

Les silos # 2

Les éléments principaux

Introduction

Le présent article est le deuxième dans une série sur les silos en général et plus particulièrement les silos métalliques. Après la première partie – introduction générale – on présente ci-après les éléments principaux et le vocabulaire associé.

On utilisera de préférence les termes des Eurocodes :

- NF EN 1991-4 :2007-05 – Actions sur les structures – Silos et réservoirs
- NF EN 1993-4-1 :2007-11 – Calcul des structures en acier - Silos

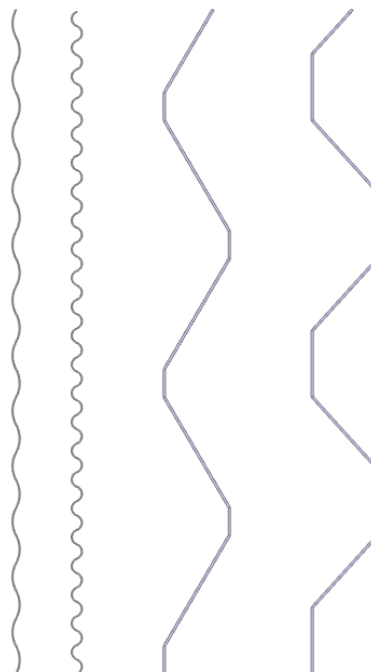
Éléments principaux

Note préliminaire : certains termes, par exemple « trémie », « boisseau », « robe », « jupe », peuvent être employés différemment selon le contexte et l'installation concernée. En pratique, il faut toujours s'assurer qu'il n'y a pas de malentendu entre les intervenants. De nouveau, on se limite à décrire des cas courants.

La **robe** (ou, pour les silos rectangulaires, les parois) est la surface verticale qui contient le volume de stockage.

Elle peut être fabriquée en tôle plane, mais très souvent, on a :

- Pour les silos circulaires : la tôle ondulée à ondes horizontales. L'épaisseur de tôle courante est de l'ordre de 0,75 à 3,5 mm ; pour des grandes cellules, deux tôles peuvent être superposées pour obtenir une épaisseur résultante plus importante.
- Pour les silos rectangulaires : la tôle pliée en forme trapézoïdale, dit « palplanche » (à noter qu'il ne s'agit pas de sections de palplanche utilisées en géotechnique, mais des tôles pliées de manière similaire). L'épaisseur courante est de l'ordre de 2 à 6 mm.



Sections de paroi typiques sur 1,2 m de hauteur pour des silos circulaires à tôle ondulée (épaisseur 2 mm) et des silos rectangulaires à tôle trapézoïdale (épaisseur 4 mm)

La robe d'un silo circulaire est décomposé en **viroles**. Une virole correspond à une « rondelle » (un tronçon horizontal) du silo, souvent d'une hauteur autour de 1 m. Les différentes viroles ont des épaisseurs de tôle différentes selon la pression de la matière ensilée en fonction de la hauteur, pour optimiser la quantité d'acier.



@Privé SA

Pour un silo rectangulaire, on parle plutôt de **tranche (horizontale)** ou de **nappe de tirants**. Les distances entre nappes de tirants sont très variables sur la hauteur, de l'ordre de 1,2 m à 2,5 m.

Des **tirants** sont nécessaires dans les silos rectangulaires pour les largeurs de paroi d'une cellule au-delà de 2,5 m environ. Il s'agit d'un sujet vaste et complexe, on en parlera dans un autre article à venir.

Les **montants (ou raidisseurs verticaux)** servent à amener les efforts verticaux de la robe vers les appuis.

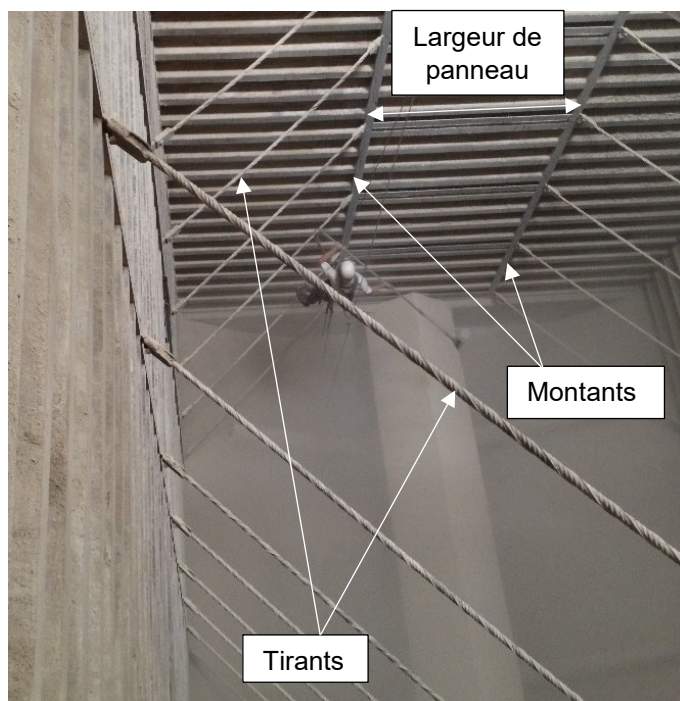
Dans le cas des silos circulaires, les montants sont généralement boulonnés sur le pourtour du silo à l'extérieur de la robe, avec un écartement entre montants de l'ordre de 1 m, indépendamment du diamètre du silo. Les sections peuvent être de type Oméga, C ou U.

Pour les silos rectangulaires, on trouve généralement des sections rectangulaires tubulaires (soit des tubes, soit des sections U jumelées), ou des combinaisons de profilés H et U dans les angles. L'écartement de deux montants correspond à la **largeur de panneau**. Les enjeux ici sont, en plus de la descente des charges vers le bas :

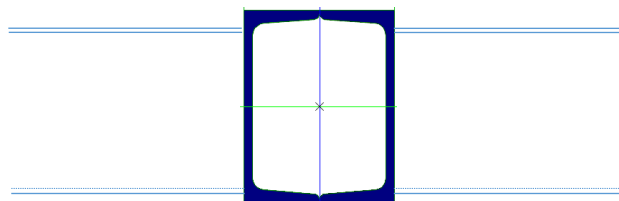


Sections C et Oméga (@Privé SA)

- une surface sur laquelle on peut souder la tôle trapézoïdale de la paroi
- la possibilité de fixer les tirants à l'intérieur du silo.



*Vue intérieure d'une cellule rectangulaire à tirants. Photo :
www.buches-travaux.fr/*



Montant en section U jumelée. Les parois en tôle trapézoïdale sont soudées de part et d'autre. © CTICM

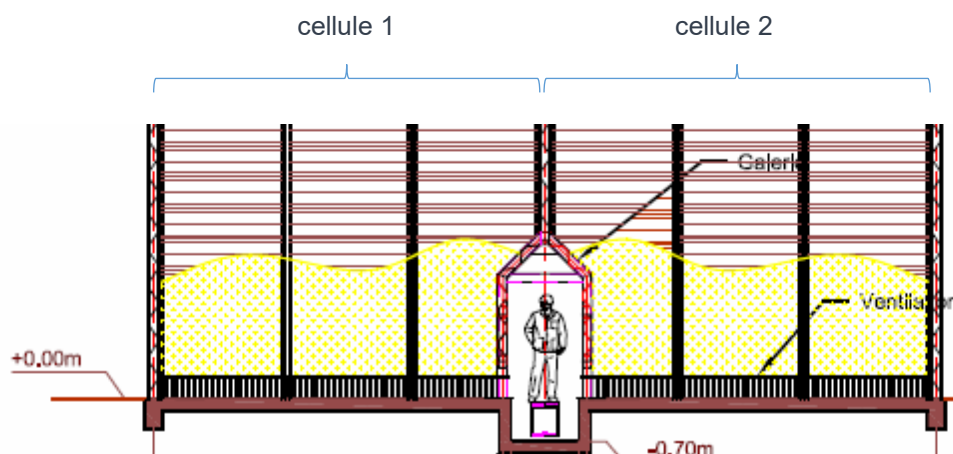
Des **raidisseurs horizontaux (ou ceintures)** peuvent être nécessaires à trois niveaux :

- En tête du silo, surtout pour les silos circulaires, pour améliorer les phénomènes de stabilité de coque
- Au droit de la jonction entre la robe et la trémie, le cas échéant (zone de transition, voir plus loin)

- Sur la hauteur de la robe. Ces raidisseurs horizontaux en zone courante sont très rares dans les silos circulaires à tôle ondulée, puisque l'ondulation apporte déjà une certaine rigidité circonférentielle. Il n'y en a pas non plus dans les silos rectangulaires à tôle trapézoïdale. Par contre, elles sont indispensables et très rapprochées dans le cas de silo rectangulaire à tôle plane, pour résister à la flexion induite par la pression de la matière ensilée.

Le **fond** du silo peut être plat (horizontal ou inclinée), ventilé ou non, ou alors le silo est équipé de **trémies** (voir ci-après).

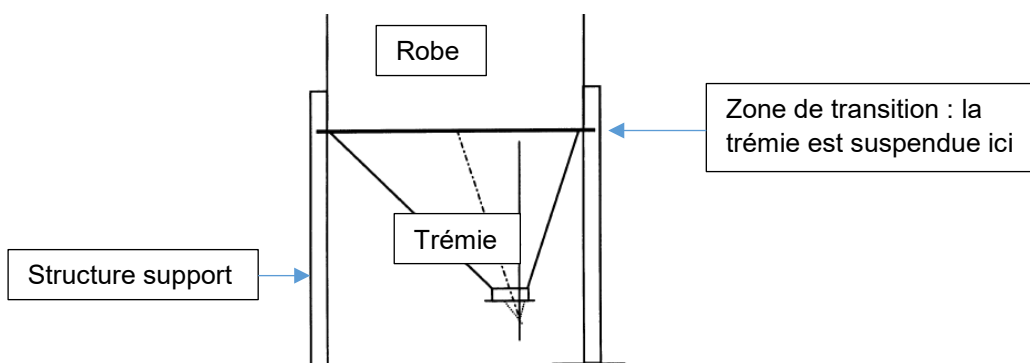
Dans les grands silos rectangulaires à grain, il est courant d'avoir une **galerie** en bas, qui accueille le convoyeur et qui donne accès aux cellules pour la maintenance. Dans ce cas, les orifices de vidange se trouvent près de la galerie (donc excentrés par rapport à chaque volume de stockage), et la vidange finale du talus restant se fait par moyens mécaniques ou par ventilation.



Galerie centrale entre deux cellules rectangulaires, fond ventilé

La **zone de transition** est la zone où la robe rencontre la trémie, donc où toutes les charges verticales doivent être transférées à la **structure support** : les charges verticales venant de la robe et des montants, et les charges de la trémie suspendue.

La structure support consiste généralement en une charpente de type poutre-poteau contreventée ; des structures support en béton existent.



Extrait de l'EN 1993-4-1 :2007-11 Fig. 6.4 avec annotations



Cellules circulaires avec trémie sur structure support contreventée. © Privé SA



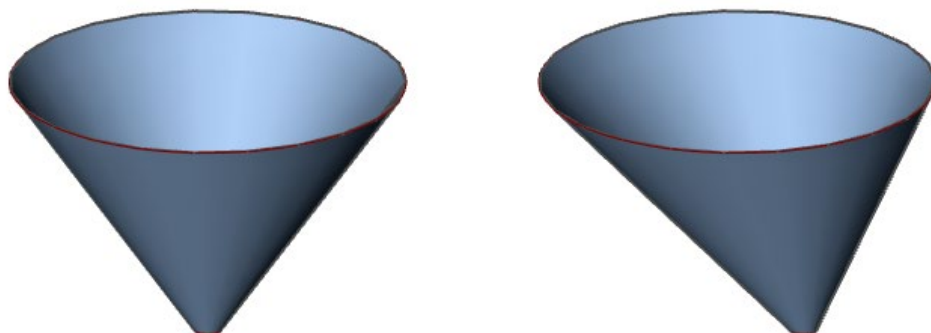
Silo rectangulaire en construction : les trémies sur structure support sont en place. ©Gillouaye SAS

Zoom sur les trémies

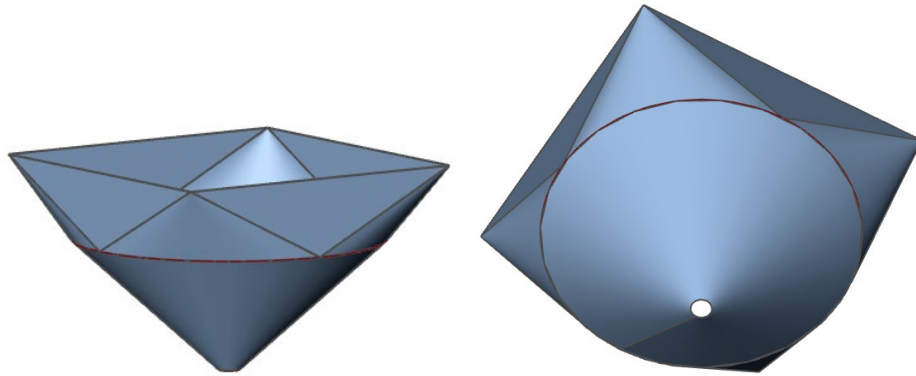
Une trémie sert à vider le silo de manière gravitaire, très souvent par simple ouverture de l'orifice de vidange au point le plus bas du volume de stockage. Sauf cas particulier, une trémie métallique est conçue pour être suspendue à son bord supérieur.

En partant de la forme en plan de la robe (circulaire ou rectangulaire), la forme de l'orifice de vidange (circulaire, carrée, rectangulaire, voire en fente), et l'emplacement de l'orifice (excentrique par rapport à l'axe verticale de la robe ou non), toute forme géométrique qui permet l'écoulement de la matière ensilée est possible.

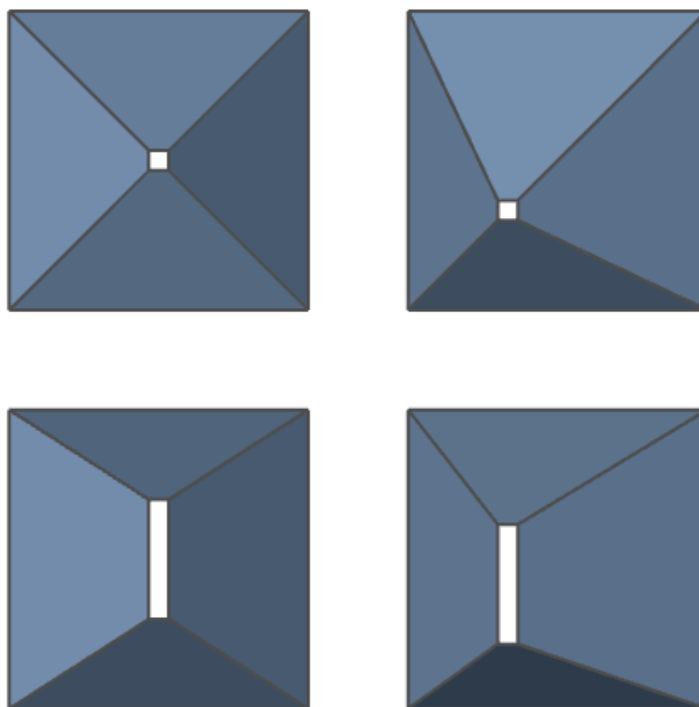
Ils existent des cas où un seul volume de stockage est équipé de plusieurs trémies, par exemple une cellule rectangulaire allongé ($a/b \approx 2$) équipé de deux trémies pyramidales à base carrée, ou encore, pour des cellules circulaires de très grand diamètre (jusqu'à 50 m), une multitude de petites trémies coniques ou pyramidales (diamètre supérieur 3 m, par exemple).



Trémie conique (robe et orifice de vidange circulaires), centré et excentré



Vues 3D d'une trémie sous robe carrée, orifice de vidange circulaire. La partie basse est conique, la partie supérieure est composée de 8 parois triangulaires : 4 parois verticales planes et 4 parois courbes.

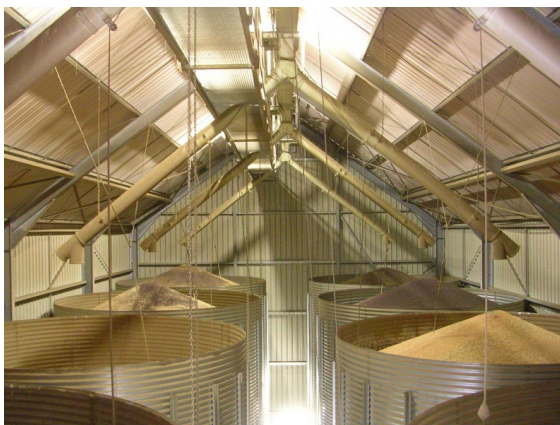


Trémies pyramidales (robe carré) vue en plan, orifice de vidange carré ou en fente, centré ou excentré

Zoom sur les toits

Le toit permet de fermer le volume de stockage vers le haut. En plus des actions climatiques, souvent il doit aussi reprendre les actions de l'équipement de manutention (convoyeur, sondes suspendues, passerelles d'accès, ...).

- Des petites cellules de stockage ou boisseaux de manutention sont souvent juste posées à l'intérieur d'un bâtiment agricole ou industriel. Si nécessaire, le volume est abrité par une simple tôle horizontale en tête, qui est éventuellement maintenue par quelques poutres. Surtout dans l'industrie, pour des silos élancés de faible diamètre à tôle plane, on trouve aussi des toits chaudronnés en forme de coupole.



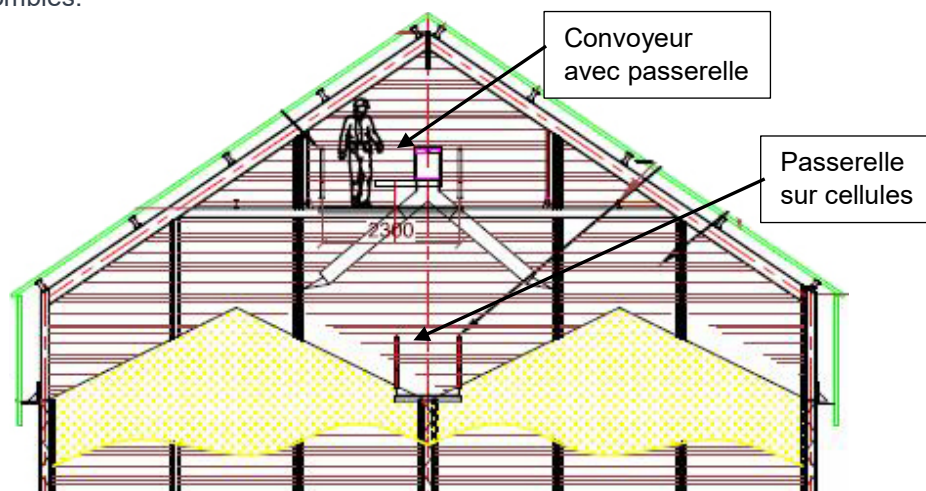
Petites cellules de stockage ouvertes, à l'intérieur d'un bâtiment indépendant. On note l'absence de ceinture de tête. Photo : www.toutpourlegrain.fr

- Les silos circulaires de stockage de grain sont généralement équipés de toitures de type « chapeau chinois » (forme d'un cône assez plat). Des pannes sont disposées de manière radiale entre les montants de la robe et une couronne centrale en tête de toit. Les structures de passerelle et de convoyeur s'appuient sur des montant renforcés et sur la couronne en haut du toit.



Toit « chapeau chinois » avec passerelle/ convoyeur. © Privé SA

- Les silos rectangulaires sont généralement abrités par un toit à deux versants en charpente. Les passerelles et convoyeurs se trouvent alors à l'intérieur des combles.



Coupe : toit à deux versants sur un silo à cellules rectangulaires