

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

جامعة البليدة 1
UNIVERSITE DE BLIDA 1



FACULE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

MEMOIRE DE PROJET DE FIN D'ETUDES
POUR L'OBTENTION DU DIPLOME EN MASTER 2
OPTION : CONCEPTION MECANIQUE

ETUDE ET VERIFICATION D'UN SILO METALLIQUE

Présenté par: KHIMDA NABIL

Encadrant à l'université : M.EZZRAIMI

Encadrant à CR-METAL : LORIBI RABAH

2013-2014

Remerciement

En préambule à ce mémoire je remercie ALLAH qui m'a aidé et ma donné la patience et le courage durant ces longues années d'études.

Je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

Je remercie chaleureusement mes parents ainsi que chaque membre de ma famille, pour leur contribution, leur soutien et leur patience.

Ces remerciements vont tout d'abord au corps professoral et administratif de la Faculté de génie mécanique, pour la richesse et la qualité de leur enseignement et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

Je tiens à remercier sincèrement Monsieur, M.EZZRAIMI et LORIBI RABAH, qui, en tant que Directeurs de mémoire, se sont toujours montrés à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu nous consacrer et sans eux ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours encouragées au cours de la réalisation de ce mémoire.

Merci à tous et à toutes.

INTRODUCTION

Les stages pratiques sont des outils complémentaires mais incontournable pour augmenter les compétences des étudiants durant et après leur formation .Dans ce cadre, et à travers un stage au sein de la société de construction métalliques CR METAL, vision en premier lieu, le renforcement de nos connaissances théoriques dans le domaine de la construction.

Cette entreprise a reçu une commande pour la construction d'un silo pour le groupe SIM, ce qui a donné l'idée pour le traiter en projet de fin d'études. Un projet de cette taille nous donne l'occasion de se confronter à une situation professionnelle réelle et difficile en même temps.

Le silo commandé est avec grande capacité de stockage destiné à entreposer et expédier des produits en vrac (pulpe de betterave, blé, orge, maïs...etc.) dans l'industrie de l'agro-alimentaire.

Les silos de ce type sont équipés d'un matériel adéquat permettant une manutention rapide et un bon contrôle de stock, les principaux matériaux utilisés dans la construction sont le métal et le béton armé, les deux variantes peuvent présenter plus d'avantages l'une par rapport à l'autre selon les cas, le choix de l'un ou de l'autre tient compte aussi bien des considérations techniques que économiques.

Notre mission est de faire un dossier d'étude du silo commandé, à savoir, commençant de la recherche sur l'état de l'art, la conception, les efforts, le comportement du silo, sa résistance, etc....., et pour l'accomplir on a opté pour un plan de travail détaillé ci-après.

Dans l'industrie il existe différentes structures de silos qui varient en fonction du temps de stockage et des différentes matières à entreposer, alors on a commencé notre travaille avec une généralité sur les silos, où on a parlé des différents types et formes des silos et leur utilisation dans l'industrie en générale.

Ensuite on a consacré un chapitre à une étude technologique de silo, qui fait l'objet de notre projet, où on a donné les dimensions de notre appareil et une description détaillé des éléments qui constituent notre silo et la technologie utilisée dans la conception.

Le chapitre qui suit l'étude technologique est dédié au calcul de comportement mécanique de silo en se conformant aux normes et les codes. Ce chapitre se compose de deux parties, dans la première partie on s'est intéressé au calcul de poids propre de silo et les différentes pressions qui vont être exercées sur les parois lors de la vidange et le remplissage de la matière ensilé, et dans la seconde on a appliqué les résultats obtenus sur les parties de silo pour vérifier leur résistance et leur assemblage.

Le quatrième chapitre concerne la fabrication de silo, on a vu les différentes étapes pour la fabrication de silo (découpage, cintrage, assemblage ...etc.), avec une description détaillée de chaque étape.

Quelle que soit le procédé de fabrication qui utilise le soudage, il est important de procéder à un contrôle de soudage, c'est pour quoi on a destiné le dernier chapitre à expliquer les techniques de contrôle qui ont été utilisés (contrôle visuel, le ressuage, la radiographie).

Tout travail doit se terminer par une conclusion où on expose les objectifs atteints, les problèmes rencontrés et les recommandations proposées.

SOMMAIRE

Introduction	1
I. Généralités	3
I.1 Les silos.....	4
I.2 Les différentes formes de silo	4
I.2.1 Silos ronds à fonds coniques	4
I.2.2 Silos ronds à fonds plats	5
I.2.3 Silos carrés à fonds coniques.....	5
I.3 Les différents types de silos.....	6
I.3.1 Silo agricole	6
I.3.1.1 Silo à grain	7
I.3.1.2 Silo à maïs	7
I.3.2 Silo à boues	8
I.3.2.1 Différentes sortes de silos à boues	9
I.3.3 Silo à pellets	9
I.3.3.1 Les différents types de silos à pellets	9
I.3.3.2 Installation d'un silo à pellets	10
I.3.4 Silos-tours faible d'oxygène	10
I.3.5 Silos en bois debout béton	10
I.3.6 Les silos à fond vibrant	12
I.4 Les silos métalliques	13
I.4.1 Les silos cylindriques en tôles nervurées ou ondulées	13
I.4.2 Les silos cylindriques en tôles lisse	13
I.5 La ventilation des silos	13
I.5.1 Processus de ventilation forcée	13
I.5.2 Le rôle de la ventilation	15
I.5.3 La ventilation des grains en climat tempéré chaud	15
I.6 Accessoires pour silos	15
II. Etude technologique	16
II.1 Dispositif pour la construction des silos	16
II.2 Description générale de silo à étudier	18
II.2.1 Dimensions générales	19

II.3 Matériaux utilisés	20
II.4 Les différentes parties de silo	21
II.4.1 La virole et le cône.....	21
II.4.1.1 L'assemblage de la virole avec le cône	23
II.4.2 La trémie	24
II.4.3 Le toit	24
III. Calcul et vérification	27
III.1 Caractéristique de Matériaux utilisés.....	28
III.2 Poids propre de silo	29
III.3 Calcul des Efforts exercées dans le silo.....	31
III.3.1 Calcul de la pression verticale	32
III.3.2 Calcul de la pression normale à la paroi	33
III.3.3 Action de frottement contre la paroi	33
III.3.4 Applications numériques	33
III.4 Vérification des différents éléments de silo	35
III.4.1 Vérification des épaisseurs de la tôle	35
III.4.2 Vérification des liaisons entre portions de virole	38
III.4.3 Vérification des liaisons entre portion de cône.....	40
III.4.4 Vérification de la jonction entre cône et trémie.....	42
III.5 Conclusion.....	43
IV. Les étapes de fabrications	44
IV.1 Le découpage des tôles	44
IV.1.1 Principe de l'oxycoupage	45
IV.1.2 Avantages et inconvénients de l'oxycoupage	45
IV.1.3 Conditions à satisfaire pour rendre l'oxycoupage possible.....	46
IV.1.4 Préparation des tôles avant l'oxycoupage	46
IV.1.5 Les dimensions et les formes des tôles après coupage	46
IV.2 Le cintrage ou roulage des tôles	50
IV.2.1 Avantages des rouleuses à quatre rouleaux	50
IV.2.2 Cintrage de la virole	50
IV.2.3 Le cône	51
IV.3 Pliages de la tôle de trémie	52

IV.3.1 La cotation de pliage	52
IV.4 L'assemblage par soudage	54
IV.4.1 Le soudage manuel à l'arc	54
IV.4.1.1 Le matériel de soudure manuel à l'arc	55
IV.4.2 Soudure semi-automatique	55
IV.4.2.1 Le matériel de soudure semi-automatique	56
IV.4.2.2 Avantage et inconvénients	56
V. Contrôle de soudage	57
V.1 Introduction.....	57
V.2 Etapes de contrôle du soudage	57
V.3 Les techniques de contrôle	59
V.3.1 Examen visuel	59
V.3.1.1 Les instruments couramment utilisés.....	59
V.3.1.2 Avantage et inconvénients	60
V.3.2 Le ressuage	60
V.3.2.1 Principe	60
V.3.2.2 Mise en œuvre	61
V.3.2.3 Les avantages et les inconvénients	63
V.3.3 Les ultrasons	63
V.3.3.1 Principe	63
V.3.3.2 Domaine d'application	64
V.3.3.3 Mise en œuvre	64
V.3.3.4 Les avantages et les inconvénients	65
Conclusion générale	67

Liste des figures

Chapitre I : Généralité

Figure I.1 les silos	3
Figure I.2 Silo rond à fond conique	4
Figure I.3 Silos rond à fonds plats	5
Figure I.4 Silos carré à fons coniques	5
Figure I.5 Silos agricole	6
Figure I.6 Silos à boues	8
Figure I.7 Silos-tours faible d'oxygène	10
Figure I.8 Silos en bois debout béton	11
Figure I.9 Cône avec fond vibrant	12
Figure I.10 Silo avec quelques accessoires	15

Chapitre II : Etude technologique

Figure II.1 Silo rend à fond conique	18
Figure II.2 une portion d'une virole avec une portion de cône	22
Figure II.3 l'assemblage de la virole avec le cône	23
Figure II.4 La trémie	24
Figure II.5 Le toit	25
Figure II.6 Tôle larmée	25
Figure II.7 Trappe de visite	26

Chapitre III : Calcule et vérification

Figure III.1 boulon de classe 8.8	28
Figure III.2 Les parties de la virole	29
Figure III.3 Les efforts exercés dans le silo	31
Figure III.4 résultat de l'étude « solidworks»	36

Figure III.5 résultat de l'étude « solidworks».....	37
Figure III.6 La Liaison entre deux portions de virole.....	38
Figure III.7 liaison entre portion de cône.....	40
Figure III.8 La jonction entre cône et trémie.....	42

Chapitre IV : Les étapes de fabrications

Figure IV.1 L'opération de l'oxycoupage CR-METAL.....	44
Figure IV.2 Le principe de l'oxycoupage.....	45
Figure IV.3 Forme et dimension de la tôle de cône apprêt découpage.....	47
Figure IV.4 gousset perses.....	48
Figure IV.5 gousset non perses.....	48
Figure IV.6 Dimension de la partie latérale de toit.....	49
Figure IV.7 Dimension de la partie centrale de toit.....	49
Figure IV.8 Les dimensions de la tôle de trémie apprêt coupage.....	49
Figure IV.9 le cintrage de la virole.....	50
Figure IV.10 le cintrage du cône.....	51
Figure IV.11 Pliage sur presse plieuse.....	52
Figure IV.12 Pliage sur plieuse universelle ou a sommier.....	52
Figure IV.13 La cotation d'une pièce pliée.....	52
Figure IV.14 soudage manuel à l'arc.....	54
Figure IV.15 matériels de soudure manuelle à l'arc.....	55

Chapitre V : Contrôle de soudage

Figure V.1 Mesureur d'angle Calibre d'épaisseur.....	59
Figure V.2 Jauge de mesure.....	59
Figure V.3 Calibre selon norme EN 970.....	59
Figure V.4 Nettoyage préalable.....	59
Figure V.5 Application du pénétrant et imprégnation.....	59
Figure V.6 Elimination du pénétrant en excès.....	61
Figure V.7 Application du révélateur.....	62

Figure V.8 Examen.....	62
Figure V.9 Nettoyage finale.....	62

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralité

Tableau I.1 Accessoires pour silo.....	15
--	----

Chapitre II : Etude technologique

Tableau II.1 Les élément pour une portion d'une virole avec une portion de cône.....	22
--	----

Chapitre III : Calcule et vérification

Tableau III.1 valeur retenues sur les viroles.....	34
Tableau III.2 valeur retenues pour le cône.....	34
Tableau III.3 les charge considéré pour le calcule des viroles.....	35
Tableau III.4 propriété de l'étude.....	36
Tableau III.5 les charge considéré pour le calcule de cône.....	37
Tableau III.6 propriété de l'étude.....	37

I. Généralité :

I.1 Les silos :

Un silo est un réservoir de stockage destiné à entreposer divers produits en vrac (pulvérulents, en granulés, en copeaux...) utilisés dans diverses industries (cimenteries, matières plastiques, engrais, matériaux divers...) et dans le domaine agricole. Il se différencie d'une trémie par le fait qu'il est hermétiquement fermé.

Il s'agit généralement de réservoirs verticaux, souvent cylindriques, construits en divers matériaux (bois, acier, béton le plus souvent...). Il peut aussi s'agir d'installations horizontales : silo-couloir, silo tranchées, utilisés notamment en agriculture pour préparer et conserver des ensilages.

Le remplissage des silos se fait par le haut et recourt à diverses techniques : élévateur à godets ou à vis sans fin, air pulsé...

Un silo isolé comporte un corps vertical à section constante, mais fréquemment plusieurs cellules à section droite polygonale ou circulaire sont accolées : l'ensemble constitue alors une batterie de silos. [1]



Figure I.1 Les Silos

I.2 Les différentes formes des silos : [2]

Il existe plusieurs formes et types de silos qui varient selon l'utilisation, en voici les plus fréquents :

I.2.1 Silos ronds à fonds coniques :

Les silos ronds à fonds coniques 45 à 60° sont utilisés généralement pour le stockage des produits comme les grains, copeaux de bois, café et certains tourteaux (soja)... etc.

Ce genre de silos nous offrent l'avantage d'une vidange complète pour les produits à écoulement difficile grâce à leurs cônes tout en réduisant le coût de la maintenance du produit, ils possèdent aussi une capacité de stockage allant jusqu'à 1300 tonnes.

La forme des silos à fond conique lui permet de faire plusieurs fonctions, on cite parmi elles :

- Stockage des grains humides avant séchoirs
- Stockage avant machines
- Expédition
- Fabrication d'aliment
- Minoteries
- Stockage tampon



Figure I.2 Silo rond à fond conique

I.2.2 Silos ronds à fonds plats :

Les silos ronds à fonds plats sont destinés au stockage de diverses céréales ou produits granuleux, et différents produits, dont la fluidité lors de la vidange est acceptable, et dont l'humidité n'est pas trop importante.

Ces cellules ont l'avantage d'avoir de nombreuses configurations possibles et d'être rapidement mis en place et aussi ont une longue durée de vie, économique, et leur utilisation est polyvalente.



Figure I.3 Silos rond à fonds plats

I.2.3 Silos carrés à fonds coniques :

Les silos carrés à fonds coniques 55° assurent le bon écoulement des produits, réalisent des vidanges complète et permettent de stocker de nombreux types de produits tel que les céréales, les grains, copeaux de bois, les granulés, le café et le cacao. Ils sont idéals pour les produits à écoulement difficile.

Les silos carrés à fonds coniques ont plus de capacité stockée par rapport à l'occupation au sol donc, moins encombrant et aussi une diverse utilisation. Leur assemblage est réalisé par boulon avec hauteurs de cône et dimensions des sorties variables.

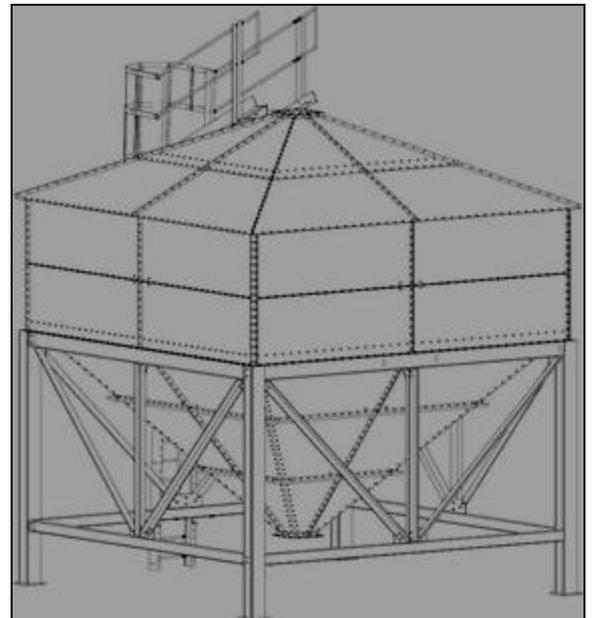


Figure I.4 Silos carré à fonds coniques

I.3 Les différents types des silos :

I.3.1 Les silos agricoles : [3]

Avant de connaître la (ou les) particularité(s) du silo agricole, il est nécessaire de savoir qu'il sert à stocker différentes matières, tels que les granulés, les copeaux, et bien d'autres encore.

Rectangulaire, circulaire, carré, le silo agricole peut avoir diverses formes. En fonction de son utilisation, il peut aussi avoir une base conique, cylindrique ou plate, avec ou sans système d'extraction.

Le silo agricole est fabriqué en béton, acier inoxydable ou aluminium, de façon à préserver la qualité des produits stockés à l'intérieur, surtout lors des différences de températures, et de climat (humide, sec). S'agissant de lieu de stockage, il peut aussi être installé seul, en couloirs ou en tranchées, c'est-à-dire que plusieurs silos sont mis côte à côte.

Le remplissage s'effectue toujours par le haut. La distribution des produits, quant à elle, se fait par le bas. Parfois monté sur pilotis, le silo agricole peut remplir des camions complets ou déverser son contenu directement dans les machines de fabrication.



Figure I.5 Silos agricoles

I.3.1.1 Les silos à grains : [3]

Les silos à grain sont des réservoirs utilisés pour le stockage du grain en vrac. Il y a trois grands types de structures proposés par les fabricants des silos : le silo tour, le silo bunker et le silo sac.

Les silos tours sont des constructions verticales cylindriques de diamètre compris entre quelques mètres et une trentaine de mètres pouvant atteindre plus de 80 mètres de hauteur. Ils sont construits généralement en ciment ou en béton armé. Le déchargement de ces silos-tours se fait généralement directement dans des wagons à grains, des camions ou des convoyeurs.

Les silos bunkers sont des tranchées généralement constituées de murs en ciment et revêtues d'un matériau plastique assurant leur étanchéité. Les silos-bunkers sont chargés et déchargés par des tracteurs ou par des machines à moteur. D'un coût moins cher que les silos-tours et qui sont particulièrement adaptés aux stockages volumineux de grains.

Les silos sacs sont des structures en plastique de capacité et de longueur variables. Ils sont emballés à l'aide d'une machine faite pour cet usage, et scellés aux deux extrémités. Ils sont déchargés à l'aide d'un tracteur. Les silos-sacs sont des poches de stockage temporaires utilisées de manière transitoire lors d'un surplus de récolte et quand tous les autres réservoirs sont pleins par exemple. Ces capacités de stockage ont bien évidemment un coût d'achat très faible et ne nécessitent pas de coût d'investissement comme les silos en ciment ou en béton.
[3]

I.3.1.2 Silo à maïs :

Cela fait plus d'un siècle que l'on a trouvé le silo pour conserver la céréale. Cela évite que le maïs subisse les assauts climatiques et ceux des rongeurs. Le maïs est ainsi stocké en respectant ses besoins, car il nécessite des conditions de séchage optimales pour être conforme aux normes alimentaires. Il y a une économie d'emballage puisque le maïs y est stocké en vrac.

➤ Le silo à maïs bunker :

Il s'agit d'un silo à maïs creusé dans la terre avec des parois et un sol recouverts de béton. Une couche de matière plastique y est superposée pour plus d'étanchéité. Le remplissage se

fait par tracteur. Ce silo à maïs offre une étanchéité très efficace, d'autant plus qu'il est idéal pour les grandes quantités et qu'il est moins coûteux qu'un silo en tour.

➤ **Le silo à maïs tour :**

Mais le silo à tour peut être envisagé en tant que silo à maïs : il s'agit d'une tour de forme cylindrique qui peut atteindre jusqu'à 80 mètres de hauteur, construite en béton armé ou en ciment. Cette solution de silo à maïs est idéale pour les grosses structures qui font décharger le maïs par wagonnet.

I.3.2 Silo à boues : [3]

De par des systèmes de drainage appropriés, les eaux usées sont acheminées vers des lieux de collecte pour subir un certain nombre de traitements. Il en découle des résidus qu'on désigne par le terme de "boues". Il importe de recueillir régulièrement et d'emmagasiner convenablement cette matière. Pour cela, on a recours à des enceintes de stockage dénommées silos à boues.



Figure I.6 Silos à boues

I.3.2.1 Différentes sortes des silos à boues :

Selon le besoin et les exigences du terrain, on a recours à plusieurs types de silos à boues. Les silos à fond plat existent sous différentes variantes. Alors que certains servent à recueillir la boue humide et sont munis soit d'un cadre d'extraction rotatif soit d'un système d'extraction alternatif, d'autres sont équipés de systèmes d'extraction dits "planétaires" et sont destinés aux cendres chaudes et sont munis de dispositifs permettant de remplir directement des camions.

En forme de cône, une mitre équipe le silo à boues parallélépipédique afin de faciliter l'écoulement de la boue. Généralement placé sur du béton ou de la matière métallique, le silo à boues dit "cloche" se vide grâce à son fond racleur ou à son système multi-vis. Avec le silo jupe, tout appareillage en dessous de la sortie du cône est protégé

I.3.3 Les silo à pellets : [4]

Le bois est le plus vieux combustible du monde. Les hommes des cavernes l'utilisaient déjà pour se chauffer et pour faire cuire leurs aliments. Aujourd'hui, le chauffage à granulés de bois ou à pellets est en plein renouveau pour des raisons écologiques, mais également économiques. Le bois est en effet une énergie renouvelable et écologique utilisant pour sa croissance beaucoup plus de gaz carbonique que sa combustion n'en génère.

I.3.3.1 Les différents types de silos à pellets :

Pour éviter les corvées de bois, les constructeurs de chaudières à granulés ont mis au point de nouveaux systèmes de chauffage où le bois est conditionné et stocké sous forme de granulés dans des réservoirs de forme cylindrique ou cubique appelés silos à pellets.

Il existe plusieurs types de silos à pellets correspondant à des matériaux et à des types d'introduction différents.

Un silo à pellets est généralement constitué d'une enveloppe métallique (inox, aluminium ou acier) de quelques millimètres d'épaisseur, d'une enveloppe en matériau en résine composite ou bien d'une enveloppe en plastique souple.

I.3.3.2 Installation des silos à pellets :

Les silos à pellets sont généralement placés en amont des chaudières à combustion et les granulés de bois sont introduits dans la chambre de combustion soit par mouvement mécanique (en général une vis sans fin ou vis d'Archimède permet d'acheminer les granulés du silo à pellets jusqu'à l'entrée de la chambre de combustion) soit par aspiration (un système de pompe aspirante permet de véhiculer les granulés du silo vers la chambre de combustion).

I.3.4 Silos-tours faible d'oxygène : [4]

Silos faible teneur en oxygène sont conçus pour garder le contenu dans une atmosphère pauvre en oxygène, en tout temps, pour garder le contenu fermentées dans un état de haute qualité, et pour éviter la moisissure et la pourriture, comme cela peut arriver dans les couches supérieures d'un silo de portée ou bunker. Silos faible teneur en oxygène ne sont pas ouverts directement dans l'atmosphère pendant le chargement de fourrage initial, et même la goulotte de déchargement est scellée contre les infiltrations d'air.

Il serait coûteux à concevoir une grande structure telle qu'est insensible aux changements de pression atmosphérique au cours du temps. Au lieu de cela, la structure du silo est ouvert à l'atmosphère que de l'air extérieur est séparé de l'air interne par de grands sacs hermétiquement clos pour les ouvertures d'aération du silo. Dans la chaleur de la journée lorsque le silo est chauffé par le soleil, le gaz emprisonné à l'intérieur se dilate de silo et les sacs "expirer" et l'effondrement. La nuit, le silo se refroidit, l'air à l'intérieur des contrats et les sacs "respirer" et d'élargir à nouveau.



Figure I.7 Silos-tours faible d'oxygène

I.3.5 Silos en bois debout sur béton : [4]

Silos en bois debout béton sont construits à partir des petits blocs en béton préfabriqué avec des rainures le long de chaque bord nervurées qui les verrouillent ensemble dans une enveloppe à haute résistance. Une grande partie de la force de béton provient de sa haute incompressibilité, de sorte que le silo est maintenu par des arceaux en acier entourant la tour et la compression des barres dans un anneau serré. Les piles verticales sont maintenues ensemble par engrènement des extrémités des douves par une courte distance sur le pourtour de chaque couche.

Ils ont la possibilité d'avoir leur hauteur augmentée selon les besoins de la ferme et du pouvoir d'achat de l'agriculteur, ou à être complètement démonté et réinstallé ailleurs s'ils ne sont plus nécessaires.



Figure I.8 Silos en bois debout béton

I.3.6 Les silos à fond vibrant : [5]

La plus part des problèmes d'écoulement de produits difficiles s'établissent lors de la descente des produits à la base des silos. Et pour remédier en supprimant la section où se produit le tassage et en remplaçant par un fond vibrant.

Le fond vibrant est construit à base d'un fond embouti équipé d'un cône de sortie, un déflecteur conique interne est supporté à l'intérieur du fond embouti par traverses en profilés soudés sur chant pour éviter la rétention de produit.

Un moteur vibrant –deux dans certain cas est fixé à l'extérieur du fond embouti. L'amplitude des vibrations est réglable par positionnement des balourds à chaque extrémité de l'arbre moteur.

Cet ensemble est suspendu à la base du silo au moyen de biellettes de suspensions munis d'actuation élastique à chaque extrémité pour éviter la transmission des vibrations aux parois du silo. Le nombre de biellettes sont reliées au silo par l'intermédiaire d'un cornier support soudée ou boulonnée sur le silo.



Figure I.9 Cône avec fond vibrant

I.4 Les silos métalliques : [6]

Selon la forme géométrique des cellules et la nature des parois métallique, on distingue deux principaux types de silos :

I.4.1 Les silos cylindriques en tôles nervurées ou ondulées :

Ils sont constitués de tôles généralement galvanisées a nervurassions, et a ondes horizontales. Ces tôles sont cintrées et percées en usine, elles sont assemblées entre elles et fixées aux montants verticaux par boulonnage. Ces derniers sont en tôles galvanisées « en U», ils assurent la rigidité des tôles dans le sens vertical.

Les montants verticaux équilibrent l'effort de frottement exercé par la matière ensilée sur les parois, et supportent le poids propre du silos.

La hauteur du silo peut atteindre 16 à 17 m avec diamètres compris entre 2.60 et 15m.

I.4.2 Les silos cylindriques en tôles lisse :

La cellule cylindrique est construite avec des viroles en tôles galvanisées, assemblées par boulonnage avec interposition d'un cordon d'étanchéité, la tôle a une épaisseur qui varie de 1 à 2.5 mm, faciles à manipuler , lors du montage , du fait de leur faible poids la construction ,étant lisse elle n'entraîne aucune résistance à l'écoulement du produit lors de la vidange . L'utilisation de l'acier galvanisé, confère à l'installation une bonne protection contre la corrosion.

I.5 La ventilation des silos : [6]

La ventilation forcée constitue l'avantage essentiel du stockage des grains dans des cellules métalliques.

I.5.1 Processus de ventilation forcée :

La ventilation forcée consiste à envoyer un volume d'air à travers le grain, c'est-à-dire à remplacer une atmosphère interne du sil généralement humide et chaude par une autre plus

fraiche et plus sèche, en tenant compte dans les calculs des caractéristique de l'atmosphère insufflée.

I.5.2 Le rôle de la ventilation :

Le rôle essentiel de la ventilation est le refroidissement du grain et son maintien à une température suffisamment basse pour assurer une bonne conservation. Celle-ci à d'autres usages plus ou moins importants tels :

- Le maintien d'une température uniforme dans la masse grain
- Homogénéisation de l'humidité du grain
- Elimination de mauvaises odeurs ; etc.

I.5.3 La ventilation des grains en climat tempéré chaud :

En climat tempéré chaud, un certain nombre de facteurs justifient le grand intérêt de cette technique :

- Les grains sont récoltés à des températures élevées (30 à 40°C) et à des humidités basses (8 à 12% d'eau). Par suite, un refroidissement même limité sera très performant par rapport aux températures initiales du grain.
- Le stockage des grandes quantités de grain dans des cellules verticales ne permet pas un refroidissement uniforme par voie naturelle, du fait de la grande inertie thermique du grain sec (faible conductivité thermique) ;
- Les insectes, en particulier ceux de la famille des charançons, sont moins résistants au froid.

I.6 Accessoires pour les silos : [7]

Le silo est équipé de différents accessoires et cela vari d'un silo à un autre selon l'utilisation et le type de silo, en voici quelques exemples :

- Portillon sur le toit pour le contrôle le produit ensilées.
- Porte de visite placée sur la virole qui permet, quand le silo est vide l'entrée du personnel préposé à l'entretien.
- Un filet circulaire anti-moineau à installer entre le toit et la dernière virole.

- Indicateur de niveau maximum et minimum.
- échelle verticale avec protection et encrage.
- échelle sur le toit du silo avec protection latérale.
- Passerelles aériennes pour soutenir les transporteurs de charge et pour l'inspection.
- Portique de soutien passerelle.
- Extracteur d'air motorisé
- Supports pour câbles contrôle température.
- Installations thermométriques.
- Système de ventilation.
- Extracteur rotatifs pour la vidange du résidu dans le cône.

➤ **Exemple d'un silo avec quelques accessoires :**

1	PASSERELLE D'INSPECTION
2	PORTIQUE DE SOUTIEN
3	PORTILLON SUR LE TOIT
4	INDICATEUR DE NIVEAU
5	PETITE ECHELLE
6	PORTE DE VISITE
7	CABLE SONDE DE TEMPERATURE

Tableau I.1 Accessoires pour silo

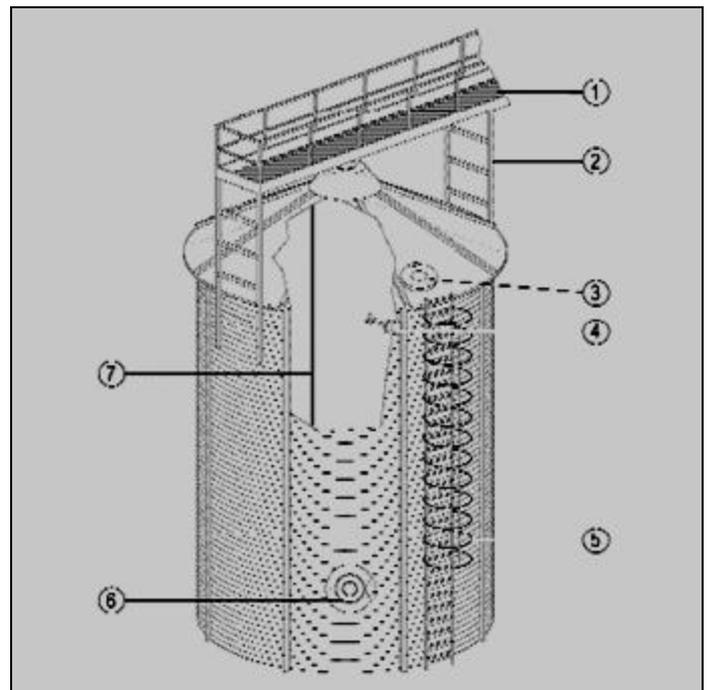


Figure I.10 Silo avec quelques accessoires

II. Etude technologique :

Les silos doivent être construits suivant les règles de l'art. Dans les calculs, il faut tenir compte du poids propre, de la pression statique de la matière ensilée, des efforts dynamiques pendant le remplissage ou le vidage, des efforts asymétriques ou localisés dus à une répartition irrégulière de la matière, des influences atmosphériques telles que le vent, la température, la neige, le gel ainsi que de toute autre sollicitation pouvant intervenir dans les cas particuliers.

II.1 Dispositif pour la construction des silos :

Voici quelques dispositifs qu'on doit prendre en compte dans la conception et la construction des silos : [8]

- Les silos, les trémies et les ouvertures de vidage doivent être conçus, disposés et dimensionnés de façon à assurer un écoulement régulier de la matière.
- Certaines parties des parois ou de la couverture des silos, dans lesquelles peuvent se former des mélanges explosifs de gaz ou de poussières, doivent être en construction légère. Elles doivent être conçues de telle manière qu'en cas d'explosion, l'onde de choc puisse se propager librement à l'extérieur et de limiter le danger pendant la chute de ces éléments.
- Les appareils électriques mobiles et portatifs doivent, s'ils sont utilisés à l'intérieur des silos, être raccordés aux réseaux spécialement prévus à cet effet. De même que les autres matériels installés à demeure, ces raccordements doivent être effectués selon des normes.
- Les postes de service surélevés doivent être munis d'escaliers et de passerelles fixes. Les échelles ne peuvent être utilisées qu'aux parties d'installation peu fréquentées et d'importance secondaire. Les escaliers et les passerelles doivent être munis de garde-corps du côté du vide.

- Tous les accès et postes de travail doivent être suffisamment éclairés.
- Les dispositifs d'alimentation des silos dans lesquels des personnes peuvent être appelées à y accéder doivent être verrouillés en position d'arrêt.
- Les ouvertures de remplissage doivent être recouvertes d'une grille solide si des personnes sont appelées à circuler à leurs abords. Le vide entre les barreaux de la grille sera suffisamment étroit pour que personne ne puisse tomber au travers.
- Dans les silos où la matière est reprise par une ouverture latérale, un avant-toit intérieur doit empêcher cette matière de se déverser sur la personne qui ouvre l'accès.
- Les silos restant en service pendant les périodes froides et remplis de matériaux pouvant s'agglutiner sous l'effet du gel doivent être pourvus d'un dispositif de chauffage. On tiendra compte dans le choix de celui-ci de la nature de la matière ensilée (risque d'incendie et d'explosion) et des risques d'intoxication possibles (monoxyde de carbone).
- Dans les silos où des mesures (températures, humidité) ou des prélèvements de matière doivent être faits, on prévoira les dispositifs nécessaires pour assurer la sécurité du personnel (instruments de mesure avec lecture à distance, ouvertures de prélèvement, etc.).
- Dans les silos où le blocage des matériaux est à craindre (formation de cheminées ou de voûtes), des dispositions doivent être prises pour permettre un déblocage sans danger: ouvertures de déblocage, vibrateurs, jets d'air comprimé ou d'eau, coussin d'air comprimé, etc.

II.2 Description générale de silo à étudier :

Le silo de notre étude est un silo métallique qui va être entreposé dans un bâtiment de charpente métallique, qui est destiné à stocker et expédier plusieurs produits comme la luzerne, tourteaux de colza, tourteaux de tourne sol, tourteaux de soja, pulpe de betterave, blé, orge, maïs.....etc.

La forme de notre silo est ronde à fond conique assemblée essentiellement avec des boulons par ailleurs il est démontable, et se constitue de quatre grandes parties, la virole, la trémie, le cône et le toit. (Figure II.1)

La partie virole se compose essentiellement de cinq tronçons de différents épaisseurs, et assemblé les un sur les autre par boulons. (Figure II.1)

La capacité maximale de silo est de 300 m^3 avec une hauteur totale (avec trémie) de 19720 mm, un diamètre extérieur de 5500 mm et un poids total de 13 109 Kg.

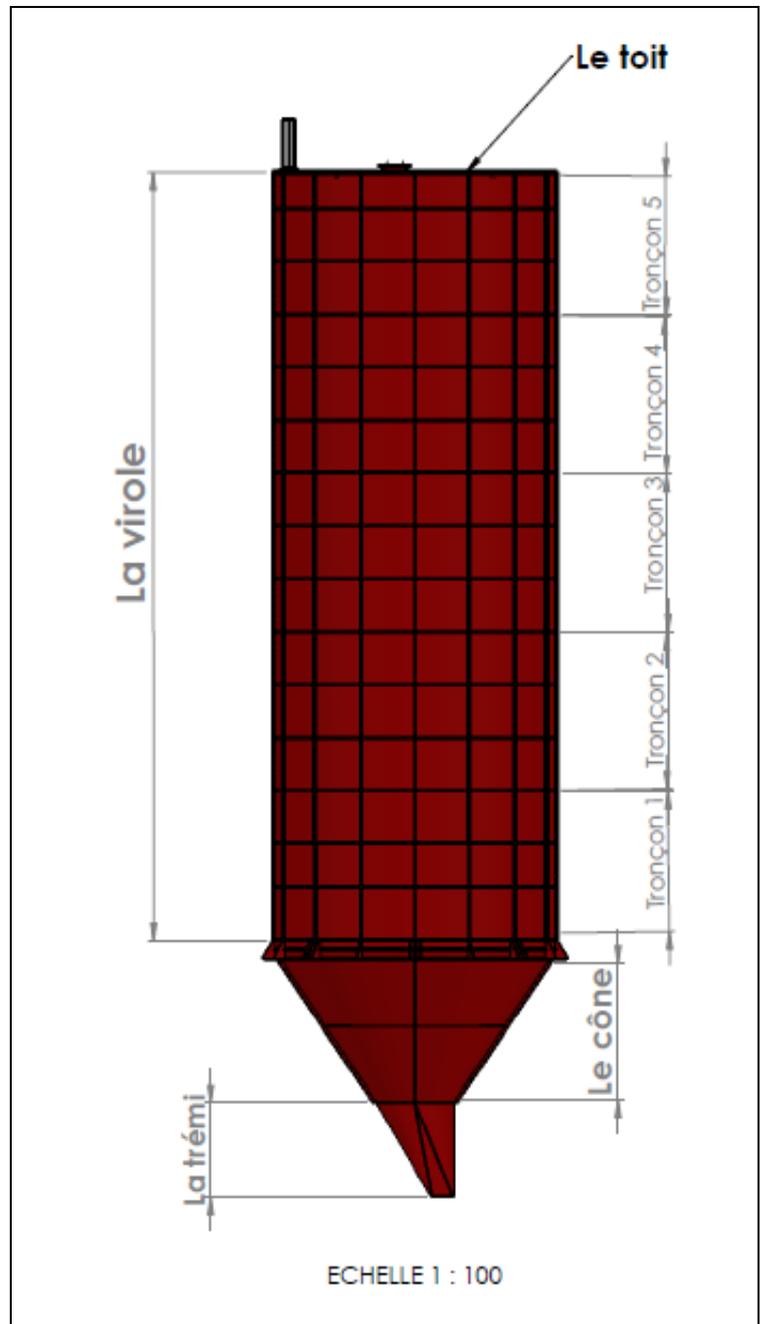


Figure II.1 Silo rend à fond conique

II.2.1 Dimensions générales de silo :

Les dimensions générales de silo sont :

Diamètre extérieur	5500 mm
Hauteur total	19720 mm
Hauteur de la virole	15000 mm
Volume du produit.....	300 m ³

A. Virole :

Hauteur entre 0 et 6 m.....	e=4 mm
Hauteur entre 6 et 9 m.....	e=3 mm
Hauteur entre 9 et 12 m.....	e=2.5 mm
Hauteur entre 12 et 15 m.....	e=2 mm
Boulons.....	M16-classe 8.8-tous les 150 mm

B. Cône :

Epaisseur.....	4mm
Platines de liaison.....	60x20 mm
Boulons.....	M16-classe 8.8-tous les 150 mm
Platine de liaison entre cône et trémie.....	60x20 mm
Boulon de liaison entre cône et trémie.....	M10-classe 8.8-tous les 150 mm

C. Toit :

Epaisseur	7 mm
Renforts	plat 60 x10 mm
UPN.....	UPN 120

II.3 Matériaux utilisé :

Dans la fabrication des silos et dans la construction métallique en générale on utilise l'acier qui peut être défini comme un matériau composé essentiellement de fer et présentant une teneur en carbone inférieure à 2 %.

Il peut encore contenir d'autres éléments mais de tous ces éléments d'alliage, le carbone a l'effet le plus prononcé sur les propriétés de l'acier. Si l'on ajoute plus de 0,5 % d'éléments d'alliage à l'acier, on parle d'acier allié, mais si la proportion d'éléments d'alliage est inférieure à ce chiffre, on parle d'acier non allié.

Dans la construction des silos on requiert une certaine résistance qui s'obtient par l'ajout d'élément d'alliage, les principaux durcissant sont par ordre d'importance le carbone, le manganèse, le silicium, etc. Plus il y a d'éléments d'alliage, plus le matériau est dur, les éléments d'alliage ont également une grande incidence sur la compatibilité de l'acier avec le soudage et la galvanisation, si bien que l'on ne peut ajouter indéfiniment des éléments d'alliage. Voici quelques aciers qui sont fréquemment utilisés dans la construction métallique :

A. Aciers hautes limites élastiques (HLE) :

Les aciers HLE sont des aciers à haute résistance, obtenues par l'ajout d'éléments de micro-alliage (niobium, titane, vanadium, etc...) afin de minimiser l'ajout de carbone, de manganèse, etc. C'est pour cette raison qu'ils présentent une soudabilité supérieure.

Les aciers HLE (par exemple le S355MC) sont utilisés pour les applications où leurs atouts (résistance, déformabilité et soudabilité) peuvent être exploités : transport, levage, etc. Leur utilisation permet souvent une réduction de poids. [9]

B. Acier revêtus métalliques :

On utilise surtout du zinc ou des alliages de zinc et d'aluminium pour revêtir les aciers plats. Le revêtement métallique offre une excellente protection contre la corrosion, parce qu'elle repose sur un double principe : l'effet barrière (fermeture physique de la surface de l'acier) et la protection cathodique.

Comme le zinc est un métal moins noble que le fer, il « se sacrifiera » au profit de l'acier (se corrodera en premier). Contrairement aux oxydes de fer, les produits de corrosion du zinc («rouille blanche »), forment une couche plus ou moins protectrice et ralentissent sensiblement la poursuite du processus de corrosion. [9]

La nuance la plus répandue dans la construction métallique est le S235JR, qui va être utilisée pour la fabrication de notre silo.

II.4 Les différentes parties de silo :

Comme on a vu dans le chapitre précédent, il existe plusieurs formes et types de silos et par ailleurs les parties qui les constituent varient d'un silo à l'autre selon la conception, dans notre étude le silo se compose essentiellement de quatre parties (la virole, le cône, la trémie, et le toit).

II.4.1 La virole et le cône :

La virole et le cône de notre silo sont réalisées à partir de 4 portions de 90° reliées entre elles par des platines boulonnées, l'épaisseur des tôles varie entre 2 mm et 4 mm selon l'altitude, car les contraintes dangereuses sont tout en bas de l'appareil à cause de la charge surfacique de compression due au poids de ce dernier.

L'écoulement des produits en vrac pulvérulents avec un diamètre de grain moyen inférieur à 0.1 mm est toujours synonyme de problèmes importants, car ces produits coulent mal, et pour cela notre silo a un cône d'un angle de 55.5°, le choix a été fixé sur cette solution par ce qu'elle est moins coûteuse.

La tôle de la virole est renforcée avec des fers plats de 60x20, les fers plats avec des trous ronds ou oblongs sur les extrémités des portions de la virole servent à l'assemblage.

Une portion de la virole avec une portion de cône assemblé entre elles, se compose de 14 éléments, le tableau suivant définit les pièces avec descriptions et quantité :

REP	DESCRIPTION	QTE
1	PLATINE ep 15	1
2	UPN180	2
3	GOUSSET PERCEE	2
4	GOUSSET	7
5	FER PLAT 60x10	1
6	FER PLAT 60x20 TROUS ROND	1
7	FER PLAT 60x20 TROUS OBLONG	1
8	FER PLAT 60x20 PERCEE ϕ 5500	1
9	FER PLAT 60x10 ϕ 5500	4
10	VIROLE ep4	1
11	CONE ep4	1
12	FER PLAT 60x10 (TROUS ROND)	1
13	FER PLAT 60x10 (TROUS OBLONG)	1
14	FER PLAT 60x10 (CERCEAUX 90°)	1

Tableau II.1 Les élément pour une portion d'une virole avec une portion de cône

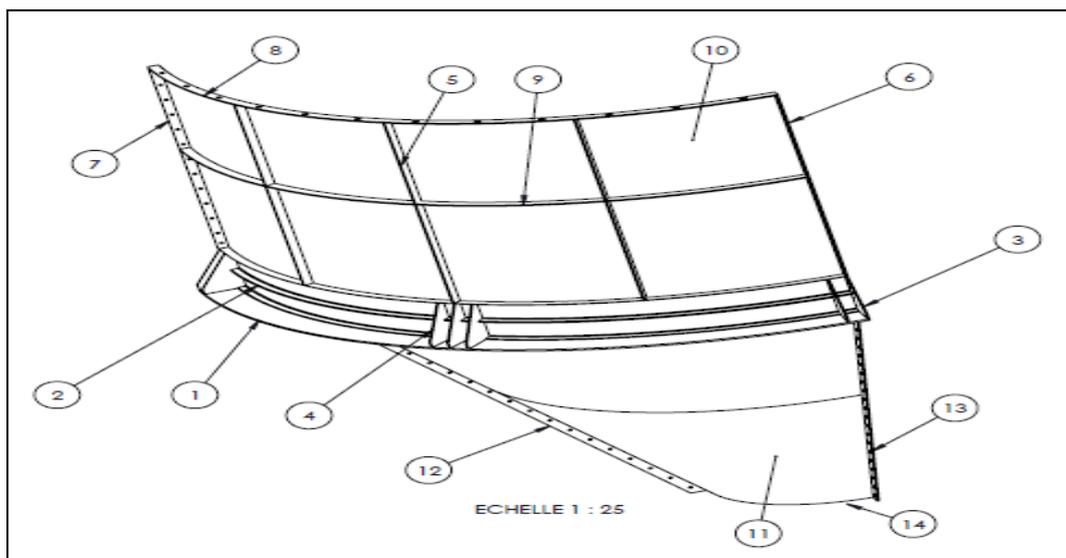


Figure II.2 une portion d'une virole avec une portion de cône

II.4.1.1 L'assemblage de la virole avec le cône :

L'assemblage de la partie virole avec le cône se fait par soudage en utilisant des goussets et des poutres UPN180. (Figure II.3)

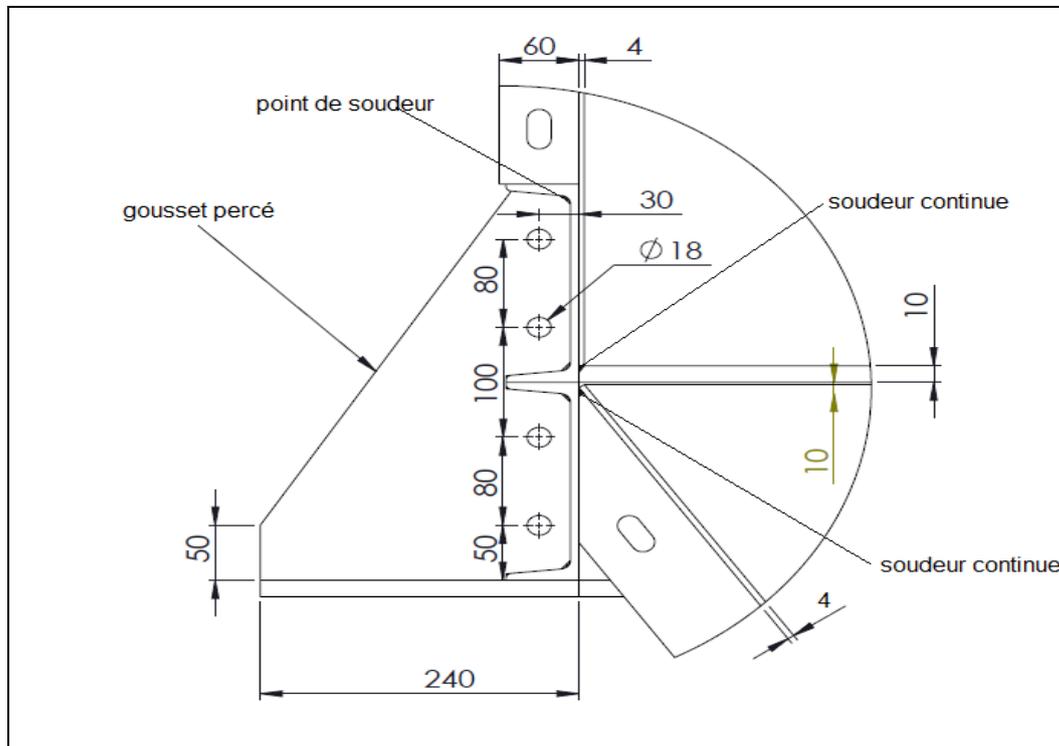


Figure II.3 L'assemblage de la virole avec le cône

Pour l'assemblage des deux parties on pose deux poutres UPN180 l'une sur l'autre qui chacune d'elle va être soudé sur les tôles (de la virole et le cône), les goussets sont soudés par point entre les poutres.

Dans une portion on trouve un totale de sept gousset, dans les extrémités de la portion il ya deux goussets que l'une d'elle est percée et cela pour l'assemblage des quatre portions entre elle avec boulons, et trois au milieu. Les goussets dans cet assemblage assurent le guidage des deux poutres UPN180, et leur bon serrage, et par là on constate qu'ils ont un grand rôle dans l'assemblage des deux parties.

II.4.2 La trémie :

En dessous du silo on trouve une pièce qui est similaire à un entonnoir qu'on appelle trémie, cette trémie est utilisée pour extraire les matériaux du silo, et elle est équipée d'une petite porte de visite.

La trémie a une longueur de 2000 mm conçu avec une tôle d'épaisseur 4 mm, l'assemblage de celle-ci avec le cône est par boulon de type M10-classe 8.8.

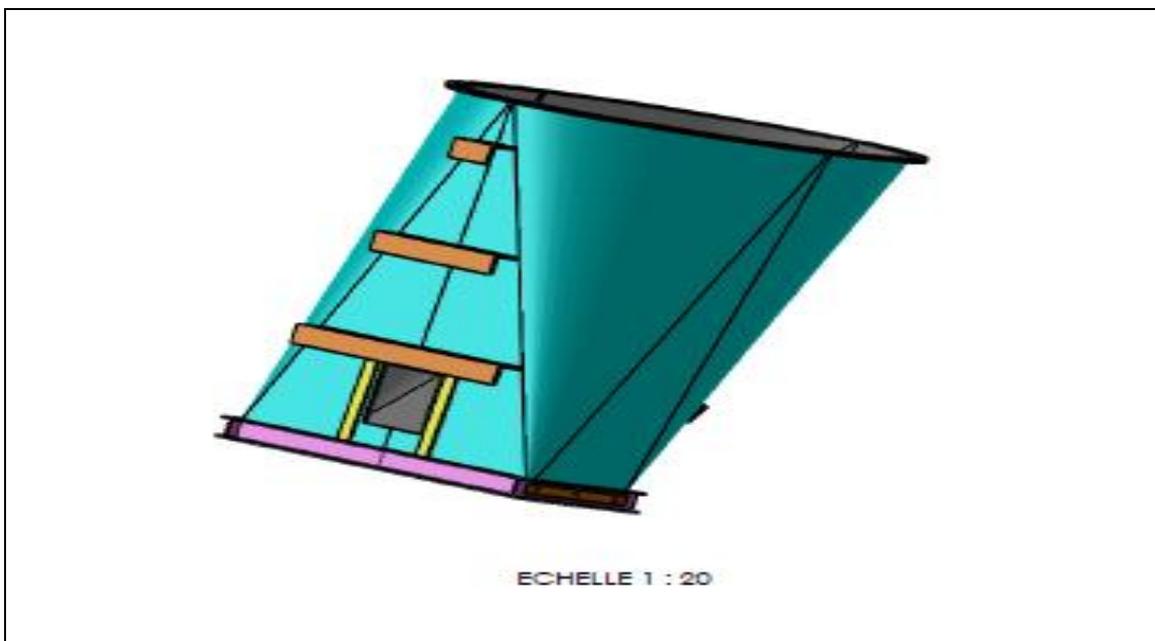


Figure II.4 La trémie

II.4.3 Le toit :

Le toit de notre silo se compose de quatre morceaux de tôles assemblés entre elle par soudage, qui sont posés sur des longerons et renforcé par des traverses. Son diamètre général est de 5590 mm avec une masse totale de 2194.3 kg, l'ensemble est assemblé par boulon sur la dernière vérole. (Figure II.5)

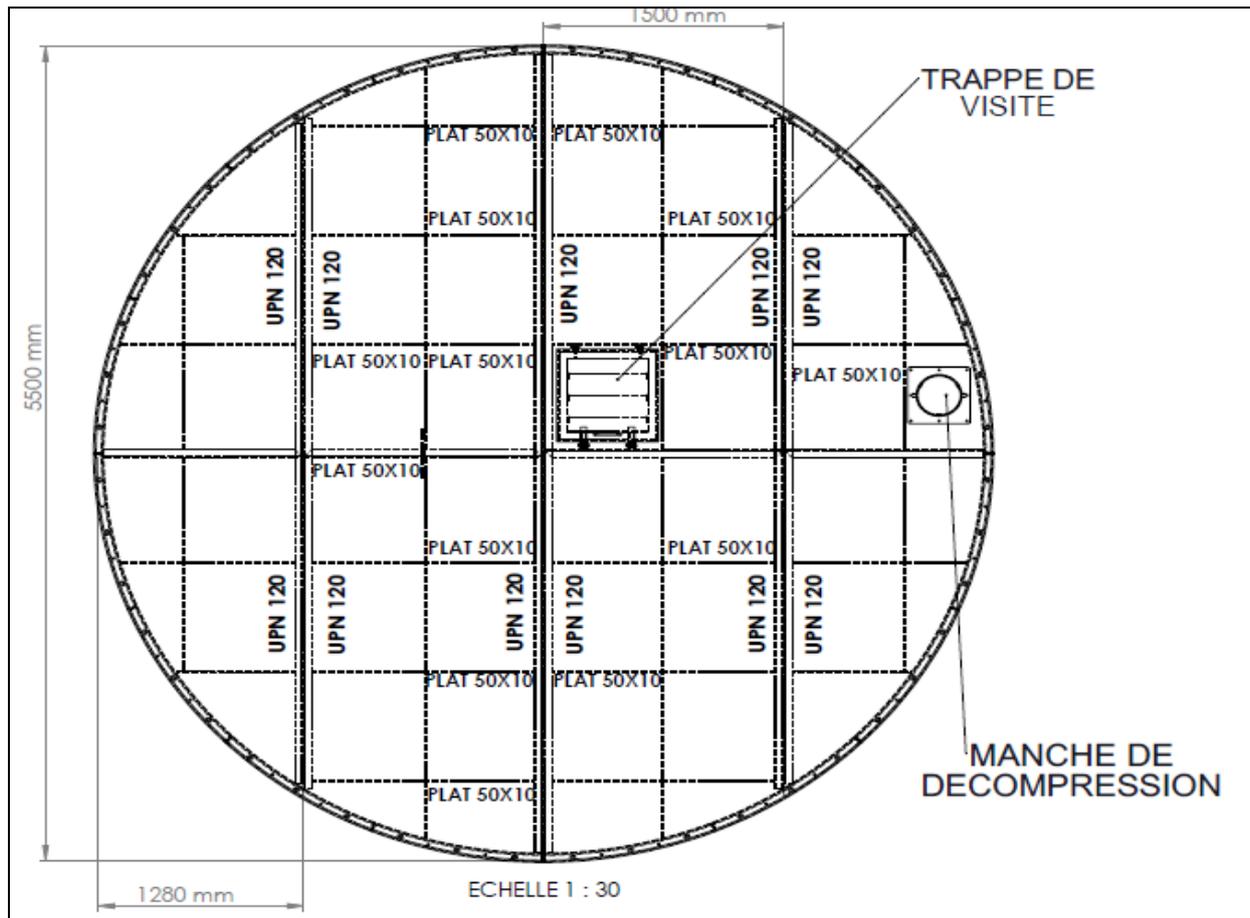


Figure II.5 Le toit

Dans la conception de notre silo les longerons de toit sont des poutres de type UPN120 ($H=120$ mm ; $S=1700$ mm²) qui ont deux principaux rôles, le premier est de simplifier l'assemblage des quatre morceaux de toit, et la deuxième est de supporter l'essentielle des charges ponctuelles et les efforts (surtout en flexion) sur le toit.

A. La tôle de toit :

La tôle utilisée dans la fabrication de toit est une tôle en acier larmée de 5/7 mm (les larmes de 2 mm de hauteur), le choix de ce type de tôle donne une surface qui a la propriété d'anti dérapage même dans les conditions les plus difficile, c'est ce qui les rend idéal pour les soles souvent humides ou gras.



Figure II.6 Tôle larmée

B. Trappe de visite :

Le toit de notre silo est équipé d'une trappe de visite de 636 mm x 633 mm (figure II.7), qui nous donne la possibilité d'accéder à l'intérieur de silo pour y effectuer une intervention technique, ou d'autres opérations comme le nettoyage de l'appareille, mais aussi pour le remplissage de la matière ensilé.

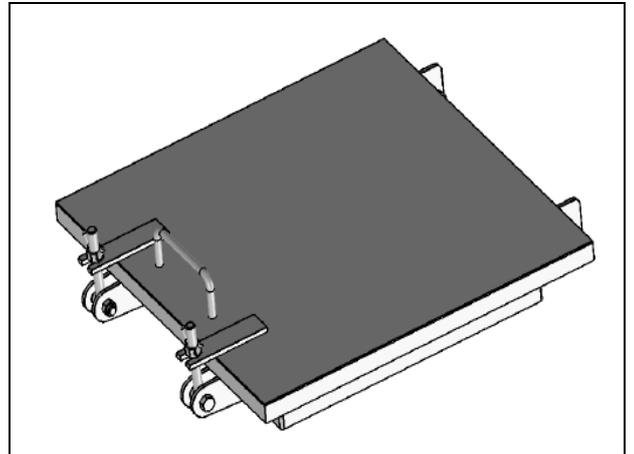


Figure II.7 Trappe de visite

C. Manche de décompression :

Pour éviter la montée de la pression à l'intérieur du silo lors de l'injection de la matière ensilé, on pose un manchon de décompression sur le toit, c'est une sorte de poche en coton ou en polyester, qui aide à décompresser le silo lors de la montée de la pression dans le silo pendant l'opération de remplissage, et elle est aussi un facteur pour le bon écoulement de la matière (pendant le vidange).

III. Calcul et vérification :

Le but de ce chapitre est la vérification de la résistance mécanique de silo, le calcul se fera en deux étapes (calculé les efforts et les charges appliqués sur le silo, et les appliquer sur les zones les plus dangereuses de notre silo).

Les calculs ont été faits selon les codes et les normes suivants :

- **Norme NF P22—630 :**

La norme couvre les cellules des silos (isolées ou en batterie) à parois verticales avec des orifices de vidange situés dans le fond horizontal ou dans les parois par piquage latéral, ou munies de trémies. L'effet de "silo" de ces cellules intervient lorsque le rapport H/D (H = hauteur équivalente, D = diamètre du cercle inscrit) est supérieur à 0,8.

- **CM 66 et additif 80 (règle de calcul des constructions en acier) :**

Cet ouvrage énonce les Règles de calcul des constructions en acier, dites Règles CM 66, accompagnées de l'Additif 80, Les Règles CM 66 concernent essentiellement les structures à barres constituées à partir de pièces simples ou composées en profils laminés. Fondées sur le seul comportement élastique de l'acier, elles ramènent les calculs de contraintes à une contrainte de référence, dite contrainte de ruine, qui est la limite d'élasticité de l'acier utilisé.

- **NF EN 10025-2 mars 2005 (norme française pour les Produits laminés à chaud en aciers de construction) :**

La présente partie 2 de l'EN 10025 spécifie les conditions techniques de livraison des produits plats et longs et des demi-produits destinés à être transformés en produits plats et longs en aciers non alliés de qualité laminés à chaud, dans les nuances et qualités données dans des Tableaux (composition chimique et caractéristiques mécaniques), dans les conditions de livraison spécifiées .

- **NF EN ISO 898-1 juin 2009 (norme française pour Caractéristiques mécaniques des éléments de fixation en acier) :**

La norme NF EN ISO 898-1, publiée en juin 2009, constitue la quatrième édition du texte traitant des caractéristiques mécaniques des éléments de fixation en acier au carbone et en acier allié: Vis, goujons et tiges filetées de classes de qualité spécifiées — Filetages à pas gros et filetages à pas fin.

Il s'agit d'une norme fondamentale pour les vis, goujons et tiges filetées à filetage métrique ISO triangulaire en acier au carbone et en acier allié, essayés dans la plage de température ambiante de 10 °C à 35 °C.

III.1 Caractéristique de Matériaux utilisés :

Le silo est réalisé en acier carbone type S235 JR, ses caractéristiques sont les suivants :

Température de calcul.....	20°C
Résistance à la traction à température ambiante.....	R _m =360 MPa
Limite élastique à température ambiante.....	R _{p0,2} =235 MPa
Module d'élasticité à température ambiante.....	E=201000 Mpa
Coefficient de poisson.....	V=0.3
Masse volumique.....	7850 Kg/m ³

La classe de la boulonnerie utilisée est 8.8 (sont des boulons à haute résistance ou boulons HR). Les caractéristiques sont issues de la norme [13] :

- Résistance a la traction est : R_m=800 MPa
- Limite élastique à 0.2 % à température ambiante est : R_{p0.2} =640 MPa

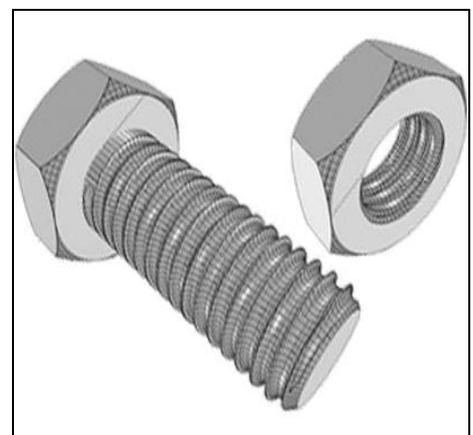


Figure III.1 boulon de classe 8.8

III.2 Poids propre de silo :

Les poids fournis ci-après sont des poids utilisés pour le calcul. Les poids réels peuvent être légèrement différents.

A. Poids de la virole :

Partie 1

Épaisseur	4 mm
Hauteur	6000 mm
Masse linéique	542 Kg/m
Masse du tronçon	3253 Kg

Partie 2

Épaisseur	3 mm
Hauteur	3000 mm
Masse linéique	407 Kg/m
Masse du tronçon	1220 Kg

Partie 3

Épaisseur	2.5 mm
Hauteur	3000 mm
Masse linéique	339 kg/m
Masse du tronçon	1017 Kg

Partie 4

Épaisseur	2.0 mm
Hauteur	3000 mm
Masse linéique	271 kg/m
Masse du tronçon	841 Kg

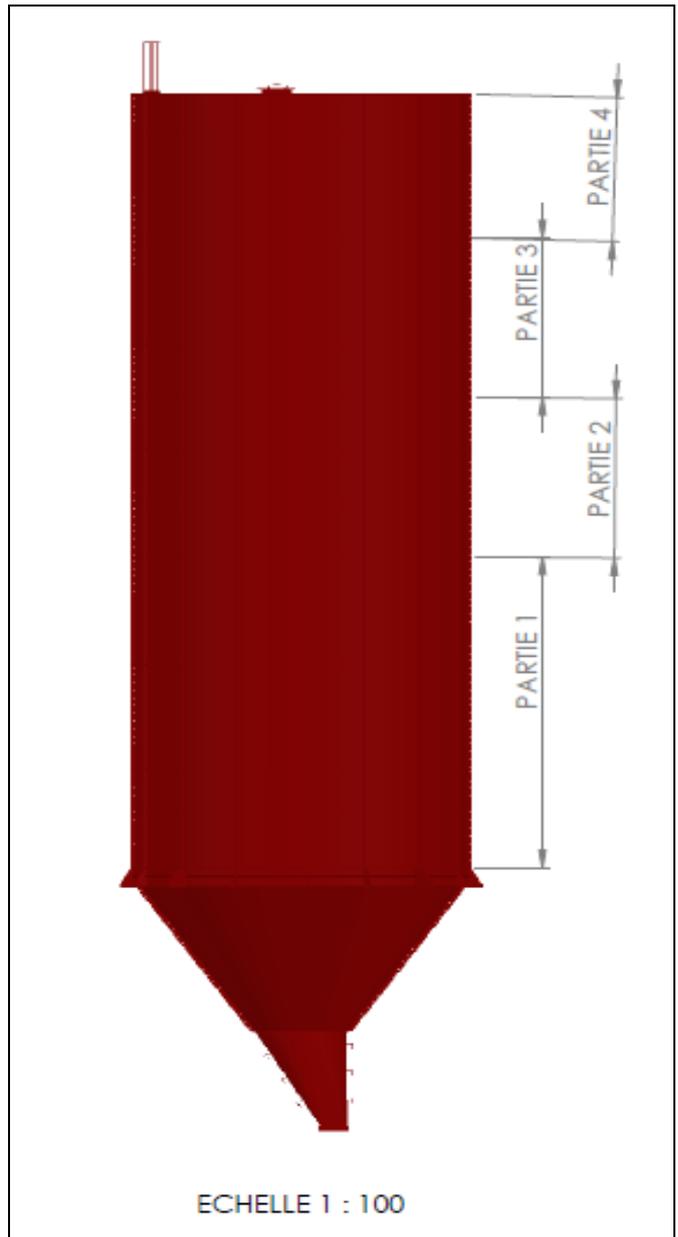


Figure III.2 Les parties de la virole

Masse totale de la virole : 7248.9 kg

B. Masse du cône :

Grand diamètre	5500 mm
Petit diamètre	1 498 mm
Angle de la trémie	55.5°
épaisseur	4 mm
Hauteur du cône total	3 999 mm
volume	85 252 520 mm ³
masse	769.6 kg

Masse de cône avec renfort et plat de liaison : 1949,9 kg

C. Masse du toit :

	Plateau	
Diamètre		5590 mm
Epaisseur		7 mm
Masse du plateau		1550,9 kg
	Travers	
Epaisseur		10 mm
Hauteur		60 mm
Masse cumulée		239,6 kg
	Longerons	
Type de poutre		UPN 120
Longueur cumulé en UPN 120		26204 mm
Masse cumulée		403.8 kg
Masse totale du toit		2194.3 kg

III.3 Calcul des Efforts exercés dans le silo :

Calcul des efforts exercés par la matière ensilée sur les parois de silo se fait en suivant la norme [10].

Le calcul des efforts exercés par la matière ensilée dans le corps de la cellule se fera en deux phases principales (le remplissage et la vidange). Dans chacune de ces phases, la matière stockée exerce sur les parois de la cellule des actions de différentes nature et qui sont :

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

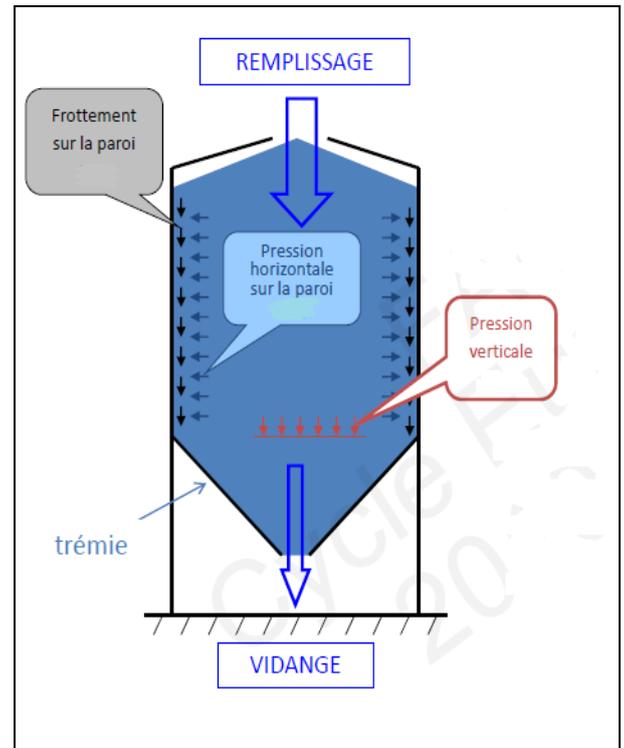


Figure III.3 Les efforts exercés dans le silo

Ces pressions sont liées aux caractéristiques géométriques de silo et les caractéristiques de la matière ensilée et qui sont les suivant :

A. Caractéristiques géométriques du silo :

Hauteur totale de la cellule	$H=15$ m
Diamètre de cercle inscrit dans le silo	$D= 5.5$ m
Présence de l'effet silo	$H/D >0.8 \rightarrow H/D=2.73$
Aire de la section droite de la cellule	$A=23.8$ m ²
Périmètre de la section droite de la cellule	$L=17.3$ m
Rayon hydraulique sans raidisseur de la cellule	$r_h=A/L=1.375$ m
Inclinaison de la paroi de la trémie	$\alpha=55.5^\circ$
Hauteur de cône de la trémie	$T=3995$ mm
Excentrement de l'orifice de vidange	$e_x = 0.01$ m
Distance entre le centre de la cellule et la paroi, sur l'axe passant par le centre de la cellule et de l'orifice	$R=0.01$ m

B. Caractéristique de la matière ensilée :[10]

La matière ensilée est considérée sans cohésion, homogène, isotrope, avec des caractéristiques mécaniques constantes, notamment l'angle de frottement interne et l'angle de frottement en paroi. Les caractéristiques de la matière ensilée sont les suivant :

masse volumique		$\rho=750 \text{ kg/m}^3$
Poids volumique		$\gamma=7.36 \text{ KN/m}^3$
angle de frottement interne		$\varphi= 25^\circ$
	En état de remplissage	$\varphi_r= \varphi= 25^\circ$
	En état de vidange	$\varphi_v=0.85 \varphi= 21.25^\circ$
Angle de talus naturel		$\psi=\varphi= 25^\circ$
Coefficient de rugosité		$C=0.45$
Coefficient de frottement sur la paroi		
	Au remplissage	$\mu_r =\tan \delta_r = C \tan\varphi_r=0.21$
	A la vidange	$\mu_v =\tan \delta_v = C \tan\varphi_v=0.17$
Angle de frottement de la matière contre la paroi		
	Au remplissage	$\delta_r=11.85^\circ$
	A la vidange	$\delta_v=9.93^\circ$

III.3.1 Calcul de la pression verticale : [10]

Le calcul de la pression verticale moyenne dans la matière se fait par la relation suivante :

$$v=\gamma z_0 \Phi(z) \tag{3.1}$$

Avec:

$$\Phi(z) =1-e^{-\frac{z}{z_0}} \quad ; \quad z: \text{altitude équivalente}$$

$$z_0=\frac{r_h}{\mu\lambda} \quad \begin{matrix} z_{0r} = 15.53 \\ z_{0v} = 10.88 \end{matrix}$$

$$\mu= \tan\delta \quad \begin{matrix} \mu_r= 0.21 \\ \mu_v=1.25 \end{matrix}$$

$$\lambda=\frac{1-\sin\varphi\cos2\beta}{1+\sin\varphi\cos^2\beta} \quad \begin{matrix} \lambda_r=0.42 \\ \lambda_v=1.24 \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} + \text{ pour le remplissage} & \cos2\beta_r= 0.96 \\ -\text{pour la vidange} & \cos2\beta_v= -0.78 \end{matrix}$$

III.3.2 Calcul de la pression normale à la paroi : [10]

La pression normale (ou "poussée latérale"), correspondant à l'effet exercé par la masse de la matière ensilée sur la paroi de silo, elle est calculer par la relation suivante :

$$n = v\lambda C_e \quad (3.2)$$

C_e : Coefficient de correction du l'excentrique de l'orifice de vidange.

$$C_e = \text{Max} (0.9 + 0.4\xi ; 1) = 1.30 \quad \text{Avec :} \quad \xi = e_x / R = 1$$

III.3.3 Action de frottement contre la paroi : [10]

C'est une pression tangentielle à la paroi (ou pression verticale), supportée par les parois sous l'effet de la friction :

$$t = n\mu \quad (3.3)$$

Avec :

$$\mu = \tan \delta$$

$$\text{Remplissage : } \mu_r = 0.21$$

$$\text{Vidange : } \mu_v = 1.25$$

III.3.4 Applications numériques :

Lorsque les silos sont destinés à contenir plusieurs types de céréale, la norme [10] demande à ce que, pour obtenir les chargements maximale, deux calculs soient réalisés. Le premier calcul avec un poids volumique de $8\text{KN}/\text{m}^3$ et un angle de frottement interne de 25° , et un second avec un poids volumique de $8.5\text{KN}/\text{m}^3$ et un angle de 32° .

Comme la masse volumique est fournie par le client, deux calculs sont réalisés avec la masse communiqué soit $7.5\text{KN}/\text{m}^3$ (qui correspond à la masse volumique de soja en grain), et les angles de frottement interne précédemment cités, le calcule est réalisé aussi pour les deux phases (remplissage et vidange).

Pour ne pas surcharger le document on va donner les résultats finale qui sont retenue, c'est résultats sont les efforts maximales des différents calculs et qui sont les suivants :

A. Pour les viroles :

Altitude (m)	Hauteur z équivalente (m)	$\Phi(z)$	Pression verticale moyenne v (KN/m ²)	Pression normale à la paroi $N=v\lambda C_e$ (KN/m ²)	Actions de frottement contre paroi $t=\eta\mu$ (KN/m ²)
15	0	0.00	0.00	0.00	0.00
14	1	0.09	7.13	6.6	1.15
13	2	0.17	13.81	12.62	2.21
12	3	0.24	20.07	18.11	3.17
11	4	0.31	25.94	23.12	4.05
10	5	0.37	31.45	27.69	4.85
9	6	0.42	36.62	31.86	5.58
8	7	0.47	41.46	35.66	6.24
7	8	0.52	46	39.13	6.85
6	9	0.56	50.25	42.29	7.4
5	10	0.6	54.25	45.18	7.91
4	11	0.64	57.99	47.81	8.37
3	12	0.67	61.5	50.21	8.79
2	13	0.7	64.79	52.4	9.17
1	14	0.72	67.87	54.4	9.52
0	15	0.75	70.76	56.22	9.84

Tableau III.1 valeur retenues sur les viroles

B. Pour le cône :

Par rapport à la profondeur a la jonction corps/trémie	$z=$	0.000	1.000	2.000	2.910	m
Pression verticale dans la matière	$v_r=$	0.071	0.078	0.085	0.092	MPa
pression normale contre la paroi à la vidange	$n_v=$	0.063	0.071	0.079	0.086	MPa
Action de frottement contre la paroi à la vidange	$t_v=$	0.012	0.014	0.015	0.016	MPa

Tableau III.2 valeur retenues pour le cône

Remarque :

Comme il va avoir des personnes qui vont opérer sur le toit pour effectuer plusieurs opérations comme le remplissage ou le nettoyage de silo, alors pour des mesures de sécurité en considère une surcharge ponctuelle de 500 kg sur le toit, et qui peut tenir compte même de la neige.

III.4 Vérification des différents éléments de silo :

Après le calcul de différentes charges et les efforts exercés sur le silo, on va dans cette partie procéder à un calcul de vérification de la résistance de matériaux pour les éléments de silo.

Les valeurs utilisées pour la vérification sont pondérées à l'aide des coefficients de pondération du CM 66, à savoir 1.5 pour les charges variables.

III.4.1 Vérification des épaisseurs de la tôle :

Les tronçons à étudier et modélisé à l'aide du logiciel solidworks version 2014, qui est un logiciel américain 3D utilisant la conception paramétrique.

A. Les viroles :

Comme les valeurs maximales pour les pressions normales à la paroi et les actions de frottements sont en bas de silo, alors le calcul se fera que sur la première virole (partie 1 en figure III.1), puisque la virole est constitué de quatre parties de même dimensions, alors le calcul se fait que pour 1/4 de la virole de la partie 1.

- Les charges considérées pour le calcul sont :

Altitude (m)	Epaisseur (mm)	Pression normale (MPa)	Action de frottement contre la paroi (Mpa)	Force de compression due au poids de l'appareil (N)
0-3	4	8,5 E-02	1 ,5 E-02	71 E+03

Tableau III.3 les charge considéré pour le calcul des viroles

- Propriétés de l'étude :

Type d'analyse	Analyse statique
Type de maillage	Maillage mixte
Nombre total de nœuds	25279
Nombre total d'élément	11411

Tableau III.4 propriété de l'étude

- **Résultat de l'étude:**

Le résultat de l'étude montre les zones où les contraintes sont aux maximums (les zones en rouge) dans notre tronçon, le max est à 71 MPa .Comme la contrainte admissible de notre matériaux est de 235 MPa, alors le tronçon à une résistance mécanique plus que acceptable.

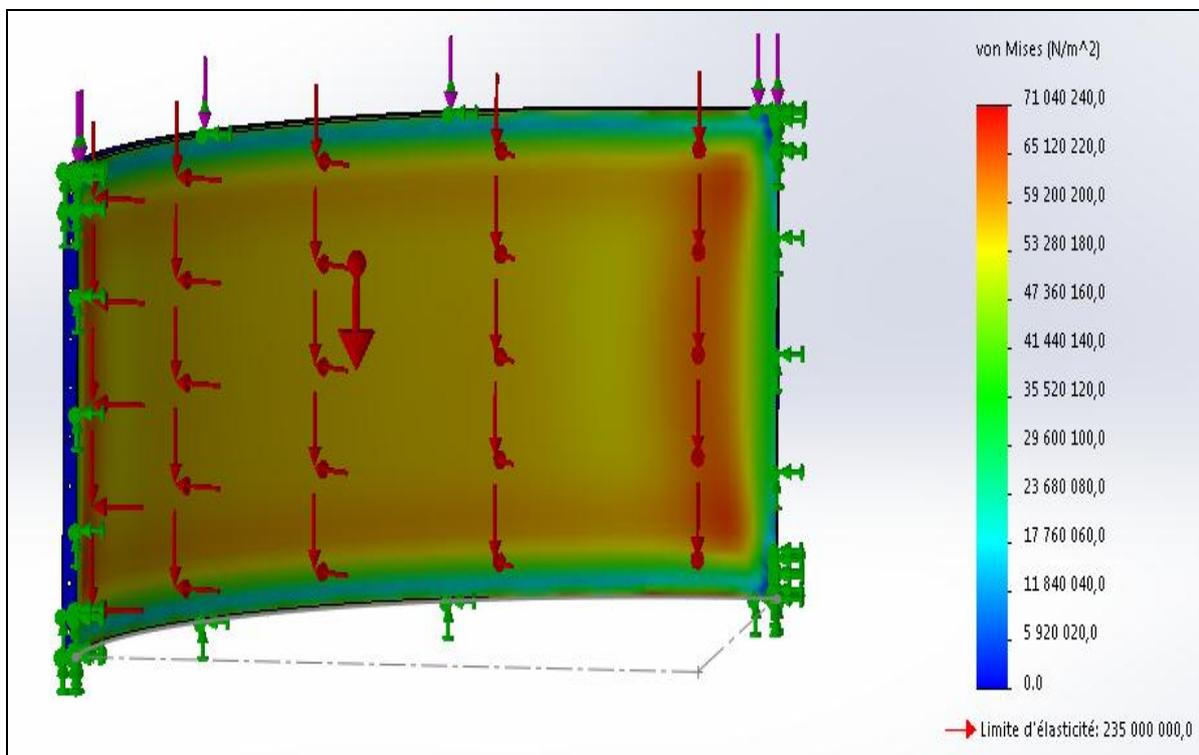


Figure III.4 résultat de l'étude « solidworks »

B. Le cône :

De même que pour la virole le calcul concerne que le 1/4 de cône .

Les charges considérées pour le cône sont :

Epaisseur (mm)	Pression normale (MPa)	Action de frottement contre la paroi (Mpa)
4	8,6 E-02	1 ,6 E-02

Tableau III.5 les charge considéré pour le calcul de cône

Propriétés de l'étude :

Type d'analyse	Analyse statique
Type de maillage	Maillage volumique
Nombre total de nœuds	15061
Nombre total d'élément	7325

Tableau III.6 propriété de l'étude

• **Résultat de l'étude:**

Le résultat de l'étude montre les zones où les contraintes sont aux maximums (les zones en rouge) dans notre cône, le max est à 117 MPa .Comme la contrainte admissible de notre matériaux est de 235 MPa alors, le cône à une résistance mécanique plus que acceptable.

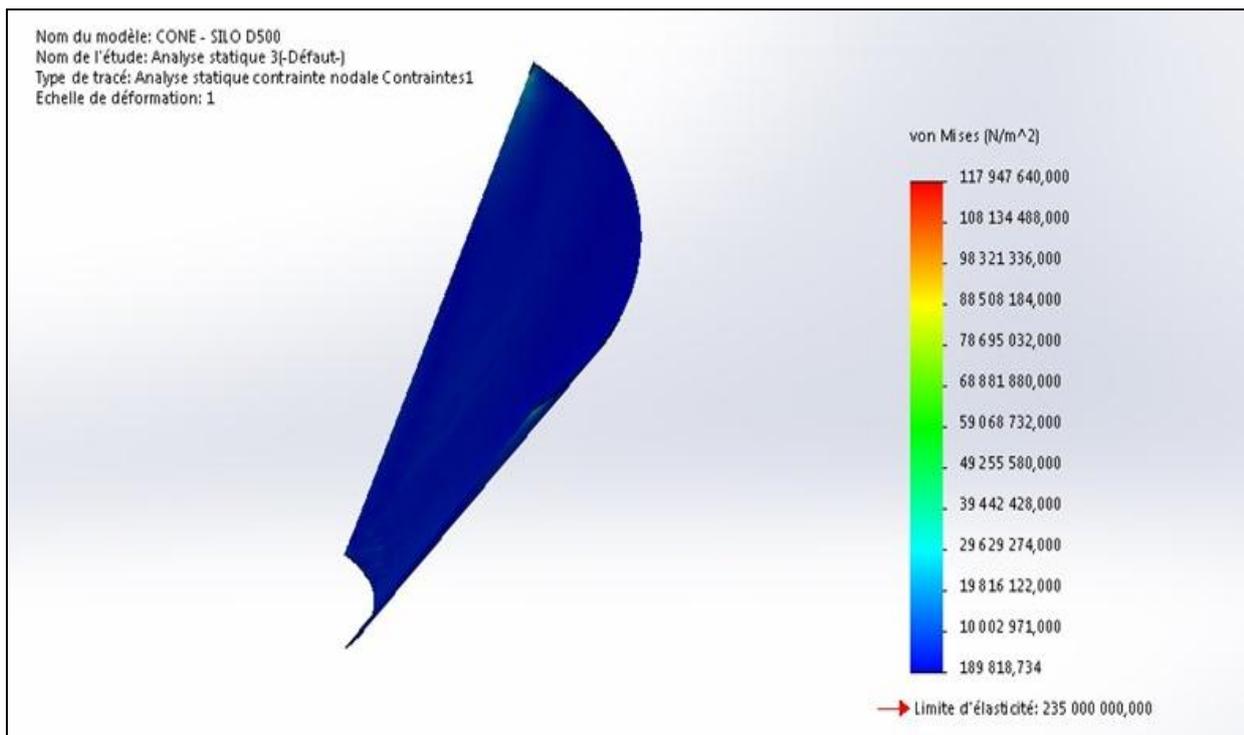


Figure III.5 résultat de l'étude « solidworks»

III.4.2 Vérification des liaisons entre portions de virole :

La virole est réalisée à partir de 4 portions (chaque portion représente le 1/4 de la virole qui à été vérifier en III.5.1 A) de 90° reliées entre elles par des platines boulonnées, l'espacement maximal entre 2 boulons est de 150 mm.

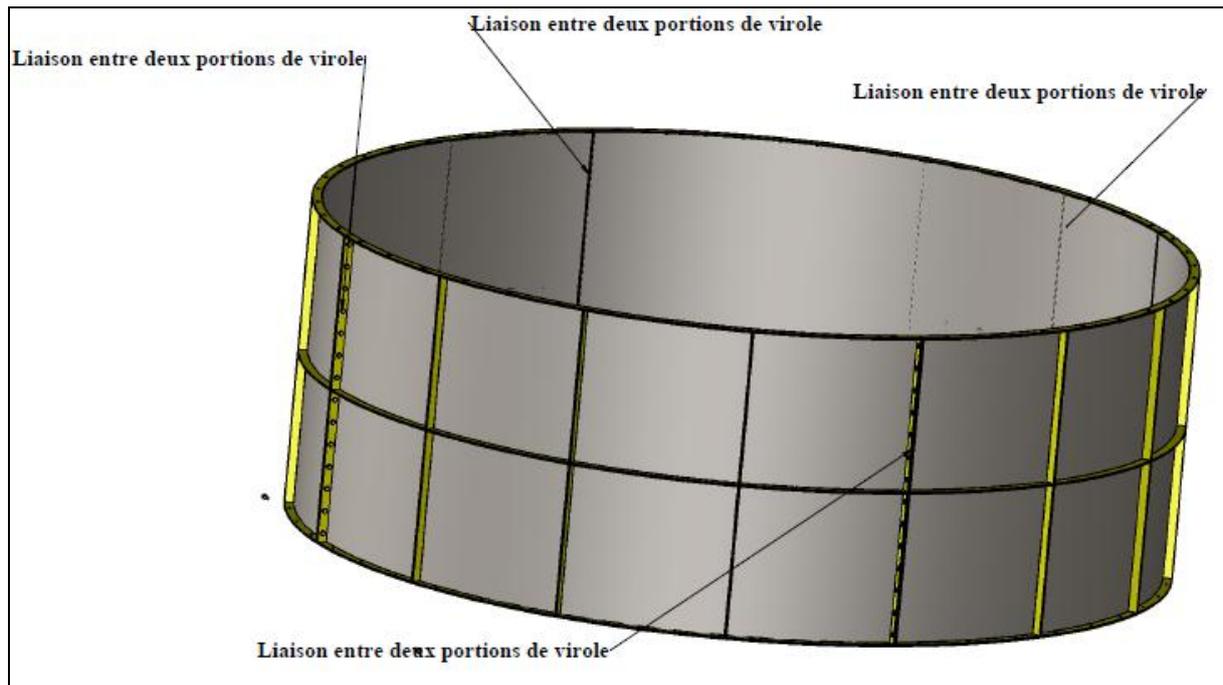


Figure III.6 La Liaison entre deux portions de virole

A. Calcul de traction maximale dans un boulon :

Boulon	M16-classe 8.8
Nombre de boulons	14
Pression normale maximale	0.06 MPa
Diamètre de la virole	5500 mm
Longueur reprise par un boulon	225 mm
Effort à reprendre par un boulon	34786 N

Donc, l'effort pondéré à 1.5 est égal à 52 180 N

B. Vérification de la boulonnerie : [11]• **Contraint de traction**

Effort normale	$N = 5218 \text{ daN}$
Section résistance	$A_r = 157 \text{ mm}^2$
Nombre de boulons	$N_b = 1$
Limite élastiques	$\sigma_e = 64 \text{ daN/mm}^2$
$\sigma_n = 1, 25.N/(A_r.N_b)$	$\sigma_n = 41.545 \text{ daN/mm}^2$

$$\sigma_n < \sigma_e \text{ Acceptable}$$

C. Vérification des platines (60 x 20) : [11]

Charge de la semelle	$P = 34786.7 \text{ N}$
Epaisseur de la semelle	$e = 20 \text{ mm}$
Distance charge / congé ou âme	$d = 30 \text{ mm}$
Largeur participante réelle disponible	$x = 150 \text{ mm}$
Moment résistant de la section $I/V = x.e^2/6$	$I/V = 10\,000 \text{ mm}^3$
Contraints admissible	$\sigma_e = 235 \text{ MPa}$
Moment de flexion max $M_f = P.d$	$M_f = 1\,043\,601 \text{ N.mm}$
Contrainte de flexion $\sigma_f = \frac{M_f}{I/V}$	$\sigma_f = 104.36 \text{ MPa}$ acceptable

III.4.3 Vérification des liaisons entre portion du cône :

De même que pour la virole, la trémie est réalisée à partir de 4 portions de 90° reliée entre elle par des platines boulonnées, l'espace maximal entre 2 boulons est de 150 mm.

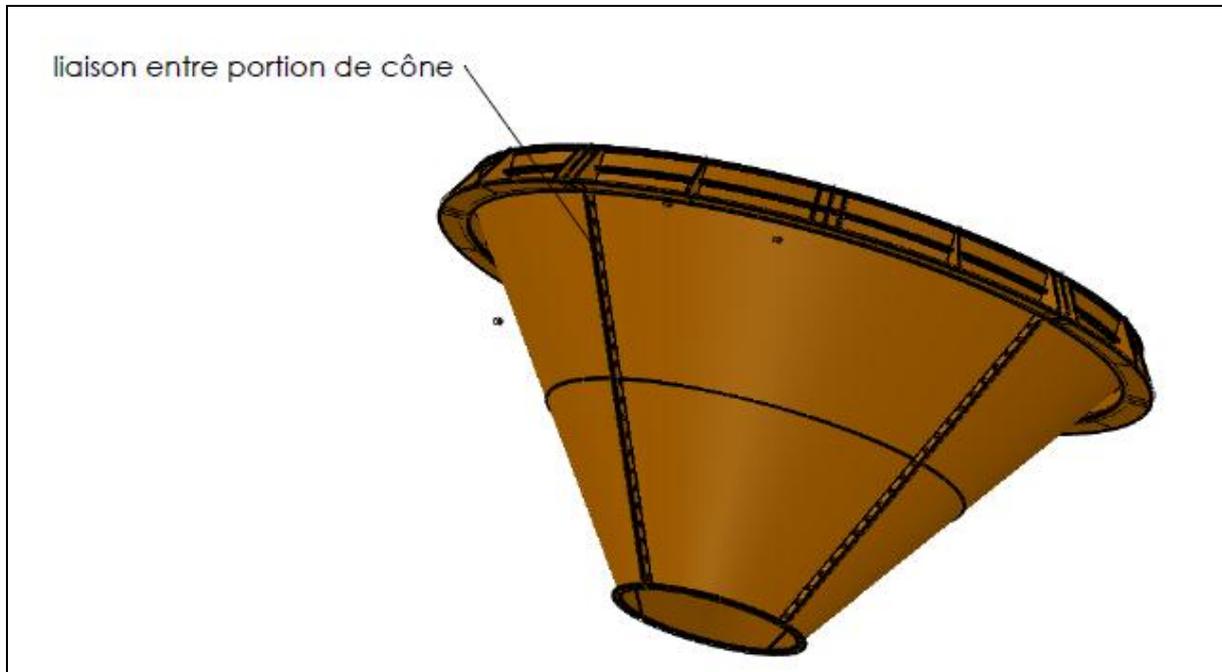


Figure III.7 liaison entre portion de cône

A. Calcul de traction maximale dans un boulon :

Boulon	M16-classe 8.8
Nombre de boulons	23
Longueur génératrice	3532 mm
Pression normale à la surface maximale	8.50E-02 MPa
Longueur reprise par un boulon	154 mm
Effort à reprendre par un boulon	36189 N
Donc, l'effort pondéré à 1.5 est égal à	54 283 N

B. Vérification de la boulonnerie :

Les contraintes dans les boulons sont suivant les règles CM 66 :

- **Contraint de traction**

Effort normale	$N = 542\,8 \text{ daN}$
Section résistance	$A_r = 157 \text{ mm}^2$
Nombre de boulons	$N_b = 1$
Limite élastiques	$\sigma_e = 64 \text{ daN/mm}^2$
$\sigma_n = 1,25.N/(A_r.N_b)$	$\sigma_n = 43.219 \text{ daN/mm}^2$

$$\sigma_n < \sigma_e \text{ Acceptable}$$

C. Vérification des platines (60 x 20) :

Charge de la semelle	$P = 36188.7 \text{ N}$
Epaisseur de la semelle	$e = 20 \text{ mm}$
Distance charge / congé ou âme	$d = 30 \text{ mm}$
Largeur participante réelle disponible	$x = 154 \text{ mm}$
Moment résistant de la section $I/V = x.e^2/6$	$I/V = 10\,267 \text{ mm}^3$
Contraints admissible	$\sigma_e = 235 \text{ MPa}$
Moment de flexion max $M_f = P.d$	$M_f = 1\,085\,661 \text{ N.mm}$
Contrainte de flexion $\sigma_f = \frac{M_f}{I/V}$	$\sigma_f = 105.74 \text{ MPa}$ acceptable

III.4.4 Vérification de la jonction entre cône et trémie:

Le cône et la trémie sont assemblés avec boulon (M10-classe 8.8), et platine de 60x10 mm.

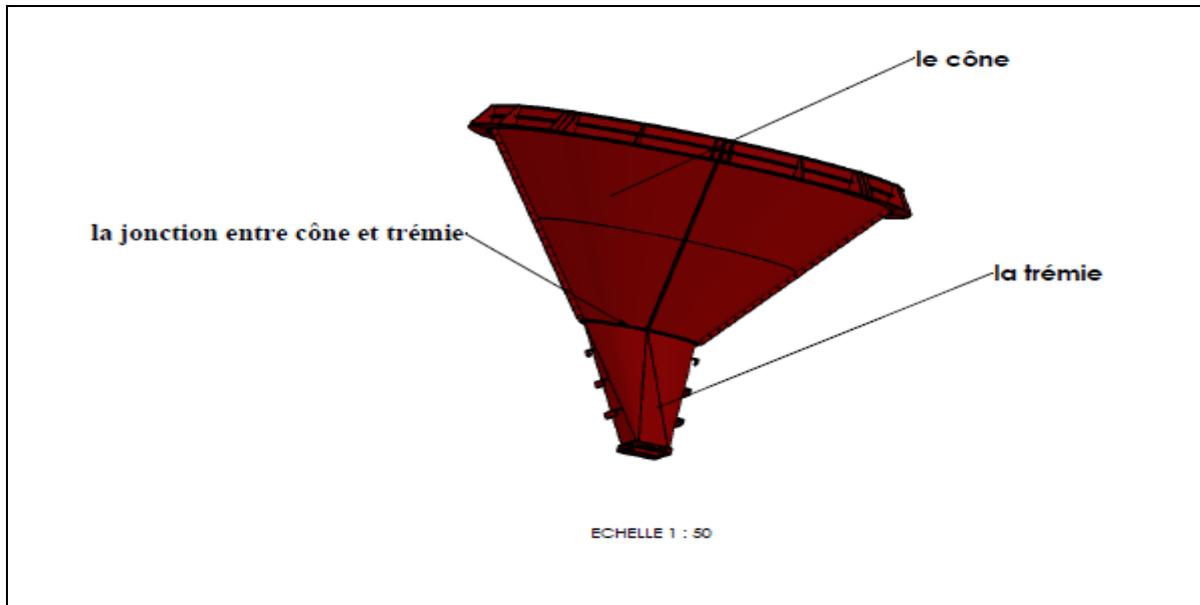


Figure III.8 La jonction entre cône et trémie

- **Donnée d'entrée :**

Boulon	M10-classe 8.8
Nombre de boulons	32
Pression verticale moyenne	0.092 MPa
Effort totale du à la pression verticale moyenne	162408 N
Pression due au frottement contre la paroi	0.016 MPa
Effort totale du à la pression verticale moyenne	137826 N
Effort totale à considérer	300 234 N

A. Calcul de traction maximale dans un boulon :

Effort à reprendre par boulon	9382 N
L'effort pondéré à 1.5 est égale à	14073 N

B. Vérification de la boulonnerie :

Les contraintes dans les boulons sont suivant les règles CM 66 :

- **Contraint de traction**

Effort normale	$N = 1407.3 \text{ daN}$
Section résistance	$A_r = 84 \text{ mm}^2$
Nombre de boulons	$N_b = 1$
Limite élastiques	$\sigma_e = 64 \text{ daN/mm}^2$
$\sigma_n = 1, 25.N/(A_r.N_b)$	$\sigma_n = 20.867 \text{ daN/mm}^2$

$$\sigma_n < \sigma_e \text{ Acceptable}$$

C. Vérification des platines (60 x 10) :

Charge de la semelle	$P = 9\,382 \text{ N}$
Epaisseur de la semelle	$e = 10 \text{ mm}$
Distance charge / congé ou âme	$d = 30 \text{ mm}$
Largeur participante réelle disponible	$x = 150 \text{ mm}$
Moment résistant de la section $I/V = x.e^2/6$	$I/V = 2\,500 \text{ mm}^3$
Contraints admissible	$\sigma_e = 235 \text{ MPa}$
Moment de flexion max $M_f = P.d$	$M_f = 281\,460 \text{ N.mm}$
Contrainte de flexion $\sigma_f = \frac{M_f}{I/V}$	$\sigma_f = 112.58 \text{ MPa}$ acceptable

III.5 Conclusion :

Le silo a un comportement mécanique acceptable, au regard des chargements calculer dans la première partie de ce chapitre, et selon les règles et les normes actuellement en vigueur au sein de l'entreprise (CR-METAL).

IV. Les étapes de fabrications :

Dans ce chapitre en va voir les différentes étapes de fabrication des éléments et pièces de notre silo. Les principales étapes sont :

- Le découpage des tôles
- Le cintrage ou roulage des tôles
- Le pliage des tôles
- L'assemblage des éléments par soudage

IV.1 Le découpage des tôles :

Le coupage des métaux est une opération courante de préparation des pièces et des joints d'assemblage, lorsque c'est possible, on utilise un procédé mécanique plus simple, plus rapide, moins coûteux et qui occasionne moins de déformation du métal.

Cependant, en fonction des types de coupes (formes), de l'épaisseur du métal à couper et de la disponibilité des équipements, on peut recourir à des techniques de coupage thermique au gaz ou à l'arc, telles que l'oxycoupage ou le coupage au jet de plasma.

Le coupage des métaux pour la fabrication des éléments de notre silo se fait par oxycoupage, ce procédé est très présent dans les industries qui utilisent de la tôle épaisse. Il est utilisé sur des machines munies d'un ou plusieurs chalumeaux pour les coupes rectilignes ou de forme, pour des pièces unitaires ou répétitives.



Figure IV.1 L'opération de l'oxycoupage CR-METAL

IV.1.1 Principe de l'oxycoupage :

L'oxycoupage est une opération de coupage par combustion localisée et continue sous l'effet d'un jet d'oxygène pur, agissant en un point préalablement porté à une température convenable (1300 °C), dite température d'amorçage.

Ce procédé nécessite une flamme de chauffe pour l'amorçage et un jet d'oxygène de coupe généralement central et destiné à réaliser la combustion dans la saignée étroite.

Sous l'effet de la chaleur, l'apparition d'oxyde de fer sur un métal ferreux grâce à l'injection d'oxygène. L'oxyde de fer ainsi créé fond sous la pression des gaz et s'écoule ; la coupure du métal est alors réalisée (figure 2.IV).

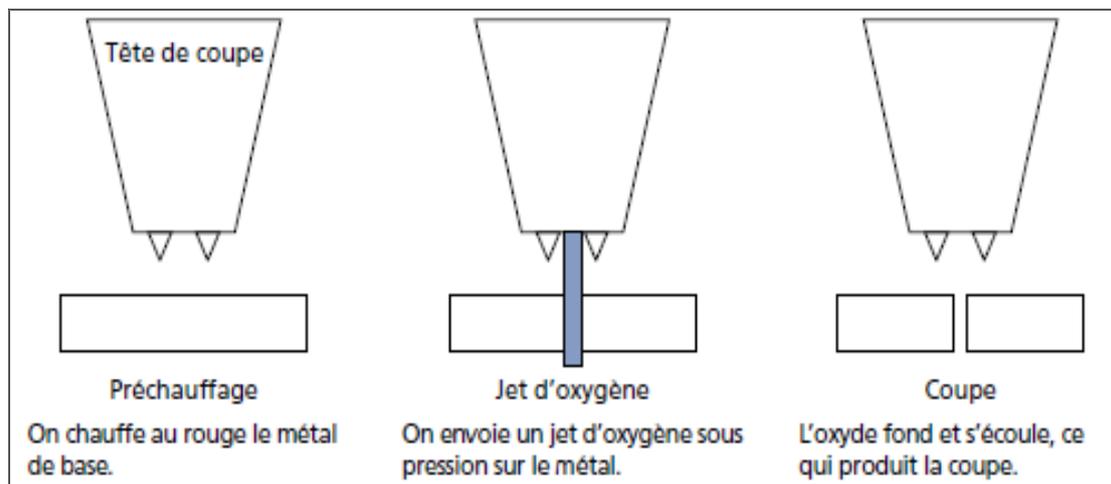


Figure IV.2 Le principe de l'oxycoupage

IV.1.2 Avantages et inconvénients de l'oxycoupage :

a. Avantage :

- Coupe rapide et efficace.
- Pratique pour la démolition de pièce en acier (chalumeau en poste mobile).

b. Inconvénients :

- Ne peut être utilisé que pour l'acier dont la teneur en carbone excède 1,9%.
- Les pièces oxycoupées ne peuvent pas être soudées directement, nécessite un usinage préalable de la croûte oxydée.

IV.1.3 Conditions à satisfaire pour rendre l'oxycoupage possible :

- La température de réaction doit être inférieure à la température de fusion du métal.
- Les oxydes formés ne doivent pas être solides.
- La formation de composés gazeux ne doit pas affecter la pureté de l'oxygène au contact du métal.
- Le carbone au-delà de 2% et le chrome au-delà de 6 à 8% rendent l'oxycoupage impossible.
- Aussi les fontes et les aciers inoxydables ne peuvent être oxycoupés.

IV.1.4 Préparation des tôles avant l'oxycoupage :

Aucune préparation particulière, si ce n'est le décapage des tôles peintes ou revêtues (galvanisées), grasses, ou le grenailage des tôles calaminées. Sans ces précautions, la vitesse de coupe peut chuter considérablement et la coupe comportée bon nombre de scories plus ou moins adhérentes.

IV.1.5 Les dimensions et les formes des tôles après coupage :

Pour la mise en forme des éléments de notre silo on doit découper les tôles avec des formes et des dimensions bien précises. Comme chaque partie de notre silo se compose de 4 portions, alors les dimensions qui vont se suivre sont pour une portion de chaque partie.

A. La virole :

Comme la virole est fabriquée avec différentes épaisseurs de tôles, alors le coupage se fera sur des tôles de différentes épaisseurs (2,2.5, 3,4 mm), la forme de coupage est rectangulaire de 2810 x 2005 mm .

B. Le cône :

Le découpage pour la fabrication de cône se fait sur une tôle d'épaisseur de 4 mm, la forme et les dimensions sont montrées dans la figure suivante :

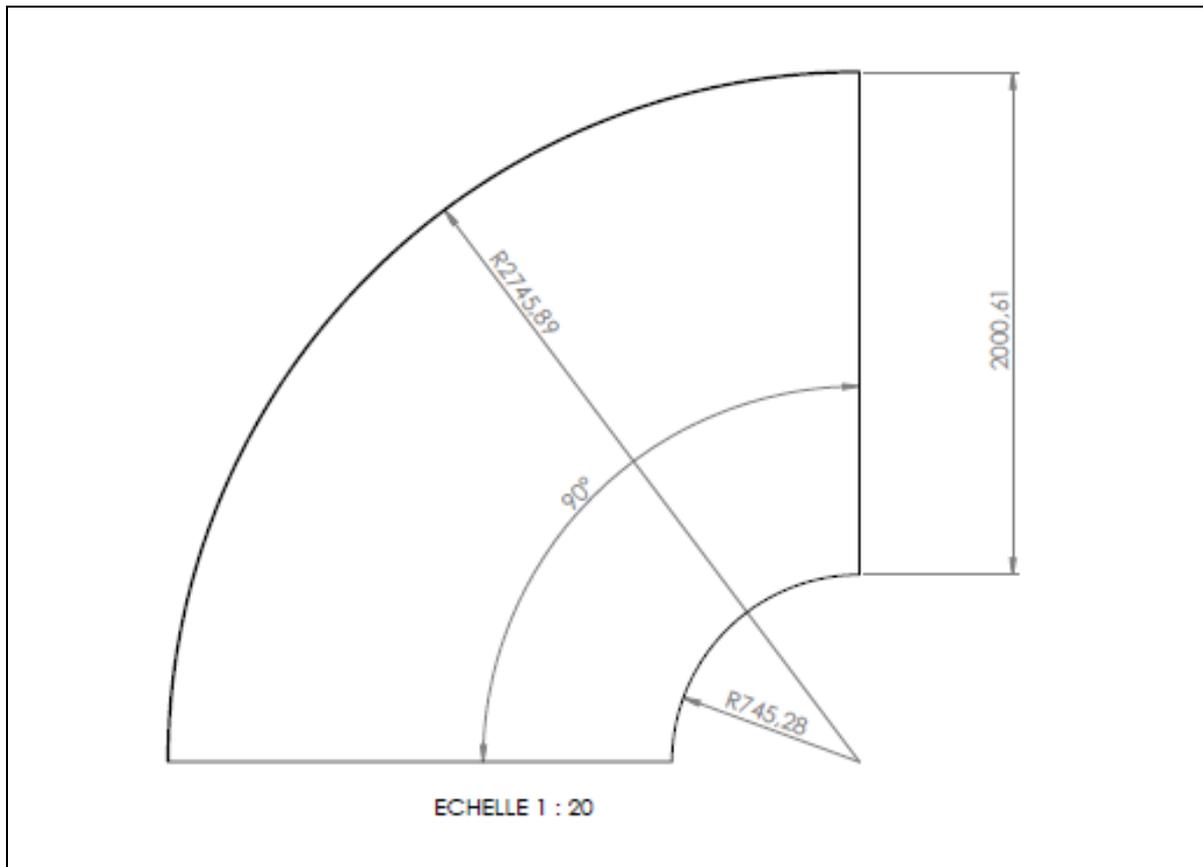


Figure IV.3 Forme et dimension de la tôle de cône apprêt découpage

C. Les goussets :

Les goussets sont découpés dans une tôle d'épaisseur de 10 mm comme les figures suivantes le montre :

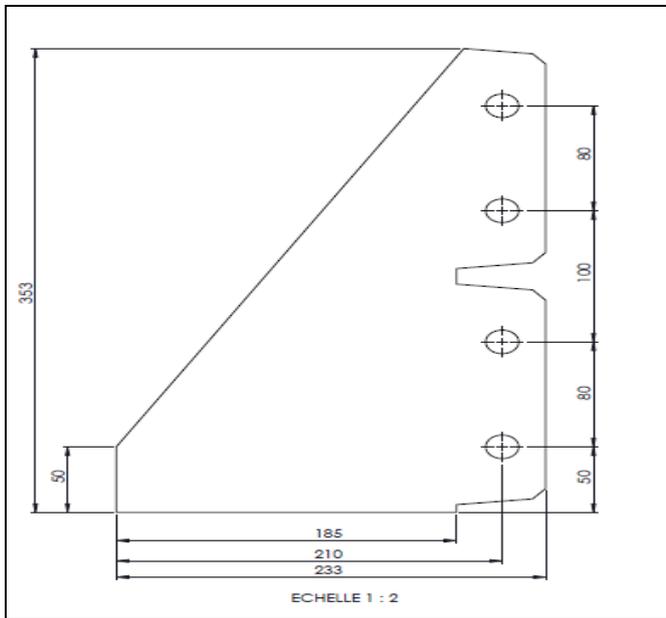


Figure IV.4 gousset perses

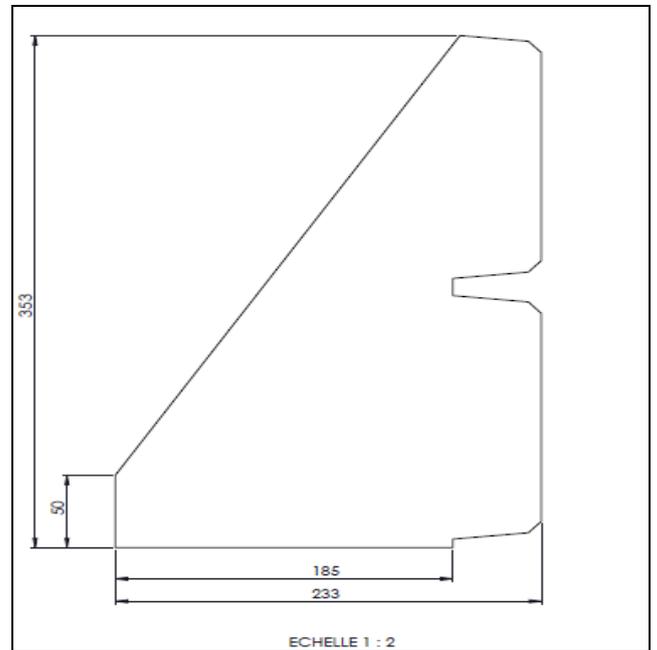


Figure IV.5 gousset non perses

D. Le toit :

Comme on a vu dans le chapitre II, le toit de notre silo se compose de deux différentes parties (partie latérale et partie centrale). Le coupage des parties de toit se fait dans une tôle larmée de 7 mm, leur forme sont les suivantes :

- La partie latérale :

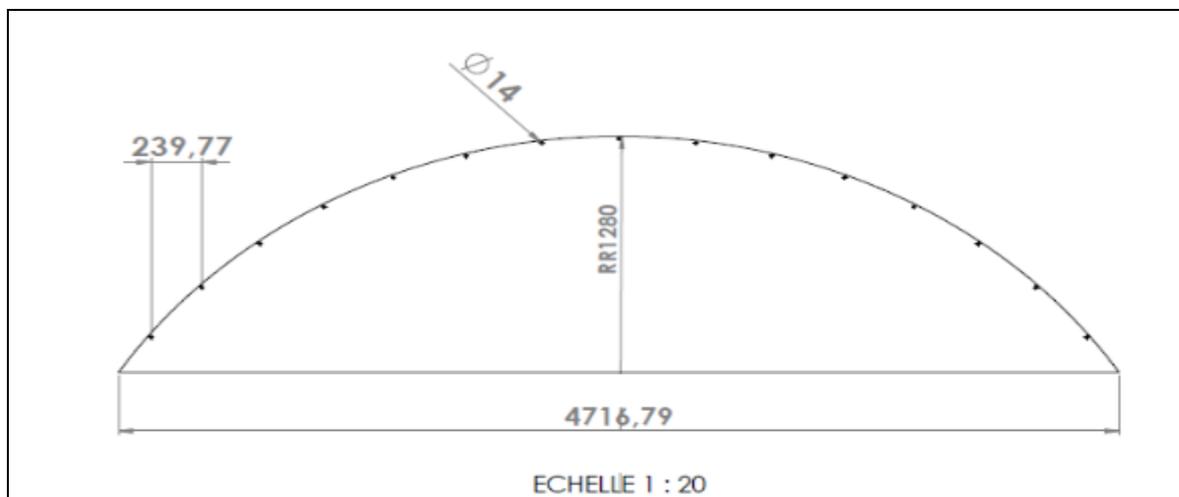


Figure IV.6 Dimension de la partie latérale de toit

- La partie centrale :

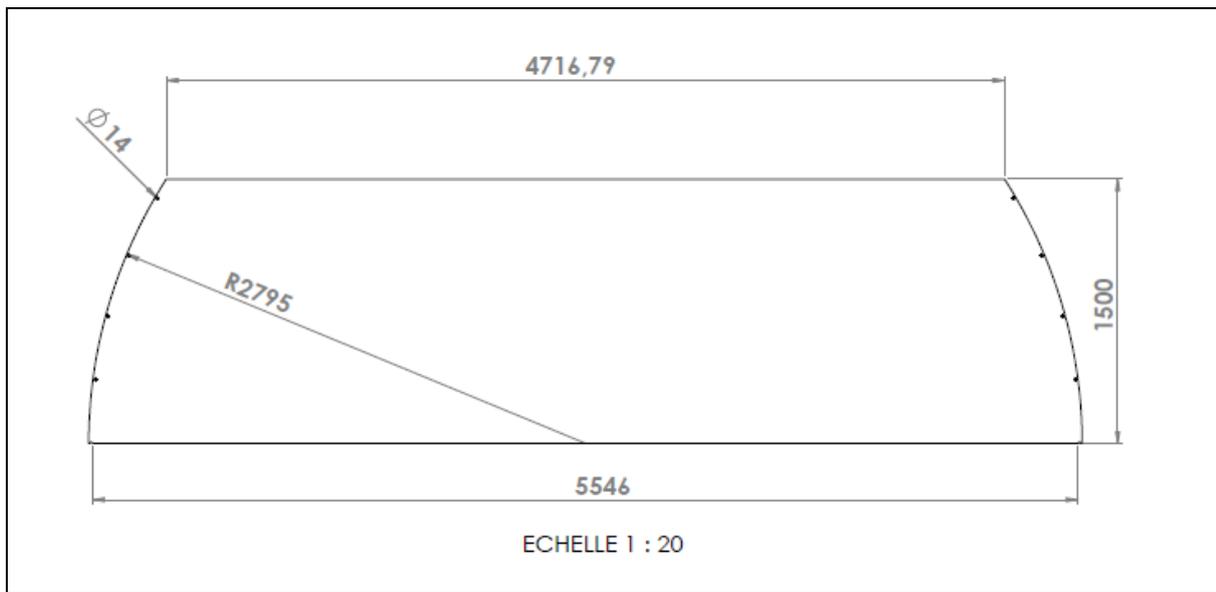


Figure IV.7 Dimension de la partie centrale de toit

E. La trémie :

La trémie de notre silo se compose d'une seule partie et elle est coupée dans une tôle de 4 mm (figure IV.8)

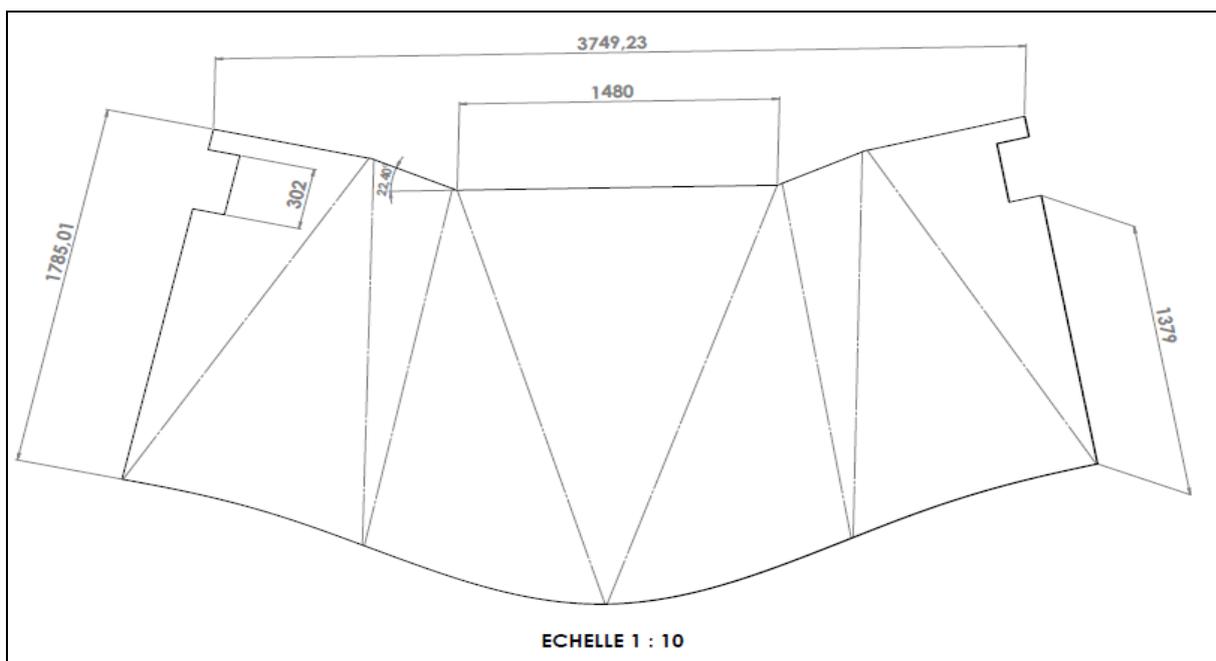


Figure IV.8 Les dimensions de la tôle de trémie apprêt coupage

IV.2 Le cintrage ou roulage des tôles : [14]

Le but de cintrage ou roulage consiste à donner une forme cylindrique ou conique à une tôle, cette forme peut être totale (cintrage fermé) ou partielle (cintrage ouvert). La forme est obtenue par l'action en porte à faux d'une pression, soit que la pièce soit animée d'un mouvement de translation par l'entraînement des rouleaux (cintrage sur rouleuses), soit que la pièce reste localement fixe (cintrage sur presse plieuse).

Les machines à rouler les plus courantes sont actuellement celles du type planeur à quatre rouleuses avec adaptation d'amorçage. Un dispositif articulé du rouleau supérieur permet la sortie des pièces présentant un cintrage fermé.

IV.2.1 Avantages des rouleuses à quatre rouleaux :

- Dégauchissement de la tôle par rapport à la génératrice d'un des rouleaux cintrants.
- Serrage de la tôle entre les rouleaux d'entraînement pendant les opérations de déroulage.
- Formage des cônes en continu à trois rouleaux où l'un des rouleaux latéraux pour les machines à quatre rouleaux

IV.2.2 Cintrage de la virole :

Pour une portion de virole de 90° , le cintrage se fait avec une cintruse de type planeur à quatre rouleaux, les rouleaux entraîneurs E1 et E2 sont situés sur des plans verticaux et leur pression sur la pièce permet son entraînement. Le cylindre formeur F1, entraîné par contact,

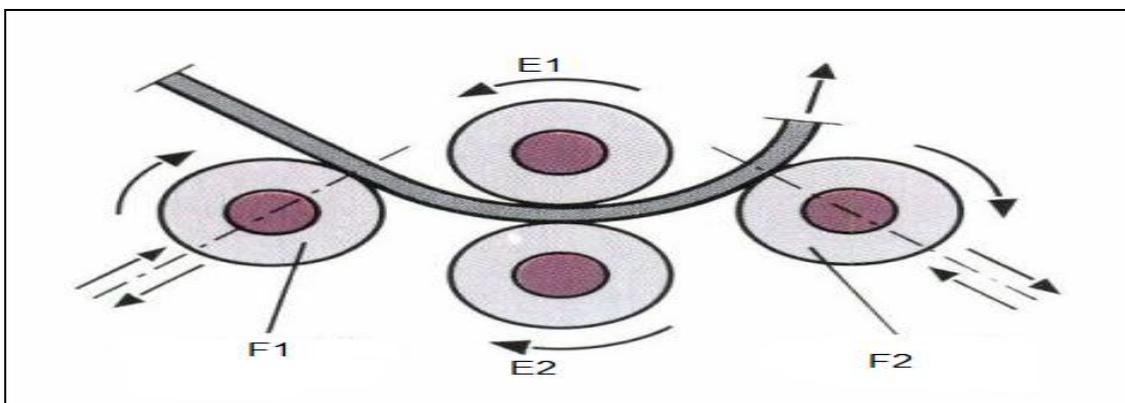


Figure IV.9 le cintrage de la virole

permet d'obtenir le rayon de cintrage par suite de son déplacement oblique en translation, ce type de roulage permet un amorçage dès la rentrée des pièces, le rouleau F2 permet le roulage de sortie et évite ainsi le retournement pour le formage de l'extrémité.

IV.2.3 Le cintrage de cône :

Pour réaliser un cône sur la rouleuse à 4 rouleaux, le rouleau inférieur central s'incline et ne pince que la partie postérieure de la tôle, là où le diamètre du cône est le plus grand, et l'entraîne plus rapidement tout en aidant le côté le plus long (développement) à avancer.

Le dispositif opposé, au contraire, qui aide la tôle à tourner et la guide selon la géométrie du cône (du côté correspondant au diamètre le plus petit), ralentit l'avancement de son développement le plus court. Les rouleaux latéraux de la machine doivent être inclinés pour que la géométrie du cône soit correcte.

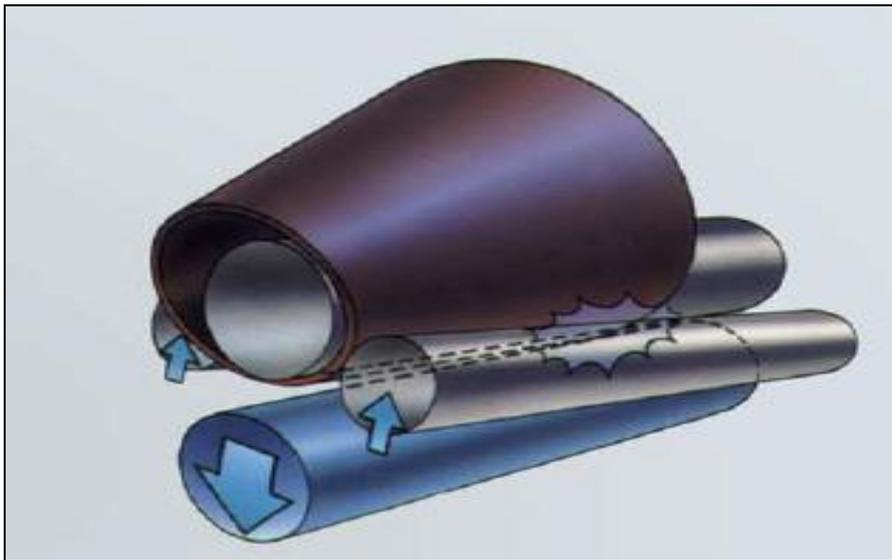


Figure IV.10 le cintrage du cône

Comme notre cône est composé de quatre portions assemblées, alors le cintrage d'une portion va être ouvert de 90° .

IV.3 Pliages de la tôle de trémie : [15]

Le pliage est une opération de conformation à froid qui consiste à déformer une tôle plane en changeant la direction de ses fibres de façon brusque suivant un angle.

Il existe plusieurs techniques pour plier une pièce : pliage en l'air dans une presse-plieuse, pliage en frappe, pliage sur plieuse à sommier ou universelle...

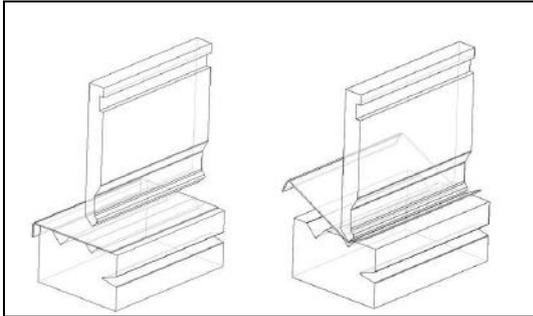


Figure IV.11 Pliage sur presse plieuse

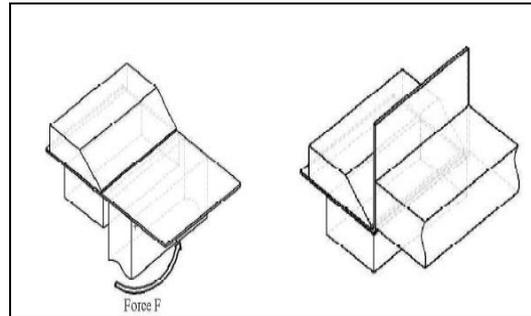


Figure IV.12 Pliage sur plieuse universelle ou a sommier

IV.3.1 La cotation de pliage :

En pliage, plusieurs cotations apparaissent : la longueur d'un bord plié, le rayon de pliage, L'angle de pliage, la longueur de pliage, etc. ... Nous allons passer en revue tous ces paramètres.

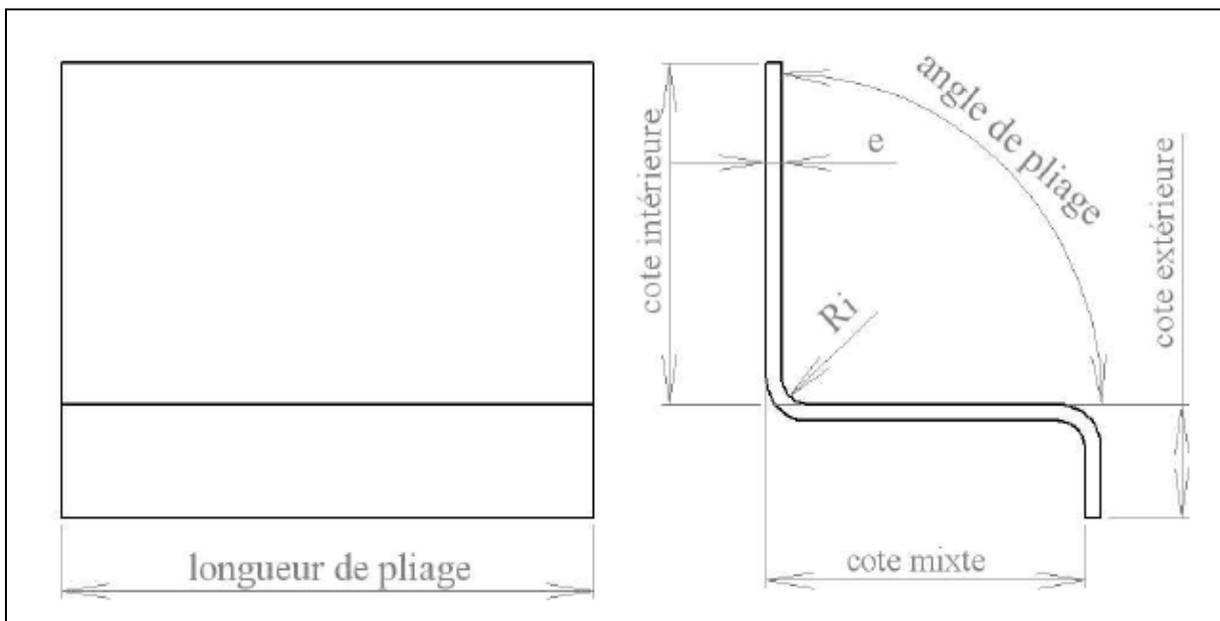


Figure IV.13 La cotation d'une pièce pliée.

A. Le rayon de pliage Ri :

Le rayon de pliage est défini selon la machine employée et les contraintes du dessin de la pièce. La plupart du temps, le dessin n'impose pas de rayon. C'est la machine utilisé qui définira à ce moment sa valeur. On note que le rayon intérieur possible varie aussi en fonction de la matière et de son coefficient d'allongement.

Retenons que plus la matière est malléable, plus le rayon intérieur pourra être petit, sans que l'on observe des défauts de criquage (cassure à l'extérieur du pli).

Ce rayon dépend :

- de la nature du métal (acier, aluminium, cuivre...).
- de l'épaisseur à plier.
- de l'état de malléabilité.
- de l'orientation des fibres.

Exemple de choix de rayon minimum en fonction du pourcentage d'allongement de la matière :

- $Ri = e$ si 33 %
- $Ri = 2 e$ si 20 %
- $Ri = 3 e$ si 14 %
- $Ri = 4 e$ si 12 %
- $Ri = 5 e$ si 8 %
- $Ri = 6 e$ si 7 %

B. L'angle de pliage :

L'angle de pliage ou l'angle du pli est défini par le dessin de définition de la pièce et peut être réalisé suivant les capacités machine. L'angle le plus travaillé est celui de 90°.

C. La longueur de pliage :

La longueur du pli est aussi appelé ligne de pliage. Ce paramètre fait varier la force à appliquer pour un pli. Plus la longueur est grande, plus grande sera la Force nécessaire.

IV.4 L'assemblage par soudage : [16]

Pour l'assemblage de quelques éléments de notre silo comme les renforts sur les véroles et virole avec cône, on a utilisé l'assemblage par soudage.

IV.4.1 Le soudage manuel à l'arc :

Le principe de la soudure à l'arc tient dans le principe de l'élévation de température au point de fusion par l'utilisation d'un arc électrique.

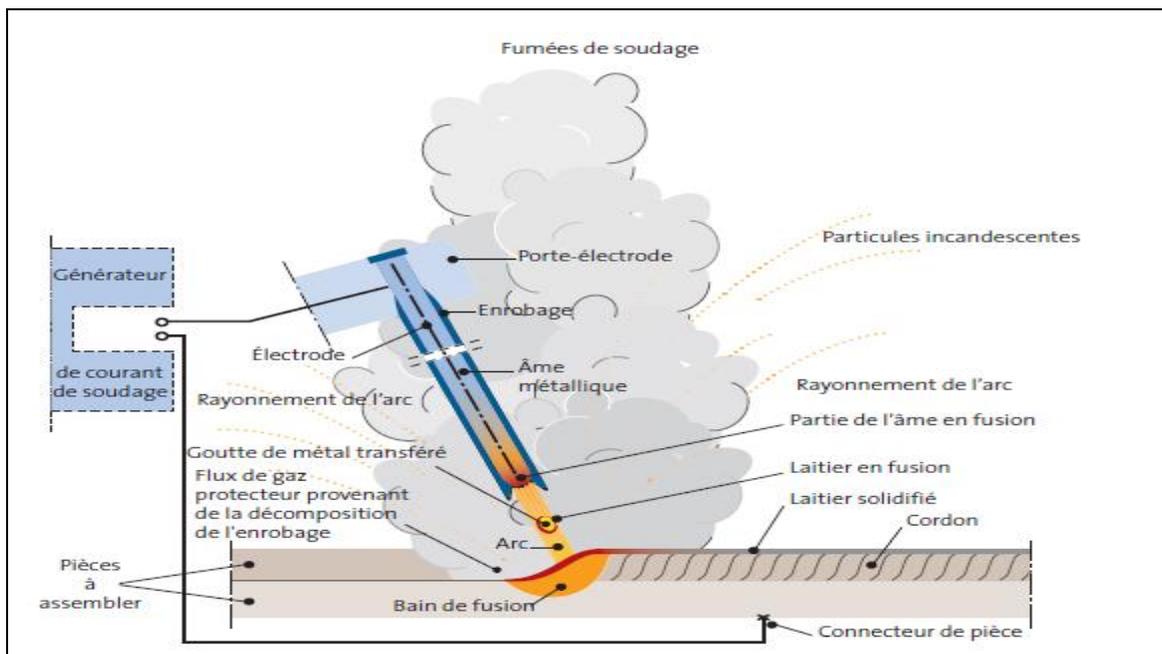


Figure IV.14 soudage manuel à l'arc

C'est l'échauffement créé par la résistivité des métaux parcourus par l'électricité qui élève la température au point de soudure jusqu'à celle requise pour la fusion du métal.

Le poste à souder délivre un courant électrique (alternatif ou continu) :

- La pièce à souder est reliée à un pôle et sur le second pôle c'est une électrode qui transporte le courant électrique.
- L'opérateur manœuvre le porte-électrode pour amener l'électrode à frôler la surface de la pièce à souder.
- L'arc électrique qui se crée provoque l'échauffement du métal de la pièce à souder et la fonte éventuelle de l'électrode.

IV.4.1.1 Le matériel de soudure manuel à l'arc :

Le matériel de soudure à l'arc se compose d'un poste à souder à l'arc qui est un générateur électrique relié par un câble à la pièce à souder et par un autre au porte-électrode.

L'électrode de soudure peut être soit un fil continu : le fil à souder, soit une électrode de soudure de différents métaux et tailles selon le métal à souder et le type d'électrode fusible (fondant lors de la soudure) ou non fusible (sans perte de matière de l'électrode lors de la soudure) dans ce cas, un métal d'apport est nécessaire par l'utilisation de baguettes à souder.

L'arc électrique dégageant de la chaleur, mais aussi un arc lumineux éblouissant, le masque à souder est la base de l'équipement de protection.

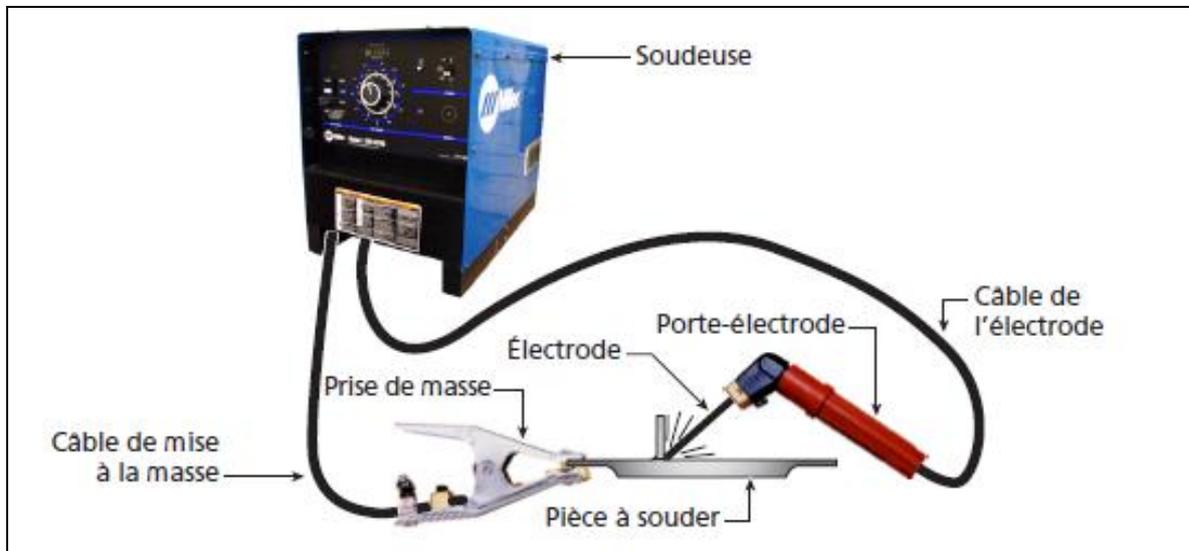


Figure IV.15 Matériels de soudure manuelle à l'arc

IV.4.2 Soudure semi-automatique :

La soudure semi-automatique se distingue par le recours comme électrode à un fil fusible continu en lieu et place de l'électrode, si le fil fusible est fourré ou non d'un procédé dégageant un gaz inerte ou actif durant la fusion on parlera de soudure MIG ou soudure MAG.

Le poste à souder délivre un courant électrique (alternatif ou continu). La pièce à souder est reliée à un pôle et sur le second pôle c'est le fil à souder qui transporte le courant électrique. L'opérateur manœuvre le porte-électrode pour amener le fil à souder à frôler la surface de la pièce à souder.

- L'arc électrique qui se crée provoque l'échauffement du métal de la pièce à souder et la fonte du fil à souder.
- L'avance en continu du fil à souder est assurée par des rouleaux d'avance automatique qui dévident la bobine de stockage de fil à souder.

Bien évidemment, si le fil à souder entrait en contact avec la pièce à souder, le dispositif serait en court-circuit d'où les caractéristiques et protections internes du poste à souder.

IV.4.2.1 Le matériel de soudure semi-automatique :

Le matériel de soudure semi-automatique se compose d'un poste à souder à l'arc qui est un générateur électrique relié par un câble à la pièce à souder et par un autre au porte-électrode.

- le poste à souder semi-automatique est équipé d'un porte-bobine de fil à souder ;
- le porte-électrode est une torche à souder munie des rouleaux d'avance du fil ou peut emporter une petite bobine (spool gun).

L'arc électrique, exclusivement alimenté en courant continu (CC), jaillit entre l'extrémité du fil fusible (pôle « + ») et les pièces à souder (pôle « — »). Le dévidage du fil à vitesse constante détermine l'intensité du courant fournie par le poste à souder qui doit être autorégulée.

IV.4.2.2 Avantage et inconvénients du procédé de soudage semi-automatique :

- Rentabilité du procédé.
- Vitesse très élevée en soudage.
- Taux de dépôt de métal élevé.
- Longueur possible d'un cordon sans point d'arrêt très important.
- Pas de décrassage du laitier.
- Possibilité de soudage dans toutes les positions.

V. Contrôle de soudage :

V.1 Introduction :

Quel que soit le procédé de fabrication, pour obtenir des produits de qualité bien définie et constante, il est important de faire un contrôle de soudage. A CR-METALE il procède à trois contrôles (examen visuel, contrôle par ressuage, et les ultrasons) pour vérifier l'état de soudage.

V.2 Etapes de contrôle du soudage : [18]

N'opérer qu'un contrôle final conduit, en effet, à constater qu'on a produit des pièces non conformes, lorsqu'il est trop tard pour l'éviter. Ceci est particulièrement vrai en soudage, où les facteurs qui agissent sur la qualité sont nombreux et complexes. L'objectif du contrôle est de garantir la bonne exécution de l'assemblage d'une construction.

Il s'applique à :

- la prévention des défauts
- la détection et localisation des défauts
- l'évaluation du degré de gravité des défauts
- l'acceptation ou le refus de la pièce, suivant l'interprétation des défauts.

Le contrôle doit s'exercer à trois moments bien distincts :

- avant soudage
- pendant soudage
- après soudage

A. Le contrôle avant soudage a pour but de prévenir les défauts. Il portera sur :

- la qualité du métal d'apport (compatibilité avec le métal de base, état de surface, propriétés mécaniques, nature et dimension)
- les gabarits (d'assemblage, de vérification des cordons)

- les séquences de soudage (ordre des diverses soudures, sens de réalisation)
- le matériel de soudage (état, puissance, les réglages, etc...)
- la qualification du soudeur (habileté manuelle, niveau technologique, essais dans les conditions de soudage du type d'assemblage)
- la qualification des contrôleurs.

B. Le contrôle pendant le soudage a pour but de s'assurer que les règles d'une bonne exécution du joint sont respectées. Il portera sur :

- La qualité du soudage
- La nature et dimension du métal d'apport (soudabilité, état de surface, propreté)
- L'état du joint réalisé (aspect conforme du cordon, dimensions des gorges, pénétration, propreté, écartement des bords)
- La disposition des passes (leur nombre, le sens de réalisation)
- Les cadences de soudage (vitesse, interruptions entre passes)
- Les déformations (décalage des pièces)

C. Le contrôle après soudage a pour but de vérifier que le joint exécuté est bien conforme aux exigences de la construction. Il portera sur :

- La mise en œuvre des contrôles appropriés en conformité avec la réglementation
- l'analyse des résultats des divers contrôles effectués
- L'instruction des dossiers « constructeurs » ou qualité attestant de la bonne réalisation des fabrications.

On distingue essentiellement trois méthodes de contrôle pour les soudures :

- 1) Non destructifs (Contrôle ne modifiant pas l'état de la pièce)
- 2) Semi - destructifs (on pratique une entaille, un perçage dans le joint soudé ou on prélève un petit échantillon du joint qu'on rebouche par soudage)
- 3) Destructifs (on découpe la pièce, généralement ce type de contrôle est effectué sur des éprouvettes)

V.3 Les techniques de contrôle :

Pour le contrôle de soudage des silos on n'a utilisé que des méthodes de contrôle non destructif des assemblages, qui sont couramment utiliser :

- Le contrôle visuel
- Le ressuage
- La radiographie

V.3.1 Examen visuel :

L'examen visuel de l'endroit et de l'envers des soudures peut donner un certain nombre de renseignements précieux : régularité d'aspect du métal déposé, pénétration, dénivellation des bords, caniveaux, excès ou manque de métal, position et aspect des reprises, piqûres, rochage, fissures...

On peut être conduit, pour déceler certains défauts peu visibles, à utiliser des loupes simples, des loupes binoculaires munies ou non de dispositifs éclairants.

Pour l'examen intérieur de corps creux, on utilise des endoscopes, appareils comprenant des jeux de miroirs avec oculaire d'observation et munis d'une source lumineuse.

On peut faire usage de calibres lorsque des tolérances de dimensions des soudures doivent être respectées (surépaisseurs, gorge des soudures d'angle, ..).[18]

V.3.1.1 Les instruments couramment utilisés : [18]

- Loupe grossissante de 2 à 5 fois
- Jeu de jauges ou cales de 0,1 à 3 mm
- Jauge à vernier ou calibre de soudure



Figure V.1 Mesureur d'angle
Calibre d'épaisseur

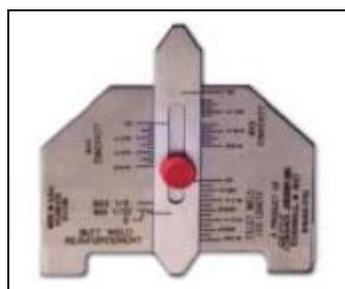


Figure V.2 Jauge de
mesure



Figure V.3 Calibre selon
norme EN 970

V.3.1.2 Avantage et inconvénients :

- L'avantage est que c'est une mise en œuvre très rapide, et coût pas très onéreux.
- L'inconvénient est qu'elle ne permet de contrôler que les défauts d'aspect, les dimensions et les trous et fissures sont apparents.[18]

V.3.2 Le ressuage : [19]

C'est un procédé qui permet de déceler les défauts de compacité débouchant en surface qui sont parfois suffisamment fins pour échapper à l'examen visuel.

Dans le domaine du soudage, le contrôle par ressuage est donc fréquemment utilisé pour la recherche des défauts superficiels.

V.3.2.1 Principe :

Certains produits liquides à faible tension superficielle ont la propriété de s'étendre très facilement sur les surfaces où ils sont déposés et de pénétrer dans les plus fins défauts de compacité qu'elles comportent. Le pétrole ou le gas-oil par exemple ont cette propriété.

De tels liquides dits « pénétrant » mis en contact sur la surface d'une pièce à contrôler s'infiltreront dans les moindres défauts en quantité relativement importante si le temps d'imprégnation est suffisant.

Après cette première période, on procède à l'enlèvement du liquide pénétrant de la surface de la pièce. Ce nettoyage n'a cependant pas éliminé le liquide contenu dans les petites cavités invisibles à l'œil. En recouvrant la surface à examiner d'une fine couche de poudre absorbante, le liquide emprisonné imbibe la couche de poudre et provoque localement une tache marquant chaque emplacement de défauts débouchant. C'est le phénomène de ressuage.

V.3.2.2 Mise en œuvre :

- 1) Nettoyage rigoureux et efficace avec brosse métallique et dégraissage soigné avec solvant volatil non chloré de la surface de pièce à contrôler. Vérification du séchage complet de l'ensemble.

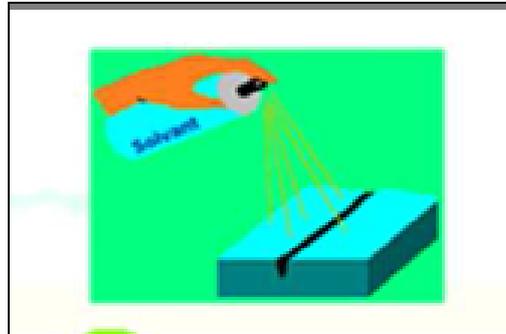


Figure V.4 Nettoyage préalable

- 2) Application par pulvérisation du liquide pénétrant coloré ou fluorescent sur toute la surface à examiner.

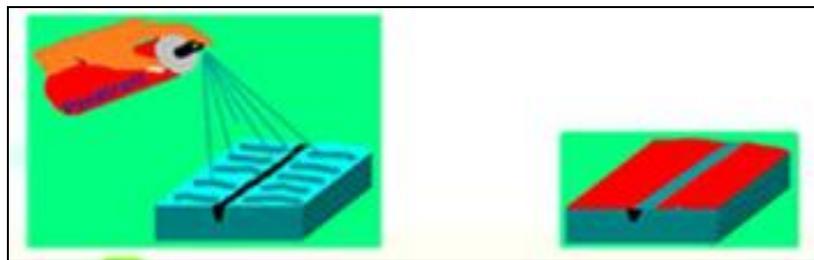


Figure V.5 Application du pénétrant et imprégnation

- 3) Après avoir respecté le temps d'imprégnation, élimination de l'excès de pénétrant sur la surface de la pièce à contrôler par rinçage à l'eau ou par un solvant spécial. Séchage complet avant interprétation éventuelle des défauts.

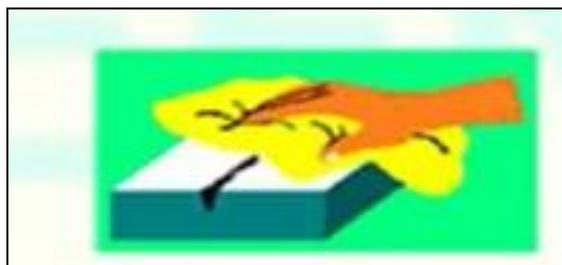


Figure V.6 Elimination du pénétrant en excès

- 4) Application par pulvérisation du révélateur à sec ou en suspension dans un solvant volatil en une couche mince et uniforme. Le révélateur pompe le pénétrant resté dans les discontinuités des défauts débouchant. Des taches colorées apparaissent à l'endroit des défauts.



Figure V.7 Application du révélateur

- 5) Interprétation du ressuage dans un délai de 7 à 30 minutes après application du révélateur sous un éclairage de 500 lux minimum pour les pénétrants colorés. Interprétation sous éclairage ultraviolet pour les pénétrants fluorescents.

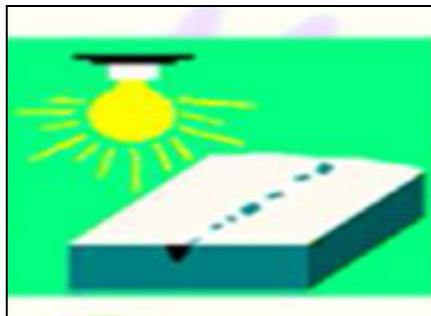


Figure V.8 Examen

- 6) Nettoyage et élimination complète des traces de produits, séchage et remise en état de la pièce contrôlée.

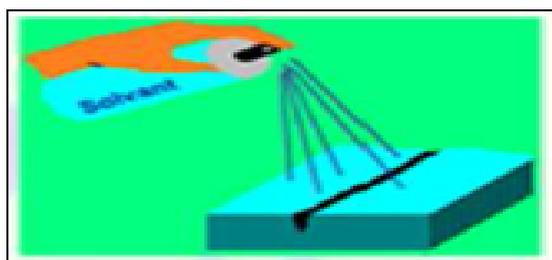


Figure V.9 Nettoyage finale

V.3.2.3 Les avantages et les inconvénients :

A. Avantage :

- Facilité de mise en œuvre avec les produits pré émulsionnés
- Facilité de mise en œuvre sur les chantiers
- Bonne sensibilité de détection des défauts débouchant
- Contrôle relativement économique et rapide

B. Inconvénients :

- Impossibilité de révéler les défauts internes et obstrués
- Nettoyage rigoureux des pièces à contrôler
- Les opérateurs doivent posséder une grande expérience
- Produits inflammables volatils et nocifs
- Gestion des déchets liquides rejetés à l'égout

V.3.3 Les ultrasons : [20]

La méthode repose sur la propagation d'une onde vibratoire, engendrée par un palpeur piézoélectrique. Elle est réfléchiée dès lors qu'elle rencontre un milieu différent de la nature du milieu de propagation.

V.3.3.1 Principe :

Un palpeur piézo-électrique émet une impulsion acoustique d'une fréquence supérieure à 20 kHz dans la pièce à contrôler.

En cas d'une déféctuosité dans la pièce cette impulsion est réfléchiée ("écho d'impulsion") et cette réflexion peut être reçue par le même ou un autre palpeur. Connaissant la vitesse du son qui est une constante pour chaque matériau homogène il nous est alors possible de calculer la distance qui sépare la déféctuosité du palpeur en mesurant le temps de parcours de l'impulsion.

V.3.3.2 Domaine d'application :

Le contrôle par ultrasons est applicable à de nombreux matériaux pourvu qu'ils ne présentent ni une trop forte atténuation ni une anisotropie importante. Les matériaux métalliques, thermoplastiques, composites, céramiques peuvent être contrôlés par ce procédé. Les ultrasons permettent la détection de tous défauts engendrant une variation locale des propriétés ultrasonores de la pièce. Le contrôle des soudures peut être effectué entre -20°C et 150°C . Il existe des solutions en dehors de cette gamme mais plus complexe à mettre en œuvre.

Le contrôle ultrasonore est notamment utilisé pour le contrôle :

- des pièces moulées : retassures, vermiculures, variations locales de structure, ségrégations, porosités...
- des pièces forgées : retassures, criques, repli de forge. L'orientation du faisceau ultrasonore doit prendre en compte le fibrage de la pièce,
- des produits laminés et étirés : dédoubleures, ségrégations, repliures, par ultrasons.
- des soudures avant et après traitement thermique.

V.3.3.3 Mise en œuvre :

L'opérateur déplace le "palpeur" sur la surface de la pièce à contrôler (préalablement enduite d'un produit de couplage) selon un mode opératoire appelé plan de sondage qui permet d'assurer l'exploration de tout ou partie de la pièce à contrôler.

Pendant cette exploration, l'opérateur doit surveiller l'apparition d'échos sur l'écran de contrôle (par ex: écran d'oscilloscope) dont la position (la position permet de localiser le réflecteur) et l'amplitude (l'amplitude de l'écho permet d'estimer l'importance du défaut) sont révélateurs d'une anomalie.

Lorsque le seuil de prise en compte est atteint, il est alors nécessaire de caractériser l'anomalie à l'aide d'une pièce de référence (témoin) afin d'identifier la nature du défaut.

V.3.3.4 Les avantages et les inconvénients :

A. Avantage :

- Contrôle possible de compacité de la totalité d'un volume donné
- Positionnement des indications détectées dans l'épaisseur
- Haute sensibilité de détection des défauts, notamment pour la recherche des défauts plans
- Localisation et dimensionnement des défauts
- Examen à partir d'une seule face souvent suffisant
- Détection instantanée, se prête bien à l'automatisation
- Transportabilité

B. Inconvénients :

- Pour les contrôles "manuels" une grande expérience des opérateurs est nécessaire
- Méthode impliquant un très haut niveau de technicité
- Sensible à la géométrie (formes, rugosité, zones mortes)
- Sensible à la nature et à l'orientation des défauts
- Technique souvent très coûteuse (investissement, temps de contrôle)

CONCLUSION GENERALE

Faire un projet d'ordre industriel, nous a mis en confrontation directe avec une situation professionnelle réelle de taille.

L'objectif principal de travail était de faire un dossier d'étude complet sur le silo métallique, partant de la recherche bibliographique sur les différents types et forme existant, puis l'études technologique des composant les normes et codes spécifique , arrivant au calcul de vérification des parties les plus sollicitées (plus dangereuses) à savoir la partie I de la virole et le cône de vidange, et en fin de contrôle et vérification des soudures d'assemblage .

Les résultats ont été satisfaisants, surtout par rapport à la documentation qui manque cruellement, aussi l'acquisition des normes et codes de calculs spécifiques et leur exploitation qui nous a pris un temps supplémentaire.

Néanmoins, malgré ces difficultés, et l'occupation du personnel du CR Métal par rapport au volume de travail à réaliser pour satisfaire les commandes qui ne cesse d'augmenter, j'ai eu la chance de travailler avec une équipe dynamique et très compétente qui ma permet d'acquérir une polyvalence dans mes actions sur le terrain, d'aborder les domaines aussi variés que les méthodes, la qualité, la logistique, et même les relations humaines.

On note que tout travail laisse derrière lui des recommandations pour des améliorations futures, à savoir dans notre cas :

- Faire de l'optimisation sur la structure, surtout sur l'épaisseur des tôles.
- Faire des améliorations sur la conception de quelques parties comme le toi.
- Ajouter des accessoires au silo pour le rendre plus facile à utiliser, plus performant et plus sécurisé.

Nomenclature

Rm	Résistance à la traction à température ambiante
Rp0,2	Limite élastique à température ambiante
E	Module d'élasticité à température ambiante
e	Epaisseur de la tôle
V	Coefficient de poisson
ρ	masse volumique
H	Hauteur totale de la cellule
D	Diamètre de cercle inscrit dans le silo
A	Aire de la section droite de la cellule
L	Périmètre de la section droite de la cellule
r_h	Rayon hydraulique sans raidisseur de la cellule
α	Inclinaison de la paroi de la trémie
T	Hauteur de cône
e_x	Excentrement de l'orifice de vidange
R	Distance entre le centre de la cellule et la paroi, sur l'axe passant par le centre de la cellule et de l'orifice
γ	Poids volumique
φ	angle de frottement interne
ψ	Angle de talus naturel
C	Coefficient de rugosité
μ	Coefficient de frottement sur la paroi
δ	Angle de frottement de la matière contre la paroi
v	Pression verticale
z	altitude équivalente
n	pression normale à la paroi
t	Action de frottement contre la paroi
Ar	Section résistance
Nb	Nombre de boulon
σ_e	Limite élastique
σ_c	Contrainte de cisaillement
σ_n	Contraint de traction
x_{th}	Largeur participante réelle disponible
M_f	Moment de flexion max
σ_f	Contrainte de flexion

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]: F. Nateghi and M. Yakhchalian . Seismic behavior of silos with different height to diameter ratios considering granular material-structure interaction .December 15, 2011.
- [2]: Hervé Bourie . www.euromat.fr , [en ligne] 2011.
- [3]:GUERTON SA .www.guerton.com, [en ligne] 2010.
- [4]:silo. Wikipédia [en ligne]. Mise à jour le 22 Mai 2014.
<http://en.wikipedia.org/wiki/Silo>
- [5]:Sinex .http://www.sinex-industrie.com/v1/images/stories/pdf/NC_02_08_fr.pdf, [en ligne] 26.11.2003.
- [6]:BARTALI.E.H. [Http://www.anafide.org/doc/HTE%20103/103-4.pdf](http://www.anafide.org/doc/HTE%20103/103-4.pdf), [en ligne].
- [7]:mulmix.http://www.mulmix.com/doc/silos_fondo_piano_fra.pdf, [en ligne].
- [8] : SUVA. <http://re.srb-group.com/web/images/pdf/infomaterialien/suva-f/01485-f.pdf> , [en ligne].
- [9] :http://ds.arcelormittal.com/repo/poutrelles_rails_tubes_parachevement_negoce/aciers_construction_presentation.pdf, [en ligne].
- [10] : l'Association française de normalisation.Norme NF P22—630.
- [11] : CM 66 et additif 80 ,deuxième édition, tirage 2005.
- [12] : l'Association française de normalisation. NF EN 10025-2 mars 2005
- [13] : l'Association française de normalisation.NF EN ISO 898-1 juin 2009
- [14] :http://www.davi.com/media/Files/81_mcb_francese.pdf
- [15] : Généralités sur le pliage des toles.http://lpmei.com/cd_bac_mei/Ressources/4-%20Ressource%20Mecanique%20-%20Fabrication/Pliage.pdf, [en ligne].

[16] :Procédésdesoudage(manuelsetsemiautomatiques).Chapitre2. http://www.csmofmi.com/IMG/pdf/1032_01_02_chap2.pdf, [en ligne].

[17] : Imad ABBAS .GUIDE CND LES TECHNIQUES DE CONTROLE NON DESTRUCTIF DES SOUDURES. Version 2010

[18] : <http://fr.scribd.com/doc/7177471/Le-Controle-Visuel-Et-Les-Criteres-d-Acceptation-d-Une-Soudure>, [en ligne].

[19] :ETS.MEC761.Essaimécaniquesetcontrôlenondestructif. https://cours.etsmtl.ca/mec761/Documents/Acetates/02_Ressuage.pdf. [En ligne].

[20]: Henri Walaszek, Pôle EPI . Les nouvelles techniques de contrôle non destructif: un atout pour votre entreprise
<http://www.cadarache.cea.fr/valorisation/pdf/3eme%20rencontre/04Henri%20WALASZEK%20CETIM.pdf>, [en ligne].