



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE SAAD DAHLAB DE BLIDA 1**  
**FACULTE DE TECHNOLOGIE**  
**DEPARTEMENT DE MECANIQUE**  
**FABRICATION MECANIQUE ET PRODUCTION (M2).**

**Projet de fin d'étude pour silo de stockage.**  
**Thème : étude et dimensionnement silo de stockage carrée.**

Réalisé par :

Benatmane Faouzi.

Gathal Mohamed Riadh.

Encadré par : Hattali Mounir

*Année universitaire : 2022/2023.*

# *Remerciement*

Avant tout on tient nos remerciements à notre dieu tout puissant de nous avoir donné la foi,  
la Source et le courage.

À travers ce modeste travail, nous tenons à remercier vivement notre promoteur  
« Mr. Hattali Mounir » pour l'intéressante documentation qu'il a mise à notre disposition, pour  
ses conseils précieux et pour toutes les commodités et aisances qu'il nous a apportées durant  
notre étude et réalisation de ce projet,

Nous tenons à remercier sincèrement M. Zakraoui Islam et tous les ingénieurs de CR  
METAL, qui ont toujours été très attentifs et disponibles tout au long de la réalisation de ce  
mémoire, donc sans eux cet anniversaire n'aurait pas vu le jour.

Nos remerciements les plus vifs s'adressent aussi aux messieurs le président et les membres de  
Jury d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous exprimons également notre gratitude à tous les professeurs et enseignants qui ont  
Collaboré à notre formation depuis notre premier cycle d'étude jusqu'à la fin de notre cycle  
universitaire.

Sans omettre bien sûr de remercier profondément à tous ceux qui ont contribué de près ou de  
loin à la réalisation du présent travail

# Résumé

Les silos sont les structures de stockage métalliques les plus utilisées au monde, destinées au stockage commercial ou industriel de gros volumes de produits (liquides, solides).

Leurs formes ou types varient selon leurs utilisations, mais ils sont généralement rectangulaires ou cylindriques et disposés verticalement ou horizontalement. Il existe plusieurs façons de classer ces œuvres, et la classification peut se faire selon: type de matériau constituant; ses dimensions: hauteur, largeur, diamètre, capacité de stockage: petites ou grandes capacités, forme: polygonale, ronde, matériau stocké.

Mais nous étudierons un nouveau Type, Amovible, facile à manœuvrer et à transporter dès que les travaux seront terminés.

Nous étudierons comment choisir le métal et vérifierons les dimensions en fonction de ce que le client demande dans le cahier des charges, après avoir appliqué les théories de la résistance des matériaux au silo de stockage et étudié les limitations qui lui sont imposées, ce qui nous permet de choisir le type de boulons et de les disposer selon les normes.

Nous calculons la quantité du réservoir, le temps de remplissage et de déchargement, comment le remplir, calculons et sélectionnons le moteur et le réducteur de vitesse appropriés en fonction des pressions appliquées et de la force requise pour soulever la charge et remplir le silo.

# SOMMAIRE

## CHAPITRE I : GENERALITE SUR LES SILOS 1

<b>I.1 INTRODUCTION :</b>	<b>1</b>
<b>I.2 CLASSIFICATION DES SILOS :</b>	<b>2</b>
<b>I.2.1 CLASSIFICATIONS PAR CAPACITE :</b>	<b>2</b>
<b>I.2.2 CLASSE DES SILOS PAR LE MATERIAU CONSTITUTIFS :</b>	<b>2</b>
<b>I.2.2.1. Silo en bois :</b>	<b>2</b>
<b>I.2.2.2. Silo en métal :</b>	<b>3</b>
<b>I.2.2.3. Silo en plastique :</b>	<b>4</b>
<b>I.2.3 SUBSTANCES DE STOCKAGE</b>	<b>6</b>
<b>I.2.3.1. Les silos agricoles :</b>	<b>6</b>
<b>I.2.3.1.2 Différente de silo agricole :</b>	<b>7</b>
<b>I.2.3.1.2 .1. Silo à grain :</b>	<b>7</b>
<b>I.2.3.1.2.2 Silo à maïs :</b>	<b>8</b>
<b>I.2.3.1.3. Silo à boues :</b>	<b>8</b>
<b>I.3 LES FORMES DES SILOS :</b>	<b>9</b>
<b>I.3.1.1 Les silos verticaux :</b>	<b>9</b>
<b>I.3.1.2. Les différentes formes des silos verticaux :</b>	<b>9</b>
<b>I.3.1.2.1. Silos ronds à fonds coniques :</b>	<b>9</b>
<b>I.3.1.2.2. Silos ronds à fonds plats :</b>	<b>10</b>
<b>I.3.1.2.3. Silos cylindriques en tôles nervurées ou ondulées :</b>	<b>11</b>
<b>I.3.1.2.4. Silos carrés à fons coniques :</b>	<b>12</b>
<b>I.3.1.2.5. Silo mélangeur :</b>	<b>12</b>
<b>I.3.2. LES SILOS HORIZONTEAUX :</b>	<b>13</b>
<b>I.4. SILO DOME :</b>	<b>14</b>
<b>I.5. ACCESSOIRES POUR LES SILOS :</b>	<b>15</b>
<b>I.6 LES SYSTEMES DE REMPLISSAGE ET VIDANGE POUR LES SILOS :</b>	<b>17</b>
<b>I.6.1 SYSTEM DE REMPLISSAGE :</b>	<b>17</b>
<b>I.6.1.1. L'élévateur à godets :</b>	<b>17</b>
<b>I.6.1.2. Convoyeur à vis :</b>	<b>19</b>
<b>I.6.1.2.1. Convoyeur à câble tubulaire :</b>	<b>20</b>
<b>I.6.1.2.2 Convoyeur pneumatique :</b>	<b>21</b>
<b>I.6.2 SYSTEM DE VIDANGE :</b>	<b>22</b>
<b>I.6.2.1 Vidange par Vis de vidange intégrale :</b>	<b>22</b>
<b>I.6.2.2 Vidange par Transracleur :</b>	<b>22</b>
<b>I.6.2.3 Vidange par ventilation :</b>	<b>22</b>
<b>I.7 LA MATIERE EN GRAIN :</b>	<b>22</b>
<b>I.7-1 DEFINITION :</b>	<b>22</b>
<b>I.7-2 VARIABILITE PHYSIQUE DES GRAINS :</b>	<b>22</b>
<b>I.7.3 PROPRIETES :</b>	<b>23</b>
<b>I.7.3.1 Influence de la variation des caractéristiques physiques et mécaniques de la matière ensilée :</b>	<b>23</b>

I.7.3.2 La densité (ou poids volumique) :	24
I.7.3.3 Le frottement interne :	24
I.7.3.4 Le frottement sur les parois :	24
I.8 ECOULEMENT :	24
I.8.1 DEFINITION DE L'ECOULEMENT :	24
I.8.2 LE PHENOMENE DE DURCISSEMENT DES MATERIAUX STOCKES :	24
I.8.3 MODELES D'ECOULEMENTS :	25
I.9 LES AVANTAGES ET LES INCONVENIENTS :	26
I.9.1 LES AVANTAGES DE SILO METALLIQUE :	26
I.9.2 LES INCONVENIENTS DES SILOS METALLIQUES SONT LES SUIVANTS :	26

## CONCLUSION : 27

# CHAPITRE II : THEORIES ET NORMES DE CALCUL DES SILOS. 28

II.1 INTRODUCTION :	28
II.2 DIFFERENTS PARAMETRES INTERVENANT DANS LA DETERMINATION DES ACTIONS :	28
II.2.1 LES CARACTERISTIQUES GEOMETRIQUES DU SILO :	29
II.2.2 CLASSE DE FIABILITE :	31
II.3 LES DIMENSIONS DE SILO CARRE :	34
II.3.1 LES DIMENSIONS :	34
A. Virole :	34
B. La trémie pyramide basse carré :	34
C. Corniers et renfort :	34
D. Boulons :	35
E. Pieds porteuses :	35
II.4. PROPRIETES DE MATERIAU :	35
II.5 CALCUL ET VERIFICATION :	35
II.5.1 RAYON HYDRAULIQUE :	35
II.5.2 VOLUME ET CAPACITE :	36
A. Volume :	36
B. Hauteur du sommet du cône du solide stocké :	36
C. La hauteur à la base de la surface effective heq :	36
D. Capacité volumétrique du silo :	37
E. Capacité minimale du silo :	37
F. Le poids total du solide pour le calcul structural :	37
II.5.3 CALCULES DES COEFFICIENTS :	38
II.5.3.1. Le coefficient de frottement sur la paroi :	38
5.3.2 Rapport de pression latéral k :	38
II.5.4 TYPES D'ECOULEMENT :	38
II.6 CALCUL LES PRESSIONS EXERCEES DANS LE SILO CARRE :	40
II.6.1 PRESSION VERTICAL $P_v$ :	41
La hauteur caractéristique de Janssen :	42
II.6.2. PRESSION HORIZONTAL (NORMAL) :	43
II.6.3 LA PRESSION ASYMPTOTIQUE $P_o$ :	43

<b>II.6.4</b>	<b>PRESSION DANS LA TREMIE :</b>	<b>43</b>
<b>II.6.4.1.</b>	<b>La trémie :</b>	<b>43</b>
<b>II.6.4.2.</b>	<b>La pression verticale agissant à la transition :</b>	<b>44</b>
<b>II.6.4.3</b>	<b>Contrainte de frottement sur la trémie :</b>	<b>45</b>
<b>II.7</b>	<b>VERIFICATION DES LIAISONS ENTRE LES PLAQUES DE LA PAROI :</b>	<b>45</b>
<b>II.7.1</b>	<b>CALCUL DE TRACTION MAXIMALE DANS UN BOULON :</b>	<b>45</b>
<b>II.7.1.1</b>	<b>Contraint de traction et cisaillement :</b>	<b>46</b>
<b>II.7.1.2</b>	<b>Calcul de traction maximale dans un boulon :</b>	<b>46</b>
<b>II.7.1.3</b>	<b>Vérification des boulons entre trémie et la virole :</b>	<b>47</b>
<b>II.8</b>	<b>FLAMBEMENT:</b>	<b>47</b>
<b>II.8.1</b>	<b>DEFINITION :</b>	<b>47</b>
<b>II.8.2</b>	<b>VERIFICATION DE FLAMBEMENT :</b>	<b>48</b>

## **CHAPITRE3 : SIMULATION ET VERIFICATION PAR SOLIDWORKS 51**

<b>III.1</b>	<b>INTRODUCTION :</b>	<b>52</b>
<b>III.2.1</b>	<b>VERIFICATION D'EPAISSEURS DE LA PLAQUE :</b>	<b>52</b>
<b>III.2.1.1.</b>	<b>La plaque sans renfort :</b>	<b>52</b>
<b>III.2.1.2.</b>	<b>Avec renfort :</b>	<b>55</b>
<b>III.2.1.3.</b>	<b>Simulation de la cornière :</b>	<b>56</b>
<b>III.2.1.4.</b>	<b>Simulation de la trémie :</b>	<b>56</b>

## **CONCLUSION GENERALE : 58**

## Liste des figures :

<u>Figure</u>	<u>Titre</u>	<u>page</u>
01	Silos pour le stockage des céréales les cellules carrées modulaires.....	1
02	Des silos en bois pour le stockage du sel.....	3
03	Silos forme cylindrique à ciment avec accessoires.....	4
04	Silo en plastique pour colorants, arômes.....	5
05	Silo en polythène alimentaire.....	5
06	Les silos agricoles en acier galvanisé pour céréales.....	6
07	Silo agricole pour le stockage du blé et des graines de tournesol.....	7
08	Silo de boues.....	8
09	Silo à boue sur la station d'épuratio.....	8
10	Silos ronds à fonds coniques.....	9
11	Silos ronds à fonds plats.....	10
12	Silo cylindre tôle ondulée en d'acier.....	11
13	Silos carrés à fons coniques.....	12
14	Silo mélangeur.....	12
15	Silo horizontal.....	13
16	Silo dôme de sucre blanc de 60 000 t à American (Crystal Sugar).....	14
17	Silo mélangeur vertical pour plastique avec accessoires.....	16
18	Élévateur à godets.....	18
19	Débit d'une vis en fonction de son diamètre.....	19
20	Convoyeur à vis sans fin avec trémie.....	19
21	Convoyeur à câble tubulaire.....	20
22	Schéma du transporteur pneumatique.....	21
23	Comparaison de la taille de différents grains.....	23
24	Les modes principaux d'écoulements.....	25
25	Figure25 : Formes de silos standards.....	29
26	Formes de silos et notation des dimensions selon EC1-Partie 4.2.....	30
27	dimensions de silo carré.....	34

28	dessin présente les angles et les hauteurs.....	37
29	L'angle d'inclinaison de la paroi de la trémie par rapport l'horizontale.....	39
30	limites entre l'écoulement en masse et l'écoulement en cheminée pour trémies coniques et trémies allongées en forme de coin.....	40
31	Les efforts exercés dans le silo.....	41
32	dessin de la plaque.....	46
33	dessin de la trémie.....	47
34	Le flambement.....	48
35	symboles de logiciel SolidWorks.....	52
36	résultats de simulation des contraintes de plaque sans renfort.....	54
37	résultats de simulation des contraintes de plaque avec renfort.....	55
38	résultats de simulation des contrainte de cornière.....	56
39	résultats de simulation des contrainte de la trémie.....	57

## Liste des symboles :

<b>A</b>	Surface intérieure de la section droite de la cellule du silo.	<b>m<sup>2</sup></b>
<b>Ar</b>	Section résistance.	<b>m<sup>2</sup></b>
<b>Cz</b>	Coefficient de Janssen.	/
<b>Cb</b>	Le coefficient d'amplification.	/
<b>dc</b>	Dimension caractéristique d'une section.	<b>m</b>
<b>Hh</b>	distance de pyramide entre le sommet et la base.	<b>m</b>
<b>heq</b>	La hauteur à la base de la surface effective.	<b>m</b>
<b>Iy</b>	Moment d'inertie sur axe y	<b>cm<sup>4</sup></b>
<b>Iz</b>	Moment d'inertie sur axe z	<b>cm<sup>4</sup></b>
<b>K</b>	Rapport de pression.	/
<b>L'</b>	longueur de porteuse	<b>m</b>
<b>Ncr</b>	Charge critique d'Euler	<b>daN</b>
<b>Nb, Rd</b>	résistance de section transversale a la compression	<b>daN</b>
<b>nb</b>	Nombre de boulons.	/
<b>α</b>	Angle d'inclinaison de la paroi de la trémie par rapport à l'horizontale.	<b>degré</b>
<b>α'</b>	facteur d'imperfection	/
<b>φw</b>	Angle de frottement sur la paroi de la trémie.	<b>degré</b>
<b>μm</b>	Valeur moyenne du coefficient de frottement sur la paroi.	/
<b>Phe</b>	pression horizontale lors de la vidange.	<b>N/m<sup>2</sup></b>
<b>Phf</b>	pression horizontale en fin de remplissage.	<b>N/m<sup>2</sup></b>
<b>Pt</b>	contrainte de frottement sur la trémie	<b>N/m<sup>2</sup></b>
<b>Pn, ni</b>	Pression normale à la paroi de la trémie incliné, avec i = 1, 2 et 3	<b>N/m<sup>2</sup></b>
<b>Pvo</b>	La pression verticale agissant à la transition.	<b>N/m<sup>2</sup></b>
<b>Pn1 et Pn2</b>	les pressions correspondant à la pression verticale au-dessus de la transition	<b>N/m<sup>2</sup></b>
<b>Pn3</b>	La pression correspondant au remplissage de la trémie	<b>N/m<sup>2</sup></b>
<b>Rh</b>	Rayon hydraulique	<b>m</b>
<b>Rn</b>	contraint de traction.	<b>N/m<sup>2</sup></b>
<b>Rr</b>	Limite à la rupture	<b>N/mm<sup>2</sup></b>

<b>t</b>	épaisseur	<b>mm</b>
<b>x</b>	Paramètre utilisé pour le calcul des actions sur la trémie.	<b>m</b>
<b>U</b>	Périmètre intérieur de la cellule.	<b>m</b>
<b><math>\Omega</math></b>	Facteur de réduction pour flambement	<b>/</b>
<b>Ned</b>	charge critique d'Euler	<b>daN</b>
<b><math>\mathbf{A}</math></b>	Surface de section de profilé	<b>daN</b>

## **Liste des tableaux**

**Tableau01** : Classe des silos en fonction de la capacité et d'excentricité de décharge ou remplissage.

**Tableau02** : caractéristiques des matières granulaires.

**Tableau 03** : Combinaisons des propriétés de la matière dans la détermination des différents types d'actions.

**Tableau 04** : les variables des matières granulaires.

**Tableau 05** : Définition de la nature des surfaces de paroi.

**Tableau 06** : les caractéristiques de les profilés d'acier.

**Tableau 07** : la courbe de flambement en fonction de facteur d'imperfection.

**Tableau 08** : des coefficient réduction en fonction de l'élancement réduit.

**Tableau 09**: les charges considérées pour le calcul de plaque de virole.

# Chapitre I : Généralité sur les silos

## I.1 Introduction :

-Un silo est un réservoir de grand volume utilisé commercialement ou industriellement pour stocker de grandes quantités de produit (des milliers de tonnes). Ils sont généralement cylindriques et utilisés pour le stockage, la conservation et le stockage Récolter (dans la plupart des cas des céréales, soit pour les manger, soit pour les faire germer puis les semer). Les silos sont construits en métal ou en béton armé. Ils sont généralement constitués de parties variables et de grandes alvéoles juxtaposées haut. Ils sont terminés en bas par un joint de vidange, mais fermés à leur partie supérieure par un plancher sur lequel sont installés des équipements de remplissage.

Pour les produits destinés à la vente ou à l'utilisation sur le terrain. Une mauvaise installation et une mauvaise gestion peuvent donc engendrer des pertes importantes dues à la détérioration des grains, des insectes, des rongeurs, des incendies (inflammation due à la combustion spontanée) et à la destruction des silos par instabilité due à un mauvais calibrage. Avant de construire une nouvelle installation de stockage, un système complet de stockage et de manutention doit être conçu pour répondre aux besoins actuels et futurs. Le nombre et la taille des entrepôts dépendent de la quantité et du type de céréales à stocker. Outre les structures cylindriques monofonctionnelles, divers bâtiments rectangulaires multifonctionnels peuvent également être envisagés, ces derniers permettant un stockage de masse plus économique. [1]



**Figure01** : Silos pour le stockage des céréales les cellules carrées modulaires

## **I.2 Classification des silos :**

Il existe plusieurs façons de classer les silos, qui peuvent être classés selon :

- Types de matériaux constitutifs : bois, plastique, acier, béton armé, etc.
- Dimensions : hauteur, largeur, diamètre, etc.
- Capacité de stockage : petite capacité ou grande capacité
- Forme du silo : polygonale, circulaire, etc.
- Substances de stockage. [2]

### **I.2.1 classifications par capacité :**

Les silos peuvent être classés selon leur capacité de stockage dans les quatre catégories suivantes :

Classe 1 : Petits silos supportant moins de 100 tonnes. Ils sont de conception simple et robuste avec le plus souvent des réserves substantielles de résistance.

Classe 2 : Silos intermédiaires, supportant entre 100 et 1000 tonnes. Ils peuvent être calculés manuellement. Des précautions sont prises pour assurer un écoulement fiable et pour contenir les pressions prévisibles des parois.

Classe 3 : Gros silos supportant plus de 1000 tonnes. Des connaissances spéciales sur les coffres sont requises pour prévenir les problèmes dus à des incertitudes d'écoulement, de pression et de comportement de la structure. Des analyses sophistiquées par éléments finis peuvent être justifiées.

Classe 4 : Silos vidangés de manière excentrique où l'excentricité de l'orifice de vidange est de plus de 0,25 fois le diamètre du silo.

### **I.2.2 Classe des silos par le matériau constitutifs :**

#### **I.2.2.1. Silo en bois :**

Les silos en bois sont plus beaux que les silos faits d'autres matériaux. Les silos en bois peuvent être peints avec une peinture à petits pores (le bois doit respirer) pour mieux se fondre dans l'environnement. Mais il est aussi très beau en bois naturel.

L'épaisseur du bois est de 55 mm ! C'est un épicéa à croissance très lente et qui a donc des fibres très étroites (bois de type sauna). L'épaisseur du bois, la qualité des essences, les principes de construction et d'assemblage rendent nos silos très résistants aux variations du rayonnement solaire et aux effets des variations d'humidité. S'en est suivi un phénomène tel que l'agglomération des touffes.

Celles-ci sont courantes dans toutes les industries légères du plastique ou de l'acier, mais la qualité de notre fabrication est presque sans précédent... alors, Il n'est pas superflu de vider complètement le silo en été pour s'assurer qu'il fonctionne à nouveau en hiver, comme c'est le cas de nombreux produits utilisant des principes de fabrication et des matériaux différents.

Avantages de la construction en bois : Contrairement au béton ou à l'acier, le bois n'est pas attaqué par le sel. Au lieu de cela, le sel imprègne le bois et aide à le protéger dans le temps. Toutes les pièces en contact avec le sel sont en bois ou en acier inoxydable. [3]



**Figure02** : Des silos en bois pour le stockage du sel.

#### **I.2.2.2. Silo en métal :**

-Les silos métalliques sont constitués d'unités métalliques constituées de tôles d'acier ou d'aluminium galvanisées plates ou ondulées, fixées par rivetage ou boulonnage à une base en béton étanche. Il y a plusieurs avantages à ce type de silo, dont le montage qui est généralement rapide et facile. Tous les composants en acier du silo sont fabriqués en usine, ce qui assure un contrôle qualité complet. Les silos métalliques sont relativement faciles à construire et à installer. D'une manière générale, les silos métalliques ont une plus grande capacité et dans la plupart des cas, ils sont plus efficaces car ils offrent une plus grande capacité de stockage et réduisent le coût par tonne de stockage. [4] .

On distingue trois types de silos métalliques à savoir :

- les silos cylindriques en tôles nervurées ou ondulées ;
- les silos cylindriques en tôles lisses;
- les silos métalliques pilotes.



**Figure03** : silos forme cylindrique à ciment avec accessoires.

### **I.2.2.3. Silo en plastique :**

Le matériau de composition du mur est généralement constitué de résine de polyester renforcée de fibres de verre, qui présente les caractéristiques de résistance à l'eau, de résistance à la lumière du soleil et de résistance à la lumière, et est projetée sur le substrat métallique. Ses parois sont lisses à l'intérieur pour faciliter l'écoulement du produit d'ensilage, le matériau est également translucide et grâce à l'éclairage interne, il est possible de contrôler le niveau du produit d'ensilage. [5]

- Les Caractéristique de silo en plastique :
  - La bouteille transparente permet d'afficher le niveau de matériau avec un indicateur de niveau.
  - La surface intérieure lisse offre d'excellentes caractéristiques d'écoulement et est facile à nettoyer.
  - Élimine les problèmes de corrosion et les coûts de maintenance associés.
  - Les supports en plastique robustes sont accessibles par les chariots élévateurs et les transpalettes et sont disponibles dans une variété de couleurs pour faciliter l'identification pour des applications spécifiques.
  - Des vis de 12 pouces sur le couvercle sécurisent le contenu du récipient.

- Sorties coulées de 2 et filetéées de 3 pour les installations de sortie de style serrure à came.
- Les robinets à tournant sphérique peuvent être placés verticalement, horizontalement ou à un angle de 45 degrés.
- Selon la taille, le poids et l'exposition à la température, 2-3 unités peuvent être empilées.
- Toutes les constructions en plastique et idéal pour les produits alimentaires, lotions, crèmes
- La surface intérieure lisse et uniforme offre d'excellentes propriétés d'écoulement et est facile à nettoyer. [6].



**Figure05** : Silo en polythène alimentaire.



**Figure 04** : Silo en plastique pour colorants, arômes.

## I.2.3 Substances de stockage

### I.2.3.1. Les silos agricoles :

Avant de comprendre les particularités d'un silo agricole, il faut savoir qu'il sert à entreposer différentes matières comme les granulés, les copeaux, etc.

Rectangulaires, ronds, carrés, les silos agricoles peuvent prendre différentes formes. Selon son utilisation, il peut également avoir une base conique, cylindrique ou plate, avec ou sans système d'extraction.

Les silos agricoles sont en béton, en inox ou en aluminium afin de maintenir la qualité du produit à l'intérieur, notamment lorsque la température et le climat (humide, sec) varient. En tant que lieu de stockage, il peut également être installé seul ou dans un couloir ou une tranchée, c'est-à-dire plusieurs silos placés côte à côte.

Le remplissage se fait toujours par le haut. D'autre part, la distribution des produits se fait par le bas. Parfois montés sur pilotis, les silos agricoles peuvent remplir des camions ou déverser leur contenu directement dans les machines de fabrication. [7]



**Figure 06 :** Les silos agricoles en acier galvanisé pour céréales.

### **I.2.3.1.2 Différente de silo agricole :**

#### **I.2.3.1.2 .1. Silo à grain :**

Les silos à grains sont des réservoirs utilisés pour stocker le grain et tout autre produit en vrac. L'appareil est souvent utilisé dans le domaine de l'industrie et de l'agriculture. Attention à ne pas le confondre avec un entonnoir. Ce dernier est laissé ouvert, tandis que le grenier est scellé. De plus, il ne contient que des produits secs et pas trop humides. Les greniers sont généralement de plus grande taille et ont des cheminées. Ce dernier facilite l'aération des grains à l'intérieur de l'appareil. Il existe en fait plusieurs matériaux à partir desquels les greniers peuvent être fabriqués. Vous pouvez donc utiliser du matériel métallique ou des pailles pour le fabriquer. Cet appareil est utile aux agriculteurs et aux industriels qui produisent suffisamment de céréales pour l'utiliser dans la fabrication. Aujourd'hui, la modernisation et la technologie ont permis d'assister à une révolution remarquable dans le grenier. [8]



**Figure07** : silo agricole pour le stockage du blé et des graines de tournesol.

#### **I.2.3.1.2.2 Silo à maïs :**

Les sols bitumineux sont idéaux pour le revêtement de bunkers, de tranchées ou de silos sous forme de cheminées. L'acide d'ensilage n'attaque pas l'asphalte. Il faut ajouter que les planchers d'asphalte n'ont pas de joints, éliminant ainsi le risque que l'eau s'infilte par les joints et détériore le plancher. Pour couler des sols en enrobé, couler l'enrobé sur une épaisseur d'au moins 10 cm, de préférence 15 cm : la dalle doit être suffisamment remplie. [9]

#### **I.2.3.1.3. Silo à boues :**

Un silo à boues est un silo destiné au traitement des boues dans le domaine de l'épuration des eaux. Le silo à boues a pour but d'épaissir les boues pour faciliter leur traitement ultérieur. Les boues d'épuration sont le résidu du traitement de l'eau. Ce sont des déchets qui doivent être éliminés correctement. Les boues contenues dans les silos à boues sont épaissies par sédimentation (particules solides tombent au fond de la cuve). Les boues partiellement séchées peuvent ensuite être envoyées vers des zones de séchage ou de déshydratation puis recyclées ou incinérées. Le silo à boues peut également être utilisé pour le stockage ou le transport des boues dans certains cas. [10]



**Figure 8 : Silo de boues**



**figure 9 : silo à boue sur la station d'épuration**

## **I.3 Les formes des silos :**

Les formes des silos sont développées par rapport aux méthodes d'usinage des parois et des fonds des silos, donc il existe plusieurs formes :

### **I.3.1.1 Les silos verticaux :**

Les silos verticaux sont en acier au carbone ou en acier inoxydable et sont utilisés pour stocker de grandes quantités de poudre, de granulés/granulés ou de liquides.

La large gamme répond à tous les besoins, tant en termes de volume que de matériaux stockables : poudres, liquides, granulés/granulés, granulats.

Les silos peuvent être personnalisés selon le choix du client, comme la couleur, l'endroit où appliquer son logo et toute personnalisation ultérieure. De plus, chaque intérieur de silo peut être divisé en 2 compartiments ou plus, ce qui permet de stocker différents matériaux dans le même silo.

### **I.3.1.2. Les différentes formes des silos verticaux :**

#### **I.3.1.2.1. Silos ronds à fonds coniques :**

Les silos ronds avec des bases coniques solides permettent un stockage hermétique des produits en poudre et en vrac de haute et basse densité. Ce type de silo est largement utilisé dans les applications de stockage de produits pulvérulents tels que la poudre alimentaire, le ciment, la chaux et le mortier sec.



**Figure 10 : Silos ronds à fonds coniques**

Ce type de silo nous offre l'avantage de vider complètement la matière stockée grâce au fond conique à un angle de 45 à 60°, ce sont surtout des produits difficiles à écouler, la forme du silo à fond conique permet de réaliser de nombreuses fonctionnalités inclure :

- Stocker le grain humide dans un séchoir.
- Stockage des machines avant expédition.
- Stockage tampon.
- Les murs peuvent éventuellement être peints ou en acier inoxydable.

### **I.3.1.2.2. Silos ronds à fonds plats :**

Les silos à fond plat en acier ondulé sont conçus pour des applications agricoles, industrielles, commerciales et stratégiques telles que des fermes, des installations d'approvisionnement, des terminaux portuaires ou toute installation industrielle où le grain est utilisé comme matière première.

Production, tels que moulins, usines d'extraction d'huile, usines de biocarburants, dont la fluidité lors du déchargement est acceptable, de tels silos ont l'avantage d'avoir plusieurs configurations possibles, mis en place rapidement, et ont également une longue durée de vie, une utilisation économique et polyvalente et sont fabriqués pour résister à des contraintes d'utilisation constantes, des températures extrêmes, des chutes de neige, des vents violents, ainsi que des charges sismiques. Ils offrent une plus grande résistance à la corrosion grâce à la forte galvanisation de l'acier.



**Figure11 : Silos ronds à fonds plats**

### **I.3.1.2.3. Silos cylindriques en tôles nervurées ou ondulées :**

Ils sont généralement constitués de tôle galvanisée avec nervures et ondulations horizontales. Les panneaux sont pliés et percés en usine, assemblés entre eux et boulonnés aux colonnes verticales.

Ce dernier est en tôle galvanisée "en U",

Ils assurent la rigidité des panneaux dans le sens vertical.

Les colonnes verticales équilibrent le frottement exercé par le matériau d'ensilage sur elles, Murs et supporter le poids du silo.



**Figure12 :** Silo cylindre tôle ondulée en d'acier

#### **I.3.1.2.4. Silos carrés à fons coniques :**

Les silos à fond conique carré offrent un bon écoulement des produits, une décharge complète et peuvent stocker de nombreux types de produits tels que les grains, les céréales et les chips, ce qui les rend idéaux pour les produits à écoulement difficile. Les silos à fond conique carré ont une capacité de stockage supérieure par rapport à la surface au sol, sont donc moins spacieux et polyvalents. Il est installé à l'aide d'une vis à hauteur de cône et dimensions de découpe variables.



**Figure13 :** Silos carrés à fons coniques

#### **I.3.1.2.5. Silo mélangeur :**

Les silos de mélange permettent de mélanger et d'homogénéiser différents lots d'un même produit. Ils sont utilisés par les fabricants de composants et de matières premières avant le conditionnement et dans les minoteries pour le stockage final.

Dans l'industrie des plastiques, les silos de mélange sont utilisés pour le recyclage et l'installation de matières plastiques (PE, HDPE), généralement pour mélanger des matières premières sous forme de matériaux de sol, de granulés ou d'agrégats, à partir des caractéristiques techniques, les silos sont équipés de mélange inséré La vis, permet d'homogénéiser le produit stocké en soulevant la matière du cône vers le haut du silo.



**Figure 14 :** silo mélangeur.

### I.3.2. Les silos horizontaux :

-Silo à ciment horizontal équipé de vis flexibles pour le transport du matériau et d'un système de pesée électronique. Avec véhicules silos vous améliorez les performances de votre chantier. Le silo est disponible dans les tailles 15, 28 et 34 Tapez une équation ici.et se compose des composants suivants : capteurs de pesage électronique avec commande d'affichage et gestion du processus. Le châssis principal est équipé d'un système de positionnement et de fonctionnement du véhicule indépendamment du pont élévateur. Système vibrant pour améliorer l'écoulement du béton. Tarière pour le transport et le déchargement directement de la hauteur souhaitée, réglable. Panneau de commande pour contrôler tous les systèmes de sécurité requis par les réglementations européennes en vigueur. [11]



**Figure15** : Silo horizontal

#### **I.4. Silo dôme :**

-Certains silos à céréales sont construits sur la base de la technologie des dômes développée en Amérique du Nord et sont utilisés pour la construction de garages ou de pièces multifonctionnels. Son principal intérêt réside dans la rapidité de construction et l'isolation thermique. Il s'agit d'une base hémisphérique à base de béton armé. L'enveloppe gonflable peut être utilisée pour soutenir l'exécution du dôme. Tout d'abord, la mousse de projet en mousse de polyuréthane est pulvérisée. La mousse est un matériau isolant, puis nous mettons une armature spéciale en béton résistant à haute résistance. Le diamètre du dôme varie de 40 à 100 mètres, formant un espace de stockage totalement libre qui permet de stocker des céréales ou d'autres aliments (sucre, pommes de terre, etc.) Ou non alimentaires (engrais, etc.)



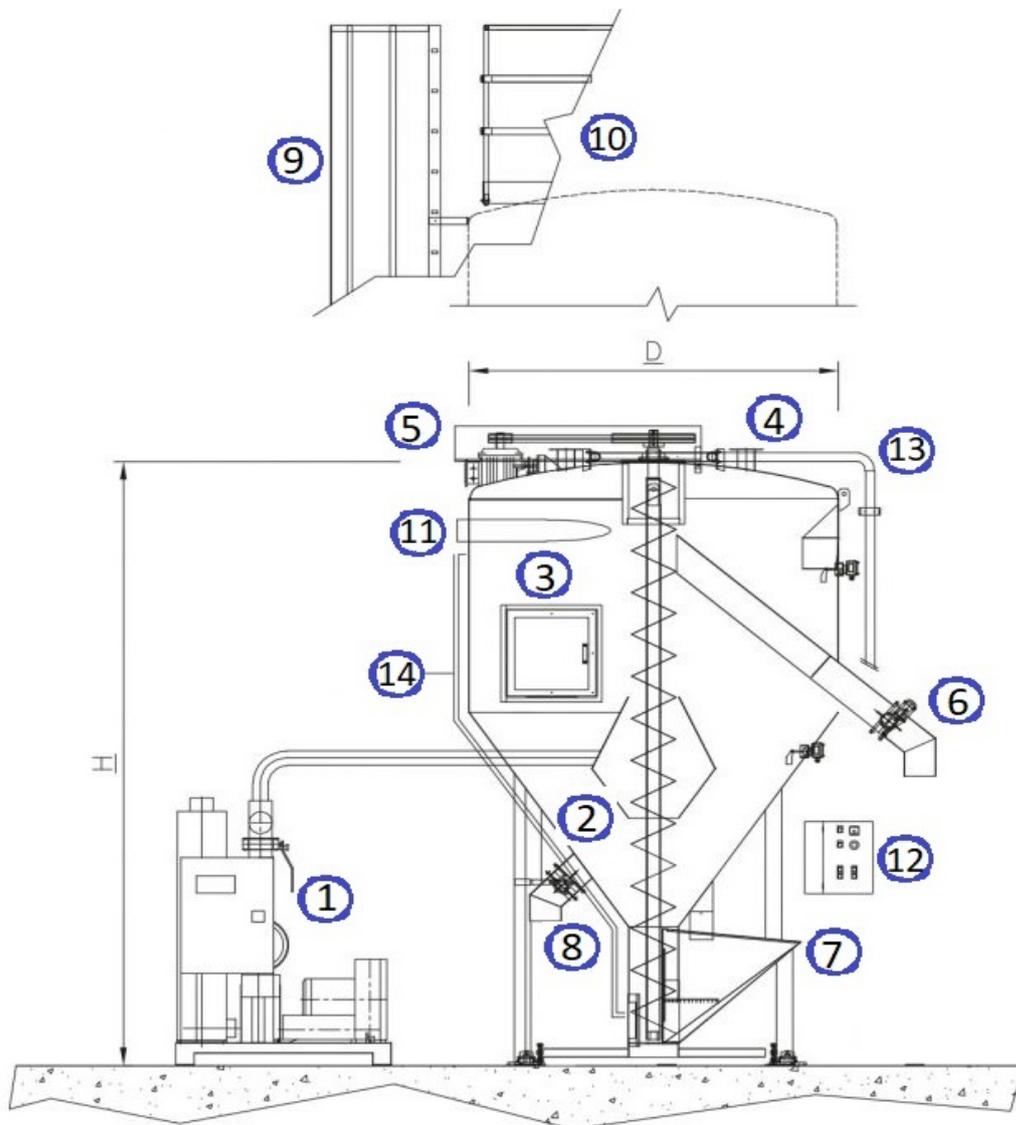
**Figure 16 :** Silo dôme de sucre blanc de 60 000 t à American (Crystal Sugar).

## **I.5. Accessoires pour les silos :**

Les silos sont équipés de divers accessoires qui varient d'un silo à l'autre selon le but et le type de silo, nous en avons mentionné certains :

- Il y a une porte de visite sur l'enceinte pour permettre l'accès au personnel chargé de la maintenance lorsque le silo est vide.
- Un filet circulaire anti-moineau a été installé entre le toit et le dernier enclos.
- Une porte sur le toit pour le contrôle de la production d'ensilage.
- Accès aérien pour supporter les porte-charges et les inspections.
- Indicateurs de niveau le plus élevé et le plus bas.
- Echelle verticale avec protection et fixation.
- Prise en charge du câble de contrôle de la température.
- Echelle en haut du silo avec protection latérale.
- Pont de support géant.
- Extracteur d'air automatique
- appareil thermique.
- système de ventilation.
- Tourner l'extracteur pour décharger les résidus dans le cône.
- Convoyeur à vis de remplissage

**Exemple d'un Silo mélangeur vertical pour plastique avec accessoires :**



**Figure 17 :** Silo mélangeur vertical pour plastique avec accessoires.

- |                                             |                                      |
|---------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1) Machine de chauffage ou de réfrigération | 3) Porte d'inspection                |
| 2) Chambre de chauffage ou de réfrigération | 5) Moteur électrique d'entraînement  |
| 4) Buse d'alimentation                      | 6) Tube de chargement pour big bag   |
| 8) Tuyau de déchargement                    | 7) Trémie                            |
| 10) Parapet de sécurité                     | 9) Échelle                           |
| 12) Boitier électrique                      | 11) Buse d'alimentation tangentielle |
| 14) Câbles électrique.                      | 13) Système de lavage                |

## **I.6 Les systèmes de remplissage et vidange pour les silos :**

-Les silos de stockage ont un système de remplissage pour les matériaux que nous voulons stocker et ont également un système de vidange de la charge stockée,

La mesure sur site des granulés dans les silos est d'une grande importance pour la surveillance des installations automatisées et la planification des livraisons. Divers dispositifs sont disponibles pour la surveillance continue du niveau de carburant, tels que des capteurs mécaniques, capacitifs et à ultrasons. Le niveau de remplissage des silos peut également être mesuré à l'aide de capteurs de pression. Le niveau de remplissage des silos inclinés peut être estimé grâce à capteurs de pression intégrés dans les plaques de base

Nous distinguons donc deux systèmes, l'un pour le remplissage et le second pour la vidange :

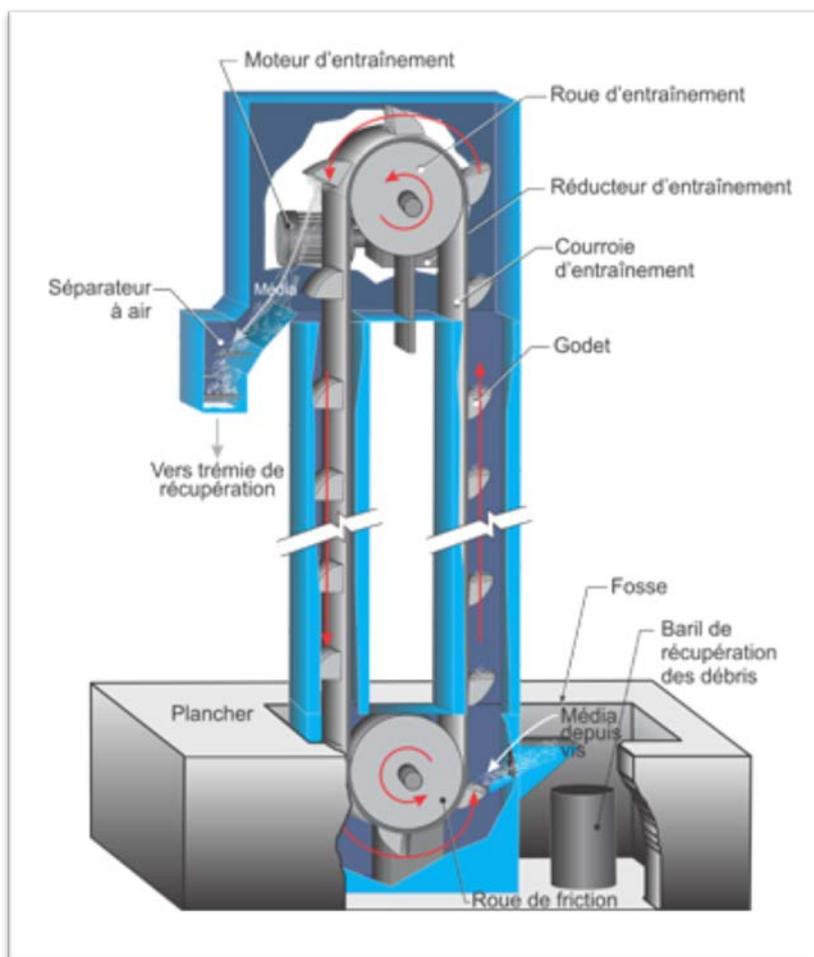
### **I.6.1 System de remplissage :**

Le traitement est généralement effectué par des ascenseurs verticaux et des convoyeurs horizontaux pour transporter les particules de la station de réception vers l'unité de stockage, donc il y a des types de remplissage :

#### **I.6.1.1. L'élévateur à godets :**

Les élévateurs à godets jointifs sont spécialement conçus pour **transporter** des produits en vrac d'un point de chargement à un seul point de déchargement. Le parcours s'effectue en continu à la verticale ou le long d'une forte pente, sur laquelle des seaux sont fixés à intervalles réguliers. Le produit à transporter est déversé dans chaque godet au bas de l'élévateur, transporté vers le haut et déversé à nouveau. L'élévateur à godets doit être couvert pour limiter la formation de nuages dans le godet renversé car des débris (le reste du produit) peuvent tomber lors du retour du godet renversé au fond de l'élévateur.

Dans les élévateurs à godets entraînés par des chaînes ou des courroies sont le plus souvent utilisés pour transporter de grandes quantités de produits à haute altitude. Ce sont des éléments de transport très fiables qui garantissent une longue durée de vie et un bon fonctionnement. [12]



**Figure 18 : Élévateur à godets**

### I.6.1.2. Convoyeur à vis :

Les vis de levage sous le tube sont utilisées pour les petites unités de stockage. En altitude, ils fonctionnent généralement à un angle de 45 °. Lorsqu'ils sont équipés d'une trémie, ils peuvent être fixés ou déplacés. Leur trafic est fonction du diamètre, selon le tableau 1 :

Diamètre (mm)	Débit (t/h)	Diamètre (mm)	Débit (t/h)
100	7	240	50
160	20	300	100

**Figure 19** : Débit d'une vis en fonction de son diamètre.



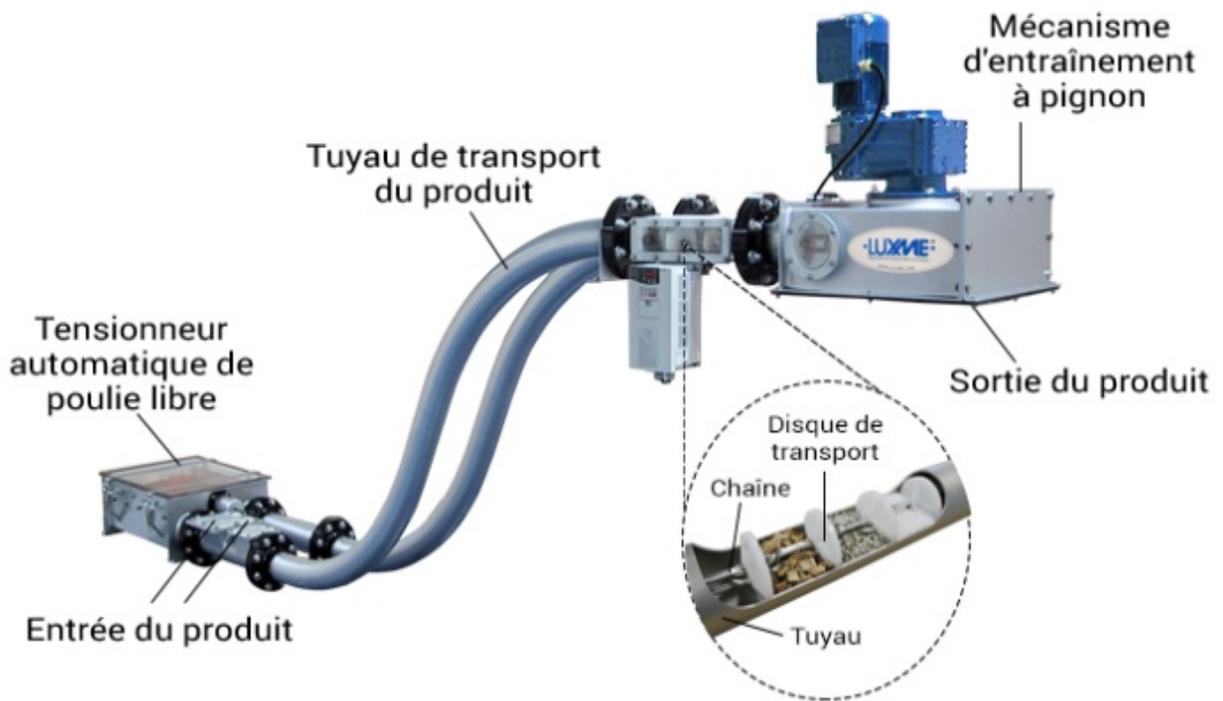
**Figure20** : Convoyeur à vis sans fin avec trémie.

### I.6.1.2.1. Convoyeur à câble tubulaire :

Ce convoyeur à câble tubulaire est la solution la plus économique pour transporter de la poudre ou des granulés à n'importe quelle distance. Ils sont disponibles dans de nombreuses configurations et offrent de faibles coûts de gestion.

En plus de transporter en douceur des produits friables et fragiles, sans les écraser, ce convoyeur tubulaire est conçu pour être totalement étanche à la poussière, évitant toute contamination du produit avec une petite surface et une faible consommation d'énergie, ce type de convoyeur en vrac peut être installé sur de longues distances de transport. L'élimination de la poussière, la grande variété de produits transportés (aliments, matériaux, abrasifs), l'adaptabilité du système aux installations existantes rendent ce convoyeur mécanique très efficace, écologique et polyvalent.

Convoyeur à chaîne tubulaire ou convoyeur à câble tubulaire travaillé à basse vitesse. Des disques maintenus ensemble par une chaîne en acier inoxydable ou un câble en acier tirent le produit dans un tube en acier modifié. Le produit qui est transporté dans une phase dense.



**Figure 21** : Convoyeur à câble tubulaire

### I.6.1.2.2 Convoyeur pneumatique :

Déplacez le transport de produits granulaires ou écrasants en déplaçant la veine dans le pipeline. Le support pneumatique est généralement composé d'un pipeline d'alimentation, équipé d'une salle de séparation de produits d'air de verrouillage, d'un dispositif de purification de l'air, d'un ventilateur et d'un pipeline d'émission. -Lors de la clairance de la technologie de traitement conventionnelle (comme la désinstallation des navires ou des barres d'armature) ou incapable d'accéder aux cellules, cette technologie est généralement obtenue. Le porteur pneumatique sur Chariot permet le flux de dizaines de tonnes par heure, mais la puissance élevée consommée est très élevée. La consommation d'énergie des porteurs pneumatiques est cinq fois celle des porteurs mécaniques conventionnels.

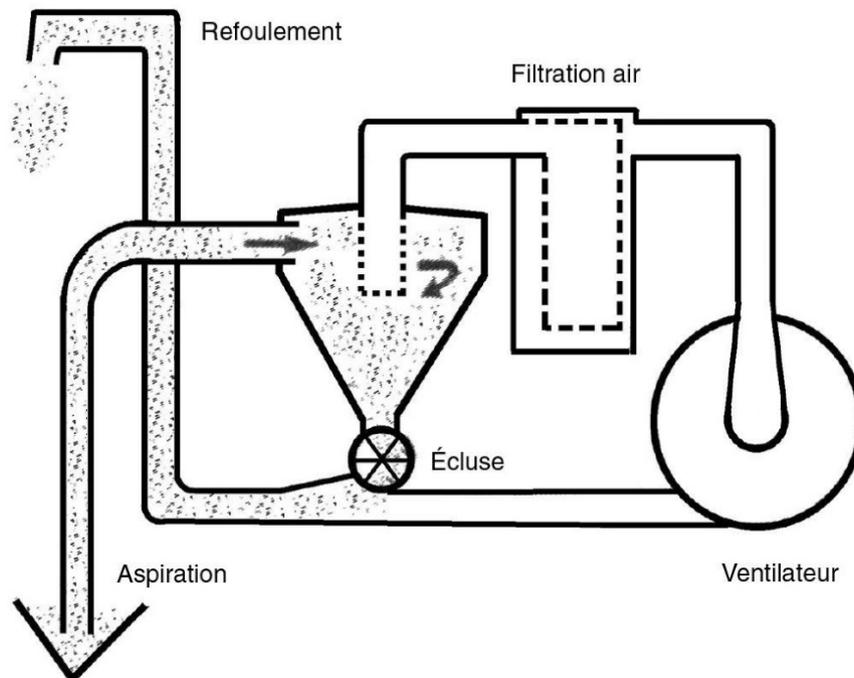


Figure 22 : Schéma du transporteur pneumatique.

## **I.6.2 System de vidange :**

La vidange d'un silo est considérée comme normale lorsque les trois conditions suivantes sont remplies :

L'écoulement se fait uniquement par gravité, aucun air n'est injecté.

Il n'y a pas de structure à l'intérieur du silo.

Le drain est situé en bas. Les coordonnées relatives du point de drainage le plus excentré  $\leq 0,4$

Si au moins une de ces trois conditions n'est pas remplie. Nous nous trouvons dans l'une des trois situations de drainage inhabituelles. [13]

### **I.6.2.1 Vidange par Vis de vidange intégrale :**

L'appareil est utilisé pour le vidage complet de silos cylindriques équipées de faux fonds perforés. La vis est positionnée dans une position fixe dans l'unité et ramène les particules de cône restantes dans le bac central. Le grain est ensuite vidé dans le circuit de traitement en serrant la vis.

### **I.6.2.2 Vidange par Transracleur :**

Le racleur est un appareil dédié à l'extraction du grain dans une auge rectangulaire à fond plat. Il racle les grains vers les pores d'évacuation et le système de recyclage de la cellule.

Le débit peut atteindre des centaines de tonnes par heure. Le matériau est également utilisé pour remplir des boîtes afin de niveler le dessus des tas de céréales.

### **I.6.2.3 Vidange par ventilation :**

Les cellules carrées à fond plat étaient parfois vidées par le système de ventilation. Parlons ensuite de la ventilation d'évacuation. Le flux d'air qui sort par le conduit de ventilation est dirigé pour pousser le grain vers le trou de vidange. Développée en Australie et adoptée par de nombreux industriels, cette technologie a l'avantage de ne pas casser le grain mais de générer de la poussière et de consommer beaucoup d'énergie.

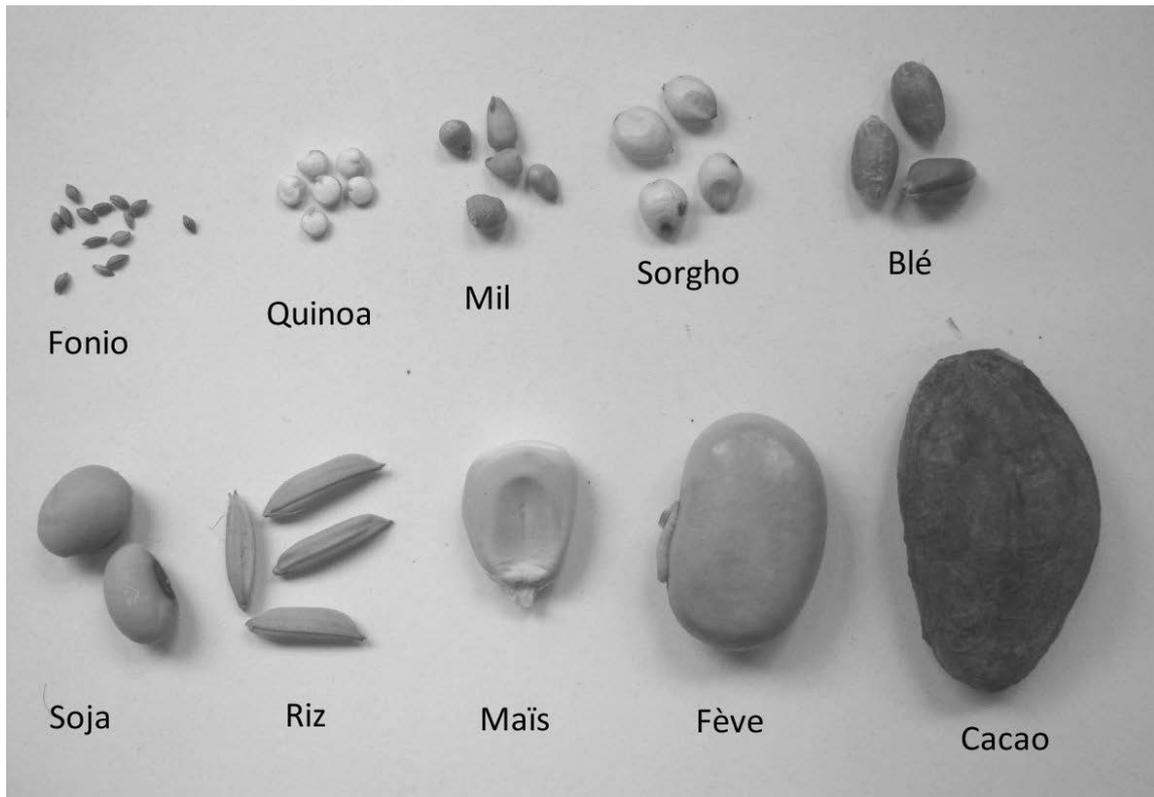
## **I.7 La matière en grain :**

### **I.7-1 Définition :**

Le terme grain fait souvent référence à la graine du grain, un véritable fruit sec et incassable appelé noyau. Cependant, le mot "céréale" désigne également les fruits ou les graines d'autres plantes, telles que les légumineuses (haricots, niébé), les oléagineux (tournesol, colza) ou les denrées semi-luxueuses (café).

### **I.7-2 Variabilité physique des grains :**

Les particules se présentent sous une grande variété de formes, de tailles ou de couleurs. Les graines sont sphériques, ovales, oblongues ou parfois même polygonales selon les espèces, dont la taille varie de moins de 1 mm à plus de 25 mm (fèves de cacao). Le poids de 1000 fèves peut donc varier de 0,5g à près de 1500g (fèves de cacao).



**Figure23** : Comparaison de la taille de différents grains.

### **I.7.3 Propriétés :**

- Les propriétés des matériaux granulaires dépendent de la nature des interactions entre les particules et également de leur interaction avec l'environnement (gaz ou liquide). Lorsque l'interaction des particules avec le fluide environnant est importante et ne peut être ignorée, en revanche pour d'autres matériaux granulaires, le comportement est déterminé par l'interaction particules/particules. Les physiciens considèrent que lorsque le fluide interstitiel est de l'air, le risque d'interférences dues à l'humidité de l'air et aux interactions électrostatiques attractives est négligeable pour des tailles de particules supérieures à 100  $\mu\text{m}$ . Ces matériaux sont alors appelés matériaux granulaires secs.

#### **I.7.3.1 Influence de la variation des caractéristiques physiques et mécaniques de la matière ensilée :**

**Ceci** doit être pris en compte afin que les variations des propriétés physiques et mécaniques du matériau d'ensilage soient prises en compte dans les calculs pour déterminer les forces maximales agissant sur les éléments constitutifs du silo. Trois paramètres importants peuvent en effet varier :

- La densité.
- Le frottement interne.
- Le frottement sur la paroi.

### **I.7.3.2 La densité (ou poids volumique) :**

Par conséquent, en prenant le fond, il est nécessaire de prendre en compte la valeur moyenne entre la densité minimale de la couche inférieure et la densité maximale de la couche supérieure lors du calcul de cette paroi densément augmentée. La valeur de densité maximale à la pression représentée par le poids appliqué de la couche supérieure est mieux déterminée par des essais préliminaires.

### **I.7.3.3 Le frottement interne :**

Le frottement interne est modifié pour exactement les mêmes raisons que pour la densité ci-dessus. Il est nécessaire de déterminer la variation expérimentalement. Dans certains cas, cependant, il est nécessaire de tenir compte des variations du pourcentage d'humidité du matériau d'ensilage, qui a un effet considérable sur son propre frottement interne et sur le frottement physique de chaque grain.

### **I.7.3.4 Le frottement sur les parois :**

Il faut réaliser exactement les mêmes études que pour le frottement interne, le frottement du matériau d'ensilage contre la paroi peut évoluer pour les deux mêmes raisons : surcharge due à la couche supérieure et à l'humidité ou simple humidification. Considérez le risque de mouiller localement le matériau d'ensilage provoquant son échauffement et son colmatage, puis formez une plaque, puis identifiez le frottement du matériau contre la paroi comme un frottement interne.

## **I.8 Ecoulement :**

### **I.8.1 Définition de l'écoulement :**

L'écoulement de particules est un phénomène complexe que l'on retrouve dans différentes situations industrielles et naturelles. En raison de la présence de particules dans divers procédés, les recherches sur les phénomènes d'écoulement des particules ne cessent de se multiplier. Un silo est un dispositif industriel qui permet le stockage et l'utilisation de matériaux granulaires, dans lequel on peut observer le phénomène d'écoulement des matériaux granulaires. Ce travail est une caractérisation et étude de l'écoulement gravitaire de matériaux granulaires dans un silo [14]

### **I.8.2 Le phénomène de durcissement des matériaux stockés :**

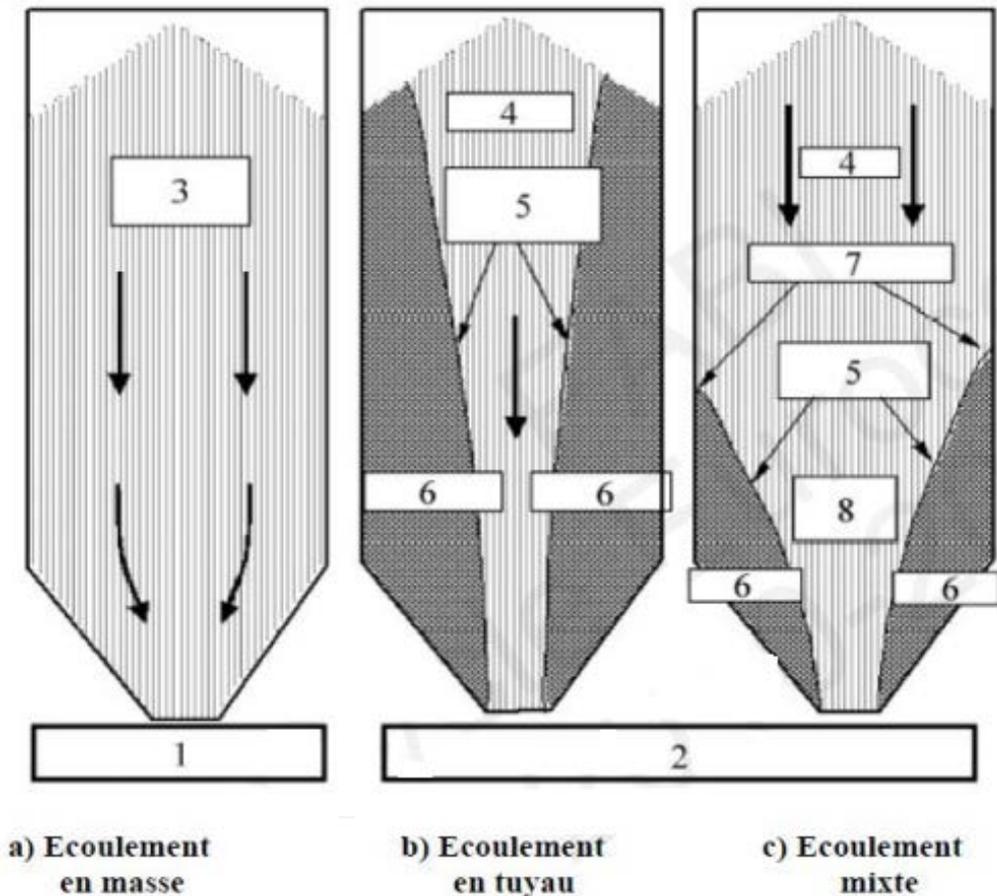
Ce phénomène est causé par la cohésion des particules stockées entre elles près de la paroi du silo, où elles restent longtemps, formant des zones statiques, tandis qu'une partie de la matière stockée située dans le canal d'écoulement est évacuée du silo. Les points faibles peuvent également augmenter en taille après un stockage prolongé, car les matériaux qui durcissent avec le temps, comme le sucre, deviennent difficiles ou impossibles à évacuer du silo. Par conséquent, le silo doit être complètement déchargé et les zones molles à l'intérieur nettoyées à des intervalles spécifiés.

### I.8.3 Modèles d'écoulements :

A/ l'écoulement en masse.

B/ l'écoulement en tuyau (cheminée).

C l'écoulement mixte (en semi- masse).



**Figure24** : les modes principaux d'écoulements.

- 1- Ecoulement en masse.
- 2- Ecoulement au tuyau.
- 3- Tout le contenu est mouvement.
- 4- Zone d'écoulement.
- 5- Surface-limite de l'écoulement.
- 6- Zone d'immobilité.
- 7- Transition effective.
- 8- Trémie effective.

## **I.9 Les avantages et Les inconvénients :**

### **I.9.1 Les avantages de silo métallique :**

- Les silos métalliques sont faciles à concevoir, fabriquer et installer, et peuvent être assemblés et démontés.
- Ventilation simple et efficace des silos métalliques pour alimenter les ventilateurs.
- Fondations de bâtiments Avec les silos métalliques, le sol n'a pas besoin d'être très dur pour supporter le poids de la structure. Dans certains cas, les silos métalliques peuvent être construits sur des parcelles n'ayant pas la capacité portante nécessaire par rapport à la construction de silos en béton.
- Stockage de liquides visqueux dans l'industrie alimentaire et solides sous forme de granulés et de gaz dans les usines de liquéfaction.
- les silos métalliques vous permettent de sélectionner le métal que vous voulez et dont vous avez besoin, par exemple : acier inoxydable, et le métal peut être peint à l'intérieur ou à l'extérieur. N'oubliez pas les difficultés de déchargement et de remplissage des sacs, abîmant le grain par éclatement ou le perdant par chute. Par conséquent, selon le type de grain et la capacité de transport requise, un silo métallique peut être équipé de différents systèmes mécaniques de chargement et de déchargement.
- Toutes les pièces en acier du silo sont fabriquées en usine, ce qui contribue à un contrôle qualité complet, tandis que les silos en béton sont construits sur place, ce qui implique davantage de variables telles que la livraison de béton et le climat.
- Les silos verticaux permettent de stocker de gros volumes dans un très petit espace.

### **I.9.2 Les inconvénients des silos métalliques sont les suivants :**

- Murs intérieurs difficiles à nettoyer en raison d'une accessibilité et de conditions de température difficiles.
- Risque de prolifération bactérienne dans le matériel d'ensilage.
- Dégradé de la qualité par une épaisseur de paroi mince et une conductivité thermique élevée (transfert de chaleur).
- Apparition du phénomène de croûte (durcissement de la matière ensilée sous l'effet de la chaleur et de l'humidité).
- Infiltration d'eau de pluie due à des imperfections dans les joints entre les panneaux et/ou au joint de toiture [15].

## **Conclusion :**

De tout ce qui a été mentionné dans ce chapitre, les silos ont un rôle très important dans le stockage et le contrôle et préservent les matériaux stockés à l'intérieur, de sorte que tous les silos, qu'ils soient en métal, en béton armé ou autres, nécessitent une étude technique et des calculs par des ingénieurs pour déterminer leurs dimensions, épaisseur et autres contrôles qui contrôlent leur industrie

Il existe de nombreux détails et variables dans un projet de silo, et chaque type de stockage de céréales a ses avantages et ses inconvénients. Le bon choix est celui qui correspond à votre stratégie d'infrastructure

# Chapitre II : Théories et normes de calcul des silos.

## II.1 Introduction :

Les normes de calcul ont toujours traité des problèmes affectant des structures qui, malheureusement, sont parfois mal définies et incompréhensibles, comme celles affectant les silos. Compte tenu de l'importance de cette structure et de l'augmentation annuelle des accidents lors de l'exploitation de cette structure, il est évident qu'il devrait y avoir une réglementation claire pour déterminer la méthode de son calcul. Le comportement du silo est très complexe, notamment au niveau où les parois interagissent avec le matériau, et le comportement des grains eux-mêmes est problématique. Face à un manque d'information et de recherche, leurs types de trafic ne peuvent être corrigés.

-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.

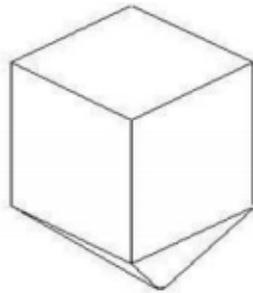
## II.2 Différents paramètres intervenant dans la détermination des actions :

On peut catégoriser ces paramètres en trois catégories :

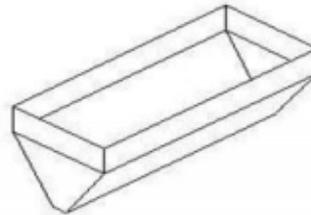
- ✓ Les caractéristiques géométriques du silo.
- ✓ La classe de fiabilité retenue pour le silo calculé.
- ✓ Les caractéristiques du (ou des) produit (s) ensilé (s).

## II.2.1 Les caractéristiques géométriques du silo :

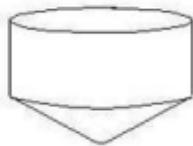
Le premier paramètre géométrique retenu pour la méthode de détermination de l'action exercée par la matière stockée est l'élanement du silo, c'est-à-dire le rapport de la hauteur  $h_c$  à la génératrice verticale  $h_c/d_c$ , calculé à partir du niveau de remplissage à la jonction avec la trémie.



(a) Silo carré avec trémie en pyramide



(b) Coffre ouvert

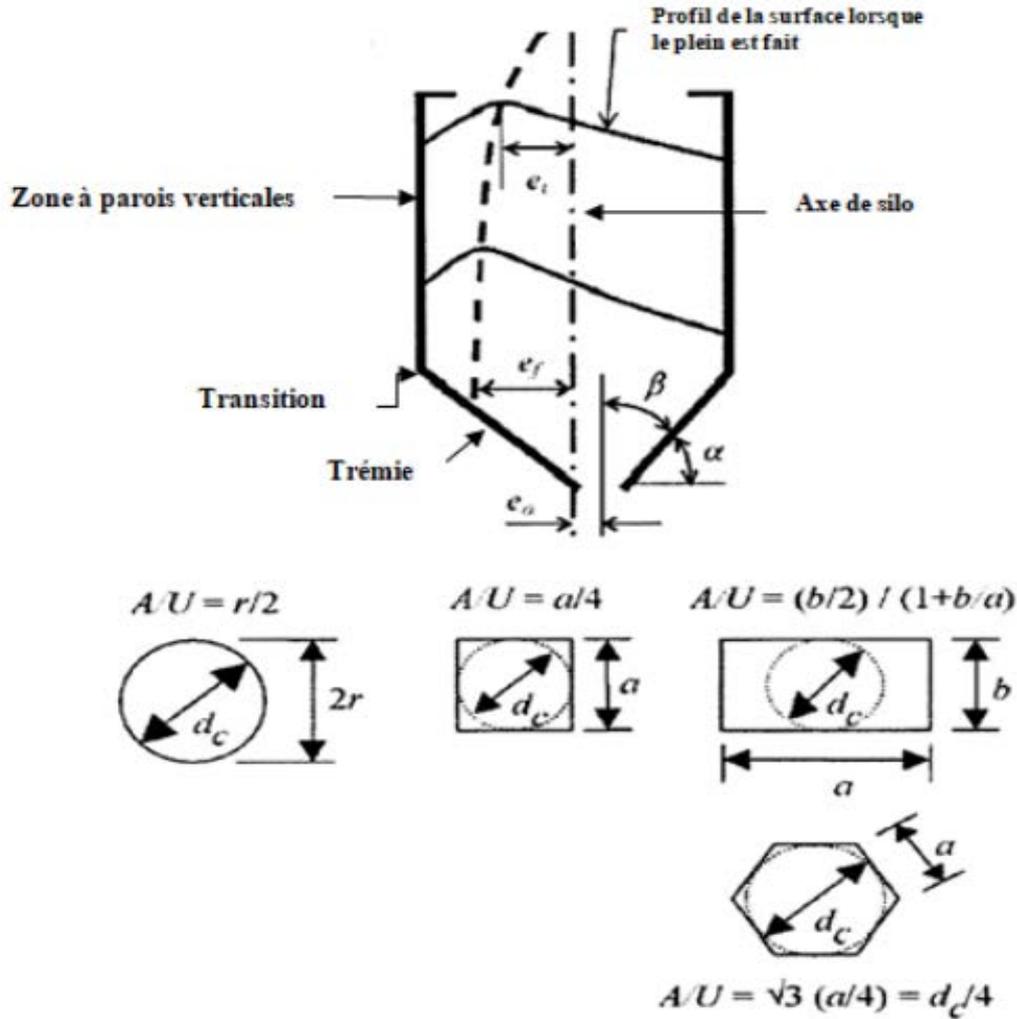


(c) Silo cylindrique à écoulement en entonnoir superficiel et dont la trémie est conique



(d) Silo cylindrique à écoulement en masse

Figure25 : Formes de silos standards.



**Figure 26 :** Formes de silos et notation des dimensions selon EC1-Partie 4.2

Le silo que nous envisageons est un silo métallique qui sera stocké dans un bâtiment à ossature métallique, destiné au stockage et à l'expédition du blé.

La forme du silo est de forme carrée avec un fond pyramidal avec une base carrée assemblée principalement avec des boulons, de plus il est amovible et se compose de 3 grandes parties, Trémie, parois et virole.

On distingue :

Ouvrage utilisé pour entreposer des matières granulaires en vrac. (Il s'agit de cellules de silo isolées ou en batterie ou encore de magasin de stockage.)

1. silo élancé Silo dont le rapport  $h/d_c \geq 1,5$ .
2. silo plat Silo dont le rapport  $h/d_c < 1,5$ .
3. silo circulaire à paroi mince.

Silo de section circulaire, sans raidisseurs circulaires, dont le rapport  $d_c/t > 200$ . [16]

## II.2.2 Classe de fiabilité :

La partie 4 de l'Eurocode 1 conduit à distinguer trois classes 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.[17]

-pour classer le silo il doit calculer la capacité de silo ou le poids de matière stocké(blé)

*Tableau01 : Classe des silos en fonction de la capacité et d'excentricité de décharge ou remplissage.*

<i>Classe de fiabilité</i>	<b>Description</b>
<b>Classe 3</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Tous les silos dont la capacité dépasse 10000 tonnes</li> <li>➤ Les silos dont la capacité dépasse 1000 tonnes, et ayant une des caractéristiques suivantes : <ul style="list-style-type: none"> <li>❖ vidange excentrée avec <math>e_0/dc &gt; 0,25</math></li> <li>❖ silos magasins avec excentrement de surface tel que <math>et/dc &gt; 0,25</math></li> </ul> </li> </ul>
<b>Classe 2</b>	➤ Tous les silos qui ne sont ni de classe 3, ni de classe 1
<b>Classe 1</b>	➤ Silos dont la capacité est inférieure à 100 tonnes

## II.2.3 Classer La famille de silo

$$r=dc/2 \quad a=dc \quad \text{donc} \quad r=a/2$$

**a ou dc** : dimension caractéristique d'une section.

$$heq/dc \dots\dots (1)$$

$$heq /dc = 3.325491483 \div 2 = 1,6627457415$$

$$heq/dc \geq 1.5$$

Donc notre silo est la famille Les **silos élancé**

Tableau02 : caractéristiques des matières granulaires.

Matériau	Poids volumique $\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )		Angle talus naturel $\theta_r$ (deg)	Angle de frottement interne $\theta_i$ (deg)		Rapport pression latérale K		Coefficient de frottement sur la paroi $\mu$				Coefficient de pression locale $C_{op}$
	$\gamma_i$ (inf)	$\gamma_i$ (sup)		$\theta_{im}$	$a_{\theta}$	$K_m$	$a_K$	D1	D2	D3	$a_{\mu}$	
<b>Blé</b>	7.5	9.0	34	30	1.12	0.54	1.11	0.24	0.38	0.57	1.16	0.5
<b>Maïs</b>	7.0	8.0	35	31	1.14	0.53	1.14	0.22	0.36	0.53	1.24	0.9
<b>Orge</b>	7.0	8.0	31	28	1.14	0.59	1.11	0.24	0.33	0.48	1.16	0.5
<b>Sucre</b>	8.0	9.5	38	32	1.19	0.5	1.20	0.46	0.51	0.56	1.07	0.5
<b>Ciment</b>	13.0	16.0	36	30	1.22	0.54	1.20	0.41	0.46	0.51	1.07	0.5
...												
<b>Par défaut</b>	6.0	22.0	40	35	1.3	0.50	1.5	0.32	0.39	0.50	1.40	1.0

Tableau 1 Tableau 03 : Combinaisons des propriétés de la matière dans la détermination des différents types d'actions.

OBJECTIF		Valeur caractéristique à adopter		
Parois verticales		Coefficient de frottement sur paroi $\mu$	Rapport de pression latérale K	Angle de frottement interne $\theta_i$
	Pression maxi. normale à la paroi	INF	SUP	INF
	Frottement maximal sur la paroi	SUP	SUP	INF
	Pression verticale maximale sur le fond, la trémie, ou les tirants	INF	INF	SUP
Trémies		Sur paroi trémie	Rapport de pression pour trémie F	
	Actions maxi. au remplissage	SUP	INF	INF
	Actions maxi. à la vidange	INF	SUP	SUP

Tableau 04 : les variables des matières granulaires.

Matière granulaire	Poids volumique <sup>3)</sup> $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Rapport des pressions ( $K_{s,m}$ )	Coefficient de frottement sur la paroi $\mu_m$		Coefficient maximal d'amplification $C_o$
			Acier <sup>4)</sup>	Béton	
orge <sup>1)</sup>	8,5	0,55	0,35	0,45	1,35
ciment	16,0	0,50	0,40	0,50	1,40
clinker	18,0	0,45	0,45	0,55	1,40
sable sec <sup>2)</sup>	16,0	0,45	0,40	0,50	1,40
farine <sup>1)</sup>	7,0	0,40	0,30	0,40	1,45
cendre volante <sup>1)</sup>	14,0	0,45	0,45	0,55	1,45
maïs <sup>1)</sup>	8,5	0,50	0,30	0,40	1,40
sucre <sup>1)</sup>	9,5	0,50	0,45	0,55	1,40
blé	9,0	0,55	0,30	0,40	1,30
charbon <sup>1) 2)</sup>	10,0	0,50	0,45	0,55	1,45

1) Des explosions de poussière peuvent survenir avec cette matière.  
 2) Il faut être prudent du fait de la variabilité des propriétés de cette matière.  
 3) Les poids volumiques sont indiqués pour calculer les charges ; il est recommandé de ne pas les utiliser dans les calculs de volumes. Les poids volumiques figurant dans la section 2 de l'ENV 1991-2-1 peuvent être utilisés pour les calculs de volume.  
 4) Non applicable à des parois ondulées.

Tableau 05 : Définition de la nature des surfaces de paroi

Catégorie	Intitulé	Type de matériau de la paroi
<b>D1</b>	<b>Paroi à frottement faible (paroi glissante)</b>	Acier inoxydable laminé à froid Acier inoxydable poli Surface revêtue basse frottement Aluminium poli Polyéthylène de poids moléculaire ultra élevé
<b>D2</b>	<b>Paroi à frottement moyen (paroi lisse)</b>	Acier doux au carbone lisse (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
<b>D3</b>	<b>Paroi à frottement élevé (paroi rugueuse)</b>	Béton brut de décoffrage, béton taloché, béton ancien Acier au carbone vieilli (corrodé) Acier résistant à l'abrasion Revêtement de céramique
<b>D4</b>	<b>Paroi irrégulière</b>	Paroi ondulée horizontalement Revêtement profilé avec rainures horizontales

## II.3 Les dimensions de silo carré :

### II.3.1 Les dimensions :

Hauteur totale (de sol)	5000 mm
Hauteur totale H'	4000 mm
Hauteur de la virole hv	3000 mm
Volume total	13.837 m <sup>3</sup>

#### A. Virole :

Hauteur virole 1	0 et 1000 mm
Hauteur virole 2	1 et 2000 mm
Hauteur virole 3	2 et 3000 mm
Volume de virole	12 m <sup>3</sup>
Epaisseur de chaque plaque	2.5 mm

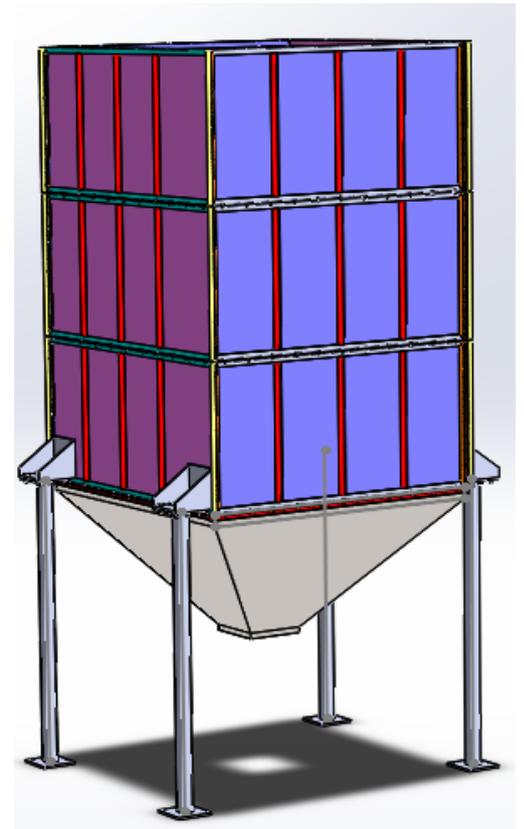


Figure27 : dimensions de silo carré

#### B. La trémie pyramide basse carré :

Grande côté de la base c	2000×2000 mm
(Orifice) Petite côté de la base	400×400 mm
Angle $\alpha$ et $\beta$	$\alpha = 50, \beta = 40$
Hauteur de la pyramide	916 mm
Epaisseur de tôle t	2.5 mm
Volume de la trémie	1.517 m <sup>3</sup>

#### C. Corniers et renfort :

Cornier profilé L	40×40×4 mm
Renfort cornier profilé L	40×40×4 mm

#### D. Boulons :

Boulon entre les plaques de paroi et la virole et la trémie  
M10×1.5 class 8×8 en acier S235JR

#### E. Pieds porteuses :

Profilé tube carré creux.

Longueur 2000 mm

Côté 90 ×90

Epaisseur 6 mm

#### F. La semelle carrée :

La longueur de la côté 200 mm

Epaisseur 15 mm

### II.4. Propriétés de matériau :

Nom : Acier S235JR  
Coefficient de poisson : 0.28  
Limite de traction : 3.6 e+008 N/m<sup>2</sup>  
Limite d'élasticité : 2.35 e+008 N/m<sup>2</sup>  
Module d'élasticité : 2.1 e+011 N/m<sup>2</sup>  
Masse volumique : 7800kg/m<sup>3</sup>

### II.5 Calcul et vérification :

#### II.5.1 Rayon hydraulique :

$$Rh = \frac{A}{U} \dots \dots \dots (2)$$

$$Rh = \frac{4}{8}$$

$$Rh = \frac{1}{2} \text{ m}$$

Matériau ensilé : **blé.** La nature de paroi : lisse

Selon le tableau de figure La catégorie du silo est **D2**

## II.5.2 Volume et capacité :

### A. Volume :

Le volume total d'une pyramide à base carrée compète est égal à :

$$\frac{a^2 \times Hh}{3} \dots\dots (3)$$

**a** : Valeur du côté de la base en m

**Hh** : distance de pyramide entre le sommet et la base.

**V trémie = V grand pyramide - V petit pyramide**

$$V \text{ trémie} = 1.517 \text{ m}^3$$

Donc volume de silo :

$$V \text{ silo} = V \text{ trémie} + v \text{ virole} \dots\dots (4)$$

$$V \text{ virole carrée} = a \times a \times hv = 2 \times 2 \times 3 = 12 \text{ m}^3$$

$$V \text{ silo} = 13,517 \text{ m}^3$$

### B. Hauteur du sommet du cône du solide stocké :

Angle de repos du solide (angle talus naturel) :  $\phi_r = 34^\circ$   
(du tableau 02)

$$hc = r \times \tan \phi_r \dots\dots\dots (5)$$

$$hc = (1) \tan 34 = 0,67450851 \text{ m.}$$

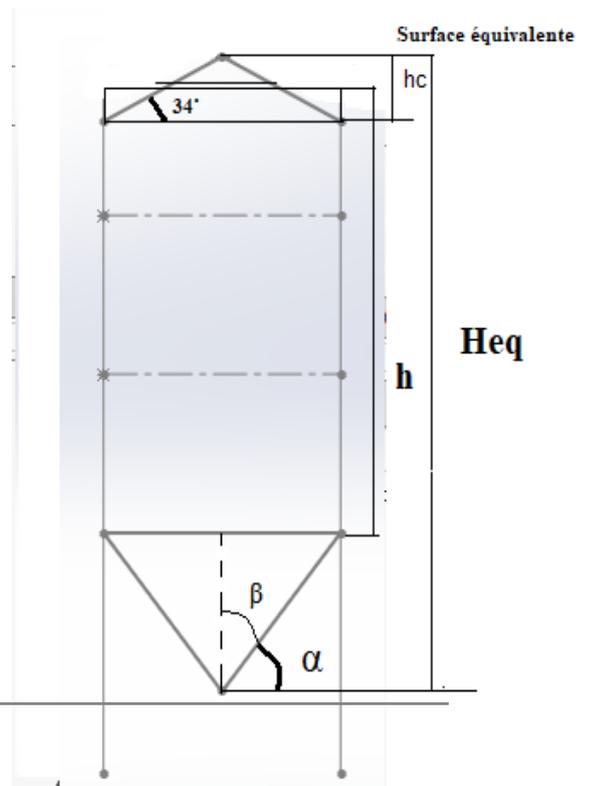
$$hc = 0,6745085168 \text{ m.}$$

### C. La hauteur à la base de la surface effective heq :

$$heq = H' - hc \dots\dots\dots (6)$$

$$heq = 4 - 0,6745085168$$

$$heq = 3.325491483 \text{ m}$$



heq=3.325 m

**Figure28** : dessin présente les angles et les hauteurs

**D. Capacité volumétrique du silo :**

La capacité volumétrique du silo pour le calcul de la capacité :

$\gamma_{\text{sup}}=9 \text{ kN/ m}^3$  (de tableau 02).

**V Capacité** = v trémie + v virole carrée(hc)

**V Capacité** = v trémie+ a×a×(hv+hc/3) =2×2× (3+0,6745085168 /3)

**V Capacité** = 1.517+12,89934469

**V Capacité=14,416 m<sup>3</sup>**

**E. Capacité minimale du silo :**

$$C = V \text{ Capacité} \times \gamma_{\text{inf}} \dots\dots (7)$$

**C** =14,41634469 ×7.5=108,122585175 KN

En unité de tonne **C = 10,812 tonnes.**

**F. Le poids total du solide pour le calcul structural :**

\*Le poids unitaire à utiliser :  $\gamma_{\text{sup}} = 9.0 \text{ KN/ m}^3$

$$C = V \text{ Capacité} \times \gamma_{\text{sup}} \dots\dots (8)$$

**C** =14,41634469×9

**C=129,74710221 KN**      En unité de tonne : **12,975 tonnes**

**12.975 < 100 tonnes**

Donc la classe de silo selon (de tableau 01) de figure est **classe 1**

### **II.5.3 Calcules des coefficients :**

#### **II.5.3.1. Le coefficient de frottement sur la paroi :**

Donc : D'après la surface de paroi D 2 (de tableau02 et tableau5)

On va déterminer le coefficient de frottement sur la paroi est supérieur (de tableau03)

$$\mu = \mu_{\text{sup}} = \frac{0.38}{1.16} = 0,32758620689... \quad \mu : \text{le coefficient de frottement sur la paroi}$$

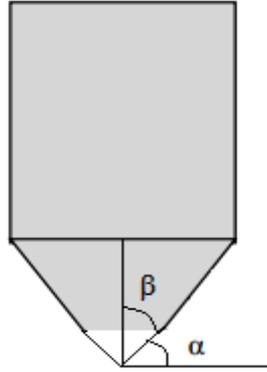
$$\mu = \mu_{\text{sup}} = \mathbf{0,327}$$

#### **5.3.2 Rapport de pression latéral k :**

$$K = K_{\text{sup}} = \frac{k s}{a \kappa} = \frac{0.54}{1.11} = 0,48648648648... \quad \mathbf{K = K_{\text{sup}} = 0,486}$$

### **II.5.4 Types d'écoulement :**

Pour déterminer le mode d'écoulement dans le silo selon le règlement Eurocode 1 Part. 4  
Silo carré avec une trémie pyramide base carrée de  $\alpha = 50^\circ$  par rapport à l'horizontale.



**Figure 29** : dessin présent  $\alpha$  L'angle d'inclinaison de la paroi de la trémie par rapport l'horizontale

Du tableau, on tire la valeur moyenne du coefficient de frottement sur la paroi  $\mu_m = 0.38$

$\mu_m$  : valeur moyenne du coefficient de frottement sur la paroi

$$\phi_w = \arctan \mu_m \dots\dots\dots (9)$$

$$\phi_w = \arctan 0.38 = 20.8067^\circ$$

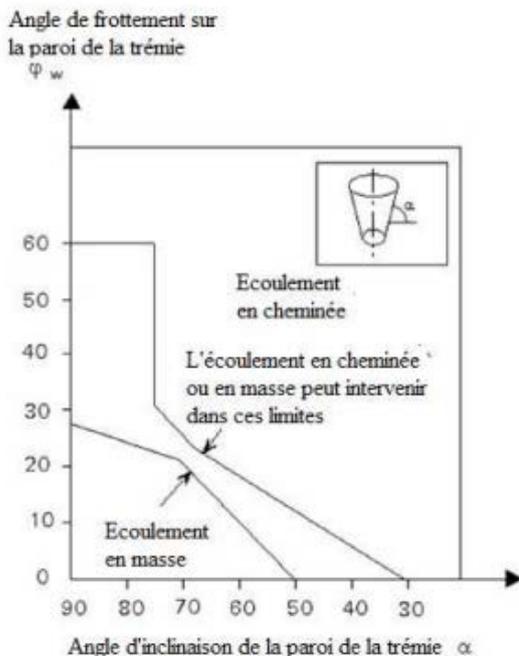
$\phi_w$  : L'angle de frottement du mur

$$\phi_w = 20,806791^\circ$$

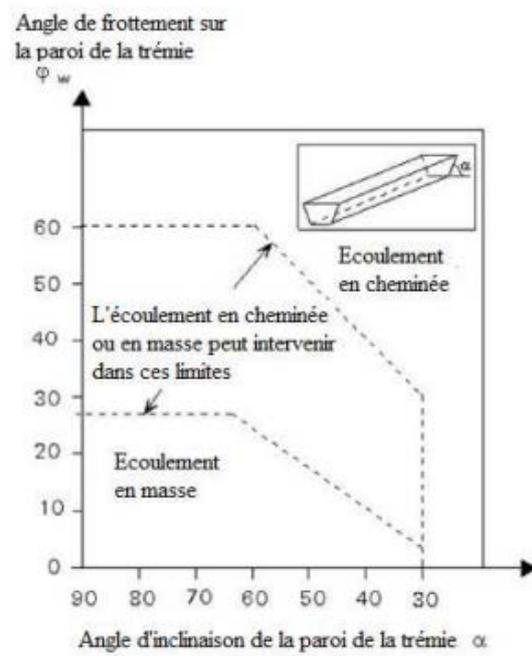
$$\phi_w = 20,8^\circ$$

Le mode d'écoulement est déterminé graphiquement par les abaques ci-dessus.

On détermine l'angle de frottement sur la paroi de la trémie, pour la détermination du mode d'écoulement.



**1- Trémie conique**



**2- Trémie allongées en forme de coin**

**Figure 30** : limite entre l'écoulement en masse et l'écoulement en cheminée pour trémies coniques et trémies allongées en forme de coin.

Après la projection le point d'interaction dans la zone de l'écoulement en cheminée

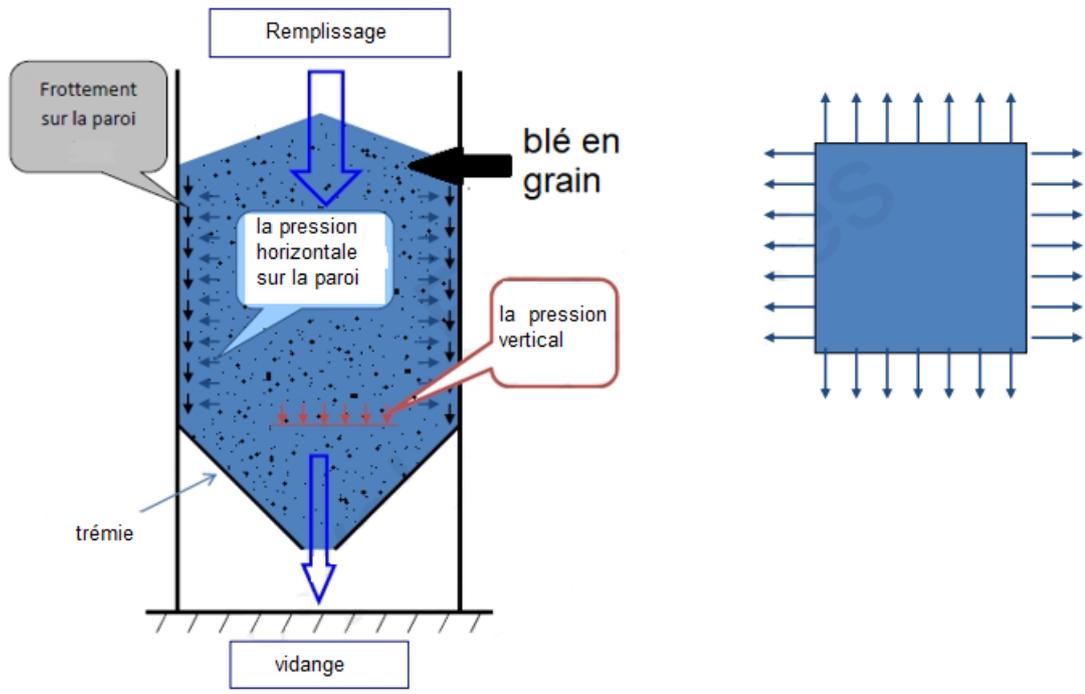
Le mode **d'écoulement est en cheminée.**

## **II.6 Calcul les pressions exercées dans le silo carré :**

En principe, les forces exercées par les matériaux stockés dans le corps cellulaire seront calculées.

Les substances stockées exercent différents types d'actions sur la paroi cellulaire, ce sont :

- Pression verticale
- Pression normale (horizontale) sur la paroi
- Frottement sur la paroi.



**Figure31** : Les efforts exercés dans le silo.

**II.6.1 Pression vertical  $P_v$  :**

$$P_{vf}(z) = \frac{\gamma A}{K_s \mu U} C_z(z) \dots\dots\dots (10)$$

Où :

$$Z_0 = \frac{A}{K_s \mu U} \dots\dots\dots (11)$$

$$C_z(z) = 1 - e^{(-z/z_0)} \dots\dots (12)$$

**Pvf** pression verticale en fin de remplissage.

**Cz** coefficient de Janssen (Le coefficient de pression).

**Y** est le poids volumique de la matière ensilée.

**μ** est le coefficient de frottement sur la paroi.

**Ks** est le rapport de pression horizontale/pression verticale.

**Z** est la profondeur considérée.

**U** est le périmètre intérieur de la section de la zone à parois verticales.

**A** aire intérieure de la section.

**Les calculs :**

$$A = 4 \text{ m}^2 \quad U = 8 \text{ m} \quad K_s = 0,486$$

**La hauteur caractéristique de Janssen :**

$$Z_0 = \frac{A}{K_s \mu U}$$

$$= \frac{4}{0,486 \times 8 \times 0,327} = 3,14619750569 \dots \text{ m}$$

$$Z_0 = 3,146 \text{ m}$$

On va calculer Cz de chaque profondeur de silo

$$C_z(1) = 1 - e^{\left(-\frac{1+0,674}{3,146}\right)} = 0,3178639542$$

$$C_z(2) = 1 - e^{\left(\frac{-2+0,674}{3,146}\right)} = 0,3439298786$$

$$C_z(3) = 1 - e^{\left(\frac{-3+0,674}{3,146}\right)} = 0,5225766032$$

$$P_{vf}(1) = \frac{9,10^3 \times 4}{0,486 \times 0,327 \times 8} \times c_z(1) = 9000,565019 \text{ N/m}^2$$

$$P_{vf}(1) = 9,100 \text{ KN/m}^2$$

$$P_{vf}(2) = \frac{9,10^3 \times 4}{0,486 \times 0,327 \times 8} \times c_z(2) = 9738,641936 \text{ N/m}^2$$

$$P_{vf}(2) = 9,739 \text{ KN/m}^2$$

$$P_{vf}(3) = \frac{9,10^3 \times 4}{0,486 \times 0,327 \times 8} \times c_z(3) = 14797,16285 \text{ N/m}^2$$

$$P_{vf}(3) = 14,798 \text{ KN/m}^2$$

**II.6.2. Pression horizontal (normal) :**

$$\mathbf{Phf(z)} = \frac{\gamma A}{\mu U} cz(z) \dots \dots \dots (13)$$

**Phf :** pression horizontale en fin de remplissage.

$$\mathbf{Phf(1)} = \frac{9.10^3 \times 4}{0,327 \times 8} \times cz(1) = 4374.274599 \text{ N/m}^2 = 4.374274599 \text{ KN/m}^2$$

$$\mathbf{Phf(1) = 4.375 \text{ KN/m}^2}$$

$$\mathbf{Phf(2)} = \frac{9.10^3 \times 4}{0,327 \times 8} \times cz(2) = 4732.979981 \text{ N/m}^2 = 4.732979981 \text{ KN/m}^2$$

$$\mathbf{Phf(2) = 4.733 \text{ KN/m}^2}$$

$$\mathbf{Phf(3)} = \frac{9.10^3 \times 4}{0,327 \times 8} \times cz(3) = 7191.421145 \text{ N/m}^2 = 7.191421145 \text{ KN/m}^2$$

$$\mathbf{Phf(3) = 7.192 \text{ KN/m}^2}$$

**II.6.3 La pression asymptotique P<sub>o</sub> :**

$$\mathbf{P_o} = \frac{\gamma L}{K_s \mu U} \dots \dots \dots (14)$$

$$\mathbf{P_o} = \frac{9 \times 2}{0.486 \times 0,327 \times 8} = 14.15788878 \text{ KN/m}^2$$

$$\mathbf{P_o} = 14.158 \text{ KN/m}^2$$

**II.6.4 Pression dans la trémie :**

**II.6.4.1. La trémie :**

Angle  $\alpha > 20^\circ$  la pression sur la paroi de la trémie inclinée, P<sub>n</sub>, est calculée comme suit :

$$P_n = P_{n3} + P_{n2} + (P_{n1} - P_{n2}) \frac{x}{l_n} \dots \dots \dots (15)$$

$$P_{n1} = P_{v0} \times (C_b \times \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) \dots \dots \dots (16)$$

$$P_{n2} = C_b \cdot P_{v0} \cdot \cos^2 \alpha \dots \dots \dots (17)$$

$$P_{n3} = 3,0 \times \frac{A}{U} \times \frac{\gamma K_s}{\sqrt{\mu}} \sin^2 \alpha \dots \dots \dots (18)$$

**Pn1 et Pn2** sont les pressions correspondant à la pression verticale dans la matière ensilée directement au-dessus de la transition.

**Pn3** est la pression correspondant au remplissage de la trémie.

**In** Longueur de paroi de la trémie.

**Cb** est le coefficient d'amplification de la pression sur le fond tenant compte d'une répartition non uniforme de l'action calculé à l'aide de l'expression

$$Cb=1.2..... (19).$$

**Pvo** est la pression verticale agissant à la transition,

Matériau ensilé : blé  $\gamma = \gamma_{sup} = 9.0 \text{ kN/m}^3$

$$\sin(\beta) = R/l_n \rightarrow l_n = \frac{R}{\sin\beta} \qquad l_n = \frac{1}{\sin 40} = 1.55723827 \text{ m}$$

$l_n = 1.557 \text{ m}$  on prendre  $x = l_n$

#### II.6.4.2. La pression verticale agissant à la transition :

Calculée à l'aide de l'expression  $PV(z) = \frac{\gamma A}{Ks\mu U} Cz (z)$

$$\text{Donc : } P_{v_0} = PV(z) = \frac{\gamma A}{Ks\mu U} Cz..... (20)$$

$$P_{v_0} = \frac{9 \times 4}{0.486 \times 8 \times 0.327} \times 0.5225766032 = 14.79716285 \text{ kN/m}^2$$

$$P_{v_0} = 14.797 \text{ kN/m}^2$$

#### Calcul de Pn1 et Pn2 et Pn3 :

$$\rightarrow Pn1 = P_{v_0} \times (Cb \times \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha)$$

$$Pn1 = 14.797 \times (1.2 \times \cos 50^2 + \sin 50^2) = 16.01975279 \qquad Pn1 = 16.019 \text{ kN/m}^2$$

$$\rightarrow Pn2 = Cb \cdot P_{v_0} \cdot \cos^2 \alpha$$

$$Pn2 = 1.2 \times 14.797 \times \cos 50^2 = 7.336516749 \qquad Pn2 = 7.336 \text{ kN/m}^2$$

$$\rightarrow Pn3 = 3,0 \times \frac{A}{U} \times \frac{\gamma K_s}{\sqrt{\mu}} \sin^2 \alpha$$

$$Pn3 = 3.0 \times \frac{4}{8} \times \frac{9 \times 0.486}{\sqrt{0.327}} \sin 50^\circ = 6.73922926$$

$$Pn3 = 6.739 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{➤ } Pn = Pn3 + Pn2 + (Pn1 - Pn2) \cdot \frac{X}{In}$$

$$Pn = 6.739 + 7.336 + (16.019 - 7.336) \times \frac{1.557}{1.557} = 22.758 \text{ kN/m}^2$$

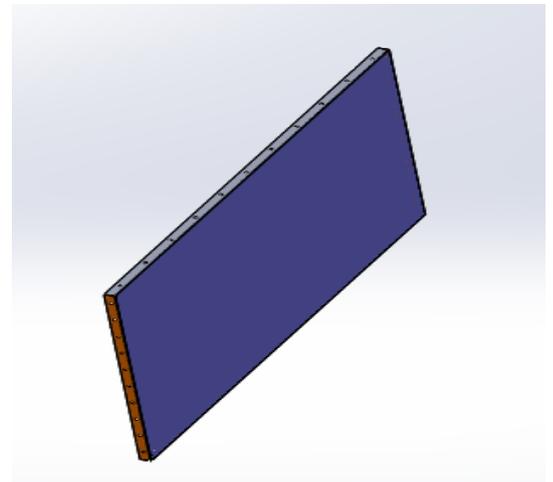
$$Pn = 22.758 \text{ KN/m}^2$$

### II.6.4.3 Contrainte de frottement sur la trémie :

$$Pt = Pn \mu \dots\dots (21)$$

$$Pt = 22.758 \times 0,327 = 7.441866$$

$$Pt = 7.441 \text{ kN/m}^2$$



## II.7 Vérification des liaisons entre les plaques de la paroi :

La paroi est réalisée à partir de 4 étages (chaque étage représente 4 des plaques qui a été vérifier en) l'espacement maximal entre 2 boulons est de 100mm dans largeur et 182 mm de longueur.

### II.7.1 Calcul de traction maximale dans un boulon :

Boulon M10-classe 8.8

Nombre de boulons 10

Pression normale maximale : 7192N

Largeur de la plaque : 1 m

Effort à reprendre par un boulon : 1438.4N

Donc, l'effort pondéré à 1.5 est égal à : 2157.75 N

➤ **Vérification de la boulonnerie :**

**II.7.1.1 Contraint de traction et cisaillement :**

Rn : contraint de traction,

Rc : contraint de cisaillement.

Effort normale : 2157.75 N

Section résistance :  $Ar = 58 \text{ mm}^2$

Nombre de boulons : 1 nb

Limites élastiques :  $Re = 640 \text{ N/mm}^2$

Limite a la rupture :  $Rr = 800 \text{ N/mm}^2$

$Rn = 1.25N / (Ar \cdot nb)$

$Rn = 46.5 \text{ N/mm}^2$

$Rc = 1.54N / (Ar \cdot nb)$

$Rc = 57.29 \text{ N/mm}^2$

$Rn < Re$

$Rc < Rr$

**Acceptable.**

**figure 32 :** dessin de la plaque

**II.7.1.2 Calcul de traction maximale dans un boulon :**

Boulon M10-classe 8.8

Nombre de boulons 11

Pression normale maximale : 7192N

Longueur de la plaque : 2 m

Effort à reprendre par un boulon : 1307.64 N

Donc, l'effort pondéré à 1.5 est égal à : 1961.45 N

➤ **Vérification de la boulonnerie :**

Contraint de traction :

Rn : contraint de traction,

Effort normale : 1961.45 N

Section résistance :  $Ar = 58 \text{ mm}^2$

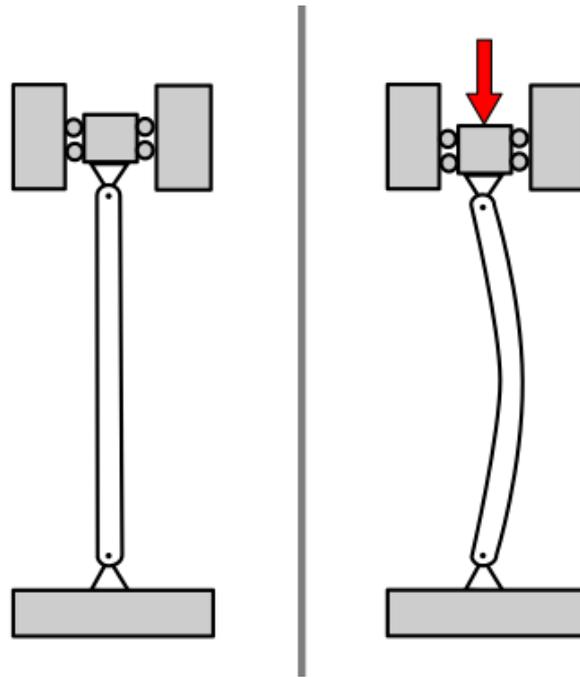
Nombre de boulons : 1 nb

Limite à la rupture :  $Rr = 800 \text{ N/mm}^2$

$Rn = 1.25N / (Ar \cdot nb)$

$Rn = 42.27 \text{ N/mm}^2$





**Figure34 : Le flambement**

-Ce seuil, à ne pas dépasser pour éviter l'effondrement du poteau, dépend de quelques paramètres :

- De la nature du matériau.
- Des caractéristiques géométriques de la poutre.
- Des conditions d'appui imposées

### **II.8.2 Vérification de flambement :**

Selon les normes **NF EN 1993-1-1 Octobre 2005**

Poids totaux de silo avec la matière granulé : 13.5 tonnes.

La forme de porteuse : profilé tube carré en acier s2.35jr 90×90 d'épaisseur 6 mm

Moment d'inertie **I<sub>y</sub>** : 238.29 cm<sup>4</sup>

Moment d'inertie **I<sub>z</sub>** : 355.66 cm<sup>4</sup>

Surface de section de profilé **A** : 20.26 cm<sup>2</sup>

Longueur **L'** : 200 cm

E Module de Young: 2.1×10<sup>6</sup> MPa

#### ➤ **Charge critique d'Euler :**

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 \times E \times I}{L^2} \dots\dots (22) \quad N_{cr} : \text{est la force critique d'Euler}$$

$$N_{cr, y} = \frac{\pi^2 \times E \times I_y}{L^2} = \frac{\pi^2 \times 2.1 \times 238.29 \times 10^6}{200^2} = 123470.98 \text{ daN}$$

➤ **Enlacement Réduit:**

$$\lambda^- = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N c_y}} \dots \dots \dots (23)$$

$$\lambda^- = \sqrt{\frac{20.26 \times 2350}{123470.98}} \quad \lambda^- = 0.62$$

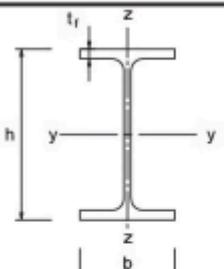
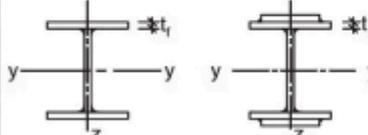
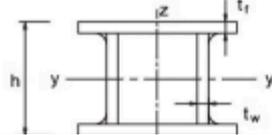
Et  $0.62 > 0.2$

**Choisir le courbe de flambement :**

On a le profilé tube carrée selon le tableau des profilés pour choisir courbe de flambement

$$\frac{b}{b} = \frac{90}{90} = 1 < 1.2 \quad t_r = 6 \text{ mm}$$

Tableau 06 : les caractéristiques de les profilés d'acier

Cross section	Limits	Buckling about axis	Buckling curve	
			S 235 S 275 S 355 S 420	S 460
 Rolled sections	$h/b > 1.2$	y-y z-z	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	a a <sub>0</sub>
			$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$	b c
	$h/b \leq 1.2$	y-y z-z	$t_f \leq 100 \text{ mm}$	b c
			$t_f > 100 \text{ mm}$	d c
 Welded I-sections	$t_f \leq 40 \text{ mm}$	y-y z-z	b c	b c
	$t_f > 40 \text{ mm}$	y-y z-z	c d	c d
 Hollow sections	hot finished	any	a	a <sub>0</sub>
	cold formed	any	c	c
 Welded box sections	generally (except as below)	any	b	b
	thick welds: $a > 0.5t_f$ $h/t_w < 30$	any	c	c

Donc la courbe c

$$\alpha' = 0.49$$

Tableau 07 : la courbe de flambement en fonction de facteur d'imperfection

Courbe de flambement	$a_0$	a	b	c	d
Facteur d'imperfection $\alpha$	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Et selon le tableau (08)

Tableau 08 : des coefficient réduction en fonction de l'élanement réduit.

Coefficient réducteur $\chi$ en fonction de l'élanement réduit $\bar{\lambda}$ (équivalent à la fig. 8.10.)					
$\bar{\lambda}$	$a_0$	a	b	c	d
0.2	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.3	0.9859	0.9775	0.9641	0.9491	0.9235
0.4	0.9701	0.9528	0.9261	0.8973	0.8504
0.5	0.9513	0.9243	0.8842	0.8430	0.7793
0.6	0.9276	0.8900	0.8371	0.7854	0.7100
0.7	0.8961	0.8477	0.7837	0.7247	0.6431
0.8	0.8533	0.7957	0.7245	0.6622	0.5797
0.9	0.7961	0.7339	0.6612	0.5998	0.5208
1.0	0.7253	0.6656	0.5970	0.5399	0.4671
1.1	0.6482	0.5960	0.5352	0.4842	0.4189
1.2	0.5732	0.5300	0.4781	0.4338	0.3762
1.3	0.5053	0.4703	0.4269	0.3888	0.3385
1.4	0.4461	0.4179	0.3817	0.3492	0.3055
1.5	0.3953	0.3724	0.3422	0.3145	0.2766
1.6	0.3520	0.3332	0.3079	0.2842	0.2512
1.7	0.3150	0.2994	0.2781	0.2577	0.2289
1.8	0.2833	0.2702	0.2521	0.2345	0.2093
1.9	0.2559	0.2449	0.2294	0.2141	0.1920
2.0	0.2323	0.2229	0.2095	0.1962	0.1766
2.1	0.2117	0.2036	0.1920	0.1803	0.1630
2.2	0.1937	0.1867	0.1765	0.1662	0.1508
2.3	0.1779	0.1717	0.1628	0.1537	0.1399
2.4	0.1639	0.1585	0.1506	0.1425	0.1302
2.5	0.1515	0.1467	0.1397	0.1315	0.1214
2.6	0.1404	0.1362	0.1299	0.1234	0.1134
2.7	0.1305	0.1267	0.1211	0.1153	0.1062
2.8	0.1216	0.1182	0.1132	0.1079	0.0997
2.9	0.1136	0.1105	0.1060	0.1012	0.0937
3.0	0.1063	0.1036	0.0994	0.0951	0.0882

➤ **Le coefficient  $\phi$  :**

$$\Phi = 0.5 \times [1 + \alpha' \times (\lambda^- - 0.2) + \lambda^2] \dots\dots\dots (24)$$

$$\Phi = 0.5 [1 + 0.49 \times (0.62 - 0.2) + 0.62^2]$$

$$\Phi = 0.79$$

➤ **Facteur de réduction pour flambement considéré :**

$$\Omega = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \dots\dots\dots (25) \quad \Omega = \frac{1}{0.79 + \sqrt{0.79^2 - 0.62^2}} = 0.782 < 1$$

➤ **Vérification de critère :**

$$N_{ed} < N_{b, Rd} \quad 13 \text{ tones} = 127976 \text{ N} \quad N_{ed} = 12797.6 \text{ daN} \quad \gamma_{M1} = 1$$

$$N_{b, Rd} = \frac{\Omega \times M \times I_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.782 \times 20.26 \times 2350}{1}$$

$$N_{b, Rd} = 37231.802 \text{ daN}$$

$$\frac{N_{ed}}{N_{b, Rd}} = \frac{12797.6}{37231.802} = 0.344 \quad 0.344 < 1$$

Donc il est vérifié

## Chapitre3 : simulation et vérification par SolidWorks

### III.1 Introduction :

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur de Dassault Systèmes. Il utilise les principes de la conception paramétrique pour générer trois types de fichiers liés : pièces, assemblages et dessins. Par conséquent, toute modification de l'un de ces trois fichiers sera propagée aux deux autres. Pour plus d'informations, nous vous invitons à visiter notre page dédiée à la préparation des fichiers pour l'impression 3D. Le fondateur Jon Hirschtick a commencé à développer SolidWorks en 1993 avec une équipe de développement pour rendre la CAO plus facile à utiliser. À partir de 1995, la première version du logiciel a été lancée. En 1997, Dassault Systèmes devient actionnaire majoritaire et continue à développer des outils logiciels. SolidWorks vous permet d'effectuer des modélisations 2D et 3D, le logiciel de CAO est reconnu pour sa facilité d'utilisation et son intuitivité.

Le logiciel SolidWorks vous permet de :

- Concevez des objets 3D avec une grande précision.
- Développement de produits
- Vérifiez la conception de votre fichier
- Possède une bibliothèque de fichiers 3D
- Configurer le dessin 2D
- Créer des images et des animations d'objets 3D
- Estimer le coût de fabrication des objets 3D
- Vous pouvez facilement créer des animations et des émissions de téléréalité

#### Simulation dans SOLIDWORKS

SolidWorks Simulation permet aux concepteurs de tester rapidement et avec précision leurs conceptions et d'identifier les défauts. Les concepteurs recevront des données extrêmement précises, ce qui signifie qu'ils pourront apporter des modifications à la conception avant que les prototypes physiques ne soient produits. Les ingénieurs mécaniciens peuvent économiser beaucoup de temps, d'argent et d'efforts en détectant les problèmes de conception tôt dans le processus.



Figure35 : symbole de logiciel SolidWorks

### III.2.1 Vérification d'épaisseurs de la plaque :

#### III.2.1.1. La plaque sans renfort :

Étant donné que les valeurs maximales des pressions normales des parois et des réactions de frottement se produisent au fond du silo, les calculs ne sont effectués que pour la phase de la virole inférieure.

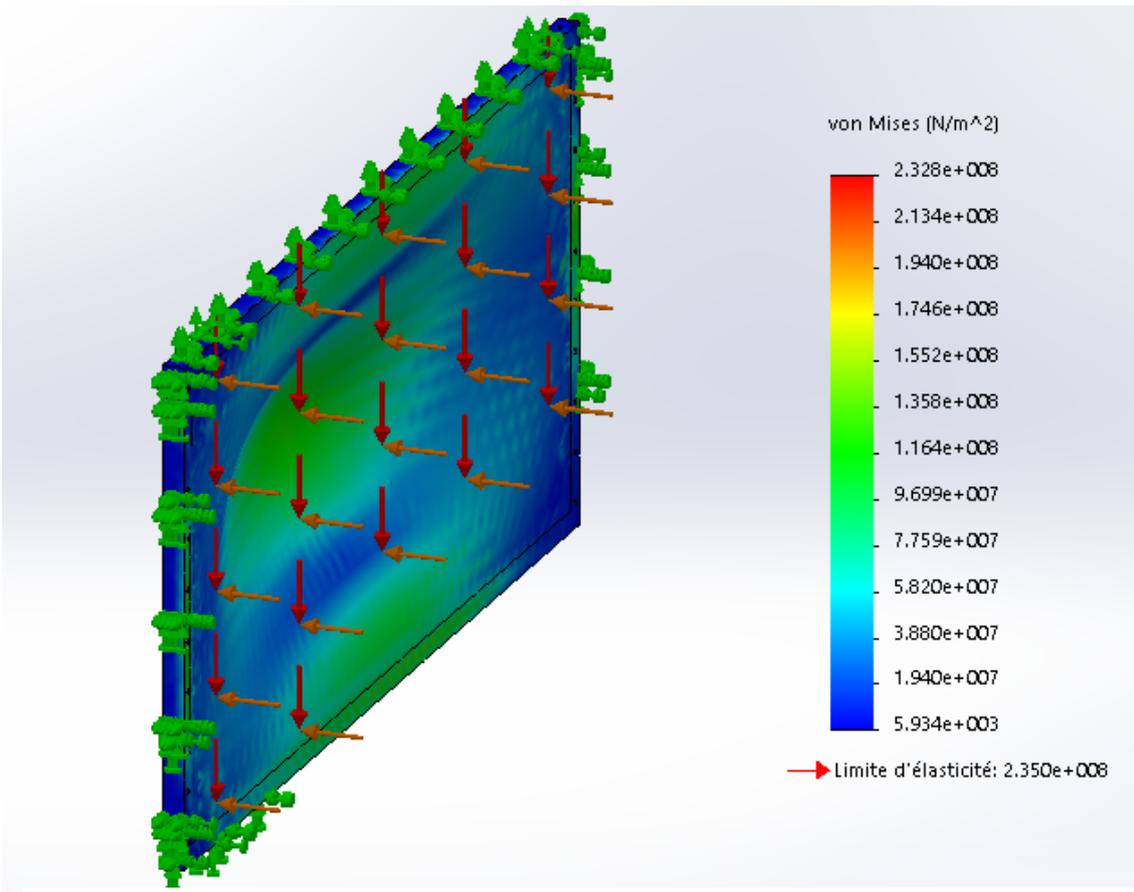
Étant donné que la virole est composée de quatre parties de même taille et dimensions seul 1/4 de la virole de la partie 1 est calculé.

❖ **Les charges considérées pour le calcul sont :**

<b>Altitude (m)</b>	<b>Epaisseur (mm)</b>	<b>La longueur (mm)</b>	<b>La largeur (mm)</b>	<b>Pression Normale (Horizontal) (KN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Pression verticale Actions de Frottement contre Paroi (KN/m<sup>2</sup>)</b>
<b>0-3</b>	<b>2.5</b>	<b>2000</b>	<b>1000</b>	<b>7.192</b>	<b>14.798</b>

**Propriétés de l'étude :**

Type d'analyse : Analyse statique  
 Type de maillage : Maillage volumique  
 Nombre total de nœuds : 39783  
 Nombre total d'élément : 19499



**Figure36** : résultat de simulation des contraintes de plaque sans renfort

**Résultat de l'étude :**

Le résultat de l'étude montre les zones où les contraintes sont aux maximums (les zones en verte) dans notre plaque, le max est à **232 MPa**.

Comme la contrainte admissible de notre matériau est de **235 MPa**, alors la plaque à une résistance mécanique acceptable.

### III.2.1.2. Avec renfort :

#### Propriétés de l'étude :

Type d'analyse : Analyse statique

Type de maillage : Maillage mixte

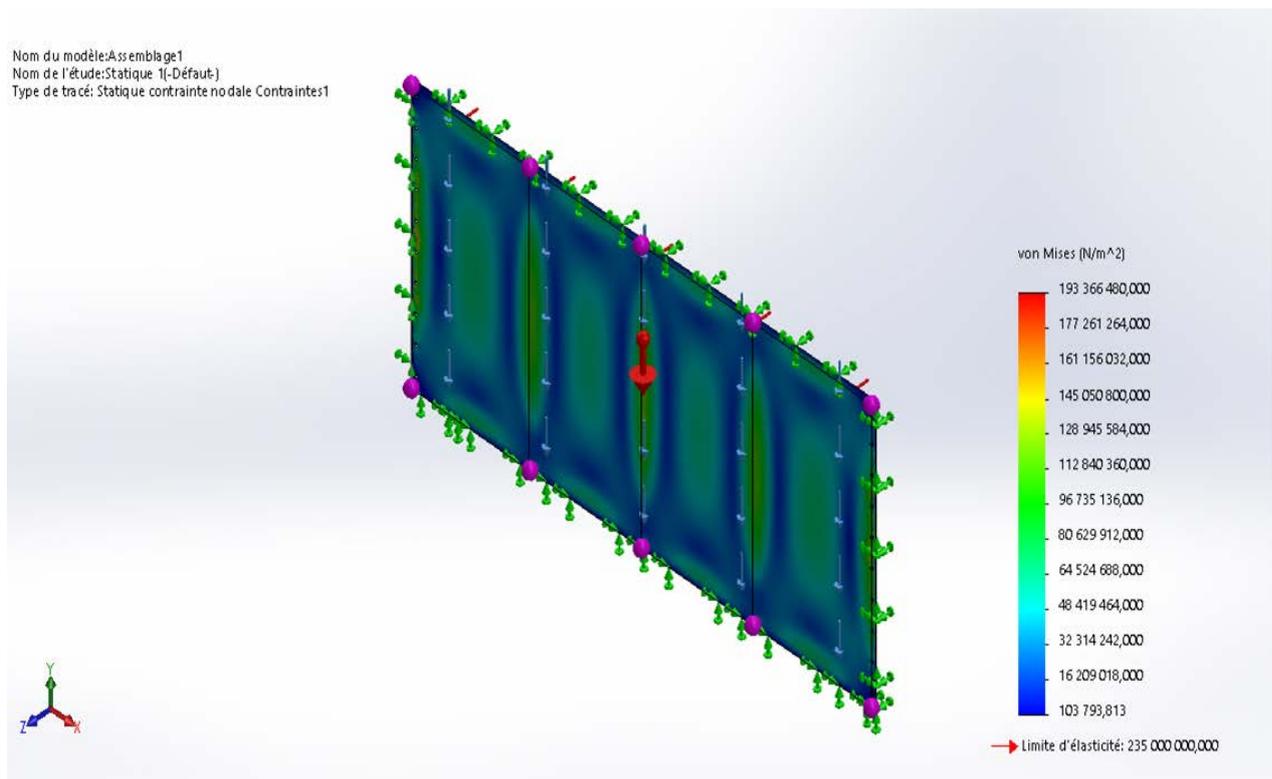
Nombre total de nœuds : 13120

Nombre total d'élément : 6481

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Modèle entier	N	0,000146866	31 422,6	-14 976	34 808,9

#### Moments de réaction

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Modèle entier	N.m	-74,639	-269,924	-335,705	437,182



**Figure 37** : résultat de simulation des contraintes de plaque avec renfort

#### Résultat de l'étude :

Le résultat de simulation de plaque avec les renforts est montre la plaque résiste plus fort par rapport la plaque sans les renforts

### III.2.1.3. Simulation de la cornière :

#### Propriétés de l'étude :

Type d'analyse :	Analyse statique.		
Type de maillage :	Maillage volumique.		
Nombre total de nœuds :	70849		
Nombre total d'élément :	34637		
La pression appliquer	pression horizontale	7.192 KN/m <sup>2</sup>	

#### Forces de réaction

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Modèle entier	N	-588.029	47.7065	-0.0659547	589.961

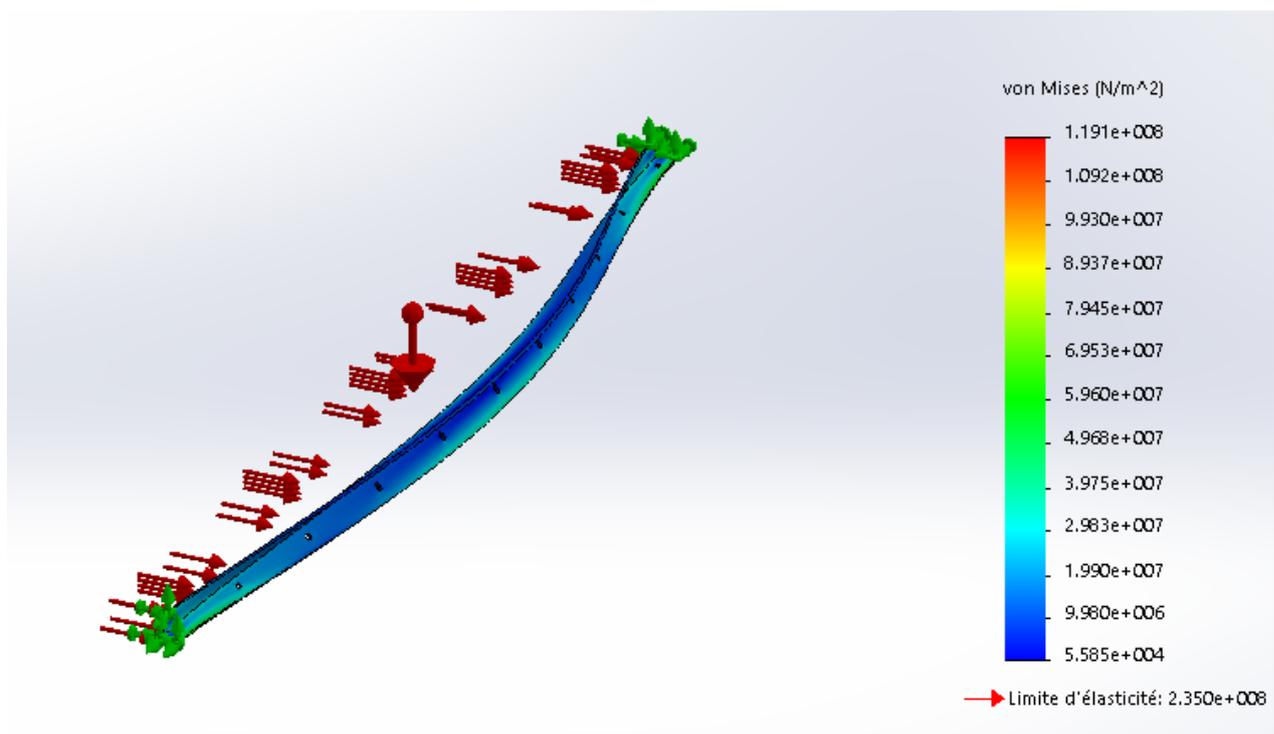


Figure 38 : résultat de simulation des contraintes de cornière

#### Résultat de l'étude :

L'étude montre les zones où les contraintes sont aux maximums (119 MPa) dans la cornière est inférieure la contrainte admissible de notre matériau (235 MPa) donc la résistance de la cornière est vérifiée la condition de résistance

### III.2.1.4. Simulation de la trémie :

### Propriétés de l'étude :

Type d'analyse : Analyse statique

Type de maillage : Maillage mixte

Nombre total de nœuds : 15044

Nombre total d'élément : 7305

### Forces de réaction

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Modèle entier	N	293,097	4 074,75	-89 262,4	89 355,8

### Moments de réaction

Ensemble de sélections	Unités	Somme X	Somme Y	Somme Z	Résultante
Modèle entier	N	45,3726	342,326	-23 034,7	23 037,3

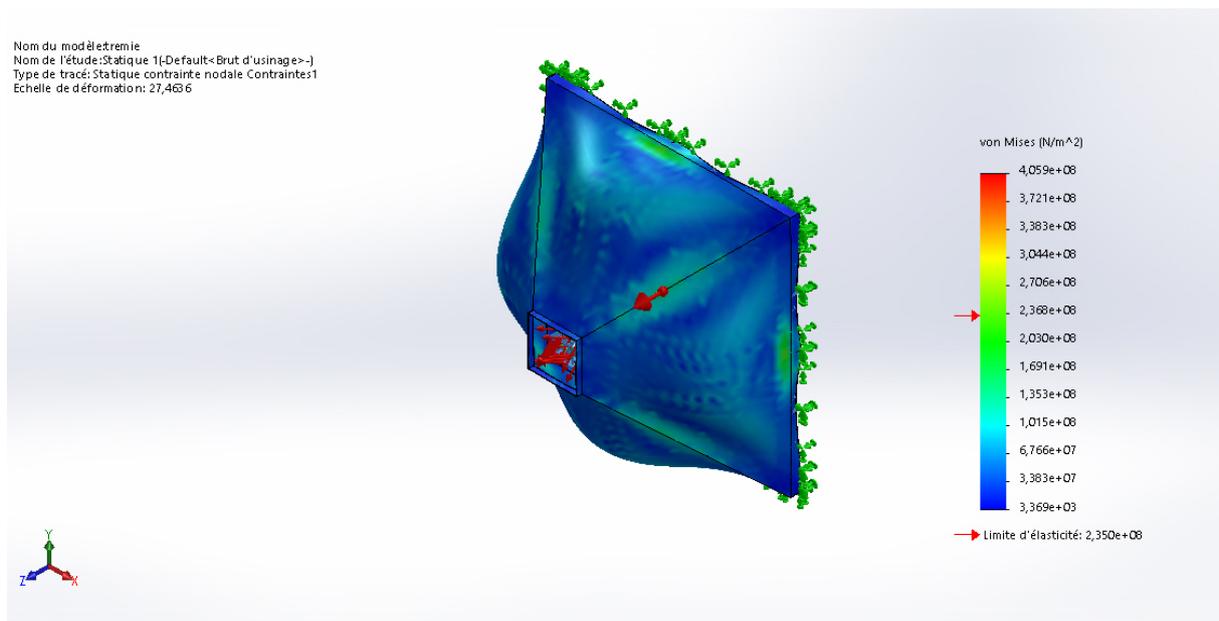


Figure 39 : résultat de simulation des contraintes de la trémie.

### Résultat :

Le résultat montre que nous utilisons le maximum de la résistance du matériau et les couleurs dans les faces de la trémie les plus proches de la flèche de limite élastique.

## **Conclusion générale :**

La mise en œuvre de projets industriels nous amène directement à des situations professionnelles à échelle réelle. L'objectif principal de ce travail est de réaliser un dossier de recherche complet sur les silos métalliques, commençant par une étude bibliographique des différents types et formes existantes, suivie d'une étude technique des composants, des normes et des spécifications spécifiques aboutissant à des calculs pour les silos métalliques. Vérification des pièces les plus sollicitées (dangereuses), c'est-à-dire la section en I du boîtier et du cône de refoulement, à la fin de l'inspection et du montage. Les résultats ont été satisfaisants, notamment en ce qui concerne le manque cruel de documentation, ainsi que l'acquisition de codes de calcul standards et spécifiques et leur utilisation, ce qui nous a coûté du temps supplémentaire.

Cependant, malgré ces difficultés et la charge de travail trépidante que le personnel de Chrome doit accomplir afin de répondre à la demande croissante, j'ai eu l'opportunité de travailler avec une personne très dynamique et capable qui m'a permis de travailler dans différentes diversités sur le terrain. Mes actions sur le terrain, en rapprochant le terrain. Différents styles, qualité et logistique

## Bibliographie :

- [1] **LATIFA LOUETRI** «contribution à la modélisation Numérique du comportement des silos à trémie lors du Remplissage et de la Vidange -évaluation numérique du chargement de la matière ensilée sur les parois du silo». Mémoire de magister université BADJI-Mokhtar-Annaba 2009.
- [2] **SABER Randa** « Conception et calcul d'un silo en béton armé ». Mémoire de mastère 2 génie civil université 08 Mai 1945 de Guelma année 2020.
- [3] **hellopro.fr** <https://www.hellopro.fr/silo-a-sel-en-bois-a-3-tremies-30-m3-2007734-1343462-produit.html> [en ligne].
- [4] **Slimane HACINI** « Eude du Comportement d'un Silo Métallique sous Sollicitations dynamiques ». Mémoire Magistère en Génie Civil université ELHadj Lakhdar Batna année 2016.
- [5] **ALAOUI TAHIRI (Rachid) et MAHRAZ (Issmail)** « Système de transports granulaires pour le génie civil : Etat de l'art et dernière avancée ». Étude Bibliographique Ecole Des mines de Douai année 2018.
- [6] **bonarplastics.com** <https://www.bonarplastics.com/Products/Hoppers/Viscous-Sanitary-Viscous-Flowmaster> [en ligne].
- [7] **KHIMDA NABIL** « étude et Vérification d'un Silo Métallique ». Mémoire de mastère 2 université Saad Dahlab 2014.
- [8] **reseauagricole.fr** <https://www.reseauagricole.fr/stockage-des-cereales-le-silo-a-grain/#Quest-ce-que-un-silo-a-grain> [en ligne].
- [9] **qualitysilage.com** <https://qualitysilage.com/fr/produire-un-ensilage-de-qualite/stockage/ensilage-en-bunker-en-tranchee-ou-en-meule/> [en ligne].
- [10] **franceenvironnement.com** <https://www.franceenvironnement.com/sous-rubrique/silo-a-boues> [en ligne].
- [11] **directindustry.fr** <https://www.directindustry.fr/prod/carmix-metalgalante/product-56891-381091.html> [en ligne].
- [12] **LEBAZ Kamel** « Etude du réducteur de vitesse d'un convoyeur à bande». Mémoire de Master 2 génie mécanique université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou année 2014.
- [13] **Soufiane Lamraoui** « Calcul et dimensionnement d'un silo ». Mémoire de Fin d'Études Juin Ecole Hassania des Travaux Publics (E.H.T.P) année 2013.
- [14] **Abderrahmane KHALFALLAH** «Caractérisation et Eude du débit et de la distribution de Vitesse D'Écoulement d'une Matière Granulaire Dans un Silo ». Mémoire de Magister de Génie des Procédés université Badji Mokhtar Annaba année 2014

[15] **AIWANOU Bertrand** « Modélisation numérique du comportement de la paroi des greniers en banco sous l'action des céréales ». Mémoire de fin de Formation Pour Diplôme D'Ingénieur de Conception en génie civil Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (EPAC) année 2017.

[16] **Normes européennes, Normes françaises, ENV 1991-4** « Action sur les structures, partie 4, silos et réservoirs » 1997

[17] **J Morraeu, J.A Cargaro** « Les Eurocodes conception des bâtiments et des ouvrages de génie civil ».

[18] **Mokhtari Riadh** « étude de flambement des portes, avec prise en charge des Défauts Géométrique » ». Mémoire de mastère 2 université Bejaïa année 2020.