

# Chapitre 5

## Les Silos

### 1. Définition :

Un silo est un réservoir de grande capacité, prévu pour le stockage commercial ou industriel de grandes quantités de produit (plusieurs milliers de tonnes).

Généralement, ils sont de forme cylindrique et destinés à stocker des récoltes. Ils sont réalisés soit en béton armé ou en acier galvanisé



Figure 1 : silos en Béton armé

### 2. Classification:

*On peut classer les silos suivant la matière ensilée, alors on aura :*

#### 2.1 Les silos agricoles :

Ils sont destinés à stocker des céréales, parmi ceux-là on a :

##### A. *Les silos de fermes:*

Pour stocker les céréales, leur capacité peut atteindre 100t

### ***B. Les silos de coopératives :***

Leur capacité varie d'une installation à l'autre et suivant les régions, de 1.000 à 10.000 tonnes

Le choix du matériau est souvent fait en considération du prix : les uns exigeant des cellules en béton qui ne nécessitent aucun entretien extérieur (mais qui doivent être équipées d'appareils assurant la ventilation artificielle du grain), les autres préférant des cellules en tôle d'acier qui doivent être repeintes régulièrement, mais qui permet le stockage en atmosphère confinée

### ***C. Les silos portuaires:***

Leur capacité est généralement supérieure à 5000 tonnes et dépasse souvent 10000, 20000 tonnes, pour atteindre même parfois 50000 tonnes ou davantage. Ils sont généralement en béton armé et rarement métalliques, en raison de l'agressivité de l'atmosphère marine qui nécessite un entretien très soigné des tôles.

## **2.2 Les silos industriels:** Ces silos sont en béton armé ou en métal

□ Les silos peuvent être aussi classés suivant :

- La forme en plan des cellules (carré, rectangulaire, .....);
- Le matériau de fabrication (Bois, béton armée, métallique).



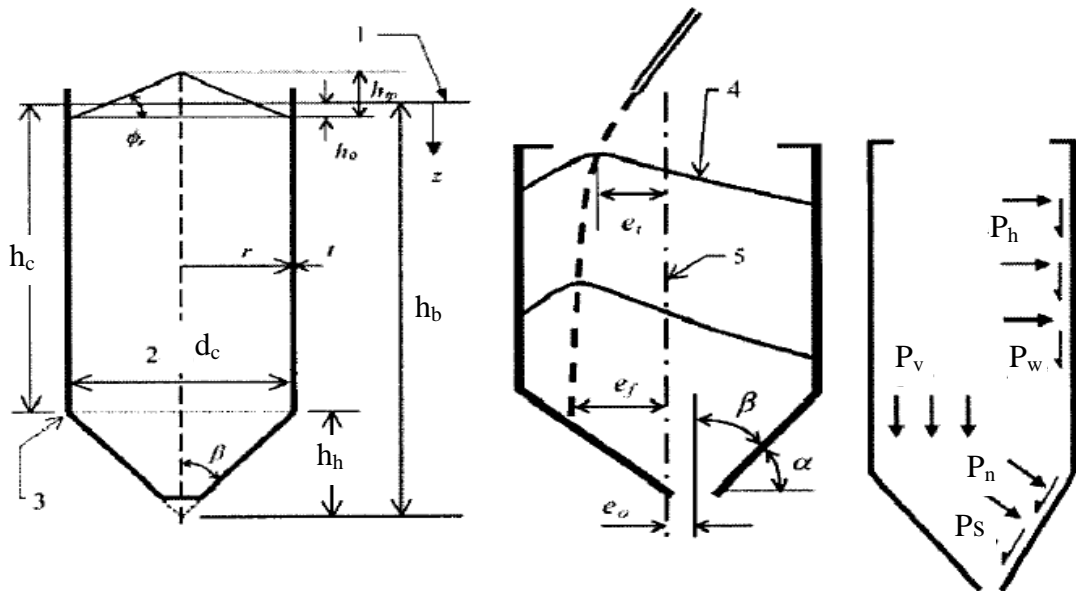
Figure 2 : silos en acier galvanisé

### 3. Caractéristiques géométriques du silo:

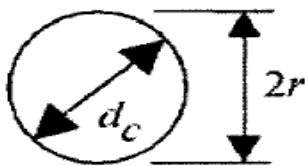
Le premier paramètre géométrique qui intervient dans le choix de la méthode de détermination des actions exercées par le matériau stocké est l'élançement du silo, c'est - à - dire le rapport  $h_c/d_c$  :

On distingue :

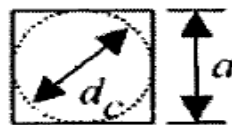
- Les silos élancés, pour lesquels  $h_c/d_c$  est supérieur ou égale à 2,0 ;
- Les silos moyennement élancés, pour lesquels  $h_c/d_c$  est compris entre 1,0 et 2,0 ;
- Les silos peu élancés  $h_c/d_c$  est compris entre 0,4 et 1,0 ;
- Les magasins de stockage : un silo dont le fond est plat et  $h_c/d_c$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



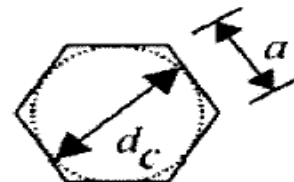
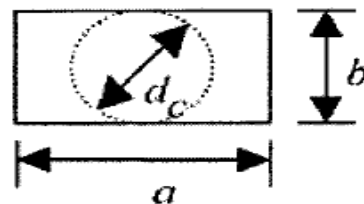
$$A/U = r/2$$



$$A/U = a/4$$



$$A/U = (b/2) / (1+b/a)$$



$$A/U = \sqrt{3} (a/4) = d_c/4$$

— les limitations dimensionnelles sont les suivantes :

$$h_b/d_c < 10$$

$$h_b < 100 \text{ m}$$

$$d_c < 60 \text{ m}$$

— le diamètre maximal des grains de matière ensilée ne dépasse pas  $0,03d_c$

#### 4. Pression dans les silos :

Il est connu que les paramètres principaux qui jouent un grand rôle sur le comportement des silos sont la matière entreposée. Ses propriétés, son mode d'écoulement, sa vitesse d'écoulement, peuvent influencer sur les parois,

##### 4.1 Matière granulaire :

###### A- Définition :

Ce sont les matériaux destinés au stockage tels que les semences, des céréales, des granulés, du riz, et, dans un cadre général à l'agro-industrie.

###### B- Les étapes de cheminement des grains :

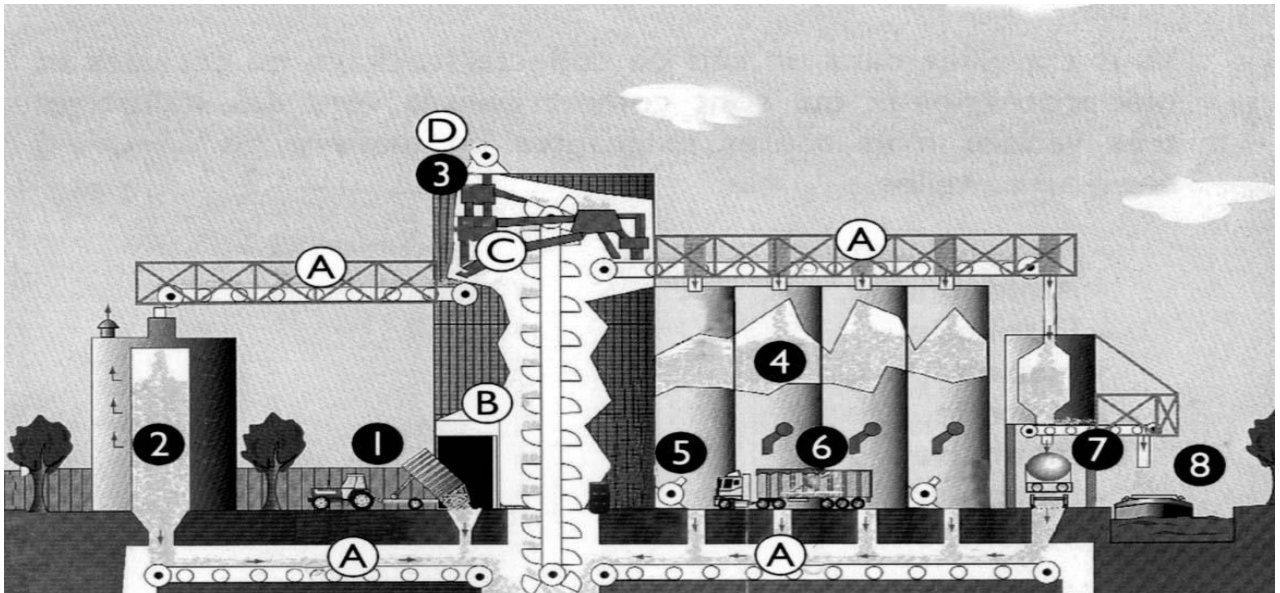


Figure 3 : les étapes du cheminement des grains

1. Réception

2. Séchage

3. Nettoyage et séparation

A. Transporteurs à bandes ou à chaînes

B. Elévateurs à godets

C. système d'aspiration de la poussière

4. Cellule de stockage avant expédition
5. Ventilation du grain
6. Expédition par camion
7. Expédition par train
8. Expédition par péniche

D. Aspirateur avec sortie air

### C- Les caractéristiques physiques et mécaniques de la matière ensilée :

Trois paramètres importants peuvent en effet varier:

- la densité,
- le frottement interne et la cohésion
- le frottement sur la paroi.

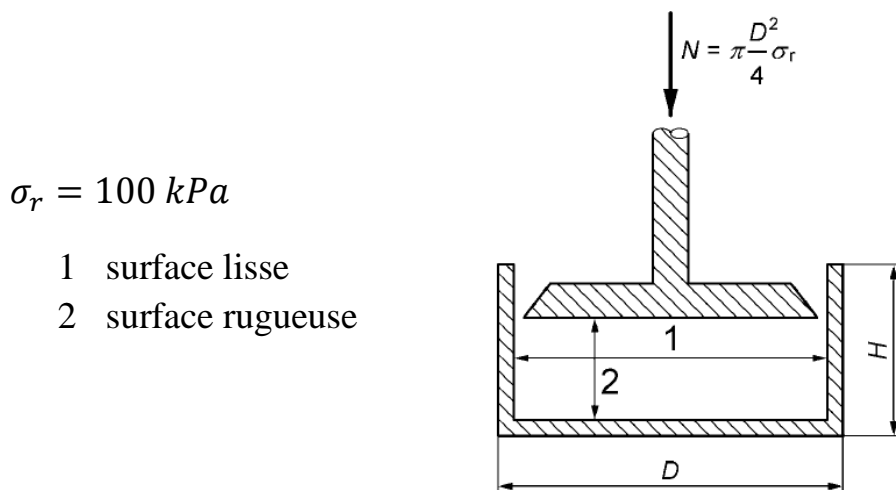
La densité varie sensiblement sur la hauteur d'un silo, par le simple fait de la compression des couches inférieures par les couches supérieures. Le cas d'un silo de 6m de diamètre et de 24m de hauteur, destinée à recevoir de blé dont la densité minimal est de  $750\text{kg/m}^3$ . Il a été mesurée que la densité de ce grain peut alors augmenter jusqu'à dépasser  $800\text{kg/m}^3$

La résistance d'un échantillon du matériau ensilé peut être déterminée à partir d'essais de cisaillement. Pour définir les effets de la résistance du matériau ensilé sur les contraintes dans le silo après remplissage, il y a lieu d'utiliser les deux paramètres  $c$  et  $\phi$ .

#### ✚ Poids volumique $\gamma$

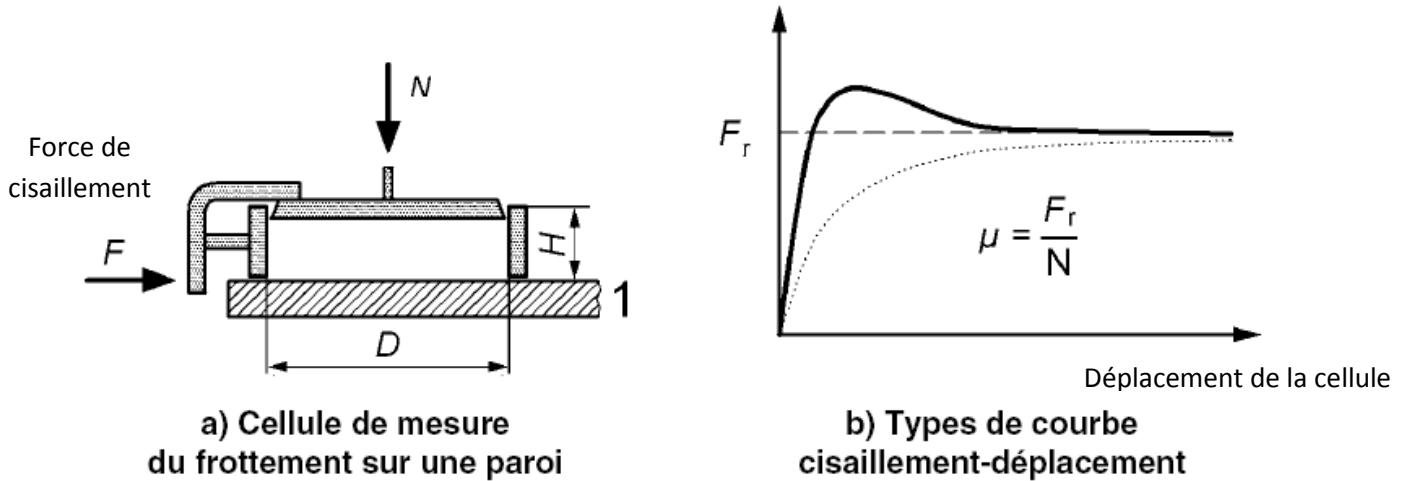
Il convient de déterminer le poids spécifique  $\gamma$  du matériau en utilisant un échantillon consolidé. Il convient d'utiliser la cellule montrée à la figure ci-dessous. Pour le diamètre  $D$  de la cellule il convient de prendre au moins 5 fois la taille maximale des grains. Pour l'épaisseur  $H$  de l'échantillon il convient de prendre entre  $0,3 D$  et  $0,4 D$

Le poids volumique du matériau est obtenu en divisant le poids de l'échantillon consolidé par le volume



### ✚ Le frottement sur les parois $\mu$ :

La détermination du coefficient de frottement de paroi est à utiliser pour la détermination des contraintes : Il s'agit de faire frotter un échantillon du matériau le long d'une surface qui représente la paroi du silo :

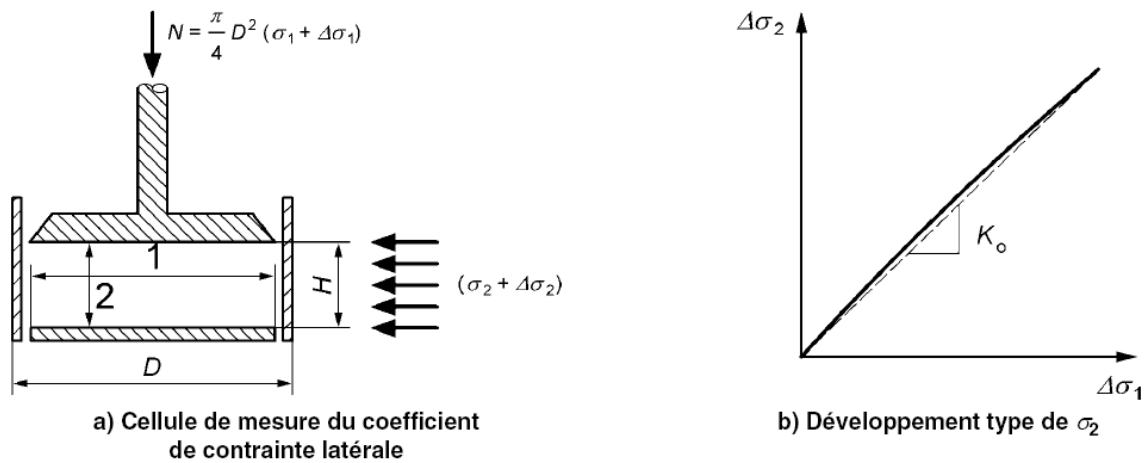


Catégorie	Titre descriptif	Type de matériau de la paroi
D1	paroi à frottement faible (paroi «glissante»)	acier inoxydable laminé à froid acier inoxydable poli surface revêtue basse frottement aluminium poli polyéthylène de poids moléculaire ultra élevé <sup>a)</sup>
D2	paroi à frottement moyen (paroi «lisse»)	acier doux au carbone lisse (construction soudée ou boulonnée) acier inoxydable finition laminoir acier au carbone galvanisé aluminium anodisé surface revêtue résistante à la corrosion et à l'usure par abrasion
D3	paroi à frottement élevé (paroi «rugueuse»)	béton brut de décoffrage, béton taloché, béton ancien acier au carbone vieilli (corrodé) acier résistant à l'abrasion revêtement de céramique

### ✚ Coefficient de contrainte latérale $K$ :

Il convient de déterminer le coefficient de contrainte latérale  $K$  (rapport de la contrainte horizontale moyenne à la contrainte verticale moyenne) pour un compactage du matériau et un niveau de contrainte correspondant au point du matériau ensilé où s'établit la contrainte verticale maximale en fin de remplissage.

On applique une contrainte verticale  $\sigma_1$  à un échantillon dont la déformation horizontale est empêchée. On mesure la contrainte horizontale induite  $\sigma_2$  et on en déduit la valeur du coefficient de contrainte latérale.



$$K_0 = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$$

$$K = 1,1 K_0$$

Pour  $\sigma_1$  ; il convient de prendre la valeur de la contrainte verticale maximale dans le solide ensilé.

Propriétés des matériaux particuliers

Matériau	Poids KN/m <sup>3</sup> (Moy)	$\phi_i$	K	$\mu$		
				D1	D2	D3
Farines	7	42	0,36	0,24	0,33	0,48
Maïs	8	31	0,53	0,22	0,36	0,53
Blé	9	30	0,54	0,24	0,38	0,57
Soja	8	25	0,63	0,24	0,38	0,48
Sucre	9,5	32	0,5	0,46	0,51	0,56
Sable	16	36	0,45	0,38	0,48	0,57

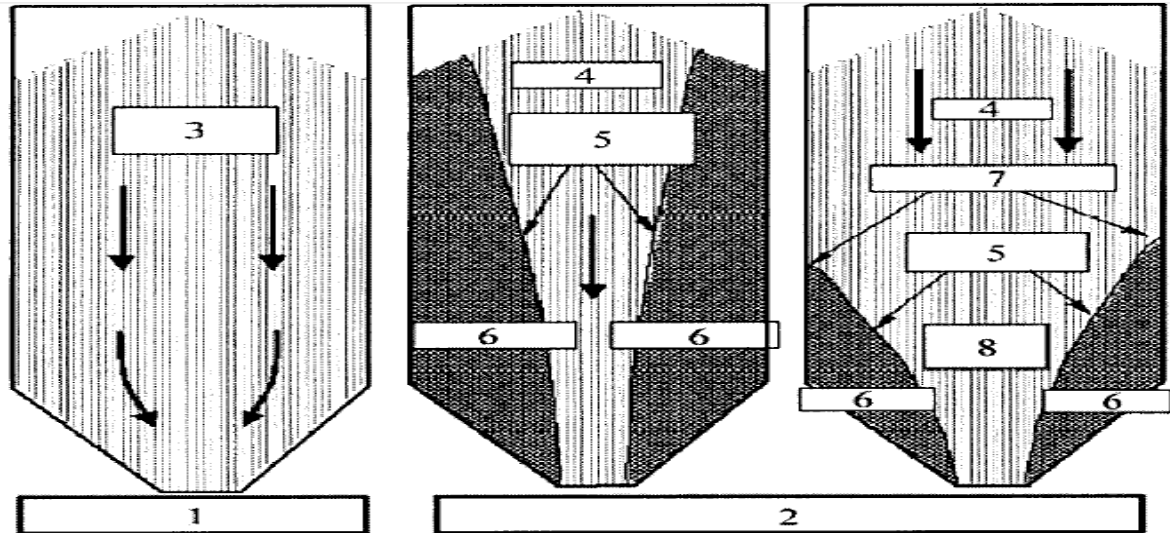
## 5. L'écoulement :

### A. Définition:

Dès que la matière commence à bouger vers le fond de silo, on dit qu'il y'a un écoulement.

Il y a lieu de prendre en compte les conséquences du mode de l'écoulement pendant la vidange, pour lequel on peut distinguer les catégories suivantes :

- écoulement en masse ;
- écoulement en tuyau ;
- écoulement mixte.



a) Ecoulement en masse

b) Ecoulement en tuyau

c) Ecoulement mixte

6 Zone d'immobilité

Lorsqu'un écoulement en tuyau interne qui se produit, les contraintes produites par la vidange peuvent être ignorées. Les silos peu élancés à vidange gravitaire centrée et les silos à système de vidange mécanique en surface assurant un écoulement en tuyau interne remplissent ces conditions ;

Durant l'écoulement granulaire dans un silo deux régions sont observées: -*région d'écoulement rapide* et *région d'écoulement lent*. L'*écoulement lent* est caractérisé par un taux de déformation lent et de petites forces internes. L'*écoulement rapide* est connecté à un grand taux de déformations et de grandes forces internes. Les particules se détachent souvent, leur contact et soumis à de courtes collisions et à un chevauchement. La matière se comporte plus comme un fluide dense ou gaz,

Durant l'écoulement lent les contraintes internes sont produites seulement de forces normales et de frottement entre les particules. Pour l'écoulement rapide, les contraintes produites sont due aux deux forces normales et frottements entre les grains et la collision.



## 6. Théories et normes de calcul des silos :

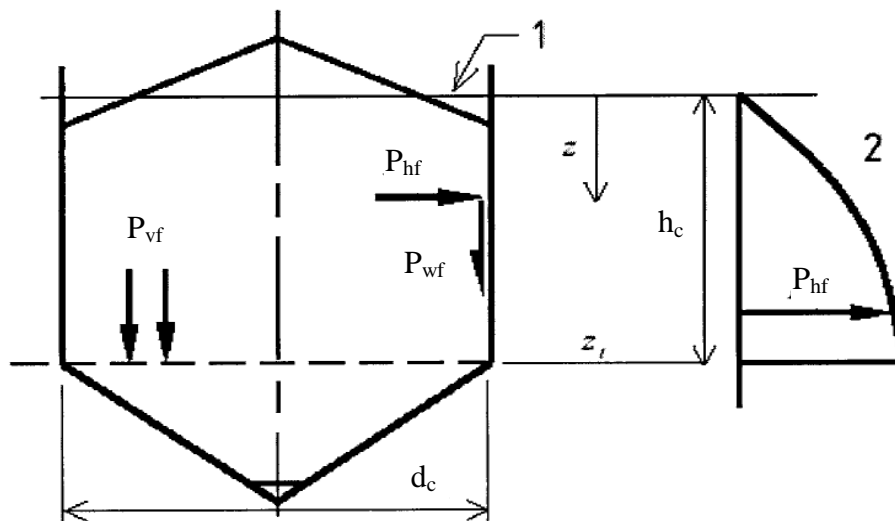
Pour l'évaluation des actions sur les parois verticales du silo on doit tenir compte de l'élancement des silos avec les classes suivantes :

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

### 6.1 Silos élancés

#### 6.1.1 Actions sur les parois verticales au remplissage

##### 6.1.1.1 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 :

$$p_{hf}(z) = p_{ho} Y_J(z)$$

$$p_{wf}(z) = \mu p_{ho} Y_J(z)$$

$$p_{vf}(z) = \frac{p_{ho}}{K} Y_J(z)$$

$$p_{ho} = \gamma K z_o$$

$$z_o = \frac{1}{K\mu U} A$$

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

$\gamma$	est la valeur caractéristique du poids spécifique
$\mu$	est la valeur caractéristique du coefficient de frottement du matériau sur la paroi verticale
$K$	est la valeur caractéristique du coefficient de contrainte latérale
$z$	est la profondeur sous le niveau de la surface équivalente du matériau
$A$	est l'aire de la coupe horizontale du silo
$U$	est le périmètre intérieur de la coupe horizontale du silo

## 6.1.2 Actions sur les parois verticales à la vidange

### 6.1.2.1 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

## 6.2. Silos peu élancés et silos d'élancement moyen

### 6.2.1. Actions sur les parois verticales au remplissage

#### 6.2.1.1. Action symétrique au remplissage

Il convient de calculer l'action symétrique au remplissage par les expressions suivantes.

Déterminer la contrainte horizontale  $p_{hf}$  et la contrainte de frottement de paroi  $p_{wf}$  en fin de remplissage de la façon suivante :

$$p_{hf} = p_{ho} Y_R$$

$$p_{wf} = \mu p_{hf}$$

$$p_{ho} = \gamma K z_o = \gamma \frac{1}{\mu U} A$$

$$Y_R = 1 - \left\{ \frac{z - h_o}{z_o - h_o} + 1 \right\}^n$$

$$z_o = \frac{1}{K \mu U} A$$

$$n = - (1 + \tan \varphi_r) (1 - h_o/z_o)$$

Où :  $h_o$  est la valeur de  $z$  au point le plus élevé du contact matériau-paroi

### 6.2.2. Actions sur les parois verticales à la vidange

#### 6.2.2.1. 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 identiques 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'élançement 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'élançement.

### **Principaux modes d'endommagement des réservoirs**

La paroi cylindrique des réservoirs est soumise à la tension circonférentielle (conduit rarement à l'éclatement), et à la compression verticale (la source des principales déformations par flambement).

Les ruptures de flambements sont généralement dues au développement de grandes contraintes compressives axiales locales, qui surviennent des pressions de frottement de paroi et de l'action de cintrage complexe.

Le flambement apparait essentiellement dans les structures minces élancées subissant des états de compression



Flambement des viroles supérieures de plusieurs silos de soja. (Port de DjenDjen, Jijel, Algerie) Septembre 2020.