

Le présent article est le troisième d'une série sur les silos en général et plus particulièrement les silos métalliques. Après les deux premières parties – l'introduction générale, et la présentation des éléments principaux – on détaille ci-après les caractéristiques géométriques principales pour le calcul.

On utilisera de préférence les termes des Eurocodes :

- NF EN 1991-4 :2006 – Actions sur les structures – Silos et réservoirs
- NF EN 1993-4-1 :2007+A1 – Calcul des structures en acier - Silos

## Caractéristiques géométriques de base

La forme en plan et le cercle inscrit :

La plupart des silos ont un plan circulaire ou rectangulaire ; autres formes polygonales existent occasionnellement. La valeur de  $d_c$ , le diamètre du cercle inscrit dans le plan, intervient dans de nombreux calculs ; des fois, le rayon équivalent  $r = d_c/2$  est utilisé.

Pour les silos à parois planes en plan, on désigne la paroi la plus longue par  $a$ , la plus courte par  $b$ .  $d_c$  est alors égal à  $b$ .

Le rayon hydraulique est défini comme le rapport entre la section en plan et le périmètre du silo :  $A/U$ . A noter qu'il est indiqué dans la figure 1.1 de l'EN 1991-4 :2006, mais il n'intervient pas par la suite. Il était une donnée importante dans l'ancienne norme Française pour les silos (P22-630), où on trouve même une méthode de la prise en compte des montants intérieurs.

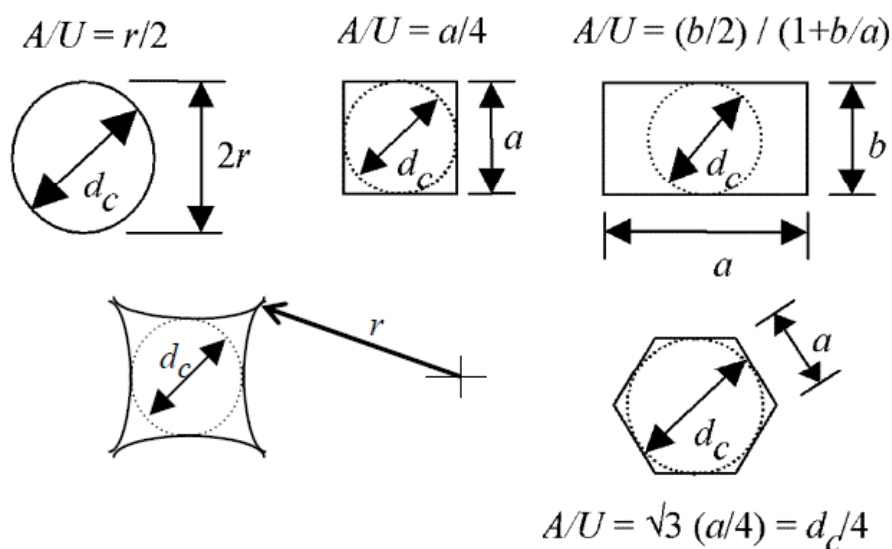
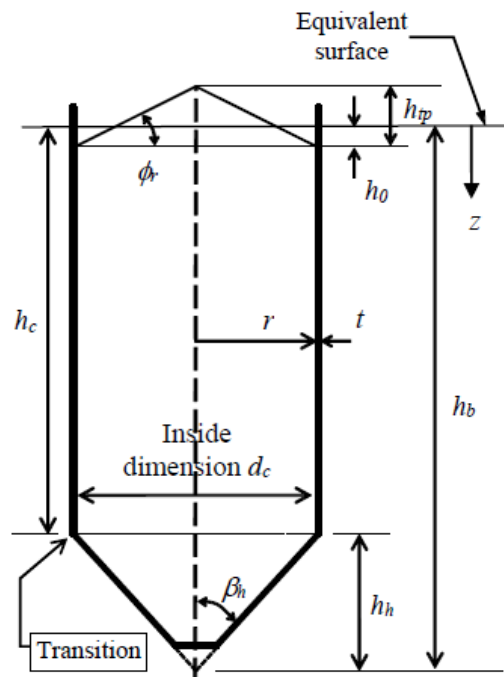


Figure 1.1 d) de l'EN 1991-4 :2006 avec compléments

Les hauteurs de calcul :

- $h_c$  = la hauteur entre le niveau supérieur équivalent(ou surface équivalente), et la transition entre la robe et la trémie, ou le fond
- $h_h$  = hauteur théorique de la trémie (jusqu'au point de rencontre dans la prolongation des parois)
- $h_b = h_c + h_h$  : hauteur totale de calcul du silo
- $h_{\varphi}$  = hauteur du talus de remplissage de la matière ensilée
- $h_0$  = distance entre le pied du talus et le niveau supérieur équivalent.  
 Silos circulaires :  $h_0 = d_c/6 * \tan \phi_r$   
 Silos rectangulaires :  $h_0 = d_c/4 * \tan \phi_r$   
 où  $\phi_r$  = angle de repos de la matière ensilée

On constate que les hauteurs de calcul  $h_c$  varient selon la matière ensilée, puisque l'angle du talus naturel  $\phi_r$  est différent. Pour un silo à céréales multiples, un calcul rigoureux démultiplie alors les cas à traiter.



Le niveau supérieur équivalent (ou surface équivalente) correspond au plan horizontal qui délimite le même volume de matière ensilée que la surface de remplissage réelle.

Extrait de la figure 1.1 a) de l'EN 1991-4 :2006 avec annotations

À noter que la géométrie réelle de la structure est différente : la robe est généralement un peu plus haute que  $h_c$  ; pour obtenir le gabarit extérieur de l'installation, on ajoute le convoyeur, le toit, etc.

La hauteur  $H$ , utilisé pour la vérification des déformations, est définie comme la hauteur entre les fondations et le toit.

La forme du **fond** du volume de stockage :

Un silo peut avoir un fond plan (horizontal ou incliné), ou il peut être équipé d'une trémie. Un fond plat est défini actuellement dans l'Eurocode avec une inclinaison inférieure à  $5^\circ$  par rapport à l'horizontale ; cette valeur passera à  $20^\circ$  dans les révisions à venir.

L'**inclinaison** des parois d'une trémie est définie par  $\alpha$  ou  $\beta$ . Attention aux cas de trémie avec inclinaisons variables (différente par paroi, ou variable entre l'orifice de vidange et la robe).



*Extrait de la figure 1.1 b) de l'EN 1991-4 :2006*

### L'épaisseur de paroi :

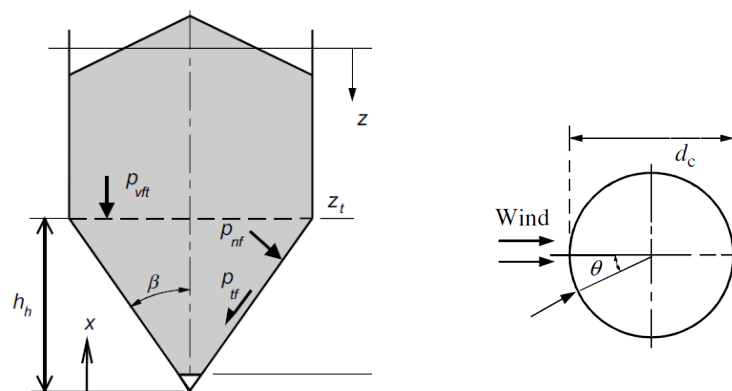
L'épaisseur de paroi  $t$  peut désigner l'épaisseur réelle de la tôle, ou une épaisseur équivalente dans le cas d'une tôle ondulée ou trapézoïdale.

Une épaisseur équivalente est déterminée notamment pour pouvoir utiliser des formules de calcul destinées aux tôles lisses. L'Eurocode donne par exemple, pour une tôle ondulée, des épaisseurs équivalentes pour la rigidité de membrane dans les directions perpendiculaires et parallèles aux ondulations, et pour la rigidité au cisaillement de membrane.

## Coordonnées

La désignation des coordonnées est différente pour le calcul des actions et pour le calcul de la structure.

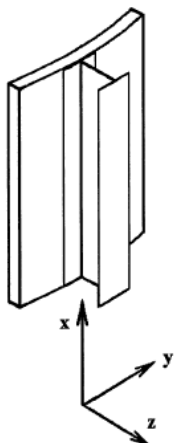
Pour le calcul des actions, la coordonnée  $z$  est la plus importante : il s'agit de la coordonnée verticale, orientée vers le bas, mesurée depuis la surface équivalente (voir ci-avant : hauteurs de calcul). Une deuxième coordonnée  $x$ , orientée verticalement vers le haut, est utilisée pour les trémies. A noter que dans la version actuelle de l'Eurocode 1991-4, l'Annexe G donne une méthode de calcul alternative (peu utilisée), où  $x$  est orienté selon l'inclinaison de la trémie. Dans certains cas, il est nécessaire d'indiquer un point sur la circonférence de la paroi : cette coordonnée circonférentielle est notée  $\theta$ .



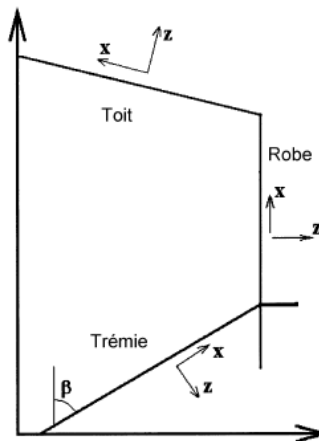
Extraits de l'EN 1991-4 :2006 Fig. 6.2 et de l'EN 1993-4-1 :2007 Fig. C.2

Pour le calcul de la structure, les coordonnées sont définies sur les figures 1.4 et 1.5 de l'EN 1993-4-1 :2007 : De nouveau, la coordonnée verticale est la plus utilisée, mais elle est notée  $x$  et orientée du bas vers le haut, en suivant la ligne de coupe.

Les coordonnées de la structure sont souvent modifiées et définies individuellement, en fonction du projet, du logiciel de calcul, du type de modélisation, et des habitudes de l'ingénieur.

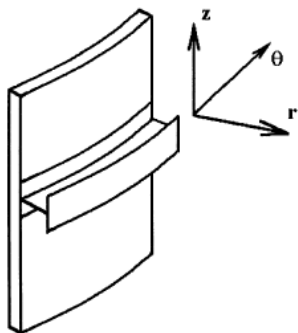


a) Raidisseur et axes de flexion

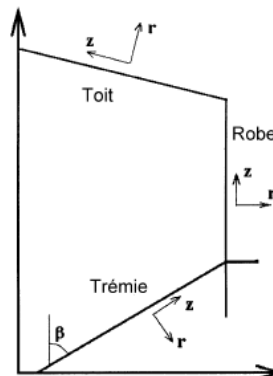


b) Axes locaux dans différents segments

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



a) Raidisseur et axes de flexion



b) Axes locaux dans différents segments

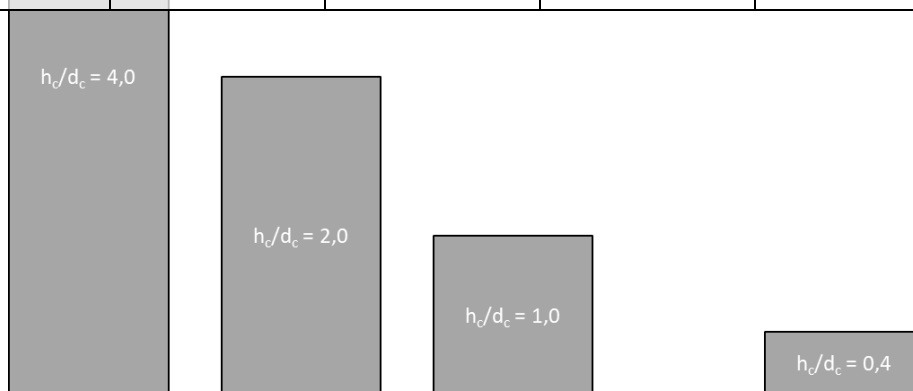
Figure 1.5 — Systèmes de coordonnées locaux pour les raidisseurs circonférentiels sur une coque ou un caisson

EN 1993-4-1 :2007+A1

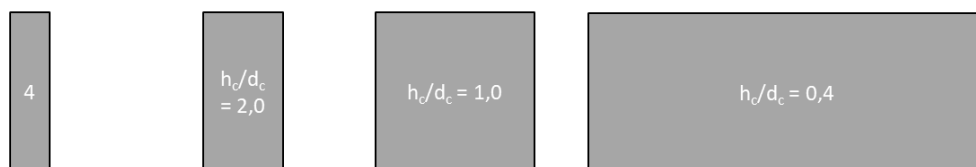
## Élancement

L'élancement est défini comme le rapport entre la hauteur  $h_c$  et le diamètre du cercle inscrit  $d_c$ . Cette valeur est importante notamment pour la détermination des actions dues à la matière ensilée. On distingue les cas suivants :

Silo très élancé	Silo élancé	Silo d'élancement intermédiaire	Silo peu élancé	Magasin de stockage
$4,0 \leq h_c/d_c$	$2,0 \leq h_c/d_c < 4,0$	$1,0 \leq h_c/d_c < 2,0$	$0,4 \leq h_c/d_c < 1,0$	$h_c/d_c < 0,4$



Représentation des élancements à diamètre du cercle inscrit égal

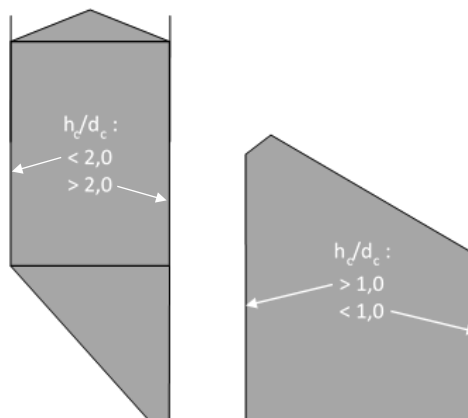


Représentation des élancements à hauteur égale

En principe, la présence ou non d'une trémie n'intervient pas dans la détermination de l'élancement. Néanmoins, la question se pose par exemple pour des trémies asymétriques, où une paroi continue verticalement jusqu'à l'orifice de vidange, voir figure ci-après.

On peut aussi avoir des cas particuliers, où une excentricité importante au remplissage crée des hauteurs de matière ensilée très différentes sur les parois opposées. Dans ce cas, l'utilisation d'une surface équivalente unique sans analyse de la situation serait précipité.

Ces cas ne sont pas traités dans l'Eurocode ; des préconisations CTICM seront données dans les articles à venir (calcul des actions).

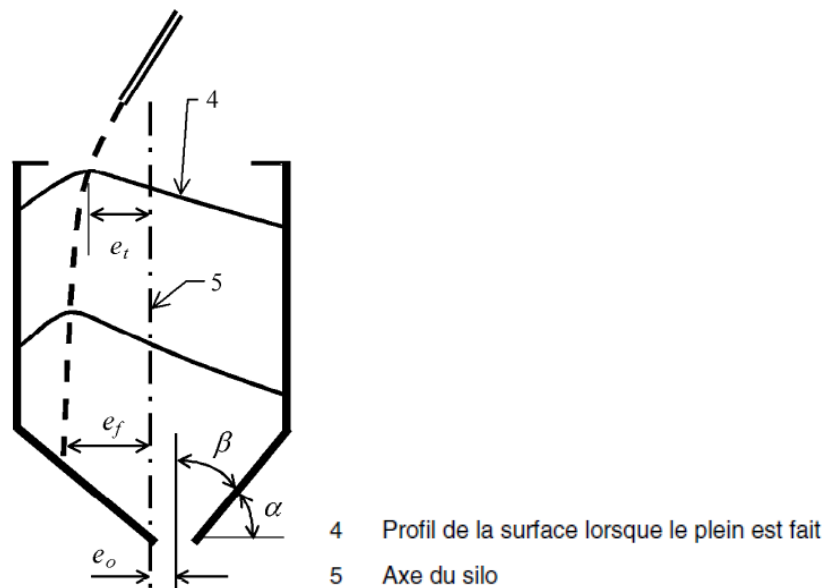


*Cas particuliers pour la détermination de l'élanement*

## Excentricités

Il y a deux types d'excentricité par rapport à l'axe central du silo comme donnée d'entrée :

- L'excentricité au remplissage :  
On distingue l'excentricité de l'orifice de remplissage, l'excentricité du point haut du talus  $e_t$  (qui varie avec le niveau de remplissage), et surtout l'excentricité maximale au point de chute de la matière ensilée dans le silo vide  $e_f$ . Une attention particulière doit être portée pour les cas où la matière percute la paroi.
- L'excentricité à la vidange  $e_o$  est définie comme distance entre l'axe central du silo et l'axe central de l'orifice de vidange.



Extrait de la figure 1.1 b) de l'EN 1991-4 :2006

A noter que pour un silo rectangulaire, il faut définir les excentricités dans les deux directions.

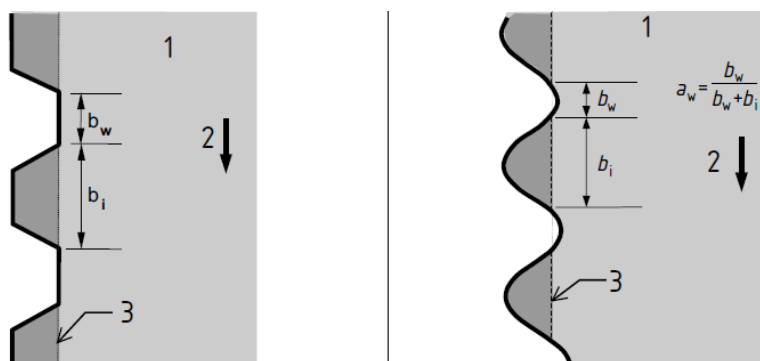
L'utilisation des règles de calcul simplifiées est autorisée pour des excentricités  $\leq 0,25 d_c$  ; cette même valeur limite est utilisée dans la classification des silos (détaillée dans une fiche à venir).



## Tôles ondulées et trapézoïdales

La géométrie des ondulations intervient notamment :

- Dans la détermination du coefficient de frottement de paroi : On détermine une valeur moyenne sur la surface de rupture, entre les zones où le volume principal de la matière ensilée est en contact avec la tôle, et les zones où la matière ensilée est en contact avec des « poches » de matière ensilée dans les creux d'onde.



a) Profil ondulé trapézoïdal

b) Profil ondulé sinusoïdal

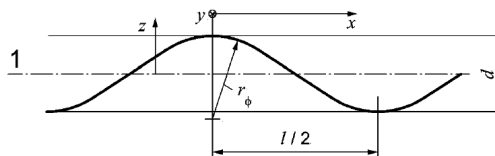
### Légende

- 1 Matériau ensilé
- 2 Écoulement du matériau
- 3 Surface de rupture

Figure D.1 — Géométrie du revêtement en profilé métallique

EN 1991-4 :2006 Annexe D

- Dans le calcul des propriétés orthotropes équivalentes des tôles ondulées (épaisseurs et inerties équivalentes).



### Légende

- 1 surface médiane efficace

Figure 4.2 — Profil d'ondulation et paramètres géométriques

EN 1993-4-1 :2007+A1