

Chapitre 3. Les Silos

3.1. Introduction

3.2. Définition

3.3. Classification de silos

3.4. Caractéristiques géométriques du silo

3.5. Type d'écoulement

3.6. Les problèmes des silos

3.7. Valeur caractérisant le produit ensilé et son interaction avec la paroi

3.8. Théories et normes de calcul des silos

Chapitre 3

Les Silos

3.1. Introduction

Les Silos sont des structures importantes pour le stockage des récoltes. Le nombre et les dimensions des bâtiments de stockage dépendent de la quantité et des types de grain à stocker. La destruction du silo lors d'instabilité suite à un mauvais dimensionnement. Le présent chapitre a pour but la justification de la stabilité des Silos en béton armé, selon les principes de calcul aux états limites.

3.2. Définition

Les silos sont des réservoirs de sections variables géométriquement et de grande hauteur, construit en béton armé, béton précontrainte ou en acier destiné à stocker des matières premières ou des produits finis. On trouve des produits fins tels que les grains de céréales, les produits alimentaires (blé, orge, malt, farine, sucre, etc.), les cendres volantes, le ciment, le clinker, les produits chimiques, etc... ; les silos sont d'une utilisation multiple relevant de différents domaines d'activité agricole et industriel.

3.3. Classification de silos

Il existe plusieurs manières de classer les silos, la classification peut se faire selon :

- Le type de matériaux constituant: Bois, plastique, acier, béton armé...
- Les dimensions: Hauteur, largeur, diamètre...
- La capacité de stockage: Petites ou grandes capacités...
- La forme du silo: Polygonale, circulaire.

Généralement les silos sont classés selon le matériau ; L'Eurocode1.Partie 4 relatifs au calcul des actions dans les silos et réservoirs les classe en fonction de leurs dimensions.

3.4. Caractéristiques géométriques du silo

Le premier paramètre géométrique qui intervient dans le choix de la méthode de détermination des actions exercées par le matériau stocké est l'élancement du silo, c'est – à - dire le rapport h/d_c (figure 3.1).

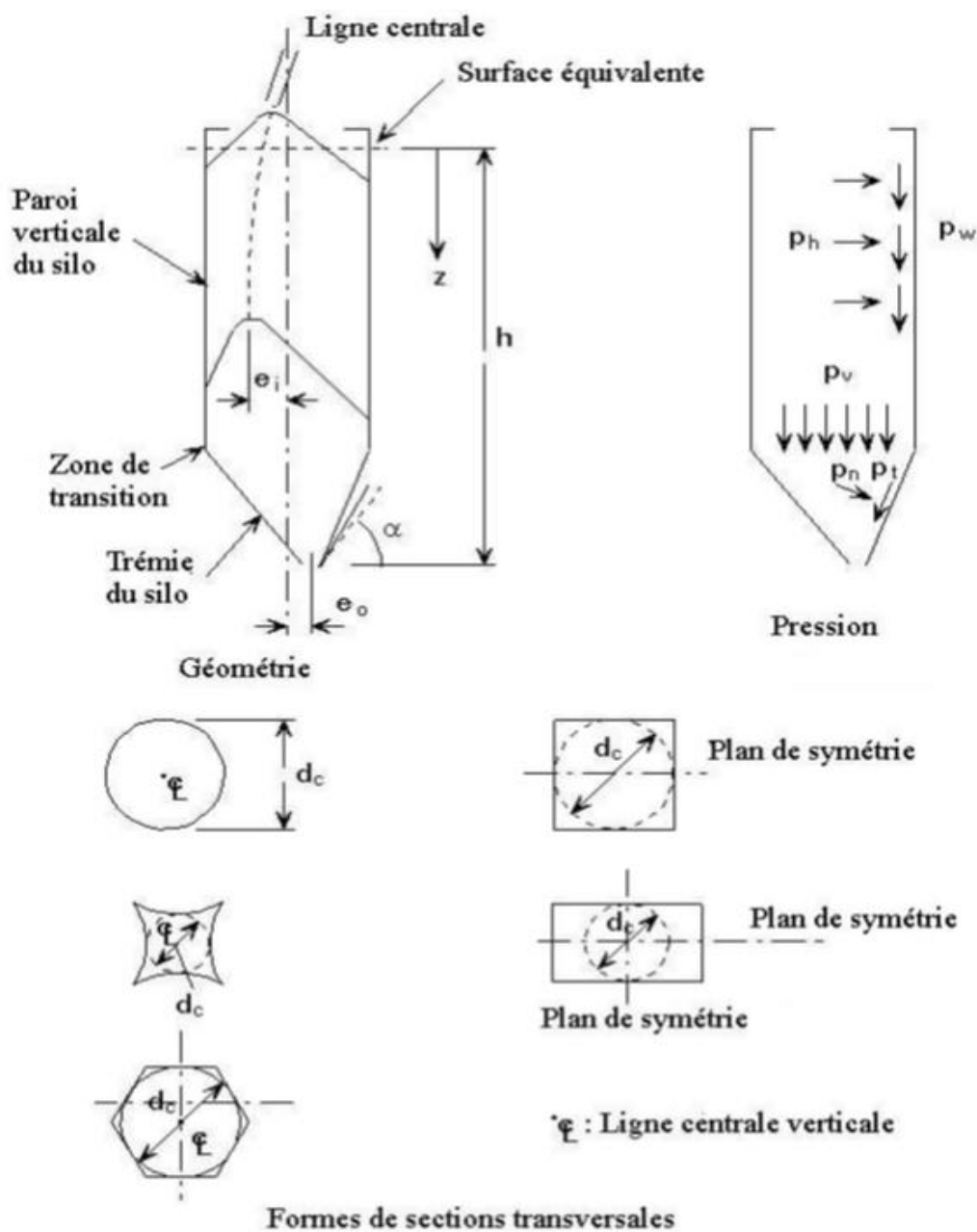


Figure.3.1. Diverses formes de silos avec les notations de dimensions et de pression (EN 1991-1-4, 2005).

On distingue :

- **Les silos élancés :** pour lesquels h/d_c est supérieur ou égale à 2,0 ;

- **Les silos moyennement élancés** : pour lesquels h_c/d_c est compris entre 1,0 et 2,0 ;
- **Les silos peu élancés** : h_c/d_c est compris entre 0,4 et 1,0 ;
- **Les magasins de stockage** : un silo dont le fond est plat et h_c/d_c est inférieur ou égal à 0,4.

Les limitations dimensionnelles sont les suivants :

- $h_c/d_c < 10$;
- $h_c < 100\text{m}$;
- $d_c < 60\text{m}$.
- Le diamètre maximal des grains de matière ensilée ne dépasse pas $0.03d_c$.

3.5. Type d'écoulement

On doit considérer des situations de projet sélectionnées et identifier les cas de charge critiques. Pour les silos, les situations de projet doivent être basées sur les caractéristiques d'écoulement de la matière ensilée.

Deux types d'écoulement sont décrits dans l'Eurocode 1 et illustrés sur la figure 3.2.

Ce sont les écoulements en masse et les écoulements en entonnoir. La pression de vidange est influencée par le comportement de l'écoulement et donc la prévision du type d'écoulement doit être réalisée avant les calculs des charges issues du matériau stocké.

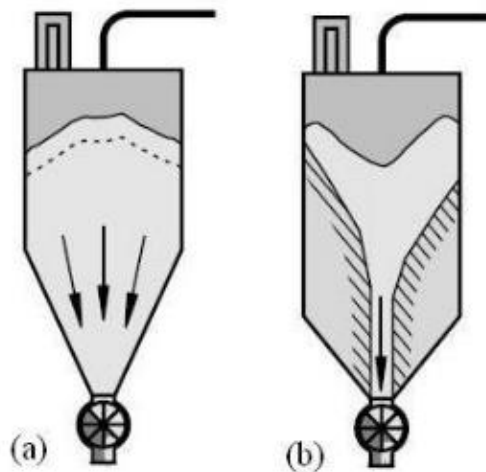


Figure.3.2. (a) écoulement massique (b) écoulement en entonnoir (Lobato et al, 2014).

3.6. Les problèmes des silos

3.6.1. Risque liées à la vidange

La vidange des silos verticaux est généralement gravitaire par écoulement naturel. Ce mode d'écoulement favorise la vidange des couches supérieures qui sont pourtant celles introduites les dernières lors du remplissage cela constitue un inconvénient plus ou moins fâcheux dans certains cas où l'on désire, au contraire, que les couches supérieures, qui ont été les dernières rentées dans le silo, soient également les dernières à en sortir.

3.6.2. Risques industriels liés aux incendies et explosions :

L'activité de stockage de produits agroalimentaires peut conduire à des accidents industriels graves. Les poussières combustibles des produits agroalimentaires sont à l'origine des risques d'incendie ou d'explosion.

Les règles générales pour réduire à la source ces risques visent à prévenir la formation d'une atmosphère explosible, supprimer les sources d'inflammation, éviter ou limiter la propagation d'une explosion. Elles permettent aussi de limiter les effets et les conséquences d'une éventuelle explosion en définissant différents périmètres de sécurité. Ces dispositions sont reprises dans différents textes ou référentiels normatif.

3.7. Valeur caractérisant le produit ensilé et son interaction avec la paroi

Un produit ensilé est caractérisé par (Tableau 3.1) :

- Son poids volumique " γ ";
- Son angle de frottement interne " φ ";
- Son angle de frottement sur la paroi du silo " δ ".

γ , φ et δ sont supposés constants; γ , φ sont définis conventionnellement pour un certain nombre de produits de base.

Tableau 3.1 : Poids volumiques et angles de frottement interne conventionnels de différents produits.

Produit	γ (KN/m ³)	ϕ (°)
Ciment	14.7	28
Clinker	14.7 à 15.7	33
Cru de cimenterie	13.0	26
Plâtre	12.25	25
Poudre de charbon	8.35	25
Blé	8.35	26
Mais	7.85	24
Orge	8.1	24
Colza	7.0	24
Soja en graines	7.5	27
Tournesol	5	22
Sorgho	7.35	23
Riz décortiqué	8.6	30
Farine de blé	8.8	20
Sucre granulé	9.0	30
Si la hauteur "h" de produit stocké au-dessus du plan de base dépasse 10 m, multiplier les valeurs de γ par $1+[(h-10)/500]$. Le poids volumique du clinker peut varier dans les limites indiquées ci-dessus. Il appartient au maître d'ouvrage de préciser la valeur à prendre en compte dans les calculs, en prenant notamment en considération le poids spécifique des grains constitutifs ainsi que la proportion de fines pouvant s'insérer dans la granulométrie.		

Les parois en béton sont classées en trois catégories (Tableau 3.2) :

- Paroi A : paroi à cannelures horizontales ;
- Paroi B : béton non revêtu ;
- Paroi C : béton revêtu d'une peinture.

Dans les règles professionnelles, la valeur conventionnelle de l'angle de frottement ϕ sur la paroi est définie par la relation :

$$\rho = \tan \delta / \tan \phi$$

Tableau 3.2 : Valeurs conventionnelles de ρ

Granularité (selon type de produit)	Paroi A	Paroi B
Poudres	0.87	0.80
Petits grains (céréales, sucre) sauf cas spéciaux	0.87	0.75 ⁽¹⁾
Gros grains (clinker)	0.87	0.70
Cas spéciaux (oléagineux, riz)	0.75	0.65
⁽¹⁾ Seul produit ayant fait l'objet d'essais pour une paroi C, le sucre, avec $\rho = 0,50$.		

Tableau 3.3 : Propriétés des matières ensilées

Matières	Poids volumique γ (KN/m³)		Angle talus naturel $\varnothing_r$ (°)	Angle frottement naturel $\varnothing_i$ (°)		Rapport pression latérale K		Coefficient de frottement sur la paroi μ				Coefficient de pression locale C_{ap}
	γ_i (inf)	γ_u (sup)		$\varnothing_{im}$	$a_{\varnothing}$	K_m	a_K	μ_m (D1)	μ_m (D2)	μ_m (D3)	a_μ	
Blé	7.5	9.0	34	30	1.12	0.54	1.11	0.24	0.38	0.57	1.16	0.5
Mais	7.0	8.0	35	31	1.14	0.53	1.14	0.22	0.36	0.53	1.24	0.9
Orge	7.0	8.0	31	28	1.14	0.59	1.11	0.24	0.33	0.48	1.16	0.5
Sucre	8.0	9.5	38	32	1.19	0.50	1.20	0.46	0.51	0.56	1.07	0.4
Ciment	13.0	16.0	36	30	1.22	0.54	1.20	0.41	0.46	0.51	1.07	0.5
.....												
Par défaut	6.0	22.0	40	35	1.3	0.50	1.5	0.32	0.39	0.50	1.40	1.0
Note : Angle de frottement naturel $\varnothing = \phi$; Coefficient de frottement sur la paroi $\mu = \delta$.												

3.8. Théories et normes de calcul des silos

Les règles professionnelles pour la conception et le calcul des silos en béton s'appuient principalement sur la norme européenne NF EN 1992-3, qui traite spécifiquement des silos et réservoirs en béton. Cette norme, publiée en 2006, détaille les exigences de sécurité, de service et de durabilité, y compris les bases de calcul, les matériaux, et les analyses structurales selon les états limites ultimes (ELU) et de service (ELS).

Pour l'évaluation des actions sur les parois verticales du silo on doit tenir compte de l'élancement des silos avec les classes suivantes :

- Silos élancés : lorsque $hc/dc \geq 2$;
- Silos d'élancement intermédiaire : lorsque $1,0 < hc/dc < 2,0$
- Silos peu élancés : lorsque $0,4 < hc/dc \leq 1,0$

3.8.1 Silos élancés

a) Actions sur les parois verticales au remplissage

☒ *Action symétrique au remplissage*

Il convient de déterminer les valeurs de la contrainte horizontale p_{hf} , de la force de frottement sur la paroi p_{wf} et de la contrainte verticale p_{vf} , à la profondeur z , en fin de remplissage et pendant le stockage, par :

$$P_{hf}(z) = P_{h0} \cdot Y_J(z)$$

$$P_{wf}(z) = \mu \cdot P_{h0} \cdot Y_J(z)$$

$$P_{vf}(z) = \frac{P_{h0}}{K} \cdot Y_J(z)$$

$$P_{h0} = \gamma \cdot K \cdot Z_0$$

$$Z_0 = \frac{A}{K \cdot \mu \cdot U}$$

$$Y_J(z) = 1 - e^{-z/Z_0}$$

Où :

A : l'aire intérieure de la section droite du silo ; **U** : le périmètre intérieur de la section droite ; **γ** : le poids volumique de la matière ensilée ; **μ** : le coefficient de frottement sur la paroi ; **K** : le rapport de pression horizontale/pression verticale ; **Z** : la profondeur sous le niveau de la surface équivalente du matériau ; **Z₀** : paramètre utilisé pour le calcul des actions ;

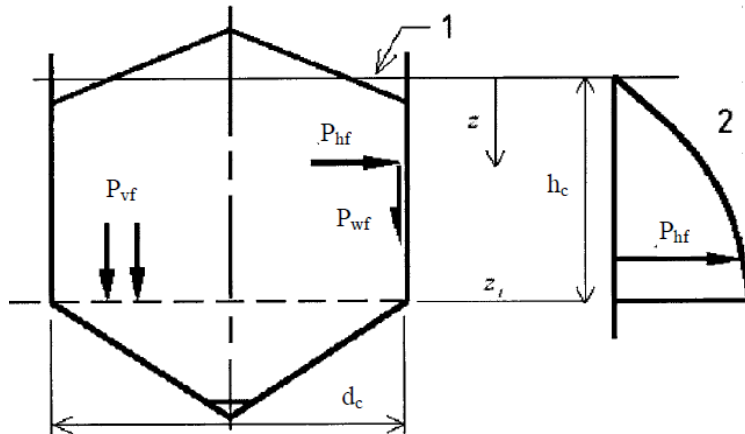


Figure.3.3. Actions sur les parois verticales au remplissage (Lobato et al, 2014).

b) Actions sur les parois verticales à la vidange

☒ Action symétrique

Des augmentations symétriques de la charge à la vidange doivent être utilisées pour représenter les augmentations momentanées de contrainte qui peuvent se produire sur les parois du silo pendant l'opération de vidange.

Quelle que soit la classe d'évaluation d'actions du silo, il convient de déterminer les contraintes symétriques à la vidange p_{he} et p_{we} par :

$$p_{he} = C_h p_{hf}$$

$$p_{we} = C_w p_{wf}$$

Où :

- C_h est le coefficient de contrainte horizontale à la vidange ;
- C_w est le coefficient de contrainte de frottement sur la paroi à la vidange.

Il y a lieu de déterminer les coefficients à la vidange C_h et C_w par les expressions suivantes, selon le cas.

- Pour les silos — quelle que soit leur classe — qui sont déchargés par le haut (pas d'écoulement au travers du matériau ensilé), on peut prendre:

$$C_h = C_w = 1,0$$

- Pour les silos minces de classe d'évaluation d'actions 2 et 3, il convient de prendre:

$$C_h = C_o = 1,15$$

$$C_w = 1,10$$

Où :

C_o est le coefficient à la vidange pour tous les matériaux ($C_o = 1,15$).

- ✓ Classe d'évaluation d'actions 3 : Silos dont la capacité dépasse 10 000 tonnes
- ✓ Classe d'évaluation d'actions 1 : Silos dont la capacité est inférieure à 100 tonnes

3.8.2. Silos peu élancés et silos d'élancement moyen

a) Actions sur les parois verticales au remplissage

☒ Action symétrique au remplissage

Il convient de calculer la contrainte horizontale p_{hf} et la contrainte de frottement de paroi p_{wf} en fin de remplissage de la façon suivante :

$$P_{hf}(z) = P_{h0} \cdot Y_R$$

$$P_{wf}(z) = \mu \cdot P_{hf}$$

Avec :

$$P_{h0} = \gamma K z_0 = \frac{\gamma \cdot A}{\mu \cdot U}$$

$$Y_R = 1 - \left(\frac{z - h_0}{z_0 - h_0} + 1 \right)^n$$

$$z_0 = \frac{A}{K \cdot \mu \cdot U}$$

$$n = -(1 + \operatorname{tg} \phi_r) \left(1 - \frac{h_0}{z_0} \right)$$

$$h_0 = \frac{r}{3} \operatorname{tg} \phi_r$$

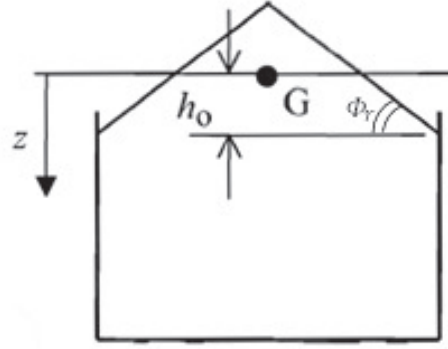


Figure 3.4. Schéma représente l'angle de talus naturel et la grandeur h_0 (NF EN 1992-3, 2006).

Où :

ϕ_r : Angle de talus naturel (voir figure 3.4);

h_0 : est la valeur de z au contact du produit avec la paroi du silo (figure 3.4).

b) Actions sur les parois verticales à la vidange

☒ Action symétrique

On introduit des augmentations symétriques de l'action à la vidange lorsqu'il est nécessaire de représenter les augmentations momentanées de contrainte susceptibles de se produire pendant l'opération de vidange.

Pour les silos peu élancés ($hc/dc \leq 1,0$), on peut prendre des actions symétriques à la vidange identique à celles qui se produisent au remplissage.

Pour les silos d'élancement intermédiaire ($1,0 < hc/dc < 2,0$), il convient de prendre pour les contraintes symétriques de vidange p_{he} et p_{we} :

$$p_{he} = C_h p_{hf}$$

$$p_{we} = C_w p_{wf}$$

Où : C_h et C_w sont les coefficients à la vidange donnés par les expressions qui suivent selon le cas.

- Pour les silos — quelle que soit la classe d'évaluation d'actions — qui sont déchargés à partir du haut (c'est-à-dire sans écoulement à l'intérieur du solide ensilé)

$$C_w = C_h = 1,0$$

- Pour les silos d'élanement intermédiaire et les classes d'évaluation d'actions 2 et 3, il convient de prendre les facteurs à la vidange suivants :

$$C_h = 1,0 + 0,15 C_S$$

$$C_w = 1,0 + 0,1 C_S$$

$$C_S = hc/dc - 1,0$$

Où C_S est le facteur d'ajustement à l'élanement.

Références bibliographiques

EN 1991-1-4 (2005) (English). Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-4: General actions - Wind actions [Authority: The European Union Per Regulation 305/2011, Directive 98/34/EC, Directive 2004/18/EC]. p.51.

Lobato, J.C.M.; Mesquita, A.L.A.; Mesquita, A.L.A. (2014). Conical hopper design for mass flow—Case of study for red mud powder. In Proceedings of the 15th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, Belém, PA, Brazil, 10–13 November 2014; pp. 1–9.

NF EN 1992-3 (2006). Eurocode 2 : calcul des structures en béton - Partie 3 : Silos et réservoirs (P 18-730:2006-12, NA:2008-07, NA:2016-17). Décembre 2006.