

Les silos – 4.2 Comportements de la matière ensilée (2/3)

Ce texte est la deuxième partie du quatrième article dans une série sur les silos en général et plus particulièrement les silos métalliques. Après les trois premiers articles d'introduction générale, de la présentation des éléments principaux et de la géométrie, puis les différents comportements et caractéristiques de la matière ensilée, on regardera les actions de la matière ensilée sur la structure et les interactions éventuelles.

Pour rappel, nous avons publié sur métalétech :

- [Les silos #1 – Introduction générale](#)
- [Les silos #2 – Les éléments principaux](#)
- [Les silos #3 – La géométrie](#)
- [Les silos # 4 - 4.1 Comportements de la matière ensilée \(1/3\)](#)

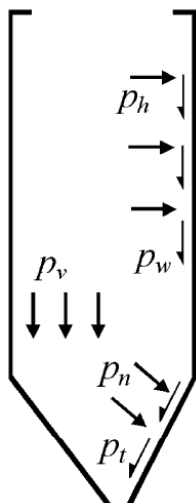
On utilisera de préférence les termes des Eurocodes :

- 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

Généralités

Le présent article se place dans la suite de sa première partie 4.1.

Actions de la matière ensilée – comportement « attendu » symétrique



Les actions de la matière ensilée sont décomposées en trois composantes :

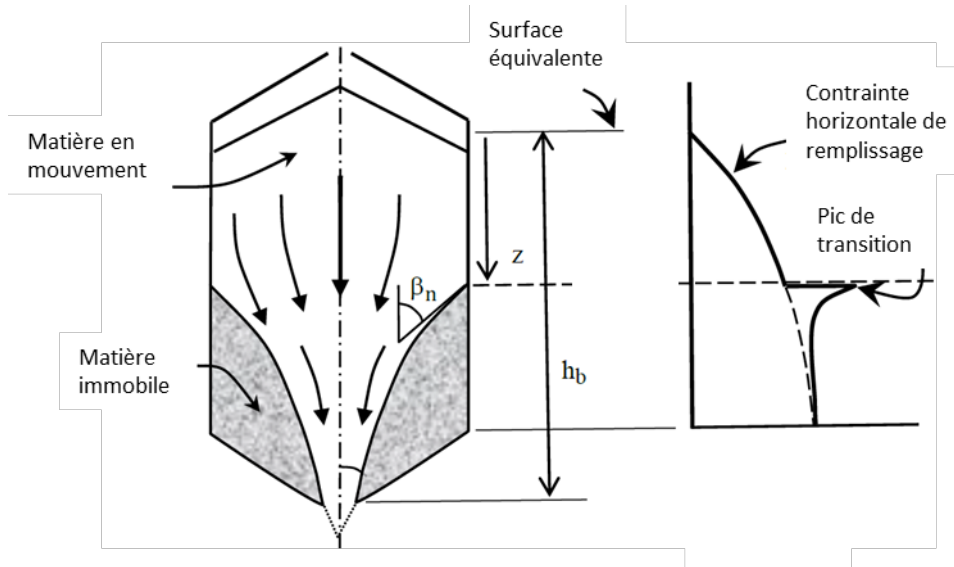
1. La contrainte horizontale (= normale à la paroi) p_h pour une paroi verticale, la contrainte normale p_n pour une paroi inclinée
2. Le frottement (parallèle à la paroi, vers le bas) p_w pour une paroi verticale, p_t pour une paroi inclinée
3. La contrainte verticale à l'intérieur du volume ou sur le fond p_v

Note : Dans la définition de l'Eurocode, en ce qui concerne les actions de la matière ensilée sur la paroi, on note que le terme « pressure » de la version anglaise a été traduit en français avec « contrainte » ; on rappelle que le terme utilisé dans l'ancienne norme française était « pression », ce qui semble plus cohérent. Néanmoins, pour éviter des confusions, on se conforme ici à la terminologie de l'Eurocode.

Par « symétrique » il faut comprendre « symétrique par rapport à l'axe verticale du silo », c'est-à-dire qu'une contrainte p donnée est uniforme à une hauteur donnée.

Les contraintes sont souvent différentes en remplissage et en vidange. Généralement les actions de vidange sont calculées simplement en multipliant les actions de remplissage par différents coefficients, afin de tenir compte de l'effet dynamique lors de la vidange, mais on tire l'attention sur un phénomène particulier concernant l'écoulement mixte : sur la paroi au

droit de la transition entre la matière en mouvement et la matière immobile, des pics de contrainte apparaissent :



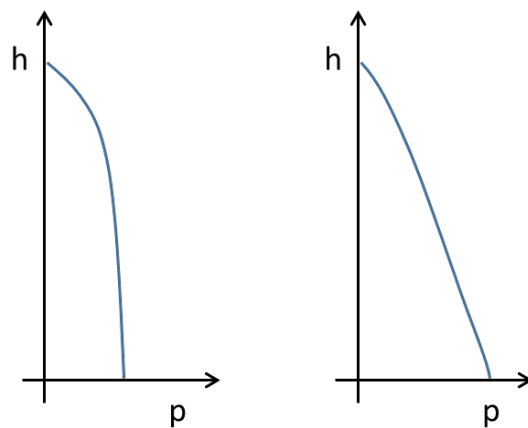
Extrait du Final Draft EN 1991-4: 2020

Ce phénomène n'est pas explicitement pris en compte dans la version actuelle de l'Eurocode.

Actions symétriques sur la jupe et à l'intérieur de la matière ensilée

Toutes les contraintes sont variables sur la hauteur. p_h , p_w et p_v augmentent vers le bas ; l'allure des courbes dépend de l'élancement du silo (rapport h_c/d_c), voir ci-contre.

Cette différence dans l'allure s'appelle « l'effet de silo ». Pour un silo très élancé, les contraintes sont presque constantes sur la hauteur ; moins que le silo est élancé, plus le comportement s'approche de ce qu'on pourrait calculer avec les méthodes utilisées en géotechnique.



Silo très élancé

Silo peu élancé

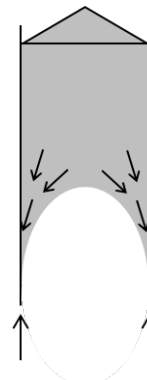
Les contraintes sont calculées indépendamment de la forme en plan du silo (circulaire, carrée, rectangulaire). Cela est probablement une approximation, notamment en ce qui concerne les angles des silos rectangulaires.

La contrainte p_v décrit la contrainte verticale à l'intérieur du volume de la matière, donc entre deux couches de matière ensilée à un niveau donné. On s'y intéresse là où il y a une interaction avec la structure : contrainte sur un fond plat, ou action sur des tirants notamment.

$p_v(h_c)$ (donc $z = h_c$: niveau de la transition entre la paroi verticale et la trémie) est aussi la donnée d'entrée pour le calcul des actions dans une trémie (p_n et p_t).

Rappel : pour la définition de z , voir le 3^e article de la présente série.

Le terme « frottement » pour la contrainte p_w conduit parfois en erreur : en effet, cette composante est présente aussi à l'état statique de la matière ensilée, et non seulement quand la matière est en mouvement. Il faut imaginer que le poids de la matière ensilée peut prendre plusieurs chemins pour arriver aux fondations : soit en s'appuyant directement sur le fond, soit en s'appuyant verticalement sur la paroi ; cette partie est alors transmise via l'effort normal dans la paroi et/ou dans les montants. La situation extrême se présente dans le cas de formation de voûte : on constate bien que la matière est dans un état statique, et tout le poids de la matière ensilée doit être transféré par les parois, donc par frottement.



A noter aussi que p_w , contrairement à p_v , n'est pas directement exploitable pour déterminer la résultante en bas du silo, puisque p_w se cumule sur la hauteur en se transformant en effort normal vertical n_{zSk} dans la paroi : pour obtenir la résultante, l'Eurocode fournit une formule supplémentaire pour n_{zSk} , intégrant p_w sur la hauteur.

Pour la descente de charge globale, on prend alors p_v à la hauteur maximale ($z_{max} = h_c$), multiplié par la surface du fond du silo, ainsi que n_{zSk} , multiplié par la circonférence de la paroi.

La répartition entre frottement sur la paroi et pression sur le fond dépend notamment de la nature de la paroi : plus qu'elle est glissante, moins on aura du frottement (voir « interactions avec la structure du silo »). A noter que ce coefficient peut varier avec le temps (revêtement initial/ polissage/ abrasion/ corrosion), et même localement (matière qui percute la paroi au remplissage ; vidange excentré ; etc.)

On rappelle que l'Eurocode prévoit le calcul de plusieurs cas, afin de trouver la valeur maximale pour chaque action, avec les autres actions concomitantes (voir la 1^{ère} partie du présent article, et le tableau 3.1 de l'EN 1991-4).

Actions symétriques dans la trémie

Pour les contraintes sur les parois inclinées de trémies p_n et p_t , la courbe prend des formes plus particulières. La première distinction à faire est celui entre les trémies profondes et peu profondes. Le cas particulier d'un fond plat est défini dans l'Eurocode avec une pente inférieure à 5° par rapport à l'horizontale.

L'impact de l'inclinaison de la paroi sur les contraintes est décrit dans l'Eurocode :

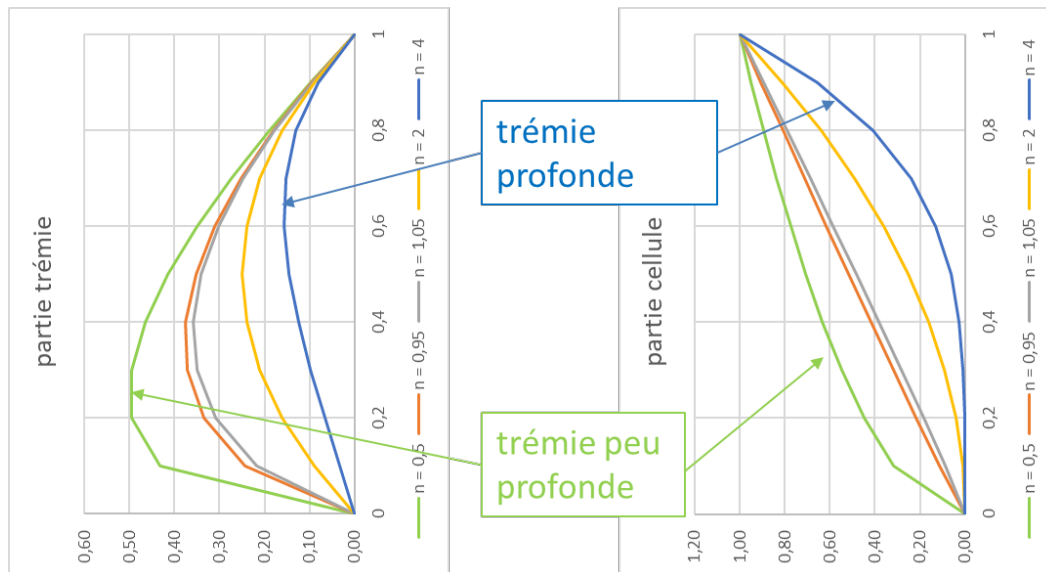
NOTE Dans une trémie profonde, au remplissage le matériau glisse le long de la paroi inclinée et se trouve consolidé par le matériau qui prend place au-dessus de la trémie. La contrainte de frottement sur la paroi est alors dans un rapport à la contrainte normale sur la trémie qui est le coefficient de frottement de paroi (le frottement est mobilisé complètement).

Dans une trémie peu profonde le matériau ne glisse pas le long de la paroi inclinée lors du remplissage (la pente est trop faible ou le coefficient de frottement trop élevé). La contrainte de frottement n'est donc pas reliée à la contrainte normale à la paroi de la trémie par le coefficient de frottement, mais par une valeur inférieure qui dépend de la pente de la trémie et l'état de contrainte dans le matériau (le frottement de paroi n'est pas totalement mobilisé).

La compressibilité du matériau joue également un rôle à cet égard, mais ce rôle est moins important.

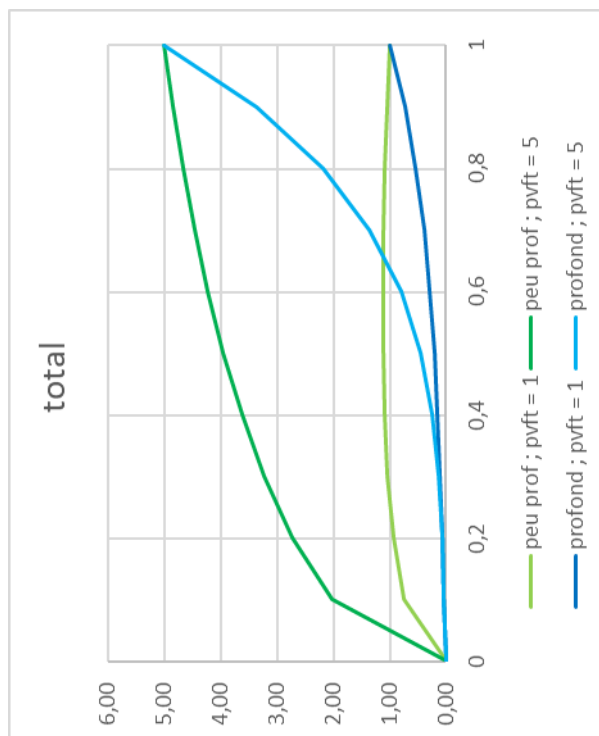
Extrait NOTE §6.1.1 (2)P de l'EN 1991-4 :2006

La courbe des contraintes dépend aussi de la hauteur de la cellule au-dessus de la trémie. En effet, on peut décomposer les contraintes en deux parties : la partie « comportement dans la trémie » et la partie « effet de la matière dans la cellule ». Ces deux courbes prennent les allures suivantes :



Courbes unitaires avec $\gamma = 1$, $h_h = 1$, $p_{vft} = 1$; axe horizontale : contrainte unitaire normale à la paroi de la trémie

L'allure de la courbe finale dépend de la profondeur de la trémie, la valeur maximale de la charge p_{vft} venant de la cellule :



Somme des deux courbes, avec $\gamma = 1$, $h_h = 1$, $p_{vft} = 1$ ou 5 ; axe horizontale : contrainte normale à la paroi de la trémie