prEN 265002	<i>Norme pour la conception et la fabrication de réservoirs métalliques soudés, destinés au stockage des liquides à des températures cryogéniques</i>		
ISO 1000	<i>Unités SI et recommandations pour l'emploi de leurs multiples et de certaines autres unités</i>	NF X02-006	<i>Normes fondamentales — Le système international d'unités — Description et règles d'emploi — Choix de multiples et sous-multiples</i>
ISO 8930	<i>Principes généraux de la fiabilité des constructions -- Liste de termes équivalents</i>	FD P06-007	<i>Principes généraux de fiabilité des constructions -- Liste de termes équivalents</i>
*) En préparation.			

Version française

**Eurocode 3 —
Calcul des Structures en acier —
Partie 4-2 : Silos réservoirs et canalisations — Réservoirs**

Eurocode 3 —
Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten —
Teil 4-2: Silos, Tankbauwerke und Rohrleitungen —
Tankbauwerke

Eurocode 3 —
Design of steel structures —
Part 4-2: Silos, tanks and pipelines — Tanks

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
Avant-propos	3
1 Généralités	6
2 Base du calcul	16
3 Propriétés des matériaux	18
4 Bases de l'analyse structurale	20
5 Calcul des parois cylindriques	23
6 Calcul des trémies coniques	27
7 Calcul des structures de toit circulaires	28
8 Calcul des jonctions de transition au fond de la coque et aux poutres annulaires de support	30
9 Calcul des réservoirs rectangulaires et à côtés plans	30
10 Exigences de fabrication et de montage par rapport au calcul	31
11 Calcul simplifié	32
Annexe A (normative) Actions, coefficients partiels et combinaisons d'actions sur des réservoirs	43

Avant-propos

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

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

Objectifs des Eurocodes

- (1) Les Eurocodes Structuraux regroupent un ensemble de normes élaborées pour le calcul structural et géotechnique des bâtiments et ouvrages de génie civil.
- (2) Ils ne traitent de l'exécution et du 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 adoptées dans 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 leur comportement soit disponible, quelques-uns des Eurocodes Structuraux couvrent certains de ces aspects dans des annexes informatives.

Historique du programme 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 Etats membres et, ultérieurement, à les remplacer. Ces règles techniques reçurent alors le nom d'«Eurocodes Structuraux».
- (5) En 1990, après consultation de ses Etats membres respectifs, 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 de s'associer au travail du CEN.
- (6) Le Comité Technique CEN/TC 250 du CEN est chargé de tous les Eurocodes Structuraux.

Programme Eurocodes

- (7) Les travaux sont en cours sur les Eurocodes Structuraux suivants, chacun d'eux étant en général 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 mentionnés ci-dessus.
- (9) La présente Partie 4-2 de l'ENV 1993 est publiée par le CEN en tant que prénorme Européenne (ENV) pour une durée 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 pour la détermination des actions futures.

(12) Dans l'intervalle, les réactions et commentaires concernant la présente prénorme devront être adressés au Secrétariat du CEN/TC 250/SC 3 à l'adresse suivante :

BSI Standards
British Standards House
389 Chiswick High Road
London W4 4AL
England

ou à votre organisme national de normalisation.

Documents d'Application Nationale (DAN)

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

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

Points spécifiques à cette prénorme

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

- ENV 1993-1-1 Règles générales : Règles générales et règles pour les bâtiments ;
- ENV 1993-1-2 Règles générales : Calcul du comportement au feu ;
- ENV 1993-1-3 Règles générales : Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois minces formés à froid ;
- ENV 1993-1-4 Règles générales : Règles supplémentaires pour les aciers inoxydables ;
- ENV 1993-1-5 Règles générales : Règles supplémentaires pour les plaques planes, raidies ou non, chargées dans leur plan ;
- ENV 1993-1-6 Règles générales : ENV 1993-4-1 Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en coque ;
- ENV 1993-1-7 Règles générales : Règles supplémentaires pour les plaques raidies chargées hors de leur plan ;
- 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) Les coefficients de sécurité pour les réservoirs «type produit» (production en usine) peuvent être spécifiés par les autorités appropriées. Lorsqu'ils sont appliqués à des réservoirs «type produit», les coefficients donnés en A.3.1 n'ont qu'une valeur indicative. Ils sont présentés pour montrer les niveaux probables nécessaires pour obtenir une fiabilité cohérente avec d'autres conceptions.

(18) Des normes parallèles sur les réservoirs sont en préparation au sein du CEN/TC 265. Elles reflètent les pratiques actuelles dans l'industrie pétrolière, pétrochimique et chimique, pratiques qui restent fondées sur la notion de contraintes admissibles.

Bien que les principes du calcul des états limites soient de plus en plus utilisés par l'industrie du bâtiment, l'expérience de leur application aux réservoirs de stockage en acier reste limitée.

Une tendance à une plus large utilisation du calcul aux états limites est envisagée à mesure que l'expérience grandira et que les concepteurs se familiariseront avec cette méthodologie.

1 Généralités

1.1 Objet

(1)P La Partie 4.2 de l'Eurocode 3 traite des principes et des règles d'application pour le calcul des structures de réservoirs de surface cylindres verticaux en acier destinés au stockage de produits liquides ayant les caractéristiques suivantes :

- a) pressions internes caractéristiques non inférieures à -100 mbar et non supérieures à 500 mbar ¹⁾ ;
- b) température de calcul du métal dans la plage comprise entre -196 °C et $+300$ °C ;
- c) niveau de calcul maximal du liquide non supérieur au sommet de la coque cylindrique.

(2)P Cette Partie ne traite que les exigences relatives à la résistance et à la stabilité des réservoirs en acier. Toutes les autres exigences de calcul sont couvertes par le prEN 265001 pour les réservoirs à température ambiante ou par le prEN 265002 pour les réservoirs cryogéniques. Ces autres exigences portent notamment sur la fabrication, le montage et les essais, l'efficacité fonctionnelle et sur des aspects détaillés comme les trous d'homme, les semelles et les dispositifs de remplissage.

(3)P Les règles relatives aux exigences particulières du calcul de la résistance aux séismes sont traitées dans l'ENV 1998-4 (Eurocode 8 : Partie 4 «Conception et dimensionnement des structures pour la résistance aux séismes : Silos, réservoirs et canalisations») qui complète spécifiquement les règles de l'Eurocode 3 dans ce domaine.

(4) Le calcul des structures porteuses pour réservoirs est traité dans l'ENV 1993-1-1.

(5) Les fondations en béton armé pour réservoirs en acier sont traitées dans l'ENV 1992 et l'ENV 1997.

(6) Les valeurs numériques des actions spécifiques s'exerçant sur les réservoirs en acier à prendre en compte dans le calcul sont données dans l'ENV 1991-4 «Actions dans les silos et réservoirs». Des dispositions supplémentaires relatives aux actions sur les réservoirs sont données dans l'annexe A à la présente partie 4.2 de l'Eurocode 3.

(7) La présente Partie 4.2 ne couvre pas :

- les toits flottants et les couvercles flottants ;
- la résistance au feu (voir l'ENV 1993-1-2).

(8) Les réservoirs à plate-forme circulaire couverts par la présente norme sont limités aux structures axisymétriques, bien qu'elles puissent être soumises à des actions dissymétriques et être soutenues de façon dissymétrique.

1.2 Distinction entre principes et règles d'application

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

(2)P Les principes comprennent :

- des déclarations générales ou définitives pour lesquelles il n'existe aucune alternative ;
- des exigences et des modèles analytiques qui n'admettent aucune alternative, sauf mention contraire.

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

(4)P Les règles d'application sont en général des règles reconnues qui suivent les principes et qui satisfont leurs exigences. On peut utiliser d'autres règles de calcul différentes des règles d'application données dans l'Eurocode, à condition qu'il soit démontré que ces autres règles respectent les principes concernés et garantissent une fiabilité au moins égale.

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

1) Sauf indication contraire, toutes les pressions sont exprimées en mbar.

1.3 Références normatives

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

ENV 1090, *Exécution des structures en acier.*

ENV 1991, *Eurocode 1 : Bases du calcul et actions sur les structures.*

Partie 1 : *Bases du calcul.*

Partie 2.1 : *Densités, poids propres et charges d'exploitation.*

Partie 2.2 : *Actions sur les structures exposées au feu.*

Partie 2.3 : *Charges de neige.*

Partie 2.4 : *Actions du vent.*

Partie 2.5 : *Actions 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.*

Partie 1.6 : *Règles générales — Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en coque.*

Partie 1.7 : *Règles générales — Règles supplémentaires pour la résistance et la stabilité des structures en plaques raidies chargées hors de leur plan.*

Partie 4.1 : *Silos.*

Partie 4.2 : *Réservoirs.*

ENV 1997, *Eurocode 7 : Calcul géotechnique.*

ENV 1998, *Eurocode 8 : Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes.*

Partie 4 : *Silos, réservoirs et canalisations.*

prEN 265001, *Spécifications relatives à la conception et à la fabrication des réservoirs métalliques soudés verticaux de forme cylindrique, à fond plat, construits sur site au-dessus du sol, destinés au stockage des liquides à température ambiante.*

prEN 265002, *Spécifications relatives à la conception et à la fabrication des réservoirs métalliques soudés destinés au stockage des liquides à des températures cryogéniques.*

ISO 1000, *Unités SI.*

ISO 8930, *Principes généraux de la fiabilité des constructions -- Liste de termes équivalents.*

1.4 Définitions

(1) Les termes qui sont définis dans l'ENV 1991-1 pour un usage commun dans les Eurocodes traitant des structures et, sauf indication contraire, les définitions données dans l'ISO 8930 sont applicables à cette Partie 4-2 de l'ENV 1993. Toutefois, pour les besoins de la présente Partie 4.2 de l'ENV 1993, les définitions supplémentaires suivantes sont données :

1.4.1 coque : structure formée d'une plaque fine incurvée. Ce terme a aussi une signification spéciale pour les réservoirs : voir 1.7.2.

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

1.4.3 caisson : structure formée d'un assemblage de plaques planes en une forme close tridimensionnelle. Aux fins de la présente norme, les dimensions du caisson sont en général comparables dans toutes les directions.

NOTE Aucune direction ne peut être comparée à la portée d'un pont à poutre de caisson

1.4.4 direction méridienne : tangente à la paroi du réservoir dans un plan vertical en un point quelconque. Elle varie selon l'élément structurel considéré. Autrement définie, elle est la direction verticale ou inclinée que prendrait une goutte d'eau glissant vers le bas sur la surface de la structure.

1.4.5 direction circonférentielle : tangente horizontale à la paroi du réservoir en un point quelconque. Elle varie autour du réservoir, est située dans le plan horizontal et est tangente à la paroi du réservoir, que ce dernier soit de plan circulaire ou rectangulaire.

1.4.6 surface médiane : ce terme désigne à la fois la surface médiane exempte de contrainte d'une coque en flexion pure et le plan médian d'une plaque plane formant une partie d'un caisson.

1.5 Unités SI

(1)P Les unités SI doivent être utilisées conformément à la Norme internationale ISO 1000.

(2) Les unités suivantes sont recommandées de manière systématique pour les calculs, :

- dimensions et épaisseurs :	m	mm
- poids volumique :	kN/m ³	N/mm ³
- forces et charges :	kN	N
- forces et charges linéiques :	kN/m	N/mm
- pressions et actions réparties par surface :	kPa	MPa
- unité de masse :	kg/m ³	kg/mm ³
- accélération :	km/s ²	m/s ²
- résultantes de contrainte de membrane :	kN/m	N/mm
- résultantes de contrainte en flexion :	kNm/m	Nmm/mm
- modules de contrainte et d'élasticité :	kPa	MPa (= N/mm ²)

(3) Facteurs de conversion

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

1.6 Symboles utilisés dans la Partie 4.2 de l'Eurocode 3

1.6.1 Majuscules latines

A aire de section transversale

*A*₁, *A*₂ aire de semelle supérieure et inférieure du support central de toit

D diamètre du réservoir

E module de Young

H hauteur d'une partie de paroi de coque par rapport à la surface du liquide ; hauteur de calcul maximale du liquide

H_0	hauteur de la coque du réservoir
I	moment quadratique de l'aire de section transversale
K	coefficient pour le calcul du flambement
L	hauteur d'un segment de coque ou longueur de cisaillement d'un raidisseur
M	moment fléchissant dans un élément structurel
N	effort axial dans un élément structurel
P	charge verticale sur un chevron de toit
R	rayon de courbure d'une coque non cylindrique
T	température
W	module résistant élastique ; poids

1.6.2 Minuscules latines

a	longueur d'une ouverture rectangulaire dans la coque
b	longueur d'une ouverture rectangulaire dans la coque ; largeur d'un élément en plaque dans une section transversale
c_p	coefficient relatif aux charges de vent
d	diamètre de trou d'homme ou de buse
e	distance d'une fibre extérieure d'une poutre à l'axe de la poutre
f_y	limite d'élasticité de l'acier
f_u	résistance ultime de l'acier
h	élévation du toit (hauteur du sommet d'un toit en dôme par rapport au plan de sa jonction avec la coque du réservoir)
j	coefficient de soudure ; facteur de concentration de contrainte ; rang d'une virole de paroi de coque
m	moment fléchissant par largeur unitaire
n	résultante de contrainte de membrane nombre de chevrons d'un toit de réservoir circulaire
p	chargement réparti (non nécessairement au droit de la paroi)
p_n	pression au droit de la paroi de réservoir (dirigée vers l'extérieur)
r	rayon moyen de la surface médiane d'une paroi cylindrique de réservoir
t	épaisseur de paroi
w	largeur minimale d'une plaque annulaire de fond
x	coordonnée radiale relative à un toit de réservoir
y	coordonnée verticale locale relative à un toit de réservoir ; facteur de remplacement utilisé dans le calcul des ouvertures renforcées
z	coordonnée axiale globale coordonnée sur l'axe vertical d'un réservoir axisymétrique (enveloppe de révolution)

1.6.3 Lettres grecques

α	pende de toit
β	inclinaison du fond de réservoir par rapport à la verticale ; = π/n où n est le nombre de chevrons
γ_F	coefficient partiel pour les actions
γ_M	coefficient partiel pour la résistance du matériau
δ	flèche
Δ	changement dans une variable
ν	coefficient de Poisson
θ	coordonnée circonférentielle autour de la coque
σ	contrainte directe
τ	contrainte de cisaillement

1.6.4 Indices

E	équivalent
F	à mi-portée ; action
a	annulaire
d	valeur de calcul
i	interne ; dirigé vers l'intérieur ; rang
k	anneau central de toit
k	valeur caractéristique
m	valeur moyenne
min	valeur minimale autorisée
n	nominal ; normal à la paroi
o	extérieur ; dirigé vers l'extérieur
p	pression
r	radial ; anneau
R	résistance
s	au support
s	paroi de coque
x	méridien ; radial ; axial
y	circonférentiel ; transversal ; élasticité
O	valeur de référence
1	supérieur
2	inférieur
θ	circonférentiel (Parois de révolution)

1.7 Terminologie

En complément à la partie 1 de l'ENV 1993 (et de la Partie 4 de l'ENV 1991), dans le cadre de la présente Partie 4.2, la terminologie suivante est applicable :

1.7.1 réservoir : conteneur pour le stockage de produits liquides : Dans la présente norme, il est par hypothèse prismatique avec un axe vertical (à l'exception du fond de réservoir et des parties du toit).

1.7.2 coque : paroi cylindrique de réservoir de forme circulaire. Bien que cet usage du terme puisse créer une légère confusion par rapport à la définition donnée en 1.4.1, il est si largement répandu que les deux significations du terme doivent être retenues. En cas de risque de confusion, le terme «paroi cylindrique» est utilisé.

1.7.3 paroi de réservoir : éléments en plaque métalliques formant les parois verticales, le toit ou la base en trémie. Ce terme n'est pas limité aux parois verticales.

1.7.4 virole : la paroi cylindrique du réservoir est formée en réalisant des assemblages horizontaux entre de courtes sections cylindriques, dont chacune est formée en réalisant des assemblages verticaux entre plaques incurvées. Le terme virole recouvre un cylindre court sans assemblages horizontaux.

1.7.5 trémie : section convergent vers le fond d'un réservoir. Elle sert à canaliser les fluides (en général lorsqu'ils contiennent des solides en suspension) vers un orifice de dépotage par gravité.

1.7.6 jonction : point de rencontre de deux (ou plus) segments de coque ou éléments plans en plaque. Elle comporte ou non un raidisseur : le point d'attache d'un raidisseur annulaire à la coque ou au caisson peut être traité comme une jonction.

1.7.7 jonction de transition : jonction entre la paroi verticale et une trémie. La jonction peut se situer à la base de la paroi verticale ou vers le bas de la paroi.

1.7.8 jonction coque-toit : jonction entre la paroi verticale et le toit. Elle est parfois dénommée jonction à l'égout du toit, bien que cet usage se rapporte plus couramment au stockage de solides.

1.7.9 raidisseur longitudinal : élément raidisseur local qui suit un méridien de coque ; il est un générateur de l'enveloppe de révolution. Il est installé pour augmenter la stabilité, aider à introduire des charges locales ou supporter des charges axiales. Il n'a pas pour but d'assurer une capacité portante primaire pour la flexion due à des charges transversales.

1.7.10 nervure : élément local qui fournit une voie de capacité portante primaire pour des charges créant une flexion vers le bas sur le méridien de coque ou de plaque plane ; elle est un générateur de l'enveloppe de révolution ou un raidisseur vertical d'un caisson. Elle est utilisée pour répartir les charges transversales sur la structure par une action fléchissante.

1.7.11 raidisseur annulaire : élément raidisseur local passant sur la circonférence d'une structure à un point donné du méridien. Il est supposé avoir une rigidité nulle dans le plan méridien de la structure. Il est installé pour augmenter la stabilité ou pour introduire des charges locales et non en tant qu'élément porteur primaire. Il est circulaire dans une enveloppe de révolution, mais prend la forme rectangulaire de la section horizontale dans les structures rectangulaires.

1.7.12 support circulaire : élément structurel qui entoure la structure à sa base sur toute sa circonférence et fournit le moyen de fixer la structure à une fondation ou à un autre élément. Il est exigé de s'assurer que les conditions aux limites prises par hypothèse sont concrètement réalisées.

1.7.13 poutre annulaire : raidisseur circonférentiel ayant une rigidité et une résistance en flexion tant dans le plan de la section circulaire d'une coque que dans le plan horizontal d'une structure rectangulaire, au droit de ce plan. Il s'agit d'un élément porteur primaire utilisé pour répartir les charges locales dans la structure de la coque ou du caisson.

1.7.14 supporté en continu : un réservoir est supporté en continu lorsque tous les emplacements sur la circonférence sont supportées de manière identique. Des écarts mineurs par rapport à cette état (par exemple l'existence d'une petite ouverture) n'affectent pas l'applicabilité de la définition.

1.7.15 support discret : emplacement où un réservoir est supporté par une console ou une colonne locale, ce qui donne un nombre limité de supports étroits sur la circonférence du réservoir.

1.8 Conventions de représentation

1.8.1 Conventions relatives au système axial global de la structure d'un réservoir circulaire

(1) La convention de représentation donnée ci-après est relative à la structure totale du réservoir et admet que ce dernier n'est pas un élément structural. Les systèmes de coordonnées doivent être considérés avec soin afin de s'assurer de ne pas confondre les coordonnées locales associées aux éléments fixés à la paroi de coque et les chargements, qui sont donnés en coordonnées locales mais définis par une coordonnée globale.

(2) En général, pour le système axial globale de la structure de réservoir, la convention est en coordonnées cylindriques (voir Figure 1.1) comme suit :

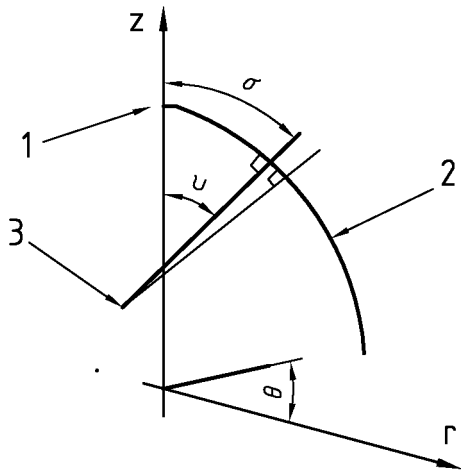
Système de coordonnées

- Coordonnée sur l'axe central d'une enveloppe de révolution z
- Coordonnée radiale r
- Coordonnée angulaire θ

(3) Pour les directions positives, la convention est la suivante :

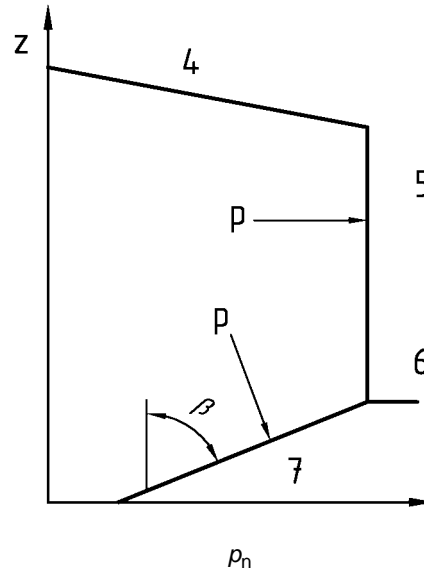
- Positive dirigée vers l'extérieur (pression interne positive, déplacements vers l'extérieur positifs)
- Contraintes de traction positives (sauf dans les équations de voilement, où la compression est positive)

(4) Pour les actions réparties sur la surface de la paroi de réservoir, la convention est la suivante :



Pression normale à la coque (vers l'extérieur)

a) Système général de coordonnées



b) Coordonnées et chargement d'une coque de réservoir : section

Légende

- 1 Pôle
- 2 Méridien de coque
- 3 Centre instantané de courbure méridienne
- 4 Toit
- 5 Coque
- 6 Transition
- 7 Fond

Figure 1.1 — Systèmes de coordonnées pour un réservoir circulaire

1.8.2 Conventions relatives au système axial global de la structure d'un réservoir rectangulaire

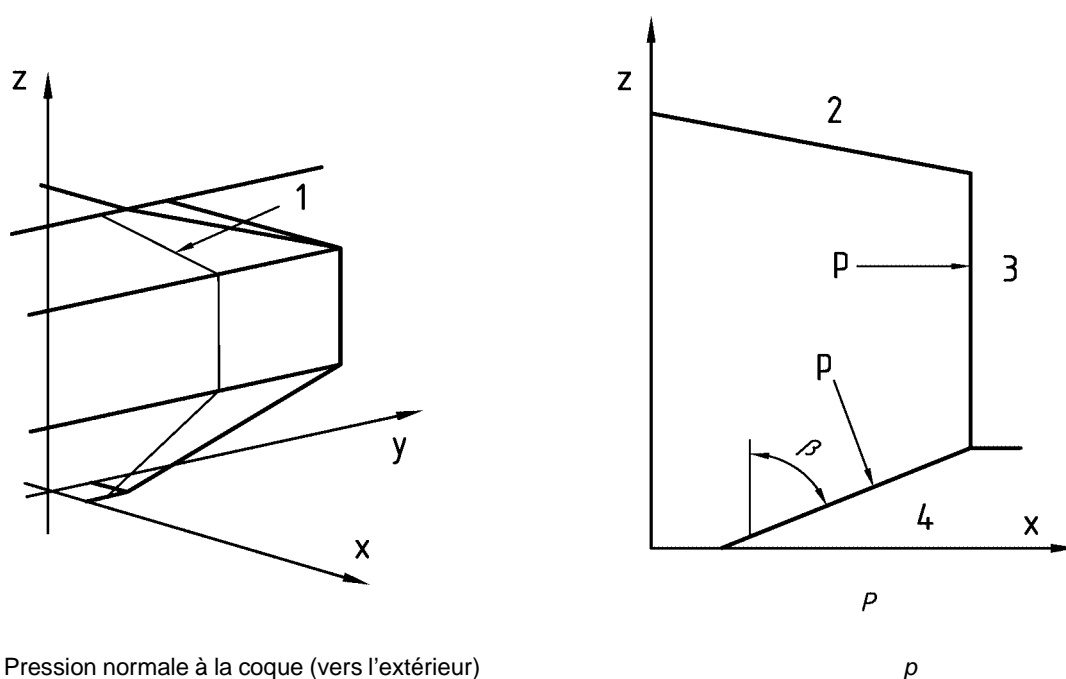
(1) La convention de représentation donnée ci-après est relative à la structure totale du réservoir et admet que ce dernier n'est pas un élément structurel. Les systèmes de coordonnées doivent être considérés avec soin pour s'assurer de ne pas confondre les coordonnées locales associées aux membres fixés à la paroi du caisson et les chargements, qui sont donnés en coordonnées locales mais définis par une coordonnée globale.

(2) En général, pour le système axial global de la structure de réservoir, la convention est en coordonnées cartésiennes x, y, z , où la direction verticale est z (voir Figure 1.2).

(3) Pour les directions positives, la convention est la suivante :

- Direction vers l'extérieure positive (pression interne positive, déplacements vers l'extérieur positifs)
- Contraintes de traction positives (sauf dans les équations de flambement, où la compression est positive)
- Contraintes de cisaillement : voir 1.8.4

(4) Pour les actions réparties sur la surface de la paroi de réservoir, la convention est la suivante :



a) Système général de coordonnées

b) Coordonnées et chargement d'un caisson de réservoir : section

Légende

- 1 Méridien de caisson
- 2 Toit
- 3 Paroi
- 4 Fond

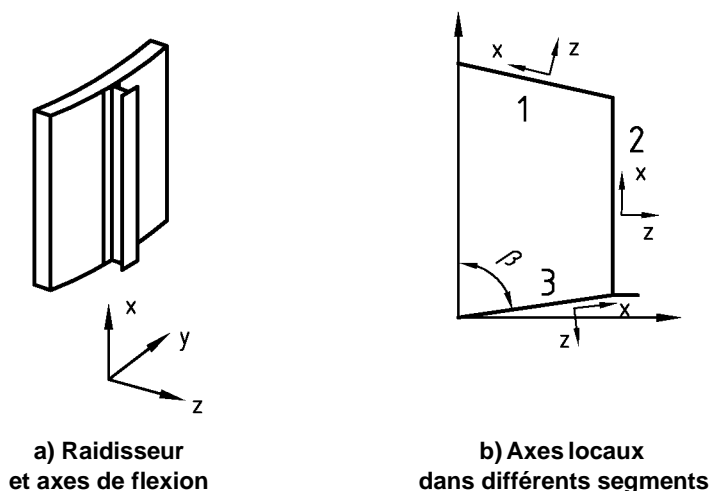
Figure 1.2 — Systèmes de coordonnées pour un réservoir rectangulaire

1.8.3 Conventions relatives aux axes d'éléments structuraux de réservoirs circulaires et rectangulaires

(1) Pour les éléments de structure fixés à la paroi de réservoir (voir Figures 1.3 et 1.4), la convention est différente pour les éléments méridiens et pour les éléments circonférentiels.

(2) Pour les éléments structuraux rectilignes méridiens (voir Figure 1.3a) fixés à la paroi de réservoir (coque ou caisson), la convention est la suivante :

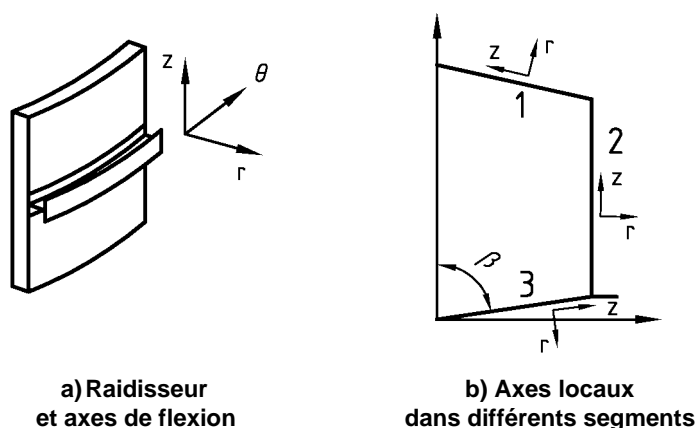
- Coordonnée méridienne pour fixation de cylindre, trémie et toit x
- Axe fort de flexion (parallèle aux semelles) r
- Axe faible de flexion (perpendiculaire aux semelles) z



Légende

- 1 Toit
- 2 Coque
- 3 Fond

Figure 1.3 — Systèmes de coordonnées locaux pour raidisseurs méridiens sur une coque ou un caisson



Légende

- 1 Toit
- 2 Coque
- 3 Fond

Figure 1.4 — Systèmes de coordonnées locaux pour raidisseurs circonférentiels de coque ou de caisson

(3) Pour les éléments de structures curvilignes (voir Figure 1.4a) fixés à une paroi de coque, la convention est la suivante :

— Coordonnée angulaire (incurvé)	θ
— Axe radial	r
— Axe vertical	z

(4) Pour les éléments structuraux rectilignes circonférentiels fixés à un caisson, la convention est la suivante :

— Axe circonférentiel	x
— Axe horizontal	y
— Axe vertical	z

1.8.4 Conventions relatives aux résultantes de contrainte pour réservoirs circulaires et rectangulaires

(1) Pour les indices indiquant les efforts de membrane, la convention utilisée est la suivante :

«L'indice dérive de la direction de la contrainte directe induite par l'effort»

Résultantes de contrainte de membrane, voir Figure 1.5 :

n_x	résultante méridienne de contrainte de membrane
n_q	résultante circonférentielle de contrainte de membrane dans une coque
n_y	résultante circonférentielle de contrainte de membrane dans un caisson rectangulaire
n_{xy} ou n_{xq}	résultante de contrainte de cisaillement de membrane

Contraintes de membrane :

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

(2) Pour les indices indiquant les moments, la convention est la suivante :

«L'indice dérive de la direction de la contrainte directe induite par le moment»

NOTE Cette convention relative aux plaques et coques diffère des conventions utilisées pour les poutres et les poteaux dans l'Eurocode 3 : Parties 1.1 et 1.3. Il y a lieu de les appliquer avec le plus grand soin lorsqu'elles sont utilisées avec ces dernières.

Résultantes de contrainte en flexion, voir Figure 1.5 :

m_x	moment fléchissant méridien par largeur unitaire
m_θ	moment fléchissant circonférentiel par largeur unitaire dans des coques
m_y	résultante circonférentielle de contrainte en flexion dans des caissons rectangulaires
m_{xy} ou $m_{x\theta}$	moment de cisaillement en torsion par largeur unitaire

Contraintes de flexion :

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

Contraintes de surface internes et externes :

- $\sigma_{s_{ix}}, \sigma_{s_{ox}}$ contrainte méridienne de surface interne, externe
- $\sigma_{s_{i\theta}}, \sigma_{s_{o\theta}}$ contrainte circonférentielle de surface interne, externe dans des coques
- $\sigma_{s_{iy}}, \sigma_{s_{oy}}$ contrainte de surface circonférentielle interne, externe dans des caissons rectangulaires
- $\tau_{s_{ixy}}, \tau_{s_{oxy}}$ contrainte de cisaillement de surface interne, externe

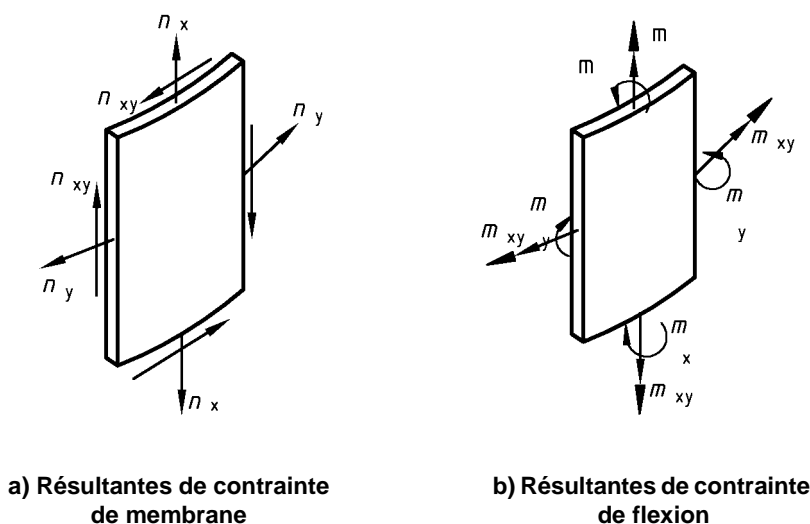


Figure 1.5 — Résultantes de contrainte dans la paroi de réservoir (coques et caissons)

2 Base du calcul

2.1 Exigences fondamentales

- (1)P Un réservoir doit être dimensionné, construit et entretenu en vue de satisfaire aux exigences de la section 2 de l'ENV 1991-1, complétées par ce qui suit.
- (2)P Une attention particulière doit être prêtée aux situations se présentant pendant le montage.

2.2 Différentiation de la fiabilité

- (1)P Différents niveaux de fiabilité doivent être adoptés pour les réservoirs, en fonction des conséquences économiques et sociales potentielles de leur défaillance.
- (2)P Trois classes de fiabilité se rapportant à la sécurité structurelle et à l'aptitude au service doivent être utilisées dans la présente Partie, soit les classes de fiabilité 1, 2, 3.
- (3) Il convient que la classe de fiabilité soit convenue entre le concepteur, le client et l'autorité compétente. Il convient de fonder la classification des réservoirs sur ce qui suit :
 - **Classe de fiabilité 3** : réservoirs destinés au stockage de liquides ou de gaz liquéfiés potentiellement toxiques ou explosifs et réservoirs de grande taille contenant des liquides inflammables ou polluants des eaux situés en zone urbaine. S'il y a lieu, il convient de prendre en compte les chargements en situations d'urgence pour ces structures, voir A.2.13.
 - **Classe de fiabilité 2** : réservoirs de taille moyenne contenant des liquides inflammables ou polluants des eaux situés en zone urbaine.
 - **Classe de fiabilité 1** : réservoirs agricoles ou réservoirs contenant de l'eau.

2.3 États limites

(1)P Les états limites définis dans la section 3 de l'ENV 1991-1 doivent être adoptés pour la présente Partie.

2.4 Actions et influences de l'environnement

2.4.1 Généralités

(1)P Les exigences générales de la section 4 et de la section 9 de l'ENV 1991-1 doivent être satisfaites.

2.4.2 Combinaisons de pressions des liquides avec d'autres actions

(1) Il convient d'adopter les coefficients partiels relatifs aux actions dans les réservoirs donnés dans l'annexe A.

(2) Il convient que les combinaisons d'actions soient conformes à l'annexe A.

2.5 Propriétés des matériaux

(1)P Les exigences générales relatives aux propriétés des matériaux données dans la section 5 de l'ENV 1991-1 doivent être observées.

(2) Il convient d'utiliser les propriétés des matériaux spécifiques aux réservoirs données dans la section 3 de la présente Partie.

2.6 Données géométriques

(1) Les informations générales sur les données géométriques données dans la section 6 de l'ENV 1991-1 peuvent être utilisées.

(2) Les informations supplémentaires se rapportant spécifiquement aux structures coque données dans l'ENV 1993-1-6 peuvent être utilisées.

(3) Il convient d'utiliser dans les calculs l'épaisseur de tôle donnée en 4.1.2.

2.7 Modélisation du réservoir en vue de déterminer les effets des actions

(1)P Les exigences générales de la section 7 de l'ENV 1991-1 doivent être observées.

(2) Il convient d'utiliser pour les segments structurels concernés les exigences spécifiques de l'analyse structurelle par rapport à l'aptitude au service définies en 5.5, 7.5 et 9.4.

(3) Il convient d'appliquer aux segments structurels concernés les exigences spécifiques de l'analyse structurelle par rapport aux états limites ultimes définies en 5.3, 7.3 et 9.3 (et, de façon plus détaillée, dans l'ENV 1993-1-6).

2.8 Conception et dimensionnement assistés par l'expérimentation

(1) Pour la conception et le dimensionnement assistés par l'expérimentation, il convient de faire référence à la section 8 de l'ENV 1991-1 et à la section 8 de l'ENV 1993-1-1.

2.9 Effets des actions pour la vérification des états limites ultimes

2.9.1 Généralités

(1)P Les exigences générales de la section 9 de l'ENV 1991-1 doivent être satisfaites

2.9.2 Coefficients partiels se rapportant aux états limites ultimes

2.9.2.1 Coefficients partiels pour les actions exercées sur les réservoirs

(1) Pour les situations de calcul persistantes et transitoires, il convient d'utiliser les coefficients partiels donnés en A.3.1.

(2) Pour la vérification relative à la fatigue, il convient de faire référence à la section 9 de l'ENV 1993-1-6.

2.9.3 États limites de service

(1) Lorsque des règles de conformité simplifiées sont données dans les articles pertinents traitant des états limites de service, il n'est pas nécessaire d'effectuer des calculs détaillés utilisant des combinaisons d'actions.

(2) Sauf indication contraire, il convient de prendre des valeurs de γ_M égales à 1,0 pour tous les états limites de service.

2.10 Durabilité

(1) P Les exigences générales de 2.5 de l'ENV 1991-1 doivent être observées.

3 Propriétés des matériaux

3.1 Généralités

(1) Il convient d'adopter les valeurs nominales des propriétés des matériaux données dans cette prénorme comme valeurs caractéristiques dans les calculs de dimensionnement.

(2) Les autres propriétés des matériaux données dans les Normes de Référence correspondantes figurant dans l'annexe B de l'ENV 1993-1-1 peuvent aussi être utilisées.

3.2 Aciers de construction

(1) Les méthodes relatives au dimensionnement théorique données dans cette Partie 4.2 de l'ENV 1993 peuvent être utilisées pour les aciers de construction conformes à l'EN 10025 ou à l'EN 10113 et inclus dans l'ENV 1993-1-1.

(2) Il convient de reprendre de l'ENV 1993-1-1 les propriétés mécaniques des aciers de construction conformes à l'EN 10025 ou à l'EN 10113.

3.3 Aciers pour appareils à pression

- (1) Les méthodes relatives au dimensionnement théorique données dans cette Partie 4.2 de l'ENV 1993 peuvent être appliquées aux aciers pour appareils à pression conformes à l'EN 10028, sous réserve que :
- la limite d'élasticité soit comprise dans l'étendue couverte par l'ENV 1993-1-1 ;
 - la déformation ultime ne soit pas inférieure à la valeur minimale pour les aciers conformes à l'ENV 1993-1-1 qui ont une limite d'élasticité spécifiée identique ;
 - le rapport f_u/f_y ne soit pas inférieur à 1,20.
- (2) Il convient de reprendre de l'EN 10028 les propriétés mécaniques des aciers pour appareils à pression.

3.4 Aciers inoxydables

- (1) Les méthodes relatives au dimensionnement théorique données dans cette Partie 4.2 de l'ENV 1993 peuvent être utilisées pour les aciers inoxydables conformes à l'EN 10088 et inclus dans l'ENV 1993-1-4.
- (2) Il convient de reprendre de l'ENV 1993-1-4 les propriétés mécaniques des aciers inoxydables conformes à l'EN 10088.

3.5 Exigences de résilience

3.5.1 Généralités

- (1) Il convient de déterminer les exigences de résilience conformément à l'annexe C de l'ENV 1993-2, en prenant en compte la classe de fatigue.
- (2) Il convient d'utiliser la température de calcul minimale du métal, MDMT, conformément à 3.5.2 et au Tableau 3.1.

NOTE MDMT remplace T_{ed} .

3.5.2 Température de calcul minimale du métal

- (1) Il convient que la température de calcul minimale du métal, MDMT, soit la température minimale la plus basse du contenu ou la température donnée dans le Tableau 3.1.
- (2) Il convient de prendre la température ambiante moyenne la plus basse sur un jour, LODMAT, comme égale à la plus basse température moyenne enregistrée sur une période quelconque de 24 h. Lorsque seuls des enregistrements incomplets sont disponibles, cette température moyenne peut être prise égale à la moyenne des températures maximale et minimale, ou à une valeur équivalente.

Tableau 3.1 — Température de calcul minimale du métal MDMT fondée sur LODMAT

Température ambiante moyenne la plus basse sur un jour LODMAT	Température de calcul minimale du métal MDMT	
	Données sur 10 ans	Données sur 30 ans
$-10\text{ °C} \leq \text{LODMAT}$	LODMAT + 5 °C	LODMAT + 10 °C
$-25\text{ °C} \leq \text{LODMAT} \leq -10\text{ °C}$	LODMAT	LODMAT + 5 °C
$\text{LODMAT} \leq -25\text{ °C}$	LODMAT - 5 °C	LODMAT

4 Bases de l'analyse structurale

4.1 États limites ultimes

4.1.1 Bases

(1)P Le calcul des structures et des composants en acier doit satisfaire aux exigences relatives à l'état limite ultime données dans la section 2.

4.1.2 Épaisseur de plaque à utiliser dans les calculs de résistance

(1) Dans les calculs visant à déterminer la résistance, la valeur de calcul de l'épaisseur d'une plaque est l'épaisseur nominale spécifiée dans l'EN 10025, l'EN 10028, l'EN 10088 ou l'EN 10113, diminuée de la valeur maximale de la tolérance négative et d'une valeur de la corrosion admissible spécifiée en 4.1.3.

4.1.3 Effets de la corrosion

(1)P Les effets de la corrosion doivent être pris en compte.

(2) La corrosion dépend du liquide stocké, du type d'acier, du traitement thermique et des mesures prises pour protéger l'ouvrage contre la corrosion.

(3) Il convient de spécifier, si nécessaire, la valeur de la tolérance.

4.1.4 Fatigue

(1)P Dans le cas de cycles de charge fréquents, la structure doit être vérifiée en fonction de l'état limite de fatigue.

(2) Le calcul en fonction d'une fatigue oligocyclique peut être effectué conformément à la section 7 de l'ENV 1993-1-6.

(3) Lorsque des actions variables seront appliquées selon plus de 10 000 cycles sur la durée de vie de l'ouvrage, il convient de vérifier le calcul en fonction de la fatigue (EL4) conformément à la section 9 de l'ENV 1993-1-6.

4.1.5 Prise en compte des effets de la température

(1)P Les effets de la variation de la température entre parties de la structure doivent être inclus lorsque la répartition de la contrainte est déterminée en fonction de l'état limite ultime considéré.

4.2 Analyse de la structure en coque circulaire d'un réservoir

4.2.1 Modélisation de la coque structurelle

(1)P La modélisation de la coque structurelle doit observer les exigences de l'ENV 1993-1-6 ; néanmoins, ces dernières peuvent être jugées satisfaites par les dispositions suivantes.

(2)P La modélisation de la coque structurelle doit inclure tous les raidisseurs, ouvertures et accessoires.

(3)P Le calcul doit garantir que les conditions aux limites adoptées par hypothèse sont satisfaites.

4.2.2 Méthodes d'analyse

4.2.2.1 Généralités

(1)P L'analyse de la coque de réservoir doit être effectuée conformément aux exigences de l'ENV 1993-1-6.

(2) Une classe d'analyse supérieure à celle définie pour la classe de fiabilité retenue peut toujours être utilisée.

4.2.2.2 Classe de fiabilité 1

(1) Pour les réservoirs de la classe de fiabilité 1, il est possible d'utiliser la théorie des membranes pour déterminer les contraintes primaires, avec, pour décrire les effets de flexion locale et les actions dissymétriques, des facteurs et des expressions simplifiées.

4.2.2.3 Classe de fiabilité 2

- (1) Pour les réservoirs de la classe de fiabilité 2 soumis à des actions et supports axisymétrique, il convient d'utiliser l'une des deux analyses suivantes :
- a) La théorie des membranes peut être utilisée pour déterminer les contraintes primaires, avec, pour décrire tous les effets locaux, des expressions de l'élasticité de la théorie de la flexion.
 - b) Une analyse numérique validée, telle que définie dans la section 2 de l'ENV 1993-1-6, peut être utilisée (par exemple, analyse de la coque par éléments finis).
- (2) Lorsque la condition de chargement n'est pas axisymétrique, il convient d'utiliser une analyse numérique validée, sauf dans les conditions définies en (3) et (4) ci-après.
- (3) Nonobstant (2), lorsque le chargement varie régulièrement autour de la coque, ne causant qu'une flexion globale (c'est-à-dire sous la forme de l'harmonique 1), la théorie des membranes peut être utilisée pour déterminer les contraintes primaires.
- (4) Pour les analyses des actions dues au vent et/ou au tassement des fondations, la théorie des semi-membranes ou la théorie des membranes peuvent être utilisées.
- (5) Lorsque la théorie des membranes est utilisée pour analyser la coque, les joints discrets fixés à un réservoir cylindrique isotrope sous pression interne peuvent être considérés comme ayant une aire efficace incluant une longueur de coque au dessus et au dessous du joint de $0,78 \sqrt{rt}$, sauf lorsque le joint est à un point de jonction.
- (6) Lorsque la coque est raidie de façon discontinue par des raidisseurs verticaux, les contraintes dans les raidisseurs et la paroi de la coque peuvent être calculées en traitant les raidisseurs comme étant intégrés à la paroi de la coque, pour autant que l'espacement de ces derniers ne soit pas supérieur à $5 \sqrt{rt}$.
- (7) Lorsque les raidisseurs verticaux sont intégrés, il convient de déterminer la contrainte dans le raidisseur en tenant compte d'une compatibilité entre le raidisseur et la paroi et la contrainte de paroi dans la direction orthogonale, conformément à 4.4.
- (8) Si une poutre annulaire est utilisée au dessus de supports discrets, il convient de prendre en compte la compatibilité de la déformation axiale entre la poutre et les segments adjacents de la coque. Lorsqu'une telle poutre annulaire est utilisée, il convient d'inclure l'excentricité du centre de gravité et du centre de cisaillement de la poutre par rapport à la paroi de la coque et à la ligne centrale du support.
- (9) Lorsqu'une poutre annulaire est traitée comme une section prismatique (exempte de distorsion), il convient que le segment vertical de l'âme ait un élancement non supérieur à $b/t = 20$.
- (10) Lorsqu'une poutre annulaire est utilisée pour redistribuer les forces dans des supports discrets et que des boulons ou des éléments de connexion discrets sont utilisés pour lier les éléments structurels, il convient de déterminer la transmission de l'effort tranchant entre les parties annulaires due à des phénomènes de flexion de la coque et de la poutre annulaire.

4.2.2.4 Classe de fiabilité 3

- (1) Pour les réservoirs de la classe de fiabilité 3, il convient de déterminer les forces et moments internes en utilisant une analyse validée (par exemple, une analyse de la coque par éléments finis) telle que définie dans la section 2 de l'ENV 1993-1-6. L'état limite plastique (EL1) peut être évalué en utilisant des résistances à la rupture plastique dans des états de contrainte primaires telles que définies dans l'ENV 1993-1-6.

4.2.3 Imperfections géométriques

- (1) Il convient que les imperfections géométriques de la coque soient conformes aux limitations définies dans les sections 3.3 et 8.4 de l'ENV 1993-1-6.
- (2)P Les imperfections géométriques doivent être mesurées pour s'assurer que la qualité adoptée par hypothèse a été obtenue.
- (3) Il n'est pas nécessaire d'inclure formellement des imperfections géométriques de la coque lorsque les forces et moments internes sont déterminés, sauf lorsqu'une analyse GMNIA est utilisée, telle que définie dans la section 4.3 de l'ENV 1993-1-6.

4.3 Analyse de la structure du caisson d'un réservoir rectangulaire

4.3.1 Modélisation du caisson structurel

- (1)P La modélisation du caisson structurel doit observer les exigences de l'ENV 1993-1-7, mais ces dernières peuvent être considérées comme étant satisfaites par les paragraphes (2)P à (8).
- (2)P La modélisation du caisson structurel doit inclure tous les raidisseurs, ouvertures et accessoires.
- (3)P Le calcul doit garantir que les conditions aux limites adoptées par hypothèse sont satisfaites.
- (4)P Les joints entre segments du caisson doivent satisfaire aux hypothèses de modélisation pour la résistance et la rigidité.
- (5) Chaque panneau du caisson peut être traité comme un segment de plaque distinct, sous réserve que :
- les forces et les moments introduits dans chaque panneau par les panneaux voisins soient inclus ;
 - la rigidité en flexion des panneaux adjacents soit incluse.
- (6) Lorsque le panneau de paroi est raidi de façon discontinue par des raidisseurs, la contrainte dans les raidisseurs et dans la paroi peut être calculée en traitant les raidisseurs comme intégrés à la paroi du caisson, pour autant que l'espacement des raidisseurs ne soient pas supérieur $40t$.
- (7) Lorsque les raidisseurs sont intégrés à la paroi, il convient de déterminer la contrainte dans le raidisseur en tenant compte de l'excentricité du raidisseur par rapport à la plaque de paroi, et la contrainte de la paroi à la normale de l'axe du raidisseur.
- (8) Il convient de prendre une largeur efficace de la plaque de chaque côté d'un raidisseur qui ne soit pas supérieure à $16t$, où t est l'épaisseur locale de la plaque.

4.3.2 Imperfections géométriques

- (1) Il convient que les imperfections géométriques dans le caisson satisfassent aux limitations définies dans l'ENV 1993-1-7.

4.3.3 Méthodes d'analyse

- (1) Selon la classe de fiabilité (voir (2) à (5)), il convient de déterminer les forces internes dans les segments de plaque de la paroi du caisson en utilisant :
- la théorie de l'équilibre statique relatif aux forces de la membrane et la théorie des poutres concernant la flexion ; ou
 - la théorie de la flexion et de l'étirement linéaires de plaque; ou
 - une analyse par ordinateur fondée sur la théorie de la flexion et de l'étirement linéaires de plaque.
- (2) Pour les réservoirs de la classe de fiabilité 1, la méthode (a) de (1) peut être utilisée.
- (3) Lorsque la condition de chargement est symétrique par rapport à chaque segment de plaque et lorsque le réservoir est de la classe de fiabilité 2, la méthode (a) de (1) peut être utilisée.
- (4) Lorsque la condition de chargement n'est pas symétrique et lorsque le réservoir est de la classe de fiabilité 2, il convient d'utiliser soit la méthode (b), soit la méthode (c) de (1).
- (5) Pour les réservoirs de la classe de fiabilité 3, il convient de déterminer les forces et moments internes à l'aide soit de la méthode (b), soit de la méthode (c) de (1).

4.4 Propriétés orthotropes équivalentes des tôles ondulées

- (1) Lorsque des tôles ondulées sont utilisées dans la structure du réservoir, l'analyse peut être effectuée en traitant les tôles comme un matériau orthotrope équivalent d'épaisseur uniforme.
- (2) Les propriétés orthotropes obtenues en prenant en compte le comportement de déplacement de charge de la section ondulée dans les directions orthogonales peuvent être utilisées dans une analyse de la contrainte et dans une analyse du flambement de la structure. Les propriétés peuvent être déterminées selon la description donnée en 4.4 de l'ENV 1993-4-1.

5 Calcul des parois cylindriques

5.1 Bases

5.1.1 Généralités

- (1)P Le calcul des parois de coque cylindrique doit satisfaire aux exigences relatives à l'état limite ultime données dans la section 2.
- (2) Il convient d'effectuer l'évaluation de la coque cylindrique au moyen des dispositions de l'ENV 1993-1-6.

5.1.2 Calcul de la paroi

- (1)P La paroi de la coque cylindrique du réservoir doit être soumise à une vérification des phénomènes suivants sous chaque état limite :
- Stabilité globale et équilibre statique
 - EL1 : limite plastique
 - EL2 : plasticité cyclique
 - EL3 : voilement
 - EL4 : fatigue
- (2)P La paroi de la coque cylindrique doit satisfaire aux dispositions de l'ENV 1993-1-6, sauf lorsque la présente norme fournit d'autres dispositions jugées satisfaire aux exigences de cette norme.

5.2 Distinction des types de coque cylindrique

- (1) Une paroi de coque cylindrique construite à partir de tôles planes en acier laminé est désignée «isotrope».
- (2) Une paroi de coque cylindrique construite à partir de tôles d'acier ondulées et dont les ondes parcourent toute la circonférence du réservoir est désignée «ondulée horizontalement».
- (3) Une paroi de coque cylindrique comportant des raidisseurs fixés à l'extérieur est désignée «raidie extérieurement», quel que soit l'espacement des raidisseurs.

5.3 Résistance de la paroi de coque de réservoir

- (1)P La résistance de la coque cylindrique doit être évaluée au moyen des dispositions de l'ENV 1993-1-6, sauf lorsque les alinéas de 5.4 contiennent des dispositions jugées satisfaire aux dispositions de cette norme.
- (2) Le coefficient de soudure des soudures en bout à pénétration complète peut être pris comme unité, sous réserve que les exigences du prEN 265001 ou du prEN 265002, selon ce qui convient, soient satisfaites.
- (3) Pour d'autres types de liaison, il convient que le calcul du joint soit conforme à l'ENV 1993-1-1.

5.4 Considérations relatives aux supports et aux ouvertures

5.4.1 Généralités

- (1) Si des contraintes de cisaillement locales sont induites par des supports locaux et des raidisseurs porteurs, la résistance critique au voilement en cisaillement, évaluée en termes de valeur locale du transfert de cisaillement entre le raidisseur et la coque, peut être évaluée à la contrainte de cisaillement la plus élevée comme suit :

$$\tau_{xyRc} = 1,4 E \frac{t}{r} \sqrt{\frac{r}{L_0} \sqrt{\frac{t}{r}}} \quad \dots (5.1)$$

où :

$$L_0 = \tau_{\max} / (d\tau / dy) \quad \dots (5.2)$$

et $d\tau / dy$ est le taux de variation circonférentiel du cisaillement, la distance par rapport au raidisseur étant la distance moyenne sur la zone concernée.

5.4.2 Coque supportée par une jupe

(1) Lorsque la coque cylindrique est soutenue par une jupe, il convient que cette dernière satisfasse aux dispositions de l'ENV 1993-4-1.

5.4.3 Coque cylindrique supportée de façon discontinue

(1) Lorsque la coque cylindrique est supportée de façon discontinue par des poteaux ou autres dispositifs, il convient que les dispositions de l'ENV 1993-4-1 concernant cette condition soient satisfaites.

5.4.4 Réservoirs à support discret avec poteaux sous la trémie

(1) Il convient que les réservoirs à support discret avec poteaux sous la trémie satisfassent aux dispositions de l'ENV 1993-4-1.

5.4.5 Détails sur le support local de réservoirs cylindriques

5.4.5.1 Supports locaux sous la paroi du cylindre

(1) Il convient que les supports locaux sous la paroi du cylindre satisfassent aux dispositions de l'ENV 1993-4-1.

5.4.5.2 Consoles locales sur le côté d'un cylindre

(1) Aux consoles locales, il convient que la paroi de la coque cylindrique satisfasse aux dispositions de l'ENV 1993-4-1.

5.4.6 Fixations locales sur des parois cylindriques

(1) Aux niveaux des fixations locales agissant sur la paroi de la coque cylindrique, il convient que le calcul de la paroi cylindrique satisfasse aux dispositions de l'ENV 1993-4-1.

5.4.7 Ouvertures dans les parois de réservoir

5.4.7.1 Généralités

(1)P Lorsqu'une ouverture dans la paroi de la coque cylindrique réduit la capacité portante ou compromet la stabilité de la coque, l'ouverture doit être renforcée.

(2) Il est possible de réaliser ce renforcement de différentes façons :

- augmentation de l'épaisseur de la plaque de la coque ;
- adjonction d'une plaque de renfort ;
- installation de tubulure.

NOTE Le calcul en fonction de l'état limite plastique (EL1) régit en général la zone de chargement à haute pression (liquide et interne), alors que des considérations liées à la stabilité (EL3) régiront probablement le calcul concernant des zones où l'épaisseur de plaque est mince en raison de faibles pressions (viroles supérieures).

5.4.7.2 Tubulures de coque de diamètre extérieur inférieur à 80 mm

(1) Le renforcement n'est pas indispensable, sous réserve que l'épaisseur de la paroi à l'emplacement de la tubulure ne soit pas inférieure aux valeurs données dans le Tableau 5.1.

Tableau 5.1 — Épaisseur minimale du corps de la tubulure

Diamètre extérieur d_n du trou d'homme ou de la tubulure (mm)	Épaisseur nominale minimale $t_{ref,n}$ (mm)	
	Acier au carbone	Acier austénitique
$d_n \leq 50$	5,0	3,5
$50 < d_n \leq 75$	5,5	5,0
$75 < d_n \leq 80$	7,5	6,0

5.4.7.3 Calcul des trous d'homme et des tubulures de coque ayant un diamètre extérieur égal ou supérieur à 80 mm pour EL1

(1) Le calcul peut être effectué soit par la méthode de remplacement de surface conformément aux paragraphes (2) et (3), soit par la méthode décrite dans le paragraphe (4).

(2) Il convient de prévoir un renforcement de la section transversale ΔA dans le plan vertical où se situe le centre de l'ouverture, au moyen de l'équation :

$$\Delta A = 0,75 d t_{ref} \quad \dots (5.3)$$

où :

d est le diamètre du trou découpé dans la plaque de la coque ;

t_{ref} est l'épaisseur requise par le calcul pour EL1 concernant la plaque de la coque sans ouverture.

(3) La surface de renfort ΔA peut être obtenue par une ou l'autre ou toute combinaison des trois méthodes suivantes :

a) L'installation d'un corps de tubulure ou de trou d'homme. La partie du corps qui peut être considérée comme un renfort est celle qui est située dans l'épaisseur de la plaque de la coque et à une distance égale ou inférieure à quatre fois l'épaisseur du corps à partir de la surface de la plaque de la coque, sauf si l'épaisseur du corps diminue à l'intérieur de cette même distance, la limite étant le point où s'amorce la réduction.

b) L'adjonction d'une plaque d'insert épaissie ou d'une plaque de renfort, la limite de renforcement étant telle que $1,5d < d_n < 2d$, où d_n est le diamètre efficace de renforcement. Une plaque de renfort non circulaire peut être utilisée, sous réserve que les exigences minimales soient satisfaites.

c) L'installation d'une plaque de coque d'une épaisseur supérieure à celle requise par le calcul pour EL1 concernant la plaque de coque sans ouverture. La limite de renforcement est identique à celle décrite en (b).

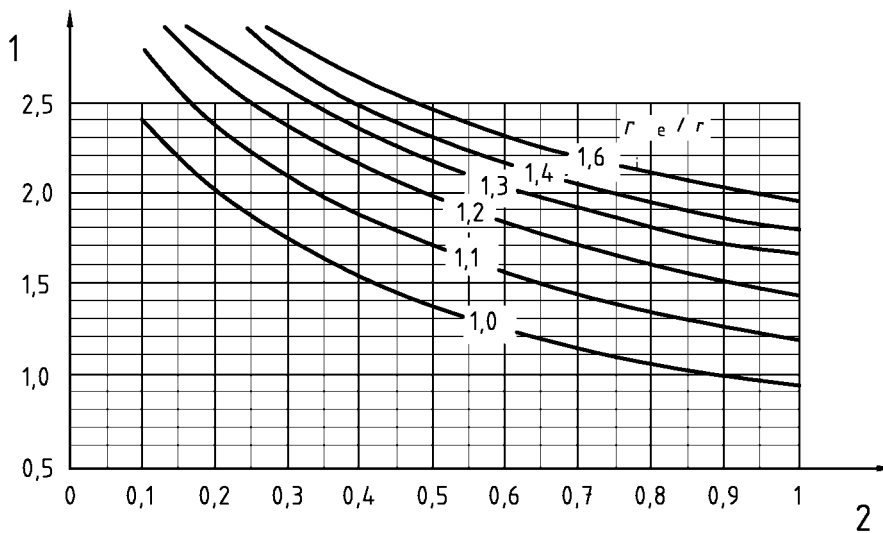
(4) En sus de la méthode de remplacement de surface spécifiée en (2) et (3), il est aussi possible de réaliser le renforcement en introduisant un corps de tubulure dépassant des deux côtés de la plaque de la coque sur $1,17 \sqrt{r_m t_{ref,n}}$ au minimum. Il convient de ne pas utiliser cette méthode, sauf si le corps de la buse est à plus de 100 mm de la plaque du fond.

(5) Il convient de choisir une épaisseur du corps de la tubulure telle que le facteur de concentration de contrainte j ne dépasse pas 2,0. Il convient de d'obtenir ce dernier à partir de la Figure 5.1 en utilisant le facteur de remplacement y . Il convient d'évaluer le facteur de remplacement y à partir de :

$$y = 1,56 \frac{t_n}{t} \sqrt{\frac{t_n}{r_m} + \left(\frac{t_n}{2r_m} \right)^2} \quad \dots (5.4)$$

où :

- t est l'épaisseur de la plaque de la coque ;
- t_n est l'épaisseur du corps de la tubulure ;
- r_m est le rayon moyen de la tubulure (surface médiane de la tubulure) ;
- r_e est le rayon extérieur de la tubulure ;
- r_i est le rayon intérieur de la tubulure.



Légende

- 1 Facteur de concentration j
- 2 Facteur de remplacement y

Figure 5.6 — Facteur de concentration de contrainte pour des tubulures de type auto-renforcé

5.4.7.4 Calcul pour EL3 en présence d'ouvertures dans la coque

(1) Il est possible de négliger les effets des ouvertures sur la stabilité des coques pour autant que la taille de l'ouverture sans dimension η soit inférieure à $\eta_{max} = 0,6$, η étant obtenu par :

$$\eta = \frac{r_0}{\sqrt{rt}} \quad \dots (5.5)$$

où :

- r est le rayon de la coque cylindrique près de l'ouverture ;
- t est l'épaisseur de la paroi de coque non raidie près de l'ouverture ;
- r_0 est le rayon de l'ouverture.

- (2) Lorsque l'ouverture est rectangulaire, le rayon d'ouverture équivalent peut être pris comme égal à :

$$r_0 = \frac{a+b}{4} \quad \dots (5.6)$$

où :

a est la longueur du côté horizontal de l'ouverture ;

b est la hauteur verticale de l'ouverture.

(3) Lorsque le diamètre de l'ouverture r_0 est inférieur au tiers du rayon r de la coque cylindrique, il n'est pas nécessaire de prévoir, du fait de l'ouverture, une réduction de la résistance au flambement évaluée, pour autant que la surface de section transversale enlevée par l'ouverture soit inférieure à la surface de section transversale de renforcement ΔA . Le renforcement peut être assuré conformément à 5.4.7.3 (3) au moyen de raidisseurs dans la direction méridienne.

(4) Si des raidisseurs dans la direction méridienne sont utilisés pour renforcer l'ouverture, il convient de réduire la section transversale de chaque raidisseur aux extrémités afin d'empêcher le flambement dû à une concentration de contrainte dans la plaque de la coque proche des extrémités des raidisseurs.

5.4.8 Ancrage du réservoir

(1)P L'ancrage doit être principalement fixé à la coque cylindrique et non à la seule plaque du fond.

(2)P Le calcul doit prévoir les mouvements du réservoir dus à des changements thermiques et à la pression hydrostatique afin de réduire au minimum les contraintes induites par ces effets dans la coque.

(3) Il convient de calculer les forces d'ancrage dues aux actions du vent pour un support rigide conformément à la théorie des coques : il convient de relever que ces forces sont considérablement supérieures à celles obtenues par la théorie des poutres.

(4) Il convient que le calcul de la coque cylindrique pour ce qui concerne les forces d'ancrage et les moments fléchissants résultant de l'ancrage satisfassent aux dispositions de 5.4.5.

5.5 États limites de service

5.5.1 Bases

(1)P Les états limites de service pour les parois de plaque cylindriques doivent être :

- les déformations et les flèches qui nuisent à l'utilisation efficace de la structure ;
- les déformations, les flèches et les vibrations qui endommagent des éléments non structurels.

(2)P Les déformations, les flèches et les vibrations doivent être limitées afin de satisfaire aux critères ci-dessus.

(3) Il convient que des valeurs limites spécifiques, correspondant à l'emploi prévu, soit convenues entre le concepteur et le client.

6 Calcul des trémies coniques

(1) Il convient que le calcul des trémies coniques satisfasse aux exigences de l'ENV 1993-4-1.

7 Calcul des structures de toit circulaires

7.1 Bases

7.1.1 Généralités

(1)P Les toits de réservoir en acier doivent être calculés de façon à satisfaire les exigences de calcul fondamentales pour l'état limite ultime données dans la section 2.

(2)P L'évaluation de la sécurité de la coque sphérique ou conique doit être effectuée au moyen des dispositions de l'ENV 1993-1-6.

(3)P L'évaluation de la sécurité de la structure porteuse du toit doit être effectuée au moyen des dispositions de l'ENV 1993-1-1.

7.1.2 Calcul du toit

(1)P Le toit doit être vérifié pour ce qui concerne :

- la résistance au flambement ;
- la résistance des assemblages (liaisons) ;
- la résistance à la rupture sous pression interne.

(2) Il convient que la tôle de toit satisfasse aux dispositions de l'ENV 1993-1-6, sauf lorsque les paragraphes 7.3 à 7.5 donnent une autre approche possible.

7.2 Distinction des types structurels de toit

(1) Le toit peut être de forme sphérique, conique, torisphérique ou toriconique. Lorsque des pressions internes élevées se produisent au dessus de la surface du liquide, il convient de choisir de préférence une forme torisphérique ou toriconique.

(2) Une structure de toit dans l'une des formes décrites en (1) peut être soit sans support, soit avec support d'éléments structurels.

(3) La structure porteuse du toit selon (2) peut être soutenue par des poteaux.

(4) La structure porteuse du toit peut être disposée au dessous ou au dessus de la tôle du toit.

(5) La tôle de toit peut être :

- a) supportée par la structure du toit sans liaison ;
- b) fixée à la structure du toit.

(6) Lorsque la frangibilité du toit est requise, il convient d'utiliser le type (a).

(7) Lorsque la structure porteuse du toit est externe, il convient d'utiliser le type (b).

7.3 Résistance des toits circulaires

(1) Il convient que la tôle de toit satisfasse aux dispositions de l'ENV 1993-1-6, sauf si des dispositions spéciales sont données en 7.4.

(2) Il convient que la structure porteuse du toit satisfasse aux dispositions de l'ENV 1993-1-1.

(3)P Les toits torisphériques et toriconiques doivent être calculés de façon à empêcher, sous pression interne, le flambement de la zone charnière.

7.4 Considérations concernant des types structurels spécifiques

7.4.1 Structure de toit sans support

- (1) Il convient que l'exécution des toits sans support soit réalisée par des soudures en bout ou des soudures à double recouvrement.
- (2) Dans l'exécution par soudures à double recouvrement, il convient de prendre en compte, dans le modèle utilisé pour l'analyse, la réduction de la résistance au flambement et l'état limite plastique du fait des excentricités de l'assemblage.

7.4.2 Toit conique ou en dôme avec structure porteuse

7.4.2.1 Calcul de la tôle

- (1) La tôle de toit peut être calculée à l'aide de la théorie des grandes déformations.
- (2)P Lorsque la frangibilité du toit est requise, les tôles du toit ne doivent pas être fixées à la structure porteuse interne du toit.

7.4.2.2 Calcul de la structure porteuse

- (1)P La structure porteuse du toit doit satisfaire aux dispositions de l'ENV 1993-1-1.
- (2) Si la tôle du toit est fixée à la structure porteuse du toit, une largeur efficace de la tôle peut être prise comme partie de la structure porteuse. Cette largeur utile peut être prise égale à $16t$, sauf si une valeur plus grande est confirmée par l'analyse.
- (3)P Pour les toits sur poteaux, la possibilité d'un tassement des fondations doit faire l'objet d'un examen spécial.

7.4.3 Jonction toit-coque (jonction à l'égout du toit)

- (1)P La jonction entre le toit et le cylindre (jonction à l'égout du toit) doit être calculée de façon à ce qu'elle transmette à partir du toit la charge verticale descendante totale (poids propre, neige, charge utile et pression négative interne).
- (2) Il convient que la jonction entre le toit et le cylindre satisfasse aux dispositions de l'ENV 1993-1-6. Si les conditions définies en 11.1 (1) sont remplies, la méthode de calcul simplifiée donnée en 11.2.5 peut être appliquée.
- (3) Pour le calcul de la frangibilité du toit, il convient que la surface de compression A satisfasse à la condition :

$$A \leq \frac{W}{2\pi \tan \alpha f_{yd}} \quad \dots (7.1)$$

où :

- W est le poids total de la coque et de tout cadre (à l'exclusion des tôles de toit) supporté par la coque et le toit ;
 α est l'angle formé par le toit et un plan horizontal à la jonction entre le toit et le cylindre.

7.5 États limites de service

- (1)P Les états limites de service concernant les toits de réservoirs sont :
 - les déformations et les flèches qui nuisent à l'utilisation efficace de la structure ;
 - les déformations, les flèches ou les vibrations qui endommagent les éléments non structurels.
- (2)P Les déformations, les flèches et les vibrations doivent être limitées afin de satisfaire aux critères ci-dessus.
- (3) Il convient que des valeurs limites spécifiques, correspondant à l'emploi prévu, soient convenues entre le concepteur et le client.

8 Calcul des jonctions de transition au fond de la coque et aux poutres annulaires de support

(1) Il convient que le calcul des jonctions de transition aux bords du fond avec les poutres annulaires supports satisfasse aux exigences de l'ENV 1993-4-1.

9 Calcul des réservoirs rectangulaires et à côtés plans

9.1 Bases

(1) Il convient de concevoir un réservoir rectangulaire soit comme un caisson renforcé dans lequel l'action structurelle prédominante est la flexion, soit en tant que structure fine à membrane dans laquelle l'action prédominante est constituée de contraintes dans la membrane se développant après une déformation importante.

(2)P Lorsque le caisson est défini pour une action fléchissante, les assemblages doivent être calculés de manière à garantir que la connectivité prise par hypothèse dans l'analyse de contrainte est obtenue dans l'exécution.

9.2 Distinction des formes structurelles

9.2.1 Réservoirs non raidis

(1) Il convient de traiter une structure fabriquée à partir de plaques en acier planes sans raidisseurs fixés comme un «caisson non renforcé».

(2) Il convient de traiter également une structure raidie seulement aux joints entre plaques non coplanaires comme un «caisson non raidi».

9.2.2 Caissons raidis

(1) Il convient de traiter une structure fabriquée à partir de plaques planes munies de raidisseurs fixés sur la surface comme un «caisson raidi». Les raidisseurs peuvent être circonférentiels, verticaux ou orthogonaux.

9.2.3 Réservoirs avec attaches

(1) Les réservoirs avec attaches peuvent être carrés ou rectangulaires.

9.3 Résistance des parois verticales

9.3.1 Calcul des plaques non raidies

(1) Pour la flexion, il convient de calculer une plaque non raidie qui soit une plaque bidimensionnelle soumise aux actions du liquide stocké, à la pression au dessus du liquide, aux contraintes résultant de l'action du diaphragme et à l'action fléchissante locale des accessoires ou tuyauteries.

9.3.2 Calcul des plaques raidies

(1) Il convient de calculer les tôles ondulées ou trapézoïdales orientées dans le sens horizontal en fonction de la flexion globale sous les actions du liquide stocké, de la pression au dessus du liquide, des contraintes résultant de l'action du diaphragme et de l'action fléchissante locale des fixations ou des tuyauteries.

(2) Il convient de calculer les propriétés de flexion efficace et la résistance à la flexion des plaques raidies conformément à l'ENV 1993-1-3.

(3) Il est possible de déterminer la rigidité au cisaillement et la résistance au cisaillement dans le plan comme étant analogues à celles de la plaque plane si la tôle est assemblée en continu sur tous ses bords aux éléments adjacents.

NOTE Si l'assemblage ne porte que sur des parties du bord vertical (par exemple uniquement dans les creux de la tôle ondulée ou trapézoïdale), les contraintes peuvent augmenter et la rigidité diminuer de façon spectaculaire. En principe, de telles constructions ne seront pas utilisées en raison d'exigences d'étanchéité à l'eau.

9.3.3 Flexion globale provenant de l'action directe du liquide stocké et de la pression au dessus du liquide

(1) Il convient d'examiner la flexion horizontale résultant de la pression normale exercée sur la paroi. Il convient que les charges soient supportées par une action fléchissante soit unidirectionnelle, soit bidirectionnelle.

9.3.4 Contraintes sur la membrane provenant de l'action du diaphragme

(1) Il convient que le calcul prenne en compte les contraintes en traction de la membrane qui se développent dans les parois par suite de pressions hydrostatiques exercées sur les parois opposées à la normale de la paroi en question.

(2) Il convient aussi que le calcul prenne en compte les contraintes de compression de la membrane susceptibles de se développer sous l'effet de l'action du vent sur d'autres parois qui sont au droit de la paroi en question.

9.3.5 Action fléchissante locale provenant d'accessoires ou de tuyauteries

(1) Il convient d'éviter dans toute la mesure du possible une action fléchissante locale provenant des accessoires et tuyauteries. Toutefois, si cela n'est pas possible, il convient de procéder à une vérification des contraintes et déformations locales près de l'accessoire.

9.4 États limites de service

(1)P Les états limites de service pour les parois de réservoirs rectangulaires en acier sont :

- déformations ou flèches qui affectent négativement l'utilisation efficace de la structure ;
- déformations, flèches ou vibrations qui endommagent les éléments non structurels.

(2)P Les déformations, les flèches et les vibrations doivent être limitées afin de satisfaire aux critères ci-dessus.

(3) Il convient que des valeurs limites spécifiques, correspondant à l'emploi prévu, soit convenues entre le concepteur et le client.

10 Exigences de fabrication et de montage par rapport au calcul

(1)P Le réservoir doit être fabriqué et monté conformément au prEN 265001 ou au prEN 265002, selon ce qui convient.

11 Calcul simplifié

11.1 Généralités

(1)P L'analyse simplifiée de la présente section est applicable lorsque toutes les conditions suivantes sont remplies :

- les restrictions de 1.1 (1)P sont observées ;
- la structure du réservoir est du type représenté à la Figure 11.1 ;
- les seules actions internes sont la pression liquide et la pression gazeuse au dessus de la surface du liquide ;
- tous les chargements suivants peuvent être négligés : charges induites thermiquement, actions sismiques, charges résultant d'un tassement inégal ou de connexions et charges en situations d'urgence ;
- aucune virole n'est construite avec une épaisseur inférieure à celle de la virole qui lui est immédiatement supérieure, à l'exception de la zone adjacente à l'égout du toit ;
- la valeur de calcul de la contrainte circonférentielle dans la coque du réservoir est inférieure à 435 N/mm^2 ;
- pour un toit sphérique, le rayon de courbure est compris entre 0,8 et 1,5 fois le diamètre du réservoir ;
- pour un toit conique, la pente du toit est dans un rapport de 1 à 5 s'il est autoportant ou de 1 à 16 s'il est avec charpente à poteaux ;
- le gradient de calcul du fond de réservoir n'est pas supérieur à 1:100 ;
- le fond est entièrement supporté ou supporté par des poutres parallèles faiblement espacées ;
- la pression interne caractéristique n'est pas inférieure à $-8,5 \text{ mbar}$ et n'est pas supérieure à 60 mbar ;
- le nombre de cycles de chargement est tel qu'il n'existe pas de risque de rupture de fatigue.

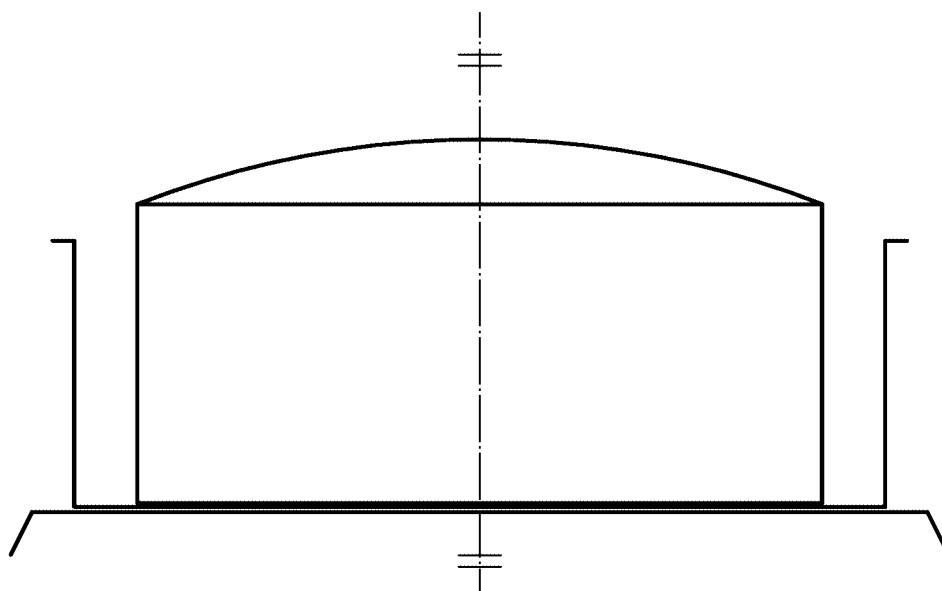


Figure 11.7 — Structure de réservoir pour laquelle un calcul simplifié est applicable

11.2 Calcul de toit fixe

11.2.1 Coque de toit non raidie à soudures en bout ou à soudures à double recouvrement

(1) Il n'est pas nécessaire de prendre en compte une possible non uniformité de la charge répartie, pour autant que la valeur locale maximale de la charge de calcul répartie soit utilisée en (3) et (5) pour représenter la pression répartie sur le toit.

(2) Lorsqu'une charge concentrée est appliquée, il convient d'effectuer une évaluation séparée conformément à la section 7.

(3) Il convient de vérifier la résistance du toit sous la pression interne de calcul $p_{o,d}$ en utilisant :

$$\text{— pour les toits sphériques } \frac{p_{o,d} R_s}{2t} \leq j f_{y,d} \quad \dots (11.1)$$

$$\text{— pour les toits coniques } \frac{p_{o,d} R_c}{t} \leq j f_{y,d} \quad \dots (11.2)$$

où :

$$R_c = r \sin \alpha \text{ pour un toit conique}$$

où :

j est le coefficient de soudure ;

$p_{o,d}$ est la composante radiale dirigée vers l'extérieur de la charge de calcul uniformément répartie sur le toit (c'est-à-dire la valeur caractéristique multipliée par le facteur partiel conformément à l'annexe A) ;

r est le rayon de la paroi de la coque cylindrique du réservoir ;

R_c est le rayon de courbure dans le cas d'un toit conique ;

R_s est le rayon de courbure dans le cas d'un toit sphérique ;

t est l'épaisseur de la plaque de toit ;

α est la pente du toit conique par rapport à l'horizontale.

(4) Il convient de prendre un coefficient de soudure égal à :

$$j = 1,00 \text{ pour les soudures en bout ;}$$

$$j = 0,50 \text{ pour les joints à recouvrement avec soudures d'angle sur les deux côtés.}$$

(5) Il convient de vérifier la stabilité du toit sous pression externe de calcul $p_{i,d}$ en utilisant :

$$p_{i,d} \leq 0,05 \left\{ 1,21 E \left(\frac{t}{R_0} \right)^2 \right\} \quad \dots (11.3)$$

où :

$$R_0 = R_s \text{ pour un toit sphérique ;}$$

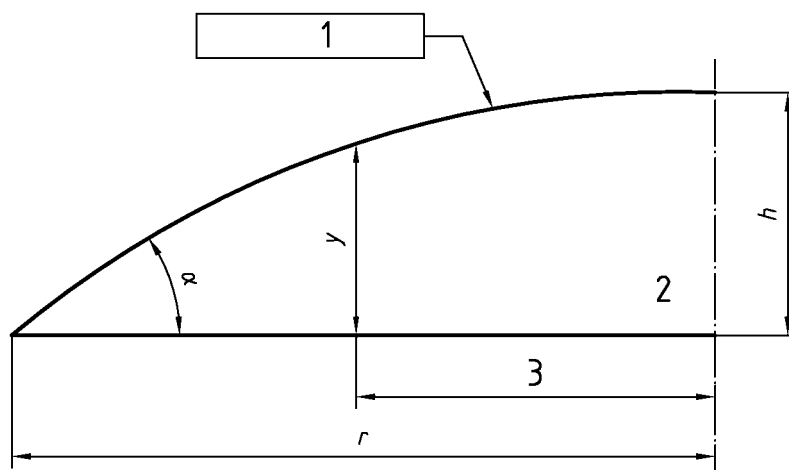
$$R_0 = R_c \text{ pour un toit conique ;}$$

où :

$p_{i,d}$ est la composante radiale dirigée vers l'intérieur de la charge de calcul uniformément répartie sur le toit (c'est-à-dire la valeur caractéristique multipliée par le facteur partiel conformément à l'annexe A).

11.2.2 Toit autoportant avec structure

- (1) Il convient que l'épaisseur spécifiée de toute tôle de toit ne soit pas inférieure à 3 mm pour les aciers inoxydables et ne soit pas inférieure à 5 mm pour les autres aciers.
- (2) Les tôles de toit peuvent être calculées à l'aide de la théorie des grandes déflexions.
- (3)P Le calcul de la structure porteuse du toit doit satisfaire aux exigences de l'ENV 1993-1-1.
- (4) Sous réserve que la charge répartie ne s'écarte pas fortement de la symétrie par rapport à l'axe du réservoir, il est possible d'utiliser la méthode suivante.



Légende

- 1 Profil du toit
- 2 Axe du réservoir
- 3 $x = \xi r$

Figure 11.2 — Coordonnées d'un toit de réservoir

- (5) Pour les toits sphériques soumis à l'action de charges réparties provenant d'une charge d'exploitation, de l'action de la neige, de l'action du vent, d'une charge et d'une pression permanentes, il convient de prendre la composante verticale maximale comme la valeur de calcul p_{vd} agissant soit vers le haut soit vers le bas, p_{vd} étant négatif dans le premier cas. Il convient de prendre une force verticale totale de calcul par chevron égale à

$$P_d = \beta r^2 p_{vd} \quad \dots (11.4)$$

où :

$$\beta = \pi/n$$

où :

n est le nombre de chevrons ;

r est le rayon du réservoir ;

p_{vd} est la composante verticale maximale de la charge de calcul répartie (voir annexe A), y compris le poids propre de la structure porteuse (positive vers le bas) ;

P_d est la force de calcul verticale totale par chevron.

(6) Dans chaque chevron, l'effort normal N_d et le moment fléchissant M_d pour le calcul conformément à l'ENV 1993-1-1 peuvent être obtenus à partir de :

$$N_d = 0,375 \frac{r}{h} P_d \quad \dots (11.5)$$

$$M_d = \frac{1}{3} \left(\frac{r}{1-\varepsilon} \right) \left\{ 1 - \left(\frac{x}{r} \right)^3 - 1,10 \left(\frac{y}{h} \right) \right\} P_d \quad \dots (11.6)$$

sous réserve que les conditions suivantes soient remplies :

$$\rho_{vd} \geq 1,2 \text{ kN/m}^2 \quad \dots (11.7)$$

$$I_y \geq \frac{N_d r^2}{\pi^2 E} \quad \dots (11.8)$$

$$b_K \geq 2 h_K \quad \dots (11.9)$$

$$A_1 \geq A_2 \quad \dots (11.10)$$

$$h_K^2 \left(\frac{A_1 A_2}{A_1 + A_2} \right) \geq \frac{I_y}{2\beta} \quad \dots (11.11)$$

où :

$$\varepsilon = N_d \frac{(0,6r)^2}{\pi^2 E I_y} \quad \dots (11.12)$$

où :

h est la flèche du toit du réservoir, voir Figure 11.2 ;

x est la distance radiale à partir de la ligne centrale du réservoir, voir Figure 11.2 ;

y est la hauteur verticale du toit à la coordonnée x , voir Figure 11.2 ;

b_K est l'épaisseur d'aile du renfort central, voir Figure 11.3 ;

h_K est la distance verticale entre les semelles du renfort central, voir Figure 11.3 ;

A_1 est l'aire de la semelle supérieure du renfort central, voir Figure 11.3 ;

A_2 est l'aire de la semelle inférieure du bas du renfort central, voir Figure 11.3 ;

I_y est le moment quadratique de l'aire du chevron autour de l'axe horizontal.

(7) Si le second moment de l'aire du chevron I_y varie sur la longueur du chevron (par exemple en raison d'une largeur efficace variable des plaques de toit connectées aux chevrons), la valeur de I_y à une distance de $0,5r$ à partir de l'axe du réservoir peut être utilisée en (6).

(8) Sous réserve que les conditions données en (6) soient satisfaites, le calcul du renfort central peut être vérifié en contrôlant seulement sa membrure inférieure comme suit.

(9) Pour autant qu'il y ait au moins 10 chevrons uniformément espacés, la valeur de calcul de l'effort dans les éléments $N_{r,d}$ et du moment fléchissant $M_{r,d}$ pour le renfort central peut être calculée en utilisant :

$$N_{r,d} = \frac{N_{2,d}}{2\beta} \quad \dots (11.13)$$

$$M_{r,d} = \frac{\rho\beta N_{2,d}}{2(3 + \beta^2)} \quad \dots (11.14)$$

où :

$$N_{2,d} = \frac{N_d e_o}{h_k} + \frac{M_d}{h_k} \quad \dots (11.15)$$

où :

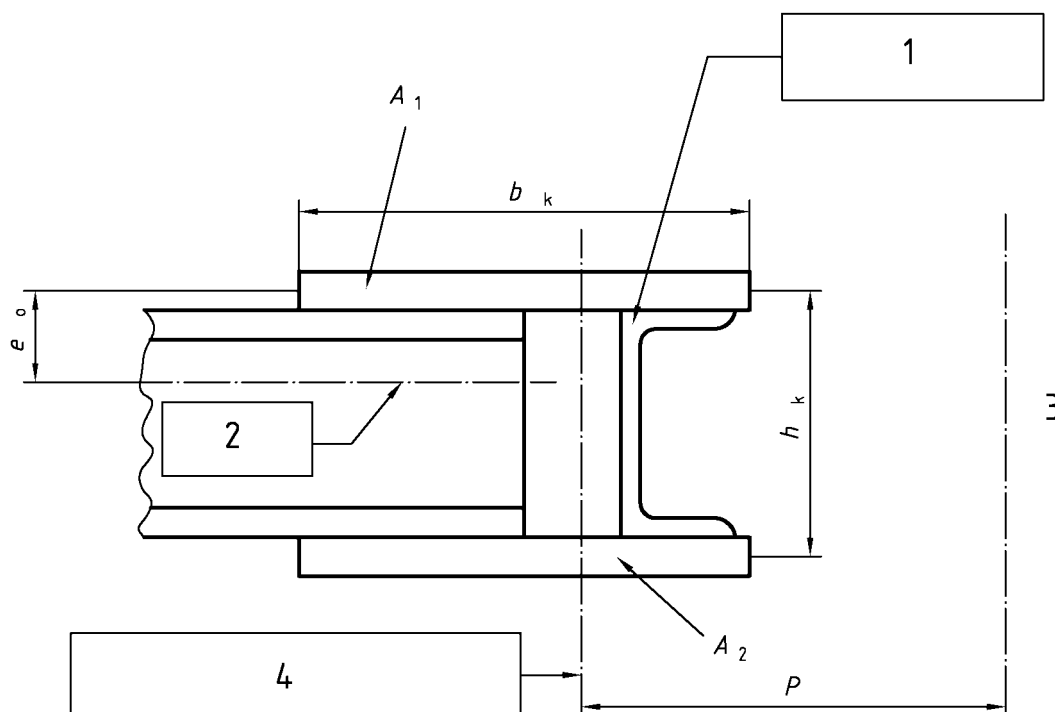
$N_{2,d}$ est la valeur de calcul de la force dans la membrure inférieure du renfort central ;

N_d est la valeur de calcul de la force dans le chevron ;

M_d est la valeur de calcul du moment fléchissant dans le chevron à son extrémité intérieure ;

e_o est l'excentricité verticale de l'axe neutre du chevron par rapport à la semelle du haut du renfort central, voir Figure 11.3 ;

ρ est le rayon de l'axe neutre du renfort central, voir Figure 11.3.



Légende

- 1 Profil séparant les semelles
- 2 Axe de la poutre
- 3 Axe de résistance axis
- 4 Axe neutre de A_1 et A_2 pour la flexion des plaques dans le plan

Figure 11.3 — Renfort central de toit

11.2.3 Toit avec charpente à poteaux

- (1) Il convient que l'épaisseur spécifiée de toute tôle de toit ne soit pas inférieure à 3 mm pour les aciers inoxydables et ne soit pas inférieure à 5 mm pour les autres aciers.
- (2) Les tôles de toit peuvent être calculées à l'aide de la théorie des grandes déflexions.
- (3)P Le calcul de la structure porteuse du toit doit satisfaire aux exigences de l'ENV 1993-1-1.

11.2.4 Entretoisement

- (1)P Si les tôles de toit ne sont pas connectées aux chevrons, l'entretoisement doit être utilisé.
- (2) Pour les toits de diamètre supérieur à 15 m, il convient de prévoir au moins deux travées d'entretoisement (c'est-à-dire deux paires de chevrons adjacents reliés par des éléments à treillis). Il convient d'espacer régulièrement les travées d'entretoisement sur la circonférence du réservoir.
- (3) Pour les toits à entretoisement dont le diamètre est compris entre 15 m et 25 m, il convient de prévoir un renfort circonférentiel supplémentaire. Pour les toits à entretoisement de diamètre supérieur à 25 m, il convient de prévoir deux renforts circonférentiels supplémentaires.
- (4) Il convient de calculer l'entretoisement pour une force de stabilisation égale à 1 % de la somme des efforts normaux dans les éléments stabilisés.

11.2.5 Joint de bordure à la jonction coque-toit (jonction d'égout de toit)

- (1) Il convient de vérifier la force dans le joint de bordure efficace (surface où le toit est relié à la coque) en utilisant :

$$\frac{N_d}{A_{\text{eff}}} \leq f_{y,d} \quad \dots (11.16)$$

où :

$$N_d = \frac{p_{vd} r^2}{2 \tan \alpha} \quad \dots (11.17)$$

où :

A_{eff} est l'aire efficace du joint de bordure indiquée dans la Figure 11.4 ;

α est la pente du toit par rapport à l'horizontale au point de jonction ;

p_{vd} est la composante verticale maximale de la charge répartie de calcul, y compris le poids propre de la structure porteuse (positive vers le bas).

- (2) Lorsque la distance entre chevrons adjacents à leurs points d'assemblage avec le joint de bordure ne dépasse pas 3,25 m, il n'est pas nécessaire de vérifier la stabilité du joint de bordure.

- (3) Lorsque la charge répartie de calcul p_{vd} agit vers le haut, les moments fléchissants dans le joint de bordure peuvent être ignorés.

- (4) Lorsque la distance entre chevrons adjacents à leurs points d'assemblage avec le joint de bordure ne dépasse pas 3,25 m, et lorsque la charge répartie de calcul p_{vd} agit vers le bas, les moments fléchissants dans le joint de bordure peuvent être ignorés.

- (5) Lorsque la distance entre chevrons adjacents à leurs points d'assemblage avec le joint de bordure dépasse 3,25 m, il convient de prendre en compte les moments fléchissants dans le joint de bordure autour de son axe vertical en sus de l'effort normal dans le joint N_d . Il convient d'évaluer les moments fléchissants dans le joint (valeurs positives induisant des contraintes en traction sur l'intérieur du joint) au moyen des expressions suivantes :

Au niveau de l'assemblage avec le chevron :

$$M_{s,d} = - \left(\frac{p_{vd} r^3}{4 \tan \alpha} \right) \left(1 - \frac{\beta}{\tan \beta} \right) \quad \dots (11.18)$$

A la moitié de la portée entre les chevrons :

$$M_{F,d} = - \left(\frac{\rho_{vd} r^3}{4 \tan \alpha} \right) \left(\frac{\beta}{\sin \beta} - 1 \right) \quad \dots (11.19)$$

NOTE Lorsque ρ_{vd} agit vers le haut, il est pris en valeur négative, ce qui change le signe de l'ensemble des efforts normaux et moments fléchissants.

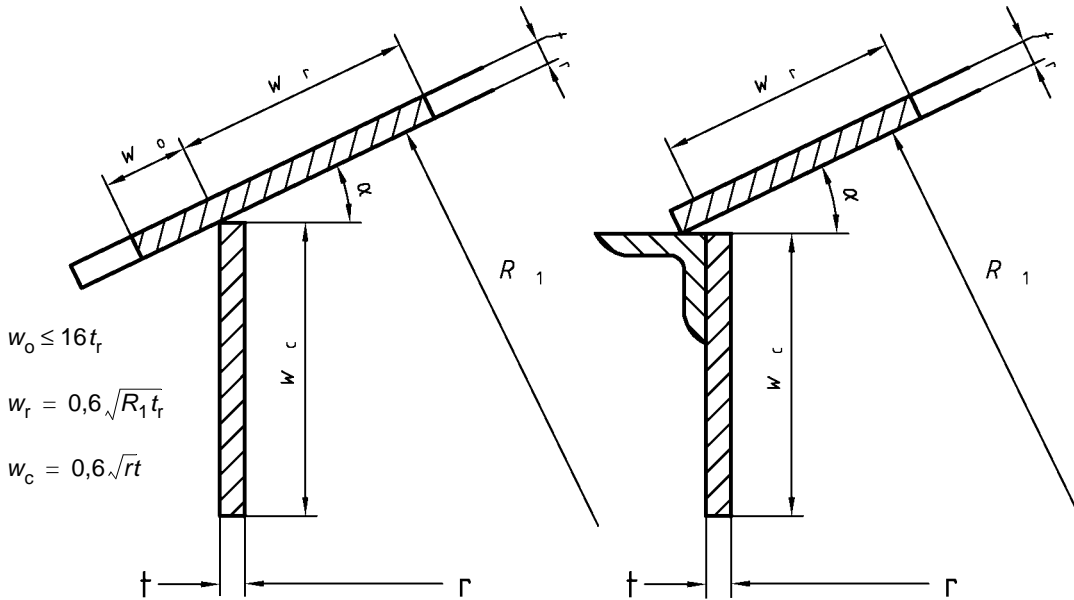


Figure 11.4 — Joint de bordure à la jonction coque-toit

11.3 Calcul de la coque

11.3.1 Plaques de la coque

(1) Il convient de vérifier la contrainte circonférentielle normale due à des charges liquides et à la pression interne dans chaque virole de la coque en utilisant :

$$\left[\gamma F_p g H_{red} + p_d \right] \left(\frac{r}{t} \right) \leq f_{y,d} \quad \dots (11.20)$$

où la valeur de H_{red} pour la virole de rang j , dénotée par $H_{red,j}$, est déterminée selon sa relation avec la valeur de la virole immédiatement supérieure, soit la virole de rang $(j + 1)$:

$$H_{red,j} = H_j - \Delta H \quad \text{si } \frac{H_{red,j}}{f_{y,d,j}} \geq \frac{H_{red,j+1}}{f_{y,d,j+1}} \quad \dots (11.21)$$

$$H_{red,j} = H_j \quad \text{si } \frac{H_{red,j}}{f_{y,d,j}} < \frac{H_{red,j+1}}{f_{y,d,j+1}} \quad \dots (11.22)$$

où :

$\Delta H = 0,30$ m

où :

ρ est la masse volumique du liquide contenu ;

g est l'accélération due à la gravité ;

H_j est la distance verticale entre le bas de la virole de rang j et le niveau du liquide ;

p_d est la valeur de calcul de la pression au dessus du niveau du liquide (c'est-à-dire la valeur caractéristique multipliée par le facteur partiel conformément à l'annexe A).

11.3.2 Renforts annulaires

(1) Les réservoirs à toit fixe avec structure peuvent être considérés comme suffisamment raidis au sommet de la coque par la structure du toit. Il n'est pas nécessaire d'utiliser un raidisseur primaire.

(2) Il convient de renforcer les réservoirs à sommet ouvert d'un collet primaire placé au sommet ou près du sommet de la virole supérieure. Le module résistant élastique minimal W_{\min} du collet primaire peut être déterminé à partir de :

$$W_{\min} = \frac{r^2 H_0}{4 \cdot 300 \cdot 000} \quad \dots (11.23)$$

où :

H_0 est la hauteur de la coque du réservoir ;

r est le rayon du réservoir ;

W_{\min} est le module résistant élastique minimal.

(3) L'évaluation du module résistant élastique réel W du collet peut inclure les parties de la coque du réservoir qui sont comprises dans une distance de $16t$ à partir du sommet de la paroi.

(4) Si le rayon du réservoir est supérieur à 30 m, le rayon peut être pris par hypothèse en (2) comme $r = 30$ m.

(5) Lorsque les renforts annulaires sont situés à plus de 600 mm sous le sommet de la coque, il convient de munir le réservoir d'une cornière de rive ayant les dimensions suivantes :

- $60 \times 60 \times 5$ lorsque l'épaisseur de la virole supérieure de la coque est inférieure à 6 mm ;
- $80 \times 80 \times 6$ lorsque l'épaisseur de la virole supérieure de la coque est égale ou supérieure à 6 mm.

Pour l'une ou l'autre de ces sections de cornière, il convient que la partie horizontale ne soit pas éloignée de plus de 25 mm du rebord supérieur de la coque.

(6) Il convient d'étudier s'il est indispensable de prévoir un raidisseur secondaire pour prévenir le voilement local de la coque en utilisant la méthode suivante. Il convient de prendre pour hauteur sur laquelle le voilement de la coque peut se produire (mesuré de haut en bas à partir du sommet de la coque ou du contreventement primaire) :

$$H_E = \sum h \left(\frac{t_{\min}}{t} \right)^{2,5} \quad \dots (11.24)$$

où :

h est la hauteur de chaque virole sous le joint de bordure ou le contreventement primaire ;

t est l'épaisseur de chaque virole ;

t_{\min} est l'épaisseur de la virole la plus fine.

(7) Il convient de prendre pour hauteur jugée stable sans collet secondaire :

$$H_p = 0,46 \left(\frac{E}{\rho_d} \right) \left(\frac{t_{\min}}{r} \right)^{2,5} rK \quad \dots (11.24)$$

où :

$K = 1$ si la contrainte axiale $\sigma_{x,d}$ est en traction ... (11.26)

$$K = \left\{ 1 - \left[2,67 \left(\frac{\sigma_{x,d}}{E} \right) \left(\frac{r}{t} \right) \left(1 + \frac{1}{54} \left(\frac{r}{t} \right)^{0,72} \right) \right]^{1,25} \right\}^{0,8} \quad \text{si la contrainte axiale est en compression} \quad \dots (11.25)$$

où :

ρ_d est la valeur de calcul maximale de la composante dirigée vers l'intérieur de la pression sur la paroi de la coque (pression sur l'extérieur, pression négative sur l'intérieur) et (r/t) est pris au même emplacement que la valeur de calcul $\sigma_{x,d}$ de la contrainte axiale en compression sur la membrane.

(8) Il convient de ne pas utiliser la méthode établie en (7) lorsque la contrainte axiale est en compression, sauf si les deux conditions suivantes sont remplies :

$$\frac{r}{t} \geq 200 \quad \dots (11.28)$$

$$f_y \geq 1,15 E \left(\frac{r}{\ell} \right) \left(\frac{t}{r} \right)^{1,5} \quad \dots (11.29)$$

(9) Si $H_E \leq H_p$, il n'est pas nécessaire d'utiliser un raidisseur secondaire.

(10) Si $H_E > H_p$, il convient de subdiviser la hauteur H_E par des collets de renfort régulièrement espacés aux séparations H_p ou moins pour prévenir le flambement de la paroi de la coque. Si plus d'un collet de renfort est nécessaire, la valeur de K peut être calculée séparément pour chaque travée entre les collets, pour obtenir des distances H_p différentes entre collets de renfort conformément à (7).

(11) Si l'épaisseur de la virole à laquelle un raidisseur inférieur est fixé dépasse l'épaisseur de plaque minimale t_{\min} , il convient de procéder à un ajustement comme suit. Il convient d'évaluer la distance $H_{\text{lower,adj}}$ à laquelle il convient de placer un raidisseur inférieur sous le joint de bordure ou le collet primaire en utilisant :

... (11.30)

où :

$H_{\text{inf,ajust}}$ est la distance entre le joint de bordure ou le raidisseur primaire et la position du raidisseur secondaire à ajuster ;

H_{tmin} est la distance entre le joint de bordure ou le raidisseur primaire et la limite inférieure des viroles de la coque d'épaisseur t_{\min} .

(12) Il convient de ne pas placer les raidisseurs secondaires à moins de 150 mm d'un joint circonférentiel de réservoir.

(13) Les raidisseurs secondaires conformes au Tableau 11.1 peuvent être considérés comme suffisants pour stabiliser la coque. Il est possible d'utiliser une section transversale d'une autre forme, sous réserve que le moment quadratique moment de l'aire autour de l'axe vertical, y compris une largeur efficace de paroi de coque ne dépassant pas $16t$, ne soit pas inférieur à celui de la section transversale correspondante du Tableau 11.1.

Tableau 11.1 — Sections des raidisseurs secondaires

Diamètre du réservoir (m)	Cornière
$D \leq 20$	100 × 65 × 9
$20 < D \leq 36$	120 × 80 × 10
$36 < D \leq 48$	150 × 100 × 10
$48 < D$	200 × 100 × 12
NOTE Il convient que la grande aile de la cornière soit en position horizontale.	

11.3.3 Ouvertures

(1) Il convient de calculer les ouvertures et les supports conformément à 5.4.7.

11.4 Calcul du fond

- (1)P Le calcul de la tôle de fond doit prendre en compte la corrosion.
- (2) Il convient que les tôles de fond soient soudées à recouvrement ou soudées en bout. Pour des précisions concernant la soudure, voir le prEN 265001.
- (3) Il convient que l'épaisseur spécifiée des tôles de fond ne soient pas inférieure à la spécification du Tableau 11.2, tolérance de corrosion non comprise. Il convient d'utiliser des valeurs plus importantes si elles sont requises pour résister à un soulèvement dû à la pression interne négative, sauf si un niveau minimal garanti de liquide résiduel est utilisé pour aider à résister à ce soulèvement.

Tableau 11.2 — Épaisseur nominale minimale de la tôle de fond

Matériau	Fonds soudés à recouvrement	Fonds soudés en bout
Aciers au carbone	6 mm	5 mm
Aciers inoxydables	5 mm	6 mm

- (4) Les tôles de fond supportées par des poutres parallèles (fonds surélevés) peuvent être calculées comme des poutres continues conformément à la théorie des faibles déflexions. Si la déformation de la section transversale des poutres porteuses due à la charge latérale est négligeable (par exemple poutres en béton, sections creuses, poutres à lourdes semelles), la portée de la poutre continue représentant la tôle peut être prise égale à la distance entre bords adjacents de ces éléments porteurs, et non à la distance entre les lignes centrales des éléments porteurs.
- (5) Il convient que les fonds de réservoirs de diamètre supérieur à 12,5 m aient un renfort de tôles annulaires satisfaisant aux exigences de résistance et de dureté de la virole à laquelle elles sont fixées. Il convient que le renfort de fond ait une épaisseur nominale minimale t_a , tolérance de corrosion non comprise, égale à :

$$t_a = t_s/3 + 3 \text{ mm mais non inférieure à } 6 \text{ mm} \quad \dots (11.31)$$

où t_s est l'épaisseur de la virole de coque.

- (6) Il convient que le renfort de fond n'ait pas une largeur exposée w inférieure à la valeur limite w_a , égale à :

$$w_a = 240 \frac{t_a}{\sqrt{H}} \text{ mais non inférieure à } 500 \text{ mm} \quad \dots (11.32)$$

où :

H est la hauteur de calcul maximale du liquide, en mètres ;

w_a est la largeur exposée minimale (distance entre le bord de la tôle de fond et le bord inférieur de la tôle de coque), en millimètres ;

t_a est l'épaisseur de la virole en prenant en compte la tolérance de corrosion, en millimètres.

- (7) Il convient que les joints radiaux reliant les plaques annulaires soient soudés en bout à pénétration complète. Pour des précisions concernant la soudure, voir le prEN 265001.
- (8) Il convient que la distance entre le bord extérieur de la tôle de coque et le bord extérieur des tôles de fond ou des tôles annulaires ne soit pas inférieure à 50 mm.
- (9) Il convient que la virole inférieure de la tôle de coque aux tôles annulaires ou tôles sur mesure du fond soit fixée par soudures d'angle continues des deux côtés de la tôle de la coque.

(10) Il convient que l'épaisseur de la gorge de chaque soudure d'angle soit supérieure ou égale à l'épaisseur de la tôle annulaire ou de la tôle sur mesure, pour autant qu'elle ne dépasse pas 10 mm, et, lorsque l'épaisseur de tôle de coque est inférieure à l'épaisseur de la tôle sur mesure ou de la tôle annulaire, il convient qu'elle ne dépasse pas la valeur appropriée donnée dans le Tableau 11.3.

Tableau 11.3 — Épaisseur de la gorge de soudure d'angle lorsque la tôle de coque est plus mince que la tôle sur mesure ou que la plaque annulaire

Épaisseur de la plaque de coque	Gorge maximale de la soudure d'angle
< 5 mm	2,0 mm
5 mm	4,5 mm
> 5 mm	6,0 mm

11.5 Calcul de l'ancrage

(1) Il convient de prévoir un ancrage pour les réservoirs à toit fixe, si l'une quelconque des conditions suivantes est susceptible de soulever hors de ses fondations la paroi de coque cylindrique et la plaque de fond qui en est proche :

- a) Soulèvement d'un réservoir vide dû à une pression interne de calcul contrecarrée par le poids sous corrosion réel du toit, de la coque et d'accessoires permanents :
- b) Soulèvement dû à la pression interne de calcul combinée aux actions du vent, contrecarrées par le poids sous corrosion réel du toit, de la coque et des accessoires permanents, ainsi que par le poids réel du produit restant en permanence dans le réservoir selon accord entre le concepteur, le client et l'autorité compétente.
- c) Soulèvement d'un réservoir vide dû aux actions du vent contrecarrées par le poids corrodé réel du toit, de la coque et des accessoires permanents ;
- d) Soulèvement d'un réservoir vide dû à un liquide externe consécutif à une inondation. Dans de tels cas, il est nécessaire d'examiner les effets sur le fond du réservoir, la coque du réservoir, etc., ainsi que le calcul de l'ancrage.

Pour cette vérification, il est possible de calculer les forces de soulèvement dues aux actions du vent en prenant pour hypothèse que la coque du réservoir a une section transversale rigide (théorie des poutres). Cette hypothèse implique la possibilité d'un soulèvement local. Dans les cas où aucun soulèvement local n'est permis, une analyse plus sophistiquée est exigée.

(2) Il convient d'espacer régulièrement, dans toute la mesure du possible, les points d'ancrage sur la circonférence du réservoir.

(3) Il convient que le calcul des boulons ou brides d'ancrage satisfassent aux exigences de l'ENV 1993-1-1. Il convient que la section minimale des boulons ou brides d'ancrage soit de 500 mm^2 . Si une corrosion est prévue, il convient d'ajouter une tolérance minimale de corrosion de 1 mm.

(4)P L'ancrage doit être principalement fixé à la paroi de la coque. Il ne doit pas être fixé uniquement à la plaque de fond.

(5)P Le calcul de l'ancrage doit intégrer les mouvements du réservoir dus à des changements thermiques et à la pression hydrostatique et doit réduire au minimum toute contrainte induite dans la coque.

(6) Il convient que le calcul de la coque pour ce qui concerne les efforts d'ancrage locaux et les moments fléchissants résultant de l'ancrage satisfassent aux exigences de 5.4.5 et 5.4.6 de l'ENV 1993-4-1.

(7) Il convient de n'appliquer aucun serrage initial au boulon ou à la bride d'ancrage, afin de s'assurer d'une efficacité uniquement en cas d'effort de soulèvement exercé sur la coque du réservoir.

NOTE Si les boulons ou brides d'ancrage ne sont pas pré-serrés, les efforts de soulèvement maximaux sous l'action du vent seront réduits, de sorte que le calcul décrit en (1) sera applicable. De plus, il y aura diminution des contraintes induites par la restriction des mouvements radiaux dus à des changements thermiques et à la pression hydrostatique.

Annexe A (normative)

Actions, coefficients partiels et combinaisons d'actions sur des réservoirs

A.1 Généralités

- (1)P Le calcul doit prendre en compte les valeurs caractéristique des actions énumérées de A.2.1 à A.2.13.
- (2) Il convient d'appliquer à ces valeurs caractéristiques les coefficients partiels relatifs aux actions conformément à A.3 et les règles de combinaison d'actions conformément à A.4.

A.2 Actions

A.2.1 Charges induites par les liquides

- (1)P Durant l'exploitation, la charge due au contenu doit être le poids du *produit à stocker entre le niveau de liquide maximal de calcul* et le réservoir vide.
- (2)P Durant l'essai, la charge due au contenu doit être le poids du *milieu d'essai entre le niveau de liquide maximal d'essai* et le réservoir vide.

A.2.2 Charges de pression interne

- (1)P Durant l'exploitation, la charge de pression interne doit être la charge due aux valeurs minimale et maximale spécifiées de la pression interne.
- (2)P Durant l'essai, la charge de pression interne doit être la charge due aux valeurs minimale et maximale spécifiées de la pression interne d'essai.

A.2.3 Charges induites thermiquement

- (1) Les contraintes résultant de la restriction de l'expansion thermique peuvent être ignorées si le nombre de cycles de charge dus à l'expansion thermique est tel qu'il n'existe pas de risque de rupture de fatigue ou de rupture plastique cyclique.

A.2.4 Poids propre

- (1)P Le poids propre du réservoir doit en être considéré comme la charge résultant du poids de tous les composants du réservoir et de tous les composants fixés en permanence à ce dernier.
- (2) Il convient d'adopter les valeurs numériques de l'ENV 1991-2-1.

A.2.5 Charges de l'isolation

- (1)P Les charges de l'isolation doivent être celles qui résultent du poids de l'isolation.
- (2) Il convient d'adopter les valeurs numériques de l'ENV 1991-2-1.

A.2.6 Charge d'exploitation

(1) Il convient d'adopter la charge d'exploitation répartie de l'ENV 1991-2-1, sauf spécification contraire de l'acheteur.

A.2.7 Charge d'exploitation concentrée

(1) Il convient d'adopter la charge d'exploitation concentrée de l'ENV 1991-2-1, sauf spécification contraire de l'acheteur.

A.2.8 Neige

(1) Il convient d'adopter les charges de l'ENV 1991-2-3.

A.2.9 Vent

(1) Il convient d'adopter les charges de l'ENV 1991-2-4.

(2) De plus, les coefficients de pression suivants peuvent être utilisés pour les réservoirs cylindriques circulaires, voir A.1 :

a) pression interne de réservoirs à sommet ouvert et de bac de décantation ouvert : $c_p = -0,6$;

b) pression interne de réservoirs ventilés avec petites ouvertures : $c_p = -0,4$;

c) lorsqu'il y a un bac de décantation, la pression externe sur la coque du réservoir peut être considérée par hypothèse comme diminuant linéairement avec la hauteur.

(3) En raison de leur nature temporaire, des actions réduites du vent peuvent être utilisées pour les situations de montage conformément à l'ENV 1991-2-4.

A.2.10 Succion due à une ventilation insuffisante

(1) Il convient d'adopter les charges de l'ENV 1991-4.

A.2.11 Charges sismiques

(1)P Les charges doivent être reprises de l'ENV 1998-4, qui définit également les exigences relatives au calcul sismique.

A.2.12 Charges résultant des connexions

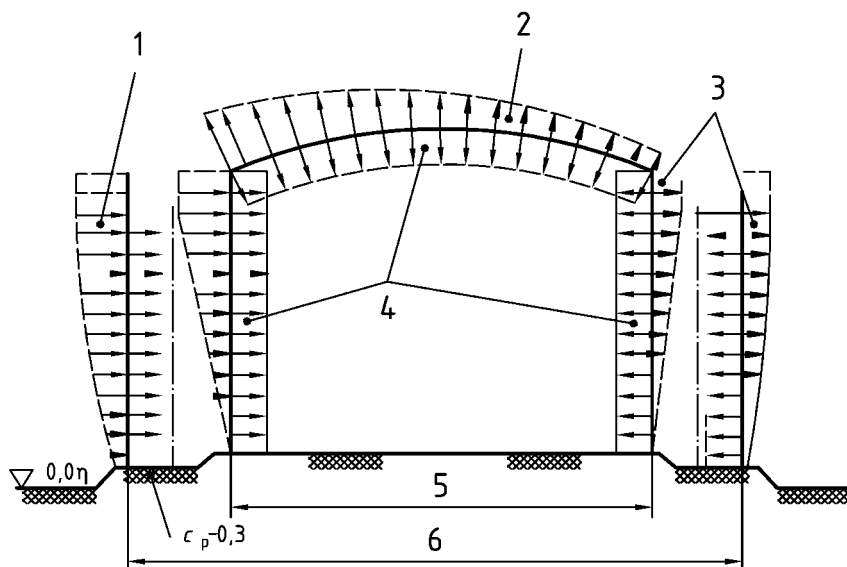
(1)P Les charges résultants des tuyaux, robinets et autres éléments connectés au réservoir et les charges résultant des tuyaux, robinets et autres éléments raccordés au réservoir et les charges résultant du tassement de supports indépendants se rapportant aux fondations du réservoir doivent être prises en compte. Les tuyauteries doivent être calculées de façon à réduire au minimum les chargements exercés sur le réservoir.

A.2.13 Charges résultant d'un tassement différentiel

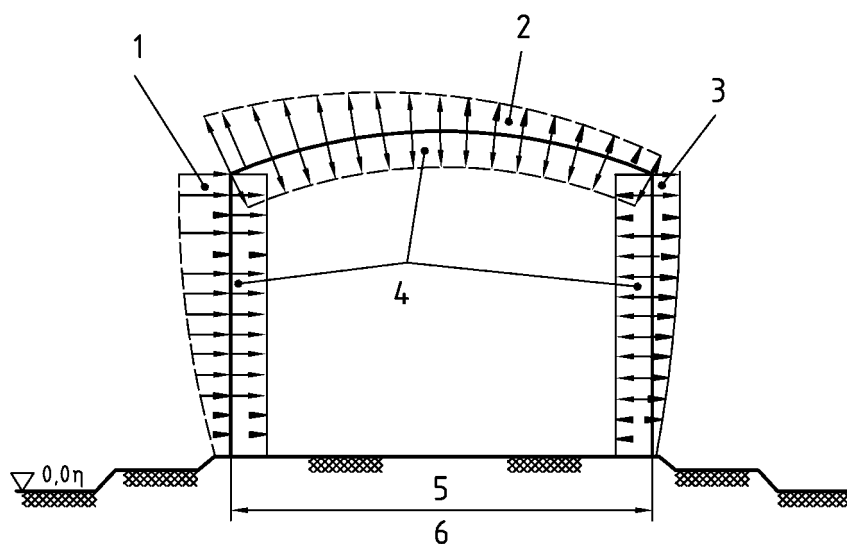
(1)P Les charges de tassement doivent être prises en compte lorsqu'un tassement différentiel est prévisible sur la durée de vie du réservoir.

A.2.14 Chargements en situations d'urgence

(1)P Les charges doivent être spécifiées par l'autorité compétente ou par l'acheteur et peuvent inclure des chargements dus à des événements tels que déflagration extérieure, choc, incendie extérieur adjacent, explosion, fuites du réservoir interne, basculement, trop-plein du réservoir interne.



a) Réservoir avec bac de décantation



b) Réservoir sans bac de décantation

Légende

- 1 c_p conforme à l'ENV 1991-2-1
- 2 c_p conforme à l'ENV 1991-2-1
- 3 c_p conforme à l'ENV 1991-2-1
- 4 $c_p = 0,4$ (réservoir ventilé uniquement)
- 5 $D_T =$ Diamètre du réservoir
- 6 $D_C =$ Diamètre du bac de décantation

Figure A.1 — Coefficients de pression relatifs aux actions du vent sur un réservoir cylindrique circulaire

A.3 Coefficients partiels

A.3.1 Coefficients partiels se rapportant aux actions

- (1)P Les coefficients partiels conformément à l'ENV 1991-1 doivent être appliqués aux actions A.2.2 à A.2.12.
- (2) Il convient de prendre comme valeur du coefficient partiel pour les charges induites par le liquide durant l'exploitation (A.2.1(1)) $\gamma_F = 1,20$.
- (3) Il convient de prendre comme valeur du coefficient partiel pour les charges induites par le liquide durant l'essai (A.2.1(2)) $\gamma_F = 1,00$.
- (4) Pour les situations critiques de calcul, il convient de prendre pour valeur des coefficients partiels des actions variables $\gamma_F = 1,00$.

A.3.2 Coefficients partiels pour la résistance

- (1)P Le coefficient partiel γ_M conformément à l'ENV 1993-1-1 doit être utilisé.

A.4 Combinaison d'actions

- (1)P Les exigences générales de la section 9 de l'ENV 1991-1 doivent être observées.
- (2) Il n'y a pas lieu de considérer que les charges d'exploitation et les actions de la neige agissent simultanément.
- (3) Des actions réduites du vent, fondées sur une brève période d'exposition, peuvent être utilisées lorsque le vent est en combinaison avec les actions de l'essai hydrostatique.
- (4) Il n'y a pas lieu de considérer que les actions sismiques agissent pendant les conditions d'essai.
- (5) Il n'y a pas lieu de considérer que les actions en situations d'urgence agissent pendant les conditions d'essai. Il convient d'appliquer les règles de combinaison se rapportant aux actions en situations d'urgence données dans l'ENV 1991-1 aux situations d'urgence.