

# ILNAS

Institut luxembourgeois de la normalisation  
de l'accréditation, de la sécurité et qualité  
des produits et services

**ILNAS-EN 1993-4-1:2007**

## **Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 4-1: Silos**

Eurocode 3 - Bemessung und  
Konstruktion von Stahlbauten - Teil 4-1:  
Silos

Eurocode 3 - Design of steel structures -  
Part 4-1: Silos

**02/2007**



## Avant-propos national

Cette Norme Européenne EN 1993-4-1:2007 a été adoptée comme Norme Luxembourgeoise ILNAS-EN 1993-4-1:2007.

Toute personne intéressée, membre d'une organisation basée au Luxembourg, peut participer gratuitement à l'élaboration de normes luxembourgeoises (ILNAS), européennes (CEN, CENELEC) et internationales (ISO, IEC) :

- Influencer et participer à la conception de normes
- Anticiper les développements futurs
- Participer aux réunions des comités techniques

<https://portail-qualite.public.lu/fr/normes-normalisation/participer-normalisation.html>

### **CETTE PUBLICATION EST PROTÉGÉE PAR LE DROIT D'AUTEUR**

Aucun contenu de la présente publication ne peut être reproduit ou utilisé sous quelque forme ou par quelque procédé que ce soit - électronique, mécanique, photocopie ou par d'autres moyens sans autorisation préalable !

NORME EUROPÉENNE <sup>ILNAS-EN 1993-4-1:2007</sup> **EN 1993-4-1**  
EUROPÄISCHE NORM  
EUROPEAN STANDARD

Février 2007

ICS 65.040.20; 91.010.30; 91.080.10

Remplace ENV 1993-4-1:1999

Version Française

## Eurocode 3 - Calcul des structures en acier - Partie 4-1: Silos

Eurocode 3 - Bemessung und Konstruktion von  
Stahlbauten - Teil 4-1: Silos

Eurocode 3 - Design of steel structures - Part 4-1: Silos

La présente Norme européenne a été adoptée par le CEN le 12 juin 2006.

Les membres du CEN sont tenus de se soumettre au Règlement Intérieur du CEN/CENELEC, qui définit les conditions dans lesquelles doit être attribué, sans modification, le statut de norme nationale à la Norme européenne. Les listes mises à jour et les références bibliographiques relatives à ces normes nationales peuvent être obtenues auprès du Centre de Gestion du CEN ou auprès des membres du CEN.

La présente Norme européenne existe en trois versions officielles (allemand, anglais, français). Une version dans une autre langue faite par traduction sous la responsabilité d'un membre du CEN dans sa langue nationale et notifiée au Centre de Gestion du CEN, a le même statut que les versions officielles.

Les membres du CEN sont les organismes nationaux de normalisation des pays suivants: Allemagne, Autriche, Belgique, Bulgarie, Chypre, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Tchèque, Roumanie, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, Suède et Suisse.



COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION  
EUROPÄISCHES KOMITEE FÜR NORMUNG  
EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION

Centre de Gestion: rue de Stassart, 36 B-1050 Bruxelles

## Sommaire

<b>Avant-propos</b>	<b>4</b>
Historique du programme des Eurocodes	4
Statut et domaine d'application des Eurocodes	5
Normes nationales transposant les Eurocodes	6
Liens entre les Eurocodes et les spécifications techniques harmonisées (EN et ATE) pour les produits	6
Informations additionnelles spécifiques à l'EN 1993-4-1	6
Annexe Nationale pour l'EN 1993-4-1	7
<b>1 Généralités</b>	<b>9</b>
1.1 Domaine d'application	9
1.2 Références normatives	9
1.3 Hypothèses de travail	10
1.4 Distinction entre principes et règles d'application	10
1.5 Termes et définitions	11
1.7 Symboles utilisés dans la Partie 4.1 de l'Eurocode 3	13
1.7 Conventions de signes	15
1.8 Unités	20
<b>2 Bases de calcul</b>	<b>21</b>
2.1 Exigences	21
2.2 Différentiation de la fiabilité	21
2.3 Etats limites	22
2.4 Actions et influences de l'environnement	23
2.5 Propriétés des matériaux	23
2.6 Données géométriques	23
2.7 Modélisation du silo pour la détermination des effets d'actions	23
2.8 Dimensionnement assisté par l'expérimentation	24
2.9 Effets des actions pour la vérification des états limites	24
2.10 Durabilité	25
2.11 Résistance au feu	25
<b>3 Propriétés des matériaux</b>	<b>25</b>
3.1 Généralités	25
3.2 Aciers de construction	25
3.3 Aciers inoxydables	26
3.4 Aciers alliés spéciaux	26
3.5 Exigences concernant la rupture fragile	26
<b>4 Bases pour l'analyse structurale</b>	<b>26</b>
4.1 Etats limites ultimes	26
4.2 Analyse de la structure d'un silo coque	27
4.3 Analyse de la structure de caisson d'un silo rectangulaire	30
4.4 Propriétés orthotropes équivalentes des tôles ondulées	32
<b>5. Calcul des parois cylindriques</b>	<b>34</b>
5.1 Bases	34
5.2 Distinctions entre formes de coques cylindriques	34
5.3 Résistance des parois cylindriques de silos	35
5.4 Conditions d'appui particulières pour les parois cylindriques	60
5.5 Dispositions constructives pour les ouvertures dans les parois cylindriques	65
5.6 Etats limites de service	66

<b>6</b>	<b>Calcul des trémies coniques</b>	<b>67</b>
6.1	Bases	67
6.2	Distinctions entre formes de coque de trémie	68
6.3	Résistance des trémies coniques	68
6.4	Considérations concernant les structures de trémies particulières	74
6.5	Etats limites de service	76
<b>7</b>	<b>Calcul des structures de toit coniques circulaires</b>	<b>76</b>
7.1	Bases	76
7.2	Distinctions entre différentes formes structurales de toits	77
7.3	Résistance des toits de silos coniques circulaires	77
<b>8</b>	<b>Calcul des zones de transition et des ceintures</b>	<b>78</b>
8.1	Bases	78
8.2	Analyse de la jonction	80
8.3	Résistances structurales	87
8.4	Vérifications aux états limites	91
8.5	Considérations concernant les dispositions des appuis pour la jonction	94
<b>9</b>	<b>Calcul des silos rectangulaires et des silos à côtés plans</b>	<b>95</b>
9.1	Bases	95
9.2	Classification des formes structurales	95
9.3	Résistance des parois verticales non raidies	96
9.4	Résistance des parois de silos composées de plaques raidies et ondulées	97
9.5	Silos à tirants intérieurs	100
9.6	Résistance des trémies pyramidales	103
9.7	Raidisseurs verticaux placés sur des parois en caisson	104
9.8	Etats limites de service	104
	<b>Annexe A [Informative]</b>	<b>106</b>
	<b>Règles simplifiées pour les silos circulaires de classe de conséquences 1</b>	<b>106</b>
	A.1 Combinaisons d'actions pour la classe de conséquences 1	106
	A.2 Evaluation des effets d'actions	106
	A.3 Evaluation à l'état limite ultime	106
	<b>Annexe B : [Informative]</b>	<b>113</b>
	<b>Expressions pour les contraintes de membrane exercées dans les trémies coniques</b>	<b>113</b>
	<b>Annexe C: [Informative]</b>	<b>115</b>
	<b>Répartition de la pression du vent autour des structures de silos circulaires</b>	<b>115</b>

## Avant-propos

La présente Norme européenne EN 1993-4-1, “Calcul des structures en acier – Silos” a été élaborée pour le compte du Comité technique CEN/TC 250 « Eurocodes structuraux », dont le secrétariat est tenu par BSI. Le Comité CEN/TC250 est responsable de l'élaboration de tous les Eurocodes structuraux.

Cette Norme européenne devra recevoir le statut de norme nationale, soit par publication d'un texte identique, soit par entérinement, au plus tard en août 2007, et toutes les normes nationales en contradiction devront être retirées au plus tard en mars 2010.

La présente Norme européenne remplace l'ENV 1993-4-1.

Selon le Règlement Intérieur du CEN/CENELEC, les instituts de normalisation nationaux des pays suivants sont tenus de mettre cette Norme européenne en application : Allemagne, Autriche, Belgique, Chypre, Danemark, Espagne, Estonie, Finlande, France, Grèce, Hongrie, Irlande, Islande, Italie, Lettonie, Lituanie, Luxembourg, Malte, Norvège, Pays-Bas, Pologne, Portugal, République Tchèque, Royaume-Uni, Slovaquie, Slovénie, Suède et Suisse.

## Historique du programme des Eurocodes

En 1975 la Commission des Communautés Européennes arrêta un programme d'actions dans le domaine de la construction, sur la base de l'article 95 du Traité. L'objectif du programme était l'élimination d'obstacles aux échanges et l'harmonisation des spécifications techniques.

Dans le cadre de ce programme d'actions, la Commission prit l'initiative d'établir un ensemble de règles techniques harmonisées pour le dimensionnement des ouvrages ; ces règles, en un premier stade, serviraient d'alternative aux règles nationales en vigueur dans les Etats Membres et, finalement, les remplaceraient.

Pendant quinze ans la Commission, avec l'aide d'un Comité Directeur comportant des représentants des Etats Membres, pilota le développement du programme des Eurocodes, ce qui conduisit au cours des années 80 à la première génération de codes européens.

En 1989, la Commission et les Etats membres de l'Union européenne EU et de l'AELE décidèrent, sur la base d'un accord<sup>1)</sup> entre la Commission et le CEN, de transférer à ce dernier, par une série de Mandats, la préparation et la publication des Eurocodes, afin de leur donner par la suite le statut de norme européenne (EN). Ceci établit de facto un lien entre les Eurocodes et les dispositions de toutes les Directives du Conseil et/ou Décisions de la Commission traitant de normes européennes (par exemple, la Directive du Conseil 89/106/CEE sur les produits de construction - CPD - et les Directives du Conseil 93/37/CEE, 92/50/CEE et 89/440/CEE sur les travaux et les services publics, ainsi que les Directives équivalentes de l'AELE destinées à la mise en place du marché intérieur).

Le programme des Eurocodes Structuraux comprend les normes suivantes, chacune étant en général constituée d'un certain nombre de Parties :

EN 1990	Eurocode : Bases de calcul des structures
EN 1991	Eurocode 1 : Actions sur les structures
EN 1992	Eurocode 2 : Calcul des structures en béton
EN 1993	Eurocode 3 : Calcul des structures en acier

<sup>1)</sup> Accord entre la Commission des Communautés européennes et le Comité européen de normalisation (CEN) concernant le travail sur les EUROCODES pour le dimensionnement des ouvrages de bâtiment et de génie civil (BC/CEN/03/89).

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 :	Calcul des structures pour la résistance aux séismes
EN 1999	Eurocode 9 :	Calcul des structures en aluminium

Les normes Eurocodes reconnaissent la responsabilité des organismes de réglementation de chaque Etat membre et ont sauvegardé le droit de ceux-ci de déterminer, au niveau national, des valeurs relatives aux questions relevant de la réglementation en matière de sécurité, là où ces valeurs continuent à différer d'un Etat à l'autre.

### Statut et domaine d'application des Eurocodes

Les Etats Membres de l'UE et de l'AELE reconnaissent que les Eurocodes servent de documents de référence pour les usages suivants :

- comme moyen de prouver la conformité des bâtiments et des ouvrages de génie civil aux exigences essentielles de la Directive du Conseil 89/106/CEE, en particulier à l'Exigence Essentielle N°1 – Stabilité et résistance mécanique – et à l'Exigence Essentielle N°2 – Sécurité en cas d'incendie ;
- comme base de spécification des contrats pour les travaux de construction et les services techniques associés ;
- comme cadre d'établissement de spécifications techniques harmonisées pour les produits de construction (EN et ATE).

Les Eurocodes, dans la mesure où ils concernent les ouvrages eux-mêmes, ont une relation directe avec les Documents Interprétatifs<sup>2)</sup> bien qu'ils soient d'une nature différente de celle des normes harmonisées de produits<sup>3)</sup>. En conséquence, les aspects techniques résultant des travaux effectués pour les Eurocodes nécessitent d'être pris en considération de façon adéquate par les Comités techniques du CEN et/ou les groupes de travail de l'EOTA travaillant sur les normes de produits en vue de parvenir à une complète compatibilité de ces spécifications techniques avec les Eurocodes.

Les normes Eurocodes fournissent des règles de conception structurale communes d'usage quotidien pour le calcul des structures entières et des produits composants de nature traditionnelle ou innovatrice. Les formes de construction ou les conceptions inhabituelles ne sont pas spécifiquement couvertes, et il appartiendra en ces cas au concepteur de se procurer des bases spécialisées supplémentaires.

<sup>2)</sup> Selon l'article 3.3 de la DPC, les exigences essentielles (EE) doivent recevoir une forme concrète dans des Documents interprétatifs pour assurer les liens nécessaires entre les exigences essentielles et les mandats pour normes européennes (EN) harmonisées et guides pour les agréments techniques européens (ATE), et ces agréments eux-mêmes.

<sup>3)</sup> Conformément à l'Art. 12 de la DPC, les documents interprétatifs doivent :

- a) donner une forme concrète aux exigences essentielles en harmonisant la terminologie et les bases techniques et en indiquant, lorsque c'est nécessaire, des classes ou niveaux pour chaque exigence ;
- b) indiquer des méthodes pour relier ces classes ou niveaux de prescriptions avec les spécifications techniques, par exemple méthodes de calcul et d'essai, règles techniques pour la conception, etc. ;
- c) servir de référence pour l'établissement de normes harmonisées et de guides pour agréments techniques européens.

Les Eurocodes, de facto, jouent un rôle similaire pour l'E.E 1 et une partie de l'E.E 2.

## **Normes nationales transposant les Eurocodes**

Les normes nationales transposant les Eurocodes comprendront la totalité du texte des Eurocodes (toutes annexes incluses), tel que publié par le CEN ; ce texte peut être précédé d'une page nationale de titres et par un Avant-Propos National, et peut être suivi d'une Annexe Nationale.

L'Annexe Nationale peut seulement contenir des informations sur les paramètres laissés en attente dans l'Eurocode pour choix national, sous la désignation de Paramètres Déterminés au niveau National, à utiliser pour les projets de bâtiments et ouvrages de génie civil à construire dans le pays concerné ; il s'agit :

- de valeurs et/ou classes là où des alternatives figurent dans l'Eurocode,
- de valeurs à utiliser lorsque seul un symbole est donné dans l'Eurocode,
- de données propres à un pays (géographiques, climatiques, etc.), par exemple carte des vents,
- de la procédure à utiliser là où des procédures alternatives sont données dans l'Eurocode.

Elle peut également contenir :

- des décisions sur l'usage des annexes informatives,
- des références à des informations complémentaires non contradictoires pour aider l'utilisateur à appliquer l'Eurocode.

## **Liens entre les Eurocodes et les spécifications techniques harmonisées (EN et ATE) pour les produits**

Une cohérence est nécessaire entre les spécifications techniques harmonisées pour les produits de construction et les règles techniques pour les ouvrages<sup>4</sup>). En outre, il convient que toute information accompagnant le marquage CE des produits de construction, se référant aux Eurocodes, fasse clairement apparaître quels Paramètres Déterminés au niveau national ont été pris en compte.

## **Informations additionnelles spécifiques à l'EN 1993-4-1**

L'EN 1993-4-1 donne des recommandations de conception pour le calcul des silos.

L'EN 1993-4-1 donne des règles de calcul qui complètent les règles génériques définies dans les différentes parties de l'EN 1993-1.

L'EN 1993-4-1 est destinée aux clients, concepteurs, constructeurs et autorités compétentes.

L'EN 1993-4-1 est destinée à être utilisée avec l'EN 1990, l'EN 1991-4, les autres parties de l'EN 1991, l'EN 1993-1-6 et l'EN 1993-4-2, les autres parties de l'EN 1993, l'EN 1992 et les autres parties des normes EN 1994 à EN 1999 traitant du calcul des silos. Les points qui sont déjà traités dans ces documents ne sont pas repris.

Des valeurs numériques de coefficients partiels et d'autres paramètres de fiabilité sont recommandées comme valeurs de base pour fournir un niveau de fiabilité acceptable. Ces valeurs et paramètres ont été sélectionnés en supposant qu'un niveau approprié de qualité d'exécution et de management de la qualité s'applique.

Des coefficients de sécurité pour les silos "standardisés" (production industrielle) peuvent être spécifiés par les autorités concernées. Lorsqu'ils sont appliqués aux silos "standardisés", les

---

4) Voir le paragraphe 3.3 et l'article 12 de la DPC, ainsi que les paragraphes 4.2, 4.3.1, 4.3.2 et 5.2 du DI 1.

coefficients mentionnés en 2.10 ne sont donnés qu'à titre indicatif. Ils sont donnés pour indiquer les valeurs susceptibles de donner une fiabilité cohérente avec d'autres ouvrages.

### **Annexe Nationale pour l'EN 1993-4-1**

La présente Norme donne des procédures alternatives et des valeurs, et recommande des classes, avec des Notes indiquant où des choix nationaux peuvent devoir être faits. C'est pourquoi il convient de doter la norme nationale mettant en application l'EN 1993-4-1 d'une Annexe Nationale contenant tous les Paramètres Déterminés au niveau National à utiliser pour le dimensionnement de bâtiments et d'ouvrages de génie civil à construire dans le pays concerné.

Les paragraphes suivants de l'EN 1993-4-1 permettent d'effectuer un choix national :

- 2.2 (1)
- 2.2 (3)
- 2.9.2.2 (3)
- 3.4 (1)
- 4.1.4 (2) et (4)
- 4.2.2.3 (6)
- 4.3.1 (6) et (8)
- 5.3.2.3 (3)
- 5.3.2.4 (10), (12) et (15)
- 5.3.2.5 (10) et (14)
- 5.3.2.6 (3) et (6)
- 5.3.2.8 (2)
- 5.3.3.5 (1) et (2)
- 5.3.4.3.2 (2)
- 5.3.4.3.3 (2) et (5)
- 5.3.4.3.4 (5)
- 5.3.4.5 (3)
- 5.4.4 (2), (3) et (4)
- 5.4.7 (3)
- 5.5.2 (3)
- 5.6.2 (1) et (2)
- 6.1.2 (4)
- 6.3.2.3 (2) et (4)
- 6.3.2.7 (3)
- 7.3.1 (4)
- 8.3.3 (4)
- 8.4.1 (6)
- 8.4.2 (5)
- 8.5.3 (3)