

5.1 Introduction

Les silos sont des ouvrages destinés au stockage, des produits pulvérulents et secs. Ils sont utilisés également dans diverses industries (brasseries, cimenteries, matières plastiques, engrais, matériaux divers, etc.) et dans le domaine agricole.

5.2 Type de silos (silos en BA, silos en acier)

Grâce à leur leur facilité de montage, l'hygiène dans leur manipulation et leur faible coût de stockage, les silos métalliques en tôle galvanisée sont la meilleure alternative pour le stockage de céréales. Un acier à limite élastique (350 MPa) dans le cas des viroles et jusqu'à 600 MPa dans le ca des renforts est utilisé. Selon la géométrie des silos on distingue :

✚ Silos isolés



Figure 5.1 : Silos isolés

✚ Silos batterie (Plusieurs cellules sont accolées)



Figure 5.2 : Plusieurs silos accolés

Chapitre 06 : Les Silos

Les silos sont classés en général selon leur utilisation, on distingue :

➤ Silos à fond plat

Les silos à base de béton, à fond plat, sont employés pour le stockage prolongé de grandes quantités de grain et de produits granulés. Ils ont des capacités de stockage allant de 83 m³ à 45055 m³ et des diamètres allant de 4,58 m à 41,25 m.



Figure 5.3 : Silos à fond plat

➤ Silos à fond conique

Ils sont conçus pour le stockage de céréales, de légumineuses, de pellets et d'autres produits exigeant des conditions de stockage spéciales. Le produit stocké reste isolé du sol pour empêcher l'entrée d'humidité et pour éviter de briser le grain.



Figure 5.4 : Silos à fond conique

Chapitre 06 : Les Silos

Avec ce type de silo, le cout de réalisation est réduit du fait qu'on n'aura pas besoin de travaux de fondations, ce qui permet aussi de réduire les coûts du génie civil et d'accélérer considérablement les travaux de montage. Ces silos à fond conique présentent des capacités allant de 43 m³ à 2 016 m³ et des diamètres de 3,82 m à 10,70 m. Pour assurer le bon déchargement du silo et un bon niveau de propreté après chaque déchargement, les cônes peuvent être fournis avec des inclinaisons de 45 ° et 60 °. La conception de nos cônes est particulièrement soignée en ce sens, du fait que l'on évite l'existence de points d'accumulation de matières risquant de contaminer le produit dans des usages ultérieurs. Les dimensions de l'orifice de sortie du silo varient de Ø270 mm à Ø1200 mm, et ils peuvent être complétés par une large gamme d'accessoires. La hauteur libre entre le niveau de déchargement du silo et le sol peut être de 1 ou 1,5 m, en fonction des exigences de chaque installation, avec la possibilité de personnaliser cette hauteur sur demande.

➤ Boisseaux de chargement

Les boisseaux de chargement sur structure sont conçus pour le stockage et l'expédition ultérieure de produits en vrac comme les granulés, les farines, etc. Dans les installations de **type** agricole, usine d'aliments de animaux ou les usines de fabrication de farine, la gamme de boisseaux de chargement disponibles présente des diamètres allant de 2,55 m à 4,65 m et des capacités allant de 11 m³ à 200 m³.



Figure 5.6 : Les boisseaux de chargement sur structure

➤ Classement selon la fiabilité

La partie 4 de l'Eurocode 1 conduit à distinguer trois classe de fiabilité .l'attribution d'une classe de fiabilité 1,2 ou 3 à un ouvrage a des conséquences sur l'évaluation des actions : les méthodes d'évaluations sont d'autant plus précises que la classe retenue est élevée. En classe 1 la norme autorise des approximations qu'elle ne permet plus en classe 2 et moins encore en classe 3.

Chapitre 06 : Les Silos

Classe de fiabilité	Descriptions
Classe 3	<ul style="list-style-type: none"> - Tous les silos dont la capacité dépasse 10000 tonnes ; - Les silos dont la capacité dépasse 1000 tonnes, et ayant une des caractéristiques suivantes : - Vidange excentrée avec $e_0/d_c > 0,25$; - Silos magasins avec excentrement de surface tel que $e/d_c > 0,25$
Classe 2	- Tous les silos qui ne sont ni de classe 3, ni de classe 1
Classe 1	- Silos dont la capacité est inférieure à 100 tonnes.

d_c : Diamètre du cercle inscrit dans la section droite ;

5.3 Règlements de calcul des silos

Les normes de calcul ont toujours fait face aux problèmes sollicitant les structures, ces derniers peuvent être parfois incertains et malheureusement mal comprise, comme ceux touchant les silos. Face à l'importance de ce type de structure, et face aux accidents augmentant chaque année lors de l'exploitation de ce type d'ouvrage il a été clair qu'il faut avoir un règlement définitif qui fixe leur mode de calcul. Le comportement du silo est très complexe, surtout au niveau de l'interaction entre les parois et la matière, le comportement des grains lui-même est un problème. Leur type d'écoulement ainsi que d'autres paramètres ne peuvent pas être fixé au niveau du calcul face au manque d'information et de recherche. Les normes de calcul actuelles des silos sont :




- La norme Allemand DIN (1055-6) ;
- La norme Américaine ACI 313-97 ;
- Le standard international ISO-11697 ;
- L'anglais BMHB ;
- L'Australien ;
- La norme Française ;
- L'espagnol NBE-AE 88 ;
- L'Eurocode ENV 1991-4.

En général, les formules appliquées pour le calcul des silos sont :

- ❖ Formule de **Koenen-Janssen** (1895) ;
- ❖ Formule de **Caquot** et **Kérisel** (1956) ;

5.4 Valeurs caractéristiques des produits ensilés

Les produits ensilés sont caractérisés par :

-  Poids volumique γ ;
-  Angle de frottement interne φ ;
-  Angle de frottement δ sur la paroi du silo.

Ces valeurs sont récapitulées dans le tableau suivant :

Chapitre 06 : Les Silos

Produit	γ (kN/m ³)	φ (°)
Ciment ⁽¹⁾	14,7	28
Clinker ⁽²⁾	14,7 à 15,7	33
Cru de cimenterie ⁽²⁾	13,0	26
Plâtre ⁽¹⁾	12,25	25
Poudre de charbon ⁽¹⁾	8,35	25
Blé	8,35	26
Maïs	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 ⁽¹⁾	8,8	20
Sucre granulé	9,0	30

Les parois en béton sont classées en trois catégories :

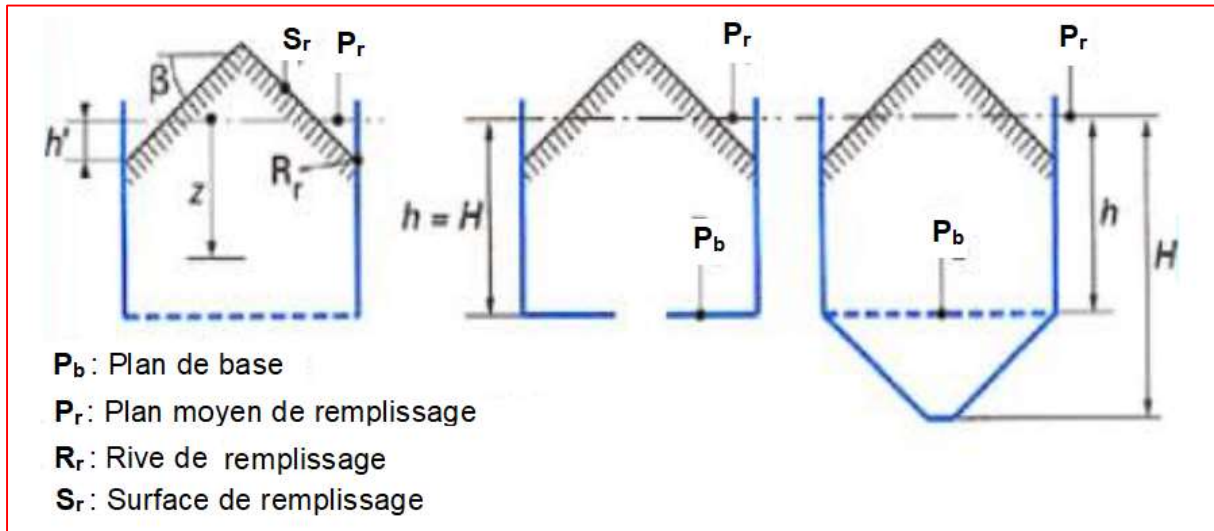
- **Paroi A** : paroi à rainures horizontales ;
- **Paroi B** : béton non revêtu ;
- **Paroi C** : béton revêtu d'une peinture La valeur conventionnelle de l'angle de frottement δ sur la paroi est définie par la relation :

$$\rho = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi}$$

Granularité (selon type de produit)	Paroi A	Paroi B ⁽¹⁾
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 $\rho = 0,50$.

5.5 Terminologie



- Le rayon hydraulique $rh = A/U$,
- Cellule circulaire de rayon R , ($rh = R/2$, $A = \pi r^2$ et $U = 2\pi r$)
- Elancement c'est le rapport H/rh
- Hauteur du sommet du cône du solide stocké $h_c = r \tan\beta$
- Profondeur $h' = h_{c/3} = \left(\frac{2}{3}\right)rh \tan\beta$

5.6 Types de vidanges

- Vidange normale : (l'écoulement se fait exclusivement par gravité, il n'existe aucune structure à l'intérieur du silo, l'orifice ou les orifices de vidange sont situés sur le fond et entièrement contenus à l'intérieur d'un contour centré déduit du contour de la section du silo par un rapport 0,4, $\zeta < 0.4$).
- Vidange géométriquement anormale ($\zeta > 0.4$)
- Vidange mécaniquement anormale
- Vidange structurellement anormale.

5.7 Actions exercées par la matière ensilée

La valeur au remplissage de la pression normale maximale sur le mur à la base du silo est :

$$P_{vf} = \left(\frac{\gamma A}{\mu k U}\right) \left(1 - e^{-\frac{zU}{Ak\mu}}\right)$$

Le rayon hydraulique pour cellule circulaire est :

$$\frac{A}{U} = \frac{\pi R^2}{2\pi R} = \frac{R}{2}$$

$$P_{hf} = kP_{vf}$$

$$P_{hf} = \left(\frac{\gamma R}{2\mu}\right) \left(1 - e^{-\frac{zR}{2k\mu}}\right)$$

Chapitre 06 : Les Silos

D'où :

$$P_{hf} = P_0 \left(1 - e^{-\frac{z}{z_0}}\right) = P_0 \cdot C_z$$

La pression asymptotique :

$$P_0 = \frac{\gamma R}{2\mu}$$

La hauteur caractéristique de Janssen :

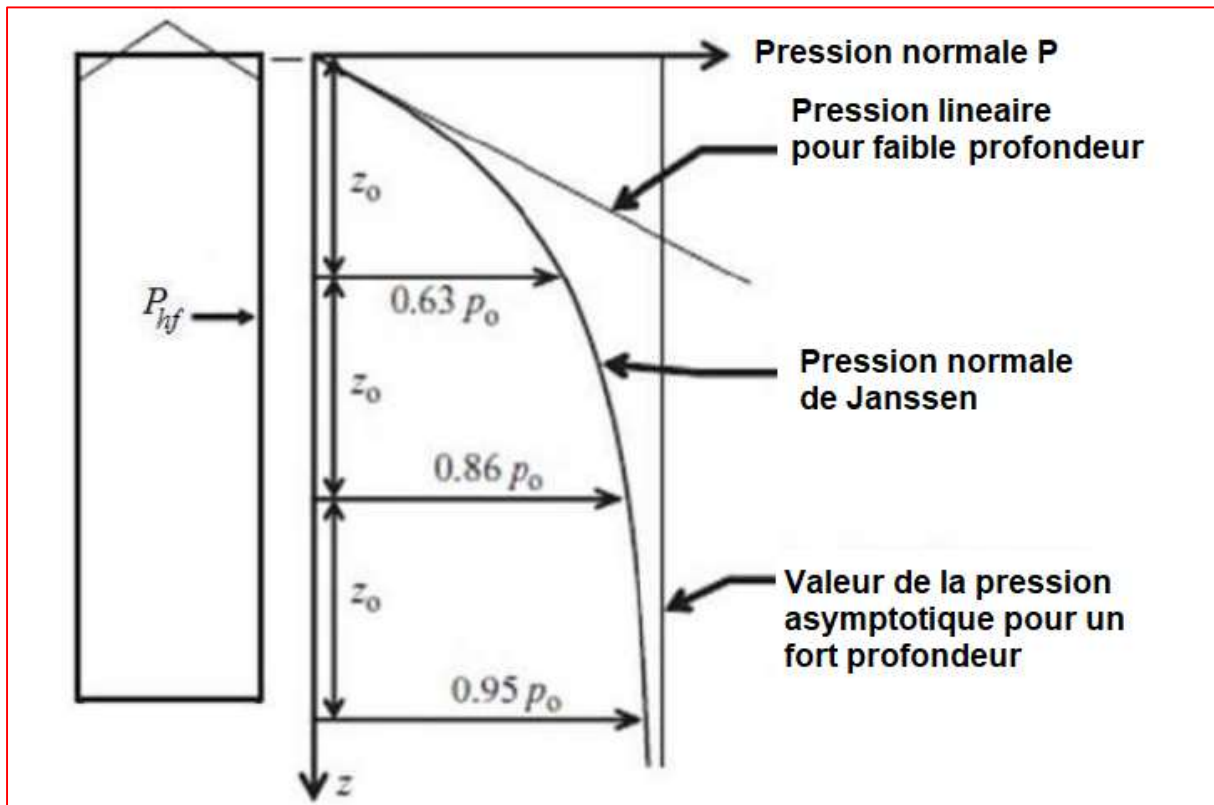
$$Z_0 = 2k\mu$$

Le coefficient de pression :

$$C_z = 1 - e^{-\frac{z}{z_0}}$$

La pression normale sur la paroi à la base du silo :

$$P_{hf} = P_0 \cdot C_z$$



La pression localisée de chargement :

$$P_{Ph} = 0.2\beta \cdot P \cdot h \cdot f$$

$$\beta = 1 + 4e_i/d_c$$

Chargement concentrique :

$$e_i = 0$$

Chapitre 06 : Les Silos

$$\beta = 0$$

La dimension verticale de la pression locale est :

$$S = 0.2d_c$$

La force horizontale totale due à la pression localisée est :

$$F_{pf} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot s \cdot d_c \cdot P_{pf}$$

La pression nominale de déchargement à la vidange P_{he} :

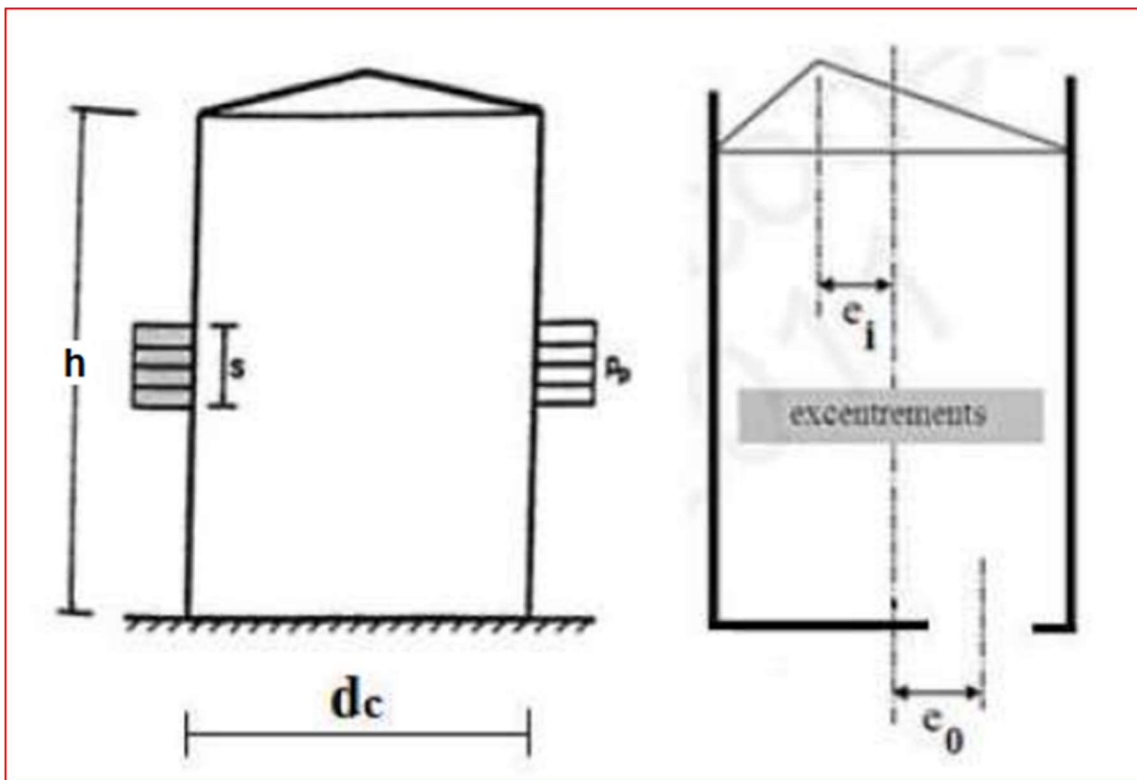
$$P_{he} = C_h \cdot P_{hf} \quad (C_h = C_0 \rightarrow \text{Coef de pression d'écoulement})$$

La valeur de pression localisée de déchargement :

$$P_{pe} = 0.2 \cdot \beta \cdot P_{he} \quad ; \quad \beta = 1 + 4e_{max} / d_c \quad ; \quad e_{max} = \max(e_i; e_0)$$

La force horizontale totale due à la pression localisée de déchargement est :

$$F_{pf} = \left(\frac{\pi}{2}\right) \cdot s \cdot d_c \cdot P_{pf}$$



Chapitre 06 : Les Silos

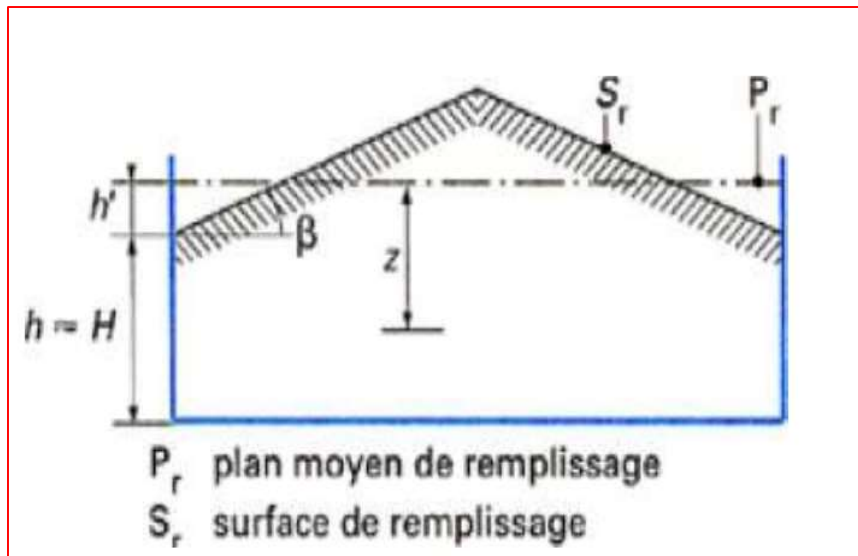
5.8 Les magasins de stockages

Étant donné leur faible élancement et leur souplesse relative, les silos de ce type sont plutôt assimilables à des murs de soutènement.

$$H \leq rh$$

$$H = h$$

$$h' \leq 0.4H$$

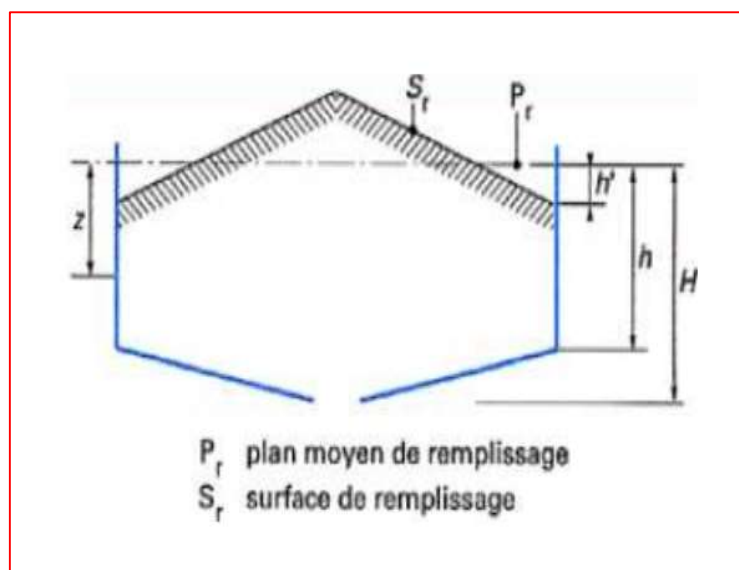


5.9 Les silos-réservoirs

$$1.5 \leq H/rh \leq 3.5$$

$$rh \leq 7.5m \text{ Vidange normale}$$

$$h - h' \geq 0.6H$$



Chapitre 06 : Les Silos

5.10 Calcul des silos en béton armé

Charges

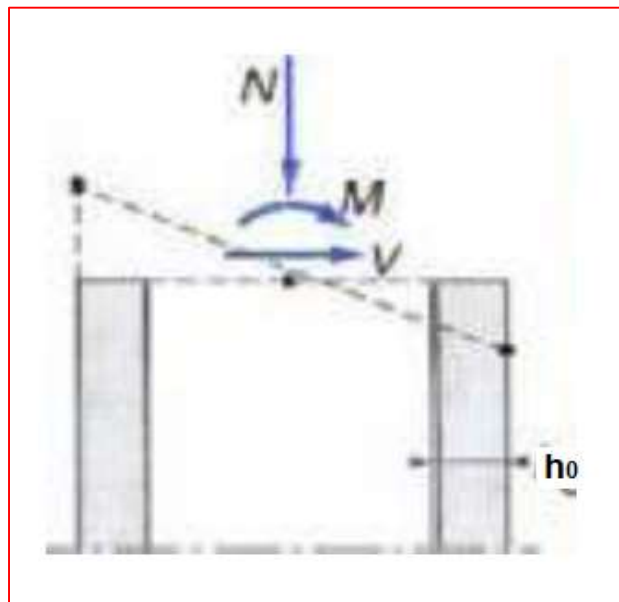
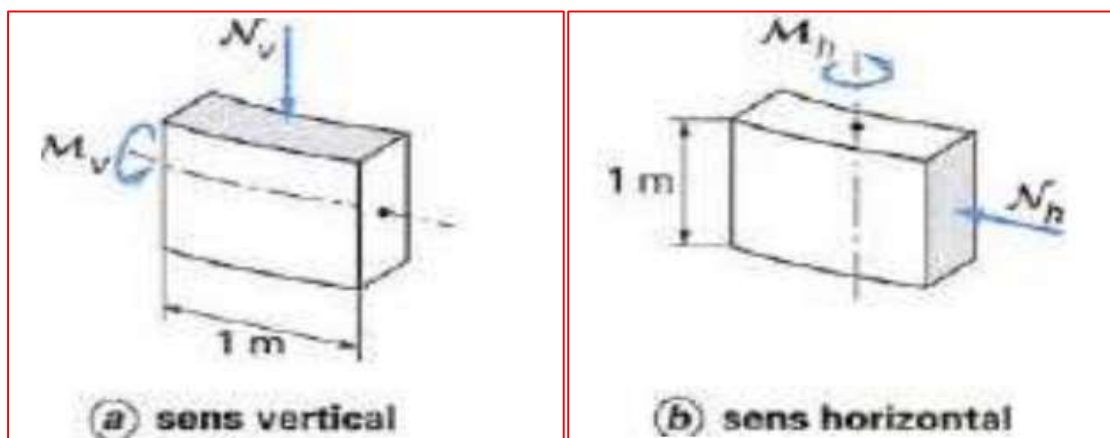
- Permanentes **G** (poids propre, équipements fixes, etc.)
- Variable d'exploitation **Q** (matière ensilée, équipements mobiles, etc.)
- Climatiques (vent **W**, neige **Sn**)
- Accidentelles (séisme **SI**)

Déformations imposées T

- Effets de la température intérieure et extérieure
- Effets du retrait

Sollicitations dues aux actions d'ensemble

Sollicitations dues aux actions d'ensemble et locales



L'action d'un gradient thermique

$$M_{\Delta\theta} = \alpha_{\theta} \frac{\Delta\theta}{h_0} EI \quad ; \Delta\theta = 10^{-5}$$

h_0 : L'épaisseur de la paroi ; EI : Rigidité de la paroi ;

Propriétés des matières ensilées :

Chapitre 06 : Les Silos

Matériau	Poids volumique γ (KN/m ³)		Angle talus naturel \varnothing_r (deg)	Angle frottement interne \varnothing_i (deg)		Rapport pression latérale K		Coefficient de frottement sur la paroi μ				Coefficient de pression locale C_{op}
	γ_l (inf)	γ_u (sup)		\varnothing_i m	a_{\varnothing}	K_m	a_K	D1	D2	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
Maïs	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	0,5	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