

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



## Mémoire de Mastère

Présenté à l'Université de Guelma

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures

Présenté par : BOUGHERARA CHOUAIB

BOUACHA IMANE

---

**Thème : CONCEPTION ET DIMENSIONNEMENT  
D'UN SILO DE STOCKAGE DE CIMENT**

---

Sous la direction de: Dr. BOUTELDJA FATHE

Juin 2011



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



## Remerciements

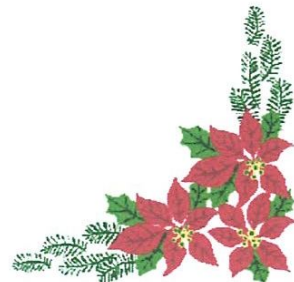
*Avant tout on tient nos remerciements à notre dieu tout puissant de nous avoir donné la foi, la force et le courage.*

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

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

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

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





## DEDICACE

Je remercie « **ALLAH** » le tout puissant qui m'a donné  
la foi et la force de mener ce travail à son terme.

Je remercie notre encadreur « **FATHE BOUTELDJA** »  
pour son aide, ses encouragements.

A ma mère qui a sacrifié toute sa vie pour nous et a  
mon père pour son soutien.

Et a tous mes frères **BILAL ET AYOUB** et mes sœurs  
qui ont contribué à la force qui m'a amené jusqu'à ici.

Je n'oublie pas mes amis : Abdellah, Hamza Naili,  
Hamdi, Fouad, Fateh, Ali, Alio Maarof,

Sofiane, Mouad, Elhowas, Balak, Taki, Rafik,

et les autres sans exception, mes cousins et tous mes  
camarades de promotion tous ceux qui m'ont aidé de  
prés ou de loin.

CHOUAIB.





## DEDICACE

Je remercie « **ALLAH** » le tout puissant qui m'a donné  
la foi et la force de mener ce travail à son terme.

Je remercie notre encadreur « **FATHE BOUTELDJA** »  
pour son aide, ses encouragements.

A ma mère qui a sacrifié toute sa vie pour nous et a  
mon père pour son soutien.

Et a tous mes frères Hamza et Toutou et mes sœurs  
Hanane et Saliha qui ont contribué à la force qui m'a  
amené jusqu'à ici.

Je n'oublie pas mes amis Fahima, Nahla et les autres,  
mes cousins et tous mes camarades de classe tous  
ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

IMANE.



# Sommaire

<b>SOMMAIRE.....</b>	
<b>LISTE DE FIGURES.....</b>	
<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>CHAPITRE I : SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE.....</b>	<b>4</b>
<b>1. GENERALITES.....</b>	<b>4</b>
<b>2. CLASSIFICATION DES SILOS.....</b>	<b>5</b>
2.1. Silos en béton armé.....	5
2.2. Silos en béton armé précontraint.....	7
2.3. Silos métalliques.....	7
<b>3. LES PROBLEMES DES SILOS.....</b>	<b>9</b>
3.1. Risques liés à la vidange.....	9
3.2. Accidents de silo.....	10
<b>CHAPITRE II : PRÉ-DIMENSIONNEMENT.....</b>	<b>13</b>
<b>1. PRESENTATION DU PROJET.....</b>	<b>13</b>
1.1. Géométrie et dimensions.....	13
1.2. Implantation et contraintes.....	13
1.3. Données géotechniques.....	13
1.4. Bases de calcul.....	14
1.5. Caractéristiques du ciment stocké.....	14
<b>3. DEFINITION DES CHARGES.....</b>	<b>16</b>
3.1. Introduction.....	16
3.2. Poussées du ciment.....	16
3.3. Le vent.....	20
3.4. La neige.....	26
3.5. Surcharge d'exploitation.....	27

3.6. Charges permanentes .....	27
<b>4. PRE-DIMENSIONNEMENT DES VARIANTES .....</b>	<b>28</b>
4.1. Variante 1 : Silo en béton armé.....	28
4.2. Variante 2 : Silo en béton précontraint .....	31
4.3. Variante 3 : Silo métallique.....	32
<b>5. CHOIX DE LA VARIANTE AVANTAGEUSE.....</b>	<b>35</b>
<b>CHAPITRE III : CONCEPTION DE LA VARIANTE RETENUE .....</b>	<b>37</b>
<b>1. CONCEPTION DU SILO.....</b>	<b>37</b>
1. 1. Introduction.....	37
1.2. Principe de la chambre d'expansion .....	38
1.3. Silo à chambre d'expansion simple.....	40
1.4. Silo avec chambre d'expansion et d'inspection.....	41
1.5. Silo de stockage muni d'un système de multi-extraction.....	42
1.6. Silo multi-stockage.....	43
1.7. Règles de conception.....	44
1.8. Conception de la variante retenue .....	44
<b>2. DEFINITION DES PUSSEES VERTICALES SUR LE FOND DU SILO .....</b>	<b>46</b>
2.1. Pressions verticales .....	46
2.2. Pressions sur la paroi du cône inversé.....	47
<b>CHAPITRE IV : MODELISATION ET DIMENSIONNEMENT.....</b>	<b>50</b>
<b>1. MODELISATION PAR ELEMENTS FINI (ROBOT).....</b>	<b>50</b>
1.2. Fût cylindrique .....	52
1.2. Cône inversé.....	53
1.3. Support du cône inversé .....	53
1.4. Dalle inclinée 1 .....	54
1.4. Dalle inclinée 2 .....	54
1.5. La couverture (dalle supérieure) .....	54
1.6. Introduction du poids propre.....	55

1.7. Introduction de la charge du vent.....	55
<b>2. DIMENSIONNEMENT DE LA STRUCTURE.....</b>	<b>57</b>
2.1. Combinaison d'actions.....	57
2.2. Calcul de la précontrainte.....	57
2.3. Présentations des résultats.....	60
2.4. Calcul des armatures passives.....	63
<b>CHAPITRE V : PHASES DE CONSTRUCTION.....</b>	<b>67</b>
Etapes de construction.....	67
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>71</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....</b>	<b>73</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>76</b>
Visite des silos « Amor ben Amor » .....	76



# Liste de figures

Figure 1 : Formes de silos et notation des dimensions selon EC1-Partie 4 .....	5
Figure 2 : Photos d'un silo individuel et des silos en batterie .....	6
Figure 3 : Photo des silos métalliques .....	8
Figure 4: schéma montre les détails de silo .....	15
Figure 5 : Actions dues au ciment .....	17
Figure 6 : Hauteur de référence $z_e$ dépendant de h et b .....	22
Figure 7 : Cpe pour différentes valeurs de $\alpha$ et de Re.....	24
Figure 8: facteur d'élanement $\psi\lambda$ en fonction de l'élanement et du taux de remplissage $\varphi$ .....	24
Figure 9 : Définition du taux de remplissage $\varphi$ .....	25
Figure 10 : Photo d'équipements installés sur le silo .....	27
Figure 11 : Schéma de ferrailage de la variante béton armé.....	30
Figure 12 . Conception des silos de petite taille .....	37
Figure 13 : Photos de réalisation de silos traditionnels .....	38
Figure 14 : Schéma de fonctionnement de la chambre d'expansion.....	39
Figure 15 : Modes d'écoulement dans les silos .....	39
Figure 16 : Schéma et photos du système d'aération sous pression.....	40
Figure 17 : Fonctionnement d'un silo à chambre d'expansion simple.....	40
Figure 18 : Système d'aération d'un silo à chambre d'expansion simple .....	41
Figure 19 : Fonctionnement d'un silo à chambre d'expansion et d'inspection .....	41
Figure 20 : Système d'aération d'un silo à chambre d'expansion et d'inspection.....	42
Figure 21 : Fonctionnement d'un silo muni d'un système multi-extraction.....	42
Figure 22 : Système d'aération d'un silo muni d'un système multi-extraction .....	43
Figure 23 : Schémas d'un silo multi-stockage .....	43
Figure 24 : Distance entre la paroi du silo et la base du cône pour les différentes variantes .....	44
Figure 25 : Schéma de conception du silo .....	45
Figure 26 : Photos d'un silo de stockage de ciment .....	45
Figure 27 : Actions sur le cône inversé (EC 1) .....	48
Figure 28 : Choix du type de structure sur Robot .....	50
Figure 29 : Création des éléments du silo .....	51
Figure 30 : Modélisation du silo par Robot .....	51
Figure 31 : Modélisation du fût cylindrique .....	52
Figure 32 : Introduction de $P_{he}$ et $P_{we}$ .....	53
Figure 33 : Introduction de $P_n$ et $P_t$ .....	53
Figure 34 : Support du cône inversé.....	54
Figure 35 : Chargement de la dalle inclinée 1.....	54
Figure 36 : La dalle inclinée 2.....	54
Figure 37 : Charge d'exploitation et charge de neiges appliquées sur la couverture.....	55

Figure 38 : Introduction du poids propre du silo complet .....	55
Figure 39 : Catégorie du silo vis-à-vis le calcul du vent .....	56
Figure 40 : Génération du vent en utilisant Robot .....	56
Figure 41 : Efforts internes $N_v$ , $M_v$ , $N_h$ , $M_h$ .....	60
Figure 42 : Cartographie des efforts internes $N_{xx}$ et $M_{xx}$ pour la combinaison la plus défavorable .....	61
Figure 43 : Cartographie des efforts internes $N_{yy}$ et $M_{yy}$ pour la combinaison la plus défavorable .....	61
Figure 44 : Déformation du silo amplifier sous la combinaison 4 .....	62
Figure 45 : schéma montre le ferrailage de la variante précontrainte (horizontal et vertical) .....	65
Figure 46 : Exécution du fût cylindrique par un coffrage glissant .....	68
Figure 47 : Exécution de la dalle inclinée et du cône inversé .....	68
Figure 48 : Avancement des travaux .....	68
Figure 49 : Fin d'exécution du fût cylindrique .....	69
Figure 50 : Silos métalliques de stockage de blé « BEN AMOR » .....	76
Figure 51 : Silo métallique de stockage de la farine « BEN AMOR » .....	77



# Introduction

# INTRODUCTION

---

## INTRODUCTION

Le ciment existe depuis le siècle des Romains, et il a beaucoup évolué avec le temps. Jusqu'à l'époque moderne, les recherches sur le ciment ont permis d'aboutir vers 1840 à une réelle fabrication des ciments modernes, et voir apparaître ensuite une architecture de béton coffré puis de béton armé. A nos jours le ciment devient plus important qu'auparavant, il est utilisé dans tous les travaux de construction comme une matière essentielle dans la composition du béton.

Le ciment est disponible à plusieurs types, qui sont utilisés pour former des bétons spéciaux suivant les besoins. Et pour fabriquer cette matière essentielle, il faut construire des cimenteries, ces dernières sont composées de plusieurs structures et machines. L'une de ces structures est les silos de stockage de ciment ou clinker.

Ces silos appartiennent à la famille des silos industriels, qui sont des réservoirs spéciaux servant à stocker le ciment lorsqu'il est sorti du broyeur, afin de le livrer en vrac ou en sac. La vidange du ciment se fait grâce à des supprimeurs qui sont installées au dessous du silo, ces machines poussent le ciment pour lui faire sortir.

Ces structures sont rarement réalisées, elles présentent un comportement plus au moins spécial parce qu'elles sont sollicitées par plusieurs types de charges, qui sont parfois compliquées à calculer. L'objectif de notre travail dans ce projet de fin d'étude consiste à étudier un silo de stockage de ciment en vue de son conception et dimensionnement.

Dans le premier chapitre de ce rapport, nous présentons une synthèse bibliographique sur les silos de stockage. Nous décrivons ces structures ainsi que ses différents types en expliquant les spécificités et les composants de chaque type.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons le pré-dimensionnement du silo qui consiste à définir l'épaisseur de la paroi du cylindre (composante principale). Ce prédimensionnement a été réalisé pour trois variantes définies en fonction du type de

# INTRODUCTION

---

matériau constituant afin de choisir la variante la plus avantageuse qui sera retenue par la suite pour la phase de conception et de dimensionnement. Une partie de ce chapitre sera consacré à la définition des charges régissant sur ce type de structures à savoir les charges dus à la matière ensilée (poussée horizontale et verticale, forces de frottement), le vent, la neige, la température... etc.

Dans le troisième et le quatrième chapitre, nous nous focaliserons sur la conception et le dimensionnement de la variante retenue. Nous présentons d'abord la conception, ensuite nous abordons les différentes phases de la modélisation du silo par le logiciel « Robot ». En dernier nous présenterons les résultats obtenues et l'exploitation de celles-ci pour réaliser le ferrailage de la structure.

Enfin, le dernier chapitre présentera les phases et les techniques de construction utilisée pour réaliser les silos de stockage de ciment.

# Chapitre I

## Synthèse bibliographique

## CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

### 1. GÉNÉRALITÉS

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 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, air pulsé...

Il existe plusieurs manières de classer les silos, la classification peut se faire selon :

- Le type de matériau constituant : bois, plastique, acier, béton armé...
- Les dimensions : hauteur, largeur, diamètre...
- La capacité de stockage : petites ou grandes capacités
- La forme du silo : polygonale, circulaire...
- ...

Généralement les silos sont classés selon le matériau constituant. L'Eurocode 1- partie 4 relatifs au calcul des actions dans les silos et réservoirs les classe en fonction de leurs dimensions. Il définit trois classes :

- Silos élancés : dont le rapport  $h/d_c \geq 1,5$  sachant que « h » est la distance entre l'orifice de la vidange et la surface équivalente et «  $d_c$  » est la dimension caractéristique d'une section (figure 1).
- Silos plats : dont le rapport  $h/d_c < 1,5$
- Silos circulaires à paroi mince : silo à section circulaire sans raidisseurs circulaires dont le rapport  $d_c/t > 200$  sachant que « t » est l'épaisseur de la paroi.



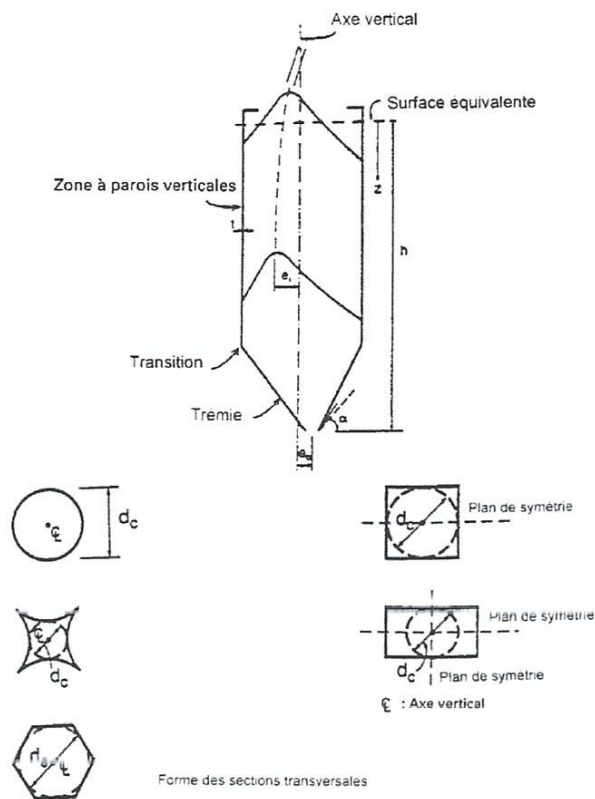


Figure 1 : Formes de silos et notation des dimensions selon EC1-Partie 4

Nous présentons dans ce qui suit la classification des silos en fonction du type de matériau constituant qui est la classification la plus classique et la plus utilisée.

## 2. CLASSIFICATION DES SILOS

Il existe trois grandes classes de silos selon le matériau constitutif : les silos en béton armé, en béton armé précontraint et les silos métalliques.

### 2.1. Silos en béton armé

C'est les silos dans la matière essentielle constitutif est le béton armé. Ils peuvent être réalisés individuellement ou en batterie (figure 2)



**Figure 2 : Photos d'un silo individuel et des silos en batterie**

Le béton armé présente des caractéristiques très intéressantes pour les silos de stockage :

- C'est un matériau durable n'exigeant ni revêtement ni entretien, donc pouvant être amorti sur une longue période, Il est particulièrement intéressant pour les silos en zones corrosives,
- C'est un matériau qui permet des constructions de grande hauteur (50 m voir plus pour 6 à 10 de diamètre) cela permet de réduire la surface au sol, ce qui est très intéressant notamment en zone encombrée où l'on cherche à optimiser au maximum l'emprise des structures,
- C'est un matériau économique, rapide et facile à mettre en œuvre,
- C'est enfin un matériau assurant une assez bonne isolation thermique du produit ensilé malgré les faibles épaisseurs mises en œuvre.

Le béton présente toutefois quelques inconvénients parties lesquelles on peut citer qu'il est un matériau poreux ce qui permet des échanges liquides et gazeux avec l'extérieur, ce qui posera des problèmes pour la matière ensilée souvent sensible à l'humidité (ciment, grains, farine, sucre...). Dans ce cas le silo doit subir un traitement intérieur ou/et extérieur de la paroi avec un revêtement spécial d'étanchéification.

## 2.2. Silos en béton armé précontraint

Pour ce type de silo la précontrainte peut être posée verticalement ou horizontalement ou les deux (horizontale et verticale). Généralement, les câbles sont ancrés à l'intérieur de la paroi afin de protéger ces derniers contre les effets climatiques et tous autres types d'agressions extérieures.

Les silos à précontrainte horizontale sont généralement construits à l'aide de coffrages glissants, les armatures étant des câbles de précontrainte incorporés dans le béton au fur et à mesure du coulage de celui-ci. Compte tenu du frottement des câbles sur la paroi, ces silos ont un diamètre limité généralement à 35 m.

La précontrainte verticale est utilisée généralement dans le cas des silos préfabriqués où la paroi est constituée à l'aide de viroles cylindriques superposées et réunies par des câbles verticaux de précontrainte, passant dans des tours prévus pour cela dans les éléments préfabriqués. Ce type de silos a une faible hauteur.

## 2.3. Silos métalliques

Les silos métalliques sont composés de cellules métalliques en tôles d'acier galvanisé ou d'aluminium planes ou ondulées, boulonnées ou serties, fixées sur un radier en béton étanchéifié. Ce type de silo présente les avantages suivants:

- montage souvent facile et rapide,
- construction légère, ce qui permet d'implanter un silo sur des sols de mauvaise portance.



**Figure 3 : Photo des silos métalliques**

Il existe plusieurs types de silos métalliques, on peut citer :

- Les silos cylindriques à panneaux métalliques préfabriqués,
- Les silos cylindriques en tôles d'acier ondulées boulonnées.

Le dernier type de silos est le plus répandu (silos en tôles d'acier ondulées boulonnées). Ces silos, bien connus, sont réalisés en tôles d'acier galvanisé (ajout de zinc). Ces tôles cintrées sont boulonnées entre elles et sur les montants verticaux répartis tous les mètres environ. Les ondulations permettent des économies de matériau (acier) et facilitent l'écoulement des matières ensilées.

La liaison entre les tôles est assurée par des boulons à haute résistance, montés avec rondelle d'étanchéité et coupelle métallique sur les 2 faces. L'étanchéité entre les tôles est assurée par la mise en place d'un joint pendant le montage. Les cellules sont couvertes par un toit autoportant, généralement en acier galvanisé.

Les silos métalliques sont plus rapides à construire que les silos en béton armé ou précontraint, mais ils présentent plusieurs inconvénients à savoir :

- Nettoyage difficile des parois intérieures à cause des conditions difficiles d'accessibilité et de température,
- Risque de corrosion accélérée des tôles,

- Risque de développement de bactéries dans la matière ensilée (détérioration de la qualité) à cause de la faible épaisseur de la paroi et sa forte conductivité thermique (transmission de chaleur),
- Apparition du phénomène de croûtage (durcissement de la matière ensilée à cause de la chaleur et l'humidité).
- Infiltration des eaux de pluie à cause des joints déficients entre les tôles et/ou au raccordement du toit

### 3. LES PROBLÈMES DES SILOS

#### 3.1. Risques liés à la vidange

La vidange des silos verticaux est généralement gravitaire par écoulement naturel. Ce mode d'écoulement favorise la vidange des couches supérieures qui sont pourtant celles introduites les dernières lors du remplissage. Cela constitue un inconvénient plus ou moins fâcheux dans certains cas où l'on désire, au contraire, que les couches supérieures, qui ont été les dernières rentrées dans le silo, soient également les dernières à en sortir. Par exemple, en meunerie, le grain laissé au repos dans le silo après avoir été convenablement traité, doit très préférentiellement, être moulu dans l'ordre du remplissage.

Les autres risques peuvent être résumés dans ce qui suit :

- Chute possible des poussières accrochées sur les parois et mise en suspension d'une partie des poussières, ce qui en présence d'une source d'inflammation, représente un risque d'explosion,
- En cas de feu de surface, risque d'écoulement de la couche supérieure en combustion vers l'intérieur, pouvant entraîner une propagation de la zone en combustion vers l'intérieur de la masse,
- Inflammation des particules extraites du silo, car elles se trouvent brutalement en présence d'une grande quantité d'air.

## 3.2. Accidents de silo

### 3.2.1. *Accidents survenus dans des silos en béton armé*

Il existe une abondante accidentologie relative aux silos, ainsi qu'aux autres installations de stockage de céréales, de grains, de produits alimentaires ou de tout autre produit organique dégageant des poussières inflammables, ce qui témoigne de la dangerosité potentielle de ces installations. Les accidents sont en majeure partie des incendies et/ou des explosions, qui sont très souvent sous-estimés.

Plusieurs moyens peuvent être mis en œuvre pour contrôler une situation d'accident ou de suivre son évolution. Par exemple, l'utilisation des données des sondes de température réparties dans le stockage et surtout dans la zone d'extraction, peuvent renseigner notamment au début du sinistre sur le volume de produit en combustion et sur l'étendue de la combustion dans le volume. Dans certains cas on peut faire appel à des méthodes de mesure du taux de CO et O<sub>2</sub> dans le silo afin de connaître l'évolution du feu (plus le taux de CO dans l'air est élevé, plus le feu est important), ou encore l'utilisation d'une caméra infrarouge dans le cas d'un feu pour visualiser la zone de combustion la plus chaude et pour suivre l'évolution de cette zone.

### 3.2.2. *Accidents survenus dans des silos métalliques*

Les surpressions de la vidange provoquent, soit des déchirures de tôle de la paroi, lorsque ces tôles sont trop minces, soit des ruptures de soudures entre ces tôles, si la qualité de ces soudures est insuffisante.

Le flambement des silos est probablement le phénomène d'instabilité le plus redoutable. Analogue au voilement, il fait plutôt intervenir la forme de la section droite que le déplacement de la section droite considérée comme un tout. Les contraintes de compression, peuvent naître des efforts normaux de compression, de la flexion et de charges concentrées appliquées localement.

## CHAPITRE I : SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

---

Le silo cylindrique parfait peut flamber soit de manière axisymétrique, avec une succession d'anneaux, ou sous la forme d'un damier. En fonction des circonstances du flambement, le silo peut prendre une configuration post flambement en forme de diamant.

# Chapitre II

## Pré-dimensionnement



### CHAPITRE II : PRÉ-DIMENSIONNEMENT

#### 1. PRESENTATION DU PROJET

##### 1.1. Géométrie et dimensions

Dans le cadre d'un projet de construction d'une cimenterie, il a été demandé d'étudier un silo de stockage de ciment d'une capacité de  $5700 \text{ m}^3$ . Le silo est une coque cylindrique de 44 m de hauteur et de 14 m de diamètre (Figure 4).

Au niveau 7 m le silo comportera une dalle servant à faciliter la vidange grâce à une ouverture centrée de 3 m de diamètre. En bas du silo il y a une voie d'accès (3 m/3 m) servant à l'installation des machines de vidange, l'entretien ainsi à l'accès des camions. Et il existe une autre ouverture dans la couverture servant à l'ensilage du ciment (Figure 4)

##### 1.2. Implantation et contraintes

La cimenterie est située dans la wilaya de Guelma qui est classée en zone de sismicité moyenne (Zone II).

Il faut savoir que l'air du chantier est très limité au sol ce qui fait appel à des méthodes de construction spécifiques.

##### 1.3. Données géotechniques

Le silo sera construit sur un terrain meuble d'une épaisseur variant de 2 à 4 m où se trouvent des formations morainiques peu compactes avec une contrainte admissible de  $130 \text{ kN/m}^2$ . La roche calcaire est située à une profondeur de 20 m.

### 1.4. Bases de calcul

- Les Eurocodes, BAEL, Règles parasismiques Algériennes (RPA 99 version 2003).
- Cours de béton armé et précontraint, CM, structures spatiales (coques) et dynamique des structures.

### 1.5. Caractéristiques du ciment stocké

Le ciment qui sera stocké dans le silo est un ciment Portland de caractéristiques suivantes :

- Poids volumique :  $\gamma = 16 \text{KN}/\text{m}^3$
- Angle de frottement interne :  $\varphi = 30^\circ$
- Angle de frottement au contact ciment béton :  $\varphi' = 27^\circ$
- Coefficient de frottement sur les parois en béton varier entre : 0,477 et 0,555

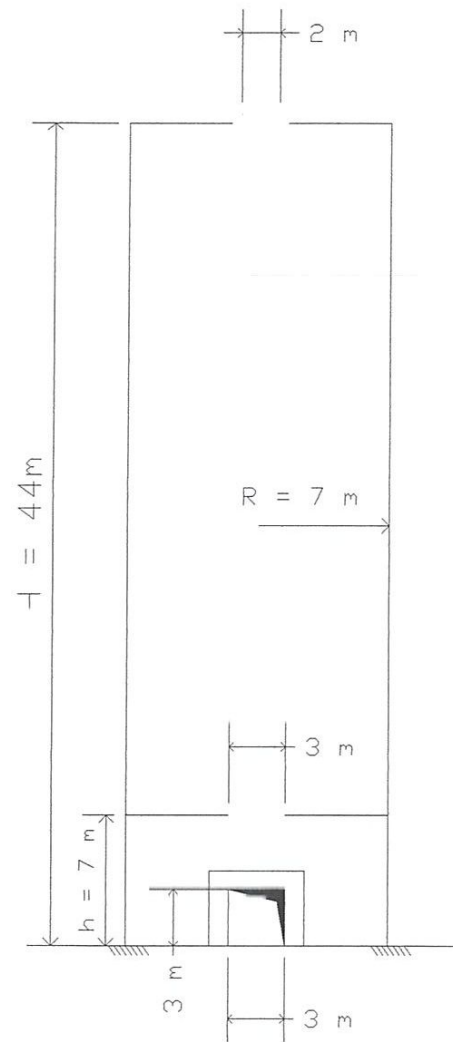


Figure 4: schéma montre les détails de silo

### 2. Variantes proposes

La première étape de votre travail consiste à proposer plusieurs variantes afin de choisir la conception la plus avantageuse. Les variantes proposées doivent répondre aux exigences suivantes :

- Simplicité et rapidité de la réalisation
- Un bon comportement statique et dynamique
- Une bonne étanchéité à l'eau et aux échanges thermiques et gazeux
- Des coûts métrisés

Pour ce fait variantes proposées sont en fonction de la constriction du fût :

- Variante 1 : la paroi du silo est en béton armé.
- Variante 2 : la paroi du silo est en béton précontrainte.
- Variante 3 : la paroi du silo est métallique.

Afin de calculer l'épaisseur de la paroi du silo des trois variantes, nous avons besoin dans un premier temps de définir les différentes charges agissantes sur le corps du silo. Ce que nous allons le voir dans ce qui suit.

### 3. DEFINITION DES CHARGES

#### 3.1. Introduction

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 (ciment), des efforts dynamiques pendant le remplissage et/ou la vidange, des efforts asymétriques ou localisés dus à une répartition irrégulière de la matière, des charges climatiques telles que le vent, la neige et la température extérieure et intérieure, les charges accidentelles telles que le séisme et une explosion ainsi que de toute autre sollicitation pouvant intervenir dans les cas particuliers.

Dans ce travail nous avons étudié uniquement les poussées du ciment, le vent, la neige et les surcharge d'exploitation. Ces charges sont définies dans ce qui suit.

#### 3.2. Poussées du ciment

Pour définir les actions dues à la poussée du ciment nous nous sommes basés sur la Partie 4 de l'Eurocode 1 relative à la définition des actions dans les silos et réservoirs. Cette partie fournit les principes généraux et les actions en matière de conception structurale de ces structures. Ce type d'actions fait parti de la famille des charges variables d'exploitation.

Il faut savoir que les actions dues aux poussées du ciment dépendent essentiellement des éléments suivants :

## CHAPITRE II : PRE-DIMENSIONNEMENT

---

- Dispersion des propriétés du ciment (surtout le gradient thermique entre le haut et le base du silo)
- Variation des caractéristiques du frottement sur les parois
- Géométrie du silo
- Procédé de remplissage et de vidange

Le schéma de la figure 5 représente les actions dues au ciment qui est :

- La pression horizontale due à la matière ensilée noté «  $P_h$  »
- La contrainte de frottement sur la paroi verticale noté «  $P_w$  »
- La pression verticale due au ciment noté «  $P_v$  »
- La pression normale à la paroi de la trémie inclinée «  $P_n$  »
- La contrainte de frottement sur la trémie noté «  $P_t$  »

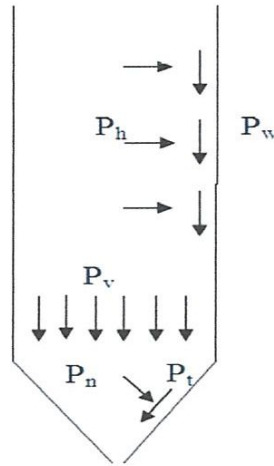


Figure 5 : Actions dues au ciment

Il faut préciser que le fond du silo peut être une trémie ou plat. On dit trémie lorsque le fond du silo présente des parois inclinées d'angle  $\alpha > 20^\circ$ . et fond plat lorsque celui-ci présente des parois inclinées d'angle  $\alpha < 20^\circ$ .

Dans cette phase du projet, on va présenter uniquement les actions agissantes sur la paroi cylindrique du silo à savoir la pression horizontale «  $P_h$  », la contrainte de frottement sur la

paroi verticale «  $P_w$  ». Les autres actions à savoir la pression verticale «  $P_v$  », la pression normale «  $P_n$  » et la contrainte de frottement «  $P_t$  » seront présentées dans le chapitre 3 après avoir défini la géométrie et les dimensions du fond de silo dans la partie conception.

### 3.2.1. Pression horizontale $P_h$

On distingue deux types de pression horizontale, la pression horizontale en fin de remplissage «  $P_{hf}$  » et la pression horizontale lors de la vidange «  $P_{he}$  ». Cette dernière ( $P_{he}$ ) permet de prendre en compte les surpressions dues à la vidange qui amplifie la pression horizontale. Les formules de calcul de ces deux pressions sont données ci-dessous. Les résultats obtenus sont présentés dans le paragraphe pré-dimensionnement.

#### A) Pression horizontale en fin de remplissage $P_{hf}$

$$P_{hf}(z) = \frac{\gamma \cdot A}{\mu \cdot U} C_z(z)$$

$\gamma$  : Poids volumique du ciment

$A$  : Aire intérieure de la section droite de la cellule

$\mu$  : Coefficient de frottement sur la paroi égale à  $0,9 \times \mu_m$  ( $\mu_m$  est donné tableau 1)

$U$  : Périmètre intérieur

$z$  : Profondeur considérée

$C_z$  : Coefficient de Janssen calculé comme suit :

$$C_z = 1 - e^{\left(\frac{-z}{z_0}\right)} \quad \text{Avec} \quad z_0 = \frac{A}{K_s \cdot \mu U}$$

$z_0$  : Paramètre utilisé pour le calcul des actions

$K_s$  : Rapport de pression horizontale / pression verticale égale à  $1,15 \times K_{s,m}$  ( $K_{s,m}$  est donné tableau 1)

## CHAPITRE II : PRE-DIMENSIONNEMENT

Matière granulaire	$\gamma(\text{KN/m}^2)$	Rapport des pressions ( $K_{s,m}$ )	Coefficient de frottement sur la paroi $\mu_m$		Coefficient maximal d'amplification $C_0$
			Acier	Béton	
Orge	8,5	0,55	0,35	0,45	1,35
<b>Ciment</b>	<b>16</b>	<b>0,5</b>	<b>0,40</b>	<b>0,5</b>	<b>1,4</b>
Clinker	18	0,45	0,45	0,55	1,4
Sable sec	16	0,45	0,40	0,5	1,4
Farine	7	0,4	0,3	0,4	1,45
Cendre volante	14	0,45	0,45	0,55	1,45
Mais	8,5	0,5	0,3	0,4	1,4
Sucre	9,5	0,5	0,45	0,55	1,4
Blé	9	0,55	0,3	0,4	1,3
Charbon	10	0,5	0,45	0,55	1,45

**Tableau 1 : Caractéristiques des matières ensilées selon EC1 – Partie 4**

### B) Pression horizontale lors de la vidange $P_{ho}$

$$P_{he} = C_h \cdot P_{hf} \quad \text{Avec} \quad C_h = C_0$$

$C_h$  : Coefficient d'amplification de la pression horizontale

$C_0$  : Coefficient maximal d'amplification définie en fonction de la nature de la matière ensilée, il est donné par le tableau 1.

### 3.2.2. Contrainte de frottement sur la paroi verticale $P_w$

De même pour la contrainte de frottement «  $P_w$  », on distingue deux contraintes :

#### A) Contrainte de frottement sur la paroi en fin de remplissage $P_{wf}$

$$P_{wf} = \gamma \cdot \frac{A}{U} \cdot C_Z(Z)$$

### B) Contrainte de frottement sur la paroi verticale lors de la vidange $P_{we}$

$$P_{we} = C_w \cdot P_{wf}$$

$C_w$  : Coefficients d'amplification de la contrainte de frottement égale à 1,1 (silo élancé)

### 3.3. Le vent

Le vent s'applique sur le silo sous forme de pression et dépression. La charge représentative du vent est calculée selon EC1 – partie 1-4 (Actions du vent et de la neige sur les structures) par la formule :

$$W_e = q_{ref} \cdot C_e(Z) \cdot C_{pe}$$

$q_{ref}$  : Pression dynamique moyenne de référence

$C_e$  : Coefficient d'exposition prenant en compte le terrain et la hauteur au-dessus de sol,  $Z$

$Z_0$  : Hauteur de référence pour l'action extérieure du vent, pour la pression intérieure

$C_{pe}$  : Coefficient de pression extérieure

#### 3.3.1. Calcul de $q_{ref}$

La pression dynamique moyenne de référence s'écrit :

$$q_{ref} = \left(\frac{\rho}{2}\right) \cdot V_{ref}^2$$

$\rho$  : Masse volumique de l'air égale à 1,25 Kg/m<sup>3</sup>

$V_{ref}$  : vitesse de référence vent qui s'écrit :

$$V_{ref} = C_{DIR} \cdot C_{TEM} \cdot C_{ALT} \cdot V_{ref,0}$$



## CHAPITRE II : PRE-DIMENSIONNEMENT

---

$c_{DIR}$  : coefficient de direction du vent pris égal à 1 dans le cas d'une structure symétrique

$c_{TEM}$  : coefficient minorateur de saison pris égal à 1 dans le cas extrême

$c_{ALT}$  : coefficient d'altitude pris généralement égal à 1

$V_{ref,0}$  : La vitesse de référence du vent

Le vent extrême dans la wilaya de Guelma a été estimé à

$$V_{ref,0} = 90 \text{ Km/h} \Rightarrow V_{ref} = 25 \text{ m/s}$$

Après les calculs on obtient la valeur de la pression dynamique moyenne de référence la suivante :

$$q_{ref} = 391 \text{ Kg/m}^2$$

### 3.3.2. Calcul de $c_e(z_e)$ :

$c_e$  : est un coefficient d'exposition prenant en compte la rugosité du terrain, la topographie et la turbulence du vent. Il s'exprime en fonction de «  $z_e$  » qui est calculé en fonction de la géométrie du silo (figure 6).

$$c_e(z_e) = c_r^2(z_e) \cdot c_t^2(z_e) \cdot [1 + 2g \cdot I_V(z_e)]$$

$g$  : Facteur de pointe.  $g = 3.5$

$c_t(z)$  : Coefficient de topographie le terrain est plat. Donc :  $c_t = 1$

$c_r(z)$  : Coefficient de rugosité, couvre la variation de la vitesse moyenne du vent au lieu ou est située la construction, en fonction de :

$$c_r(z_e) = K_T \cdot \ln \left( \frac{z_e}{z_0} \right)$$

Toujours d'après EC1 partie 2-4, les paramètres «  $z_0$  et  $K_T$  » sont à déterminer en fonction des données du site de construction du silo « catégorie du terrain ». En absence de ces données nous avons pris comme référence le cas le plus simple pour des raisons de

## CHAPITRE II : PRE-DIMENSIONNEMENT

facilité. La catégorie du terrain de construction du silo est donc la catégorie I « zone plate et horizontale à végétation négligeable et libre de tous obstacles ».

$z_0$  : est le paramètre de rugosité du terrain égale à 0,01m

$K_T$  : Facteur de terrain égale à 0,17

$I_V(z)$  : Intensité de la turbulence, donnée par :

$$I_V(z_e) = \frac{K_T}{C_r(z_e) \cdot C_t(z_e)}$$

La hauteur  $z_e$  est déterminée en fonction des dimensions du silo comme indiqué dans la figure 6 ci-dessous :

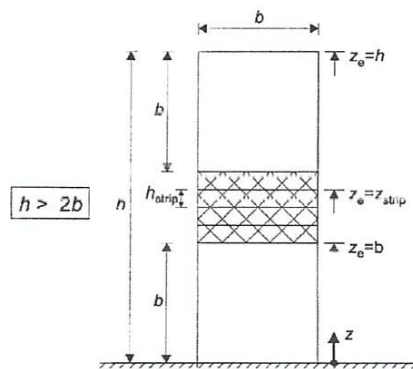


Figure 6 : Hauteur de référence  $z_e$  dépendant de h et b

On a donc :

$z_e$ (m)	$C_r$	$I_v$	$C_e$
2	0,9	0,188	1,875
4	1,231	0,138	2,979
18	1,274	0,133	3,134
22	1,308	0,129	3,255
26	1,336	0,127	3,371
30	1,361	0,124	3,46
44	1,426	0,119	3,727

Tableau 2 : Valeurs de  $C_e(z_e)$

### 3.3.3. Calcul de $c_{pe}$

Le coefficient de pression extérieure  $c_{pe}$  s'exprime ainsi :

$$C_{pe} = C_{p,0} \cdot \psi_{\lambda\alpha}$$

$c_{p,0}$  : Coefficient de pression extérieure pour un élancement  $\lambda$  infini

$\psi_{\lambda\alpha}$  : Facteur d'élancement. Déterminé après ces conditions:

$$\psi_{\lambda\alpha} = 1 \quad \text{Pour } 0 \leq \alpha < \alpha_A$$

$$\psi_{\lambda\alpha} = \psi_{\lambda} + (1 - \psi_{\lambda}) \times \cos\left(\frac{\pi}{2} \times \left(\frac{\alpha - \alpha_{min}}{\alpha_A - \alpha_{min}}\right)\right) \quad \text{Pour } 360 - \alpha_A \leq \alpha \leq 360^\circ$$

$$\psi_{\lambda\alpha} = \psi \quad \text{Pour } \alpha_A \leq \alpha \leq 360 - \alpha_A$$

Les coefficients de pression des sections circulaires dépendent du nombre de Reynolds :

$$R_e = \frac{b \cdot V_m(z_e)}{\nu}$$

$b$  : Diamètre du silo

$\nu$ : viscosité cinématique de l'air,  $\nu = 15 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

$V_m(z_e)$ : vitesse moyenne du vent qui s'exprime ainsi :

$$V_m(z_e) = C_r(Z) \cdot C_t(Z) \cdot V_{ref}$$

$z_e$ (m)	$V_m$ (m/s)	$R_e \times 10^7$
2	23	2
4	31	3
18	32	3
22	33	3
26	34	3
30	34	3
44	36	3

Tableau 3 : Valeur de  $V_m$  et  $R_e$  en fonction de  $z_e$

## CHAPITRE II : PRE-DIMENSIONNEMENT

Le nombre de Reynolds est la moyenne du tableau précédent ce qui fait  $R_e = 3 \times 10^7$

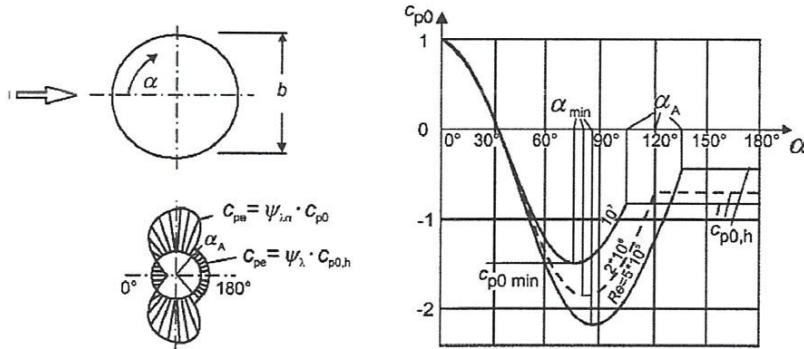


Figure 7 : Cpe pour différentes valeurs de  $\alpha$  et de  $Re$

Avec:

$\alpha_A$ : Pointe de décollement de l'écoulement. (Figure 7)

$\psi_\lambda$ : facteur d'élanement, est en fonction de taux de remplissage  $\varphi$  et l'élanement  $\lambda$ .

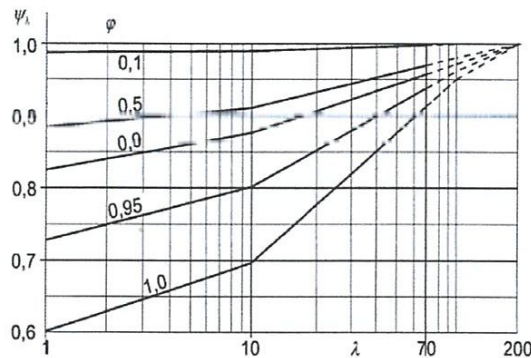


Figure 8: facteur d'élanement  $\psi_\lambda$  en fonction de l'élanement et du taux de remplissage  $\varphi$

L'élanement et le taux de remplissage sont donnés par les expressions :

$$\lambda = \frac{2 \cdot l}{b} \quad \text{et} \quad \varphi = \frac{A}{A_c}$$

$L$  : Longueur du silo,  $L = 44 \text{ m}$

$b$  : Diamètre du silo,  $b = 14 \text{ m}$

## CHAPITRE II : PRE-DIMENSIONNEMENT

Le taux de remplissage  $\varphi$  (Figure 9) est donné par l'expression :

$A$  : est la somme des aires projetées des éléments de la structure

$A_c$  : est l'aire de la surface circonscrite à la structure  $A_c = l \times b$

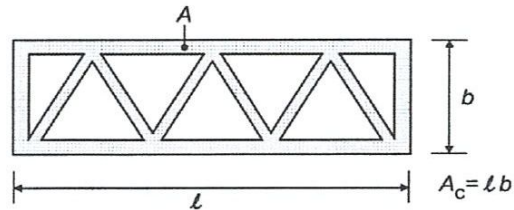


Figure 9 : Définition du taux de remplissage  $\varphi$

Notre silo ne présente pas d'ouverture qui permet le passage du vent d'un côté à l'autre ce qui donne :  $\varphi = 1$   $\lambda = 6,285$

D'après la figure 8 on a :  $\psi_\lambda = 0,66$

$\alpha^\circ$	$C_{p,0}$	$\psi_{\lambda\alpha}$	$C_{pe}$
0	1	1	1
30	0	1	0
60	-1,2	1	-1,2
90	-1,4	1	-1,4
120	-0,8	0,66	-0,528
150	-0,8	0,66	-0,528
180	-0,8	0,66	-0,528

Tableau 4 : Valeurs de  $C_{pe}$

Enfin, on calcule la pression du vent  $W_e$  à partir des trois paramètres :  $q_{ref}$ ,  $C_e$  et  $C_{pe}$ , les résultats sont résumés dans le tableau ci-dessous :

## CHAPITRE II : PRE-DIMENSIONNEMENT

$\alpha^\circ$	$W_e \text{ (Kg/m}^2\text{)}$						
	2 m	14 m	18 m	22 m	26 m	30 m	44 m
0	+733	+1164	+1225	+1272	+1317	+1352	+1456
30	0	0	0	0	0	0	0
60	-879	-1397	-1470	-1526	-1581	-1622	-1747
90	-1026	-1629	-1714	-1780	-1844	-1893	-2039
120	-387	-615	-647	-672	-696	-714	-769
150	-387	-615	-647	-672	-696	-714	-769
180	-387	-615	-647	-672	-696	-714	-769

Tableau 5 : Pression du vent en fonction de la hauteur et de l'angle  $\alpha$

### 3.4. La neige

La neige peut se déposer sur une toiture de nombreuses manières différentes suivant la forme de la toiture, ses propriétés thermiques, la rugosité de sa surface, l'importance de la quantité de chaleur engendrée sous la toiture, les caractéristiques du terrain environnant et celles des conditions météorologiques locales, en particulier l'importance des vents, les variations de température et la fréquence des précipitations (pluie ou neige). Par ailleurs, les dépôts de neige peuvent résulter d'une accumulation provenant de différentes directions ou d'une ou plusieurs chutes de neige au cours d'un même épisode climatique.

La charge de la neige sur la toiture est déterminée par la formule suivante :

$$S = \mu_i \cdot C_e \cdot C_t \cdot S_K$$

$\mu_i$  : Coefficient de forme de la charge de neige,  $\mu_i = 0,8$

$C_e$  : Coefficient d'exposition,  $C_e = 1$

$C_t$  : Coefficient thermique,  $C_t = 1$

$S_k$  : Valeur caractéristique de la charge de neige sur le sol.

$$S_K = S_{K200} + \left( \frac{0,15 \cdot h - 30}{100} \right)$$

$$S_{k,200} = 0,45 \Rightarrow S_k = 0,582 \text{ KN/m}^2$$

Donc :  $S = 0,47 \text{ kN/m}^2$

### 3.5. Surcharge d'exploitation

La surcharge d'exploitation est la charge des installations fixes sur la couverture qui sert à l'ensilage du ciment, et aussi la charge des machines qui sert à l'entretien du silo.

Après l'EC 1 partie 2-1 (action sur les structures - charges d'exploitation) définir les surcharges d'exploitation par catégorie de bâtiment. Dans notre cas il s'agit d'une structure de catégorie H « toiture inaccessible sauf pour l'entretien normal, les réparations, la peinture et les réparation mineures » (figure 10).

Cette surcharge est donnée égale à :  $0,75 \text{ KN/m}^2$



Figure 10 : Photo d'équipements installés sur le silo

### 3.6. Charges permanentes

Comprennent le poids propre de tous les éléments composants le silo et les équipements permanents.

### 4. PRE-DIMENSIONNEMENT DES VARIANTES

L'épaisseur de la paroi du silo doit être calculée pour résister aux actions dus au ciment stocké (poussée horizontale et contrainte de frottement) qui tendent à ouvrir le corps cylindrique du silo suivants les génératrices.

D'après le livre « Silos » (Reimbert) l'épaisseur de la paroi des trois variantes (béton armé, béton armé précontraint, métallique) ainsi que la section des armatures, peuvent être calculé de la manière suivante.

#### 4.1. Variante 1 : Silo en béton armé

Pour calculer l'épaisseur de la paroi, on suppose que le béton peut supporter, sans se fissurer, un effort de traction égale au dixième de sa résistance à la rupture à la compression, soit environ  $25 \text{ Kg/cm}^2$  pour un béton moyen.

L'épaisseur «  $e$  » de la paroi en béton sera donc :

$$e \geq \frac{R \cdot P_h}{100 \cdot 25}$$

$P_h$  : La poussée horizontale sur la paroi

$R$  : Rayon du silo

La paroi sera armée de cerces métalliques capable d'équilibrer à elle seules l'effort d'extension en cas de fissuration du béton, et si «  $\sigma_a$  » est la contrainte admissible pour les aciers ( $\sigma_a = 1200 \text{ Kg/cm}^2$ ), la section  $\omega'$  d'armatures par mètre linéaire de paroi est :

$$\omega' = \frac{R \cdot P_h}{\sigma_a}$$

Les résultats des calculs des poussées «  $P_{hf}$  et  $P_{he}$  » de l'épaisseur de la paroi «  $e$  » ainsi que la section des armatures «  $\omega'$  » sont résumés dans le tableau 7.



## CHAPITRE II : PRE-DIMENSIONNEMENT

	$\mu$	$K_s$	$z_0$
$P_h$	0,450	0,575	143
$P_w$	0,575	0,575	112

Tableau 6 : Valeurs des coefficients :  $\mu$ ,  $K_s$ ,  $z_0$  pour la paroi en béton

z(m)	Au remplissage		A la vidange		e (cm)	$\omega'$ (cm <sup>2</sup> )
	Phf (Kg/m <sup>2</sup> )	Pwf (Kg/m <sup>2</sup> )	Phe (Kg/m <sup>2</sup> )	Pwe (Kg/m <sup>2</sup> )		
0 - 2	1828	1049	2559	1154	7,67	15,3
2 - 4	3629	2079	5081	2287	15,24	15,2
4 - 6	5406	3091	7569	3400	22,70	14,9
6 - 8	7158	4085	10022	4493	30,06	14,7
8 - 10	8886	5061	12440	5567	37,32	14,5
10 - 12	10590	6020	14826	6622	44,48	14,4
12 - 14	12270	6962	17178	7658	51,53	14,1
14 - 16	13927	7887	19497	8676	58,49	13,9
16 - 18	15560	8796	21785	9676	65,35	13,7
18 - 20	17172	9689	24040	10658	72,12	13,5
20 - 22	18760	10566	26264	11623	78,79	13,4
22 - 24	20327	11427	28458	12570	85,37	13,1
24 - 26	21872	12274	30620	13501	91,86	13,0
26 - 28	23395	13105	32753	14415	98,26	12,8
28 - 30	24897	13921	34856	15313	104,57	12,6
30 - 32	26379	14723	36930	16196	110,79	12,5
32 - 34	27840	15511	38975	17062	116,93	12,3
34 - 36	29280	16285	40992	17914	122,98	12,1
36 - 37	29993	16667	41990	18334	125,97	5,9

Tableau 7 : Actions dues au ciment, épaisseurs de la paroi et les sections des armatures passives

Les résultats du tableau 7 montrent que la pression horizontale et la contrainte de frottement pendant la vidange sont supérieures à celles dues au cours du remplissage. Cela est expliqué par les effets dynamiques dus aux mouvements du ciment durant la vidange ce qui crée des surpressions supplémentaires.

## CHAPITRE II : PRE-DIMENSIONNEMENT

Nous prenons une épaisseur variable en fonction de « z » pour l'économie des matériaux (béton et aciers), les valeurs retenues sont présentées tableau ci-dessous :

z (m)	e (cm)
0 – 10	40
10 – 20	80
20 – 30	110
30 - 37	130

Tableau 8 : Epaisseurs de la paroi (Variante 1)

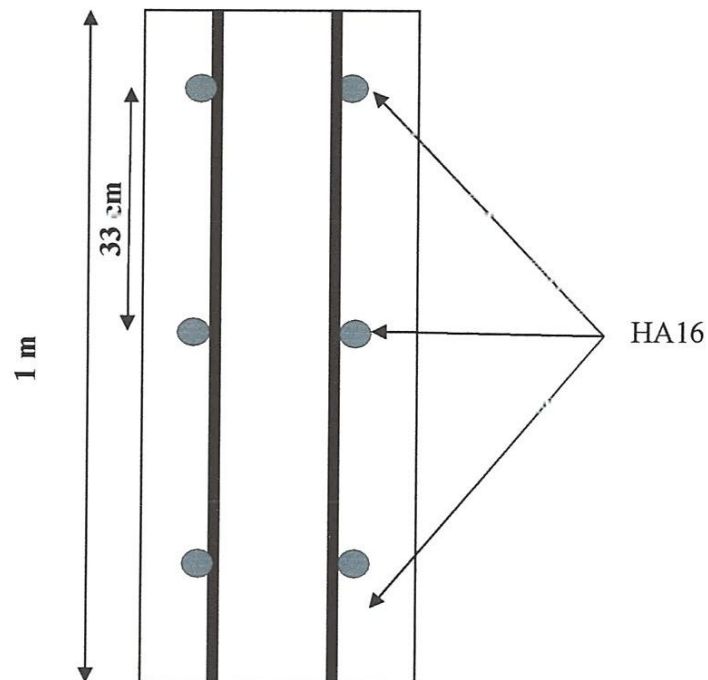


Figure 11 : Schéma de ferrailage de la variante béton armé

### 4.2. Variante 2 : Silo en béton précontraint

Dans le cas de silo en béton précontraint le béton travaille au contraire à la compression, sous l'effet de la sollicitation des aciers de la précontrainte; et il se décomprime seulement sous l'effet de la force d'extension des parois résultant de la poussée horizontale sur celles-ci.

L'épaisseur de la paroi est donc fonction, de la contrainte  $\sigma'_b$  admissible pour le béton, à la compression, elle est donnée par :

$$e \geq \frac{R \cdot P_{he}}{100 \cdot \sigma'_b}$$

La contrainte  $\sigma'_b$  généralement admise à la compression pour le béton précontraint étant de l'ordre de 4 à 5 fois la contrainte limite admise pour le béton dans le cas de risque de fissuration, il s'ensuit que l'épaisseur des parois cylindriques des silos en béton précontraint pourrait être 4 à 5 fois plus faible que celle des parois des mêmes silos en béton armé ; ce qui fait apparaître un premier avantage du béton précontraint.

Les résultats des calculs sont résumés dans le tableau ci-dessous :

## CHAPITRE II : PRE-DIMENSIONNEMENT

---

Z(m)	e (cm)	$\omega'$ (cm <sup>2</sup> )
2	2,0	4,00
4	4,0	8,00
6	6,0	12,00
8	8,0	15,00
10	10,0	19,00
12	12,0	23,00
14	13,0	26,00
16	15,0	30,00
18	17,0	33,00
20	18,0	36,00
22	20,0	40,00
24	22,0	43,00
26	23,0	46,00
28	25,0	49,00
30	26,0	53,00
32	28,0	56,00
34	30,0	59,00
36	31,0	62,00
37	32,0	63,00

**Tableau 9 : Epaisseurs du silo en béton précontraint et les sections des armatures passives**

En raison des épaisseurs réduites de la paroi de cette variante en fonction de la hauteur, on a choisi une épaisseur constante le long du silo. L'épaisseur retenue sera donc la plus proche de la valeur maximale en prenant en considération la facilité d'exécution (coffrage) :

$$e = 35 \text{ cm}$$

### 4.3. Variante 3 : Silo métallique

Contrairement au silo en béton, les silos métalliques sont sensibles à la contrainte de frottement du ciment sur la paroi à cause de la faible résistance de l'acier à la compression. Il

## CHAPITRE II : PRE-DIMENSIONNEMENT

---

est nécessaire dans ce cas de prendre en compte la contrainte de frottement «  $P_w$  » dans le calcul de l'épaisseur de la paroi. Les paramètres utilisés pour le calcul de «  $P_{he}$  » et «  $P_{we}$  » des silos métalliques sont données tableau ci-dessous.

	$\mu$	$K_s$	$Z_0$
$P_h$	0,360	0,575	179
$P_w$	0,460	0,575	140

Tableau 10 : Valeurs des coefficients :  $\mu$ ,  $K_s$ ,  $Z_0$  pour la paroi métallique

L'épaisseur de la paroi est donnée par les deux expressions suivantes, les valeurs retenues pour chaque hauteur sont les plus grandes des deux valeurs obtenues :

$$e_1 = \frac{F_Z}{100 \times 1400} \text{ (cm)}$$

$$e_2 = \frac{F_Z}{100 \times 1400} \text{ (cm)}$$

$E_Z$  : Effort d'extension de la paroi du à la poussée horizontale  $E_Z = R \times P_{he}$

$F_Z$  : Force de frottement  $F_Z = P_{we} \times A$

$A$  : la section du tronçon considéré

Les résultats des calculs sont résumés dans les tableaux ci-dessous :

## CHAPITRE II : PRE-DIMENSIONNEMENT

<b>z(m)</b>	<b>E<sub>z</sub> (Kg)</b>	<b>F<sub>z</sub>(Kg)</b>	<b>e<sub>1</sub> (cm)</b>	<b>e<sub>2</sub> (cm)</b>
0	0	0	0	0
2	17932	752174	0,1	5
4	35664	1493670	0,3	11
6	53199	2224640	0,4	16
8	70538	2945234	0,5	21
10	87685	3655599	0,7	26
12	104641	4355879	0,8	31
14	121408	5046219	0,9	36
16	137989	5726759	1,0	41
18	154385	6397638	1,0	46
20	170598	7058994	1,2	50
22	186632	7710962	1,3	55
24	202487	8353674	1,5	60
26	218165	8987263	1,6	64
28	233669	9611858	1,7	69
30	249001	10227586	1,8	73
32	264162	10834574	1,9	77
34	279154	11432945	2,0	82
36	293979	12022822	2,1	86
37	301330	12314613	2,2	88

**Tableau 11 : Actions dues au ciment, effort d'extension de la paroi et la force de frottement.**

L'épaisseur retenue est « e<sub>2</sub> », nous prenons une épaisseur variable en fonction de « z » pour l'économie des matériaux (aciers), les valeurs retenues sont présentées tableau ci-dessous :

<b>z (m)</b>	<b>e (cm)</b>
0 – 10	30
10 – 20	50
20 – 30	75
30 - 37	90

**Tableau 12 : Epaisseurs de la paroi (Variante 3)**

### 5. CHOIX DE LA VARIANTE AVANTAGEUSE

Après avoir étudié les trois variantes, nous avons trouvé que pour la construction des silos, la supériorité du béton précontraint sur le béton armé est incontestable. Cette supériorité est due au fait que le silo travaille essentiellement en traction et que la précontrainte compense entièrement cette traction. Par conséquent, pour obtenir une surface sans fissure, l'épaisseur d'une paroi précontraint est beaucoup plus petite que celle d'une paroi en béton armé, d'où une grande économie de béton fois un rapport de et aussi d'armature ; l'épaisseur de la variante béton armé précontraint est 2,5 fois inférieure à l'épaisseur de la variante béton armé sur toute la hauteur, et on utilise 4 fois moins d'armatures passives dans la variante béton précontraint.

L'avantage aussi du béton comprimé non fissuré est évident. En effet, en maintenant le béton comprimé, la précontrainte lui assure une étanchéité nettement supérieure à celle du béton armé. Cet avantage offre une bonne conservation du ciment stocké par la protection de cette dernière contre l'humidité et les infiltrations d'eau.

Donc la variante béton armé est éliminée, il nous reste seulement de choisir entre les deux autres variantes, variante béton précontraint et la variante métallique. D'un point de vue économique, le silo métallique avec une épaisseur de 88 cm est trop cher par rapport à un silo en béton armé précontraint avec une épaisseur de 35 cm. Sur le plan sécurité et stabilité, les silos métalliques sont très sensibles au voilement et au flambement, et avec une telle structure (44 m de haut pour 14 m de diamètre) l'élancement joue un rôle néfaste pour la stabilité globale de la structure. N'oubliant pas l'incidence du gradient thermique (la variation de la température en fonction de la hauteur et entre l'intérieur et l'extérieur) sur la rigidité de la structure ce qui constitue un danger supplémentaire qui doit être pris en considération. De plus, les silos métalliques sont très faibles pour résister à une explosion, un incendie ou un séisme, et en cas de sinistre les dommages sont fatals et irréparables.

Pour ces raisons nous avons choisi la variante béton armé précontraint pour la suite de notre étude.

# Chapitre III

## Cenception du silo



## CHAPITRE III : CONCEPTION DE LA VARIANTE RETENUE

### 1. CONCEPTION DU SILO

#### 1. 1. Introduction

L'extraction des matières ensilées dans les silos de petite taille ne pose pas de difficultés particulières à cause des faibles pressions exercées sur le fond du silo. Dans ce cas, il suffit de choisir un angle de cône adapté afin de faciliter la vidange sous l'effet de la pesanteur. De plus, il est nécessaire de choisir des ouvertures d'extraction compatibles avec la forme du silo (circulaire, rectangulaire...) (Figure 12).

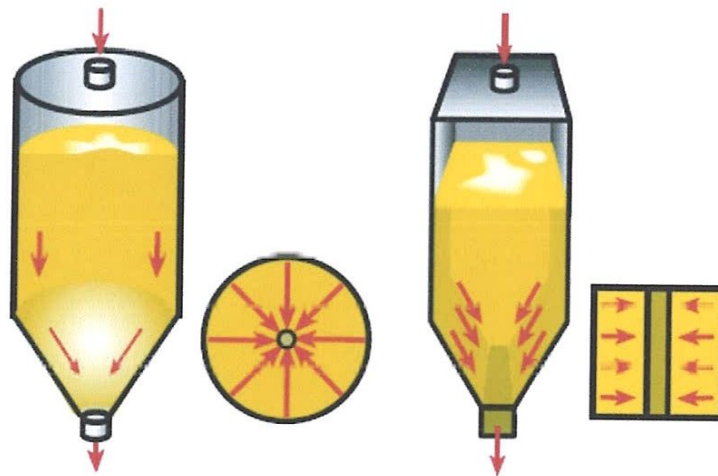


Figure 12 : Conception des silos de petite taille

En revanche, l'extraction des matières ensilées dans les silos de grande capacité pose plusieurs problèmes d'ordre techniques et économique. Techniquement, la poussée sur la matière ensilée au fond du silo crée des phénomènes inhérents à la vidange tels que la consolidation de la matière stockée et le phénomène de voûte, ce qui nécessite l'utilisation de techniques compliquées d'extraction et donc des coûts plus élevés, sans oublier l'influence de ces pathologies sur le temps d'extraction. Le volet économique est lié directement avec le volet technique, le temps et la facilité des techniques d'extraction et d'entretien sont les facteurs primordiaux dans le choix de la conception des silos.

## CHAPITRE III : CONCEPTION DE LA VARIANTE RETENUE

---

Traditionnellement, les silos de stockage de ciment sont équipés d'un cône métallique. Leur diamètre doit être inférieur à 14 m (silo compact) afin de limiter les problèmes liés à la vidange. Le fond du silo est équipé d'un système de fluidisation pour faciliter la vidange (Figure 13).



Figure 13 : Photos de réalisation de silos traditionnels

Pour palier ces difficultés et optimiser le processus d'extraction, les concepteurs de ce type de structure ont développé des nouvelles conceptions répondant aux besoins divers de l'industrie. Les silos peuvent être mono cellule pour le stockage d'un seul produit ou pour le mélange de plusieurs produits ou multi cellules pour le stockage de différents produits. Parmi les nouveaux types de silo développés on peut citer :

- Silo de stockage à chambre d'expansion simple
- Silo de stockage à chambre d'expansion et d'inspection
- Silo de stockage muni d'un système de multi-extraction
- Silo multi-stockage
- Silo d'homogénéisation
- ...

Le principe de la chambre d'expansion ainsi que ces différents types de silos sont présentés dans ce qui suit.

### 1.2. Principe de la chambre d'expansion

Aujourd'hui, la technique de la chambre d'expansion est la base de tous les types de silos de nouvelle génération de gros diamètre ( $10 \text{ m} \leq \phi \leq 50 \text{ m}$ ). Elle a été approuvée par des travaux scientifiques très élaborés. Le principe consiste à créer une chambre à l'intérieur du silo sous forme de cône inversé servant à diminuer la pression verticale sur le fond du silo afin de faciliter la vidange (Figure 14).

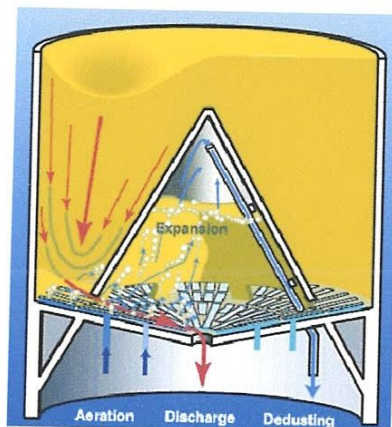


Figure 14 : Schéma de fonctionnement de la chambre d'expansion

Au cours de la vidange, l'inclinaison du cône (généralement béton armé) favorise le mouvement des produits stockés à proximité de la paroi du silo. S'ajoute à cela l'influence de l'inclinaison du fond plat et du système d'aération sous pression. Ce dernier renforce l'écoulement en masse ce qui permet de favoriser le principe de vidange « *premier arrivé - premier sorti* » et éviter les écoulements en cheminée (Figure 15).

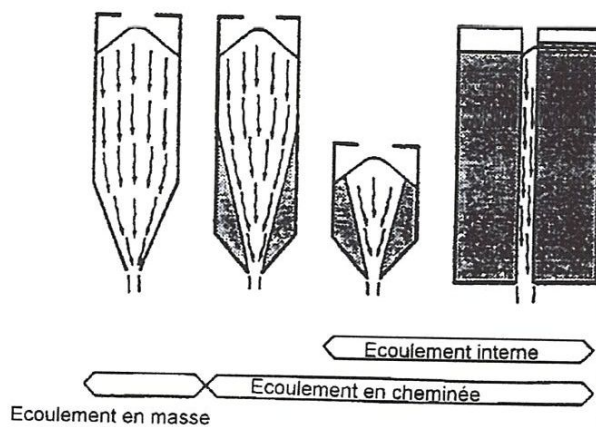


Figure 15 : Modes d'écoulement dans les silos

Le système d'aération sous pression consiste à recouvrir le fond du silo avec des aéroslides (plaques métallique aérées) disposées radialement (Figure 16). L'alimentation en air sous pression contrôlée provoque le matériau stocké et le pousse par écoulement à l'intérieur du cône inversé (chambre d'expansion) puis à l'extérieur du silo.

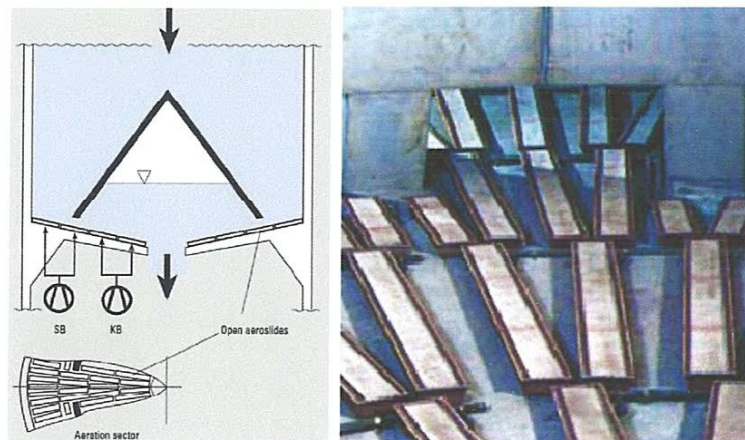


Figure 16 : Schéma et photos du système d'aération sous pression

### 1.3. Silo à chambre d'expansion simple

Le stockage dans ce type de silo offre une meilleure utilisation d'espace en augmentant le diamètre et en réduisant la hauteur ou le contraire en fonction des besoins et des contraintes du site. La vidange se fait par un seul point de 1 à 3 m de diamètre situé au milieu de la dalle sous le cône inversé (Figure 17). La capacité du silo doit être comprise entre 2 500 et 60 000 t pour des silos diamètre compris entre 10 et 30 m.



Figure 17 : Fonctionnement d'un silo à chambre d'expansion simple

Le système d'aération du fond de silo fonctionne en alternance entre zones (Figure 18) pour permettre une meilleure répartition de la vidange du silo.

Il faut noter que pour atteindre un flux de matière libre et sans obstacle, près de 40% de la zone autour de la base du cône est utilisé comme des ouvertures.

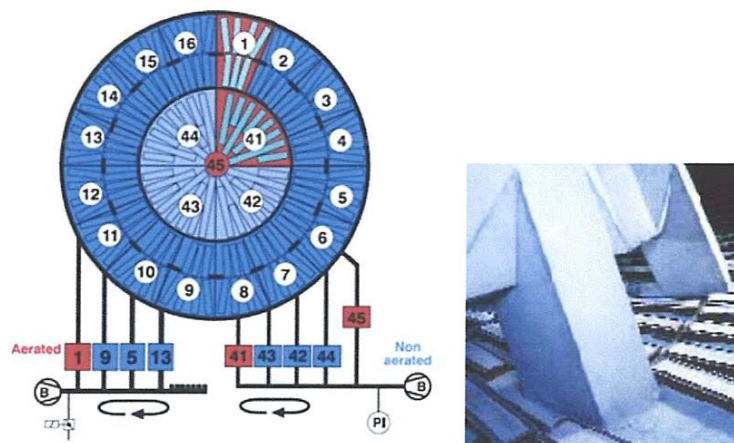


Figure 18 : Système d'aération d'un silo à chambre d'expansion simple

## 1.4. Silo avec chambre d'expansion et d'inspection

Ce type de silo dispos de caractéristiques techniques identiques au précédent sauf que la vidange se fait par 2 à 4 points grâce à un cylindre métallique placé à l'intérieur du cône inversé faisant une nouvelle chambre appelée chambre d'inspection car elle facilite des opérations de maintenance (Figure 19).

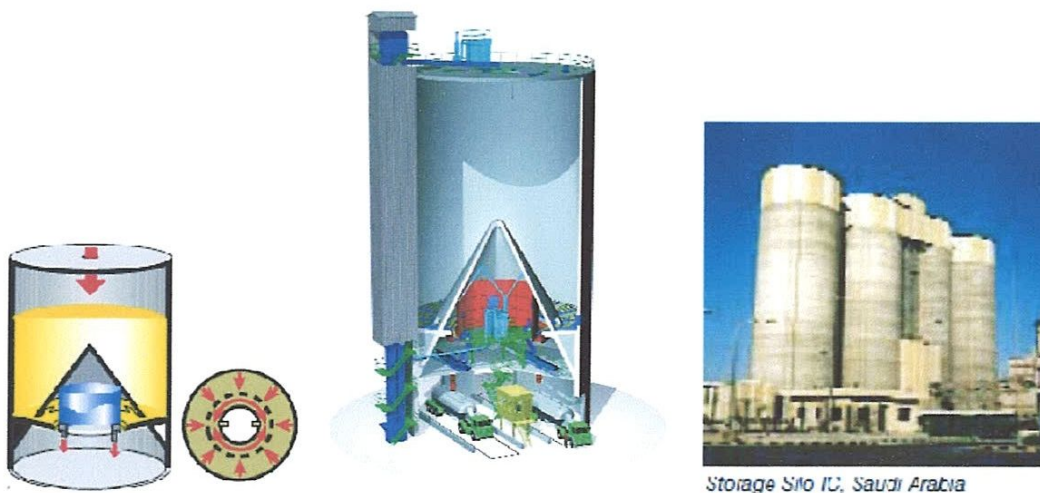


Figure 19 : Fonctionnement d'un silo à chambre d'expansion et d'inspection

Idem, le système d'aération du fond de silo fonctionne en alternance entre zones (Figure 20) pour permettre une meilleure répartition de la vidange du silo.

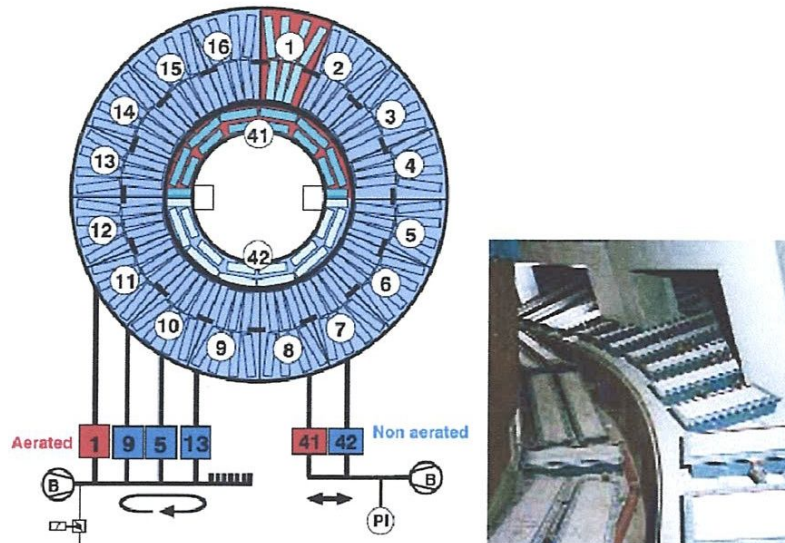


Figure 20 : Système d'aération d'un silo à chambre d'expansion et d'inspection

### 1.5. Silo de stockage muni d'un système de multi-extraction

Ce type de silo dispose de caractéristiques techniques identiques aux deux premiers types sauf qu'il n'existe pas de dalle sous le cône inversé et la vidange se fait par 3 à 9 points grâce à des équipements spécifiques (Figure 21 et 22).



Figure 21 : Fonctionnement d'un silo muni d'un système multi-extraction

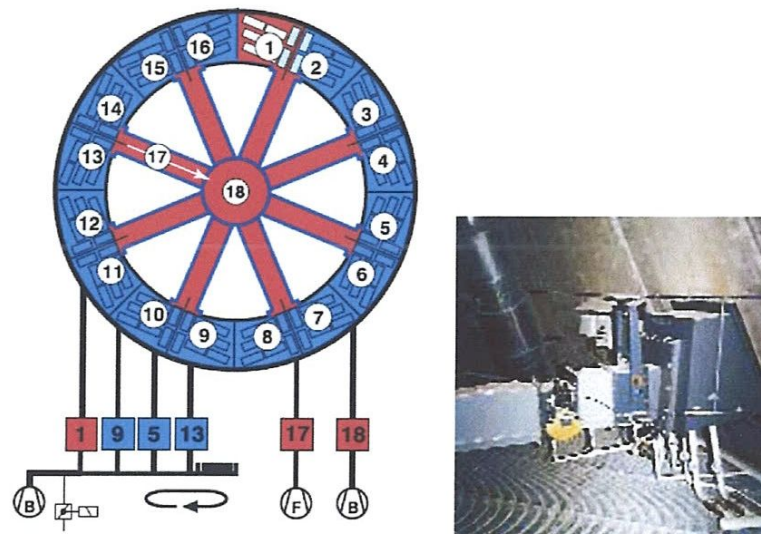


Figure 22 : Système d'aération d'un silo muni d'un système multi-extraction

### 1.6. Silo multi-stockage

Ce type de silo permet de stocker des matières de nature différentes dans des compartiments à l'intérieur du silo afin de les mélanger au cours de la vidange avant d'être livrée en vrac. Les deux schémas de la figure 23 fournissent une configuration de ce type de structure.



Figure 23 : Schémas d'un silo multi-stockage

### 1.7. Règles de conception

En se basant sur un article technique du magazine « Cement International » réalisé par les auteurs « P. Hilgraf et A. Hilck » ingénieurs appartenant au groupe mondial « CLAUDIUS PETERS » leader mondial dans la conception et la réalisation de ce type de silos, on a déduit les règles de conception définies comme indiqué dans la figure 24.

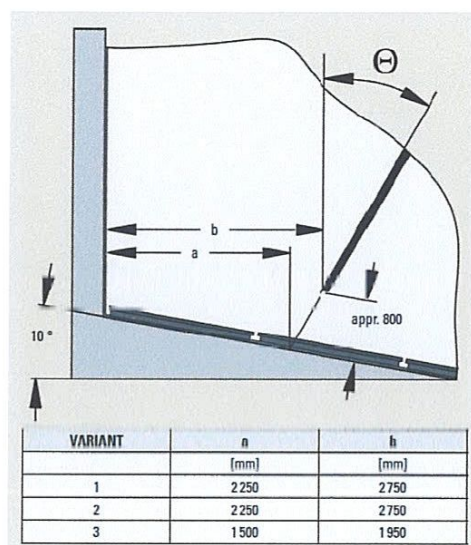


Figure 24 : Distance entre la paroi du silo et la base du cône pour les différentes variantes

Les règles se résument dans les points suivants :

- Inclinaison du cône  $\Theta = 30^\circ$  par rapport à la verticale
- Inclinaison de la dalle est  $= 10^\circ$
- Distances « a » et « b » sont définies selon la variante retenue (voir tableau figure 24)
- La hauteur des ouvertures autour du cône = 800 mm

### 1.8. Conception de la variante retenue

Le stockage des matières vrac dans les silos est utilisé par de nombreuses industries pour diverses applications. Dans l'industrie cimentière on utilise généralement les *silos à chambre d'expansion et l'inspection* pour les avantages qu'offre ce type de silo en termes de rapidité et simplicité de la vidange et des opérations de maintenance.



## CHAPITRE III : CONCEPTION DE LA VARIANTE RETENUE

La conception réalisée sur Autocad nous a permis d'avoir les dimensions indiquées dans la Figure 25. Il faut préciser que nous avons choisi la variante 3 «  $a = 1,5 \text{ m}$  et  $b = 1,95 \text{ m}$  ».

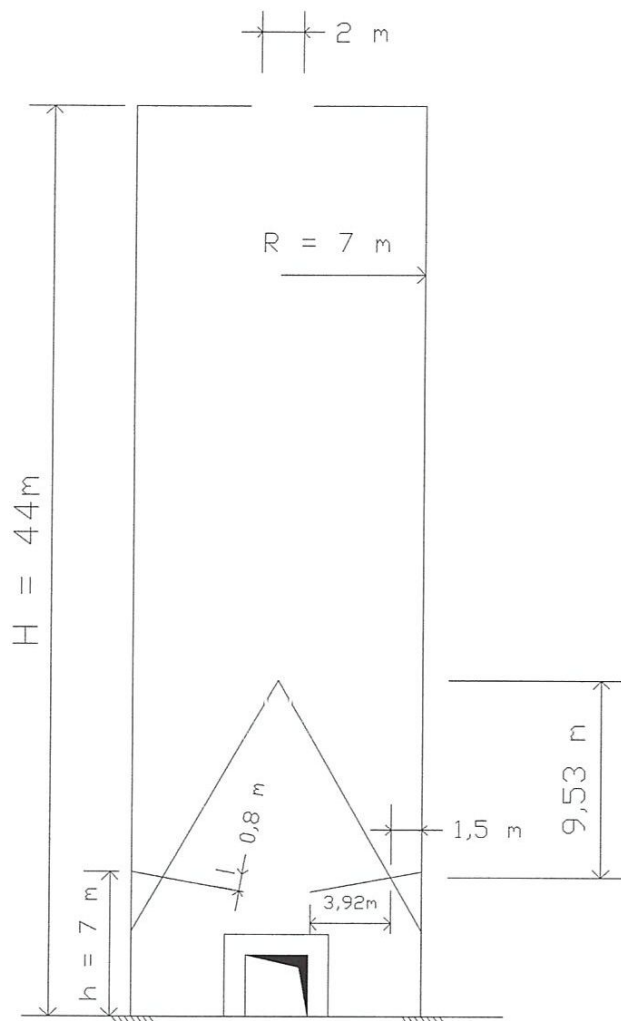


Figure 25 : Schéma de conception du silo

Voilà à quoi peut correspondre notre silo (Figure 26) :



Figure 26 : Photos d'un silo de stockage de ciment

## 2. DEFINITION DES POUSSEES VERTICALES SUR LE FOND DU SILO

### 2.1. Pressions verticales

La pression verticale due à la poussée du ciment sur la **totalité** du fond du silo «  $P_V$  » est calculée à partir de l'expression donnée par l'EC 1, elle s'écrit :

$$P_V(z) = \frac{\gamma \times A}{0,9^2 \cdot K_{s,m} \times \mu_m \times U} C_z(z)$$

$K_{s,m}$  : Le rapport moyen entre la pression horizontale / pression verticale (tableau 1)

$\mu_m$  : Coefficient de frottement moyen sur la paroi (tableau 1)

Cette pression verticale est décomposée en deux parties, l'une agissant sur la dalle inclinée notée «  $P_{v,Dalle}$  » et l'autre sur le cône inversé notée «  $P_{v,C\hat{o}ne}$  ».

Connaissant la section droite du fond du cône inversé, on peut calculer la pression «  $P_{v,C\hat{o}ne}$  » en utilisant la même expression utilisée pour calculer «  $P_V$  » en utilisant les paramètres adéquats pour cône inversé (Tableau 13).

	$A (m^2)$	$U (m)$	$Z_0 (m)$	$C_z$	$K_{s,m}$	$\mu_m$
<b>Fond total</b>	<b>153,94</b>	<b>22,00</b>	<b>34,57</b>	<b>0,657</b>	<b>0,45</b>	<b>0,45</b>
<b>Base de cône</b>	<b>88,92</b>	<b>16,71</b>	<b>26,27</b>	<b>0,755</b>	<b>0,45</b>	<b>0,45</b>

Tableau 13 : Les paramètres : A, U,  $Z_0$ ,  $C_z$ ,  $K_s$ ,  $\mu$ .

Sachant que :  $P_{v,Dalle} = (P_v - P_{v,C\hat{o}ne}) \cdot C_b$

$C_b$  : Coefficient d'amplification de la pression sur le fond pris égale à 1,2

Les résultats des calculs donnent les valeurs suivantes :

$P_v(kg/m^2)$	$P_{v,C\hat{o}ne}(kg/m^2)$	$P_{v,Dalle}(kg/m^2)$
<b>36338</b>	<b>31737</b>	<b>5522</b>

Tableau 14 : Valeurs des pressions verticales

### 2.2. Pressions sur la paroi du cône inversé

Deux pressions agissent sur la paroi du cône inversé dues à la pression verticale «  $P_{v,C\hat{o}ne}$  ». Il s'agit de la pression normale «  $P_n$  » et la contrainte de frottement «  $P_t$  ». Ces deux pressions sont calculées selon EC1 de la manière suivante :

#### 2.2.1. Pression normale $P_n$

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

$$P_{n1} = P_{v,C\hat{o}ne} \times (C_b \times \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha)$$

$$P_{n2} = C_b \times P_{v,C\hat{o}ne} \times \cos^2 \alpha$$

$$P_{n3} = 3 \times \frac{A}{U} \times \frac{\gamma \times K_s}{\sqrt{\mu}} \times \sin^2 \alpha$$

$P_{n1}$  Et  $P_{n2}$ : Pressions correspondant à la pression verticale dans la matière ensilée directement au-dessus de la transition (figure 27)

$P_{n3}$ : Pression correspondant au remplissage de la trémie au voisinage du cône (figure 27)

$\alpha$ : Angle moyen d'inclinaison de la paroi du cône ( $\alpha = 60^\circ$ )

$P_{v0}$ : Pression verticale agissant à la transition

$I_h$ : Longueur de la trémie

$x$ : Longueur comprise entre 0 et  $I_h$  (figure 27), dans notre cas on prit  $x = I_h$  pour obtenir la valeur max de «  $P_n$  »

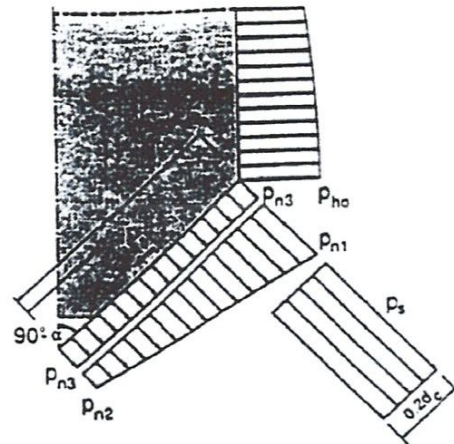


Figure 27 : Actions sur le cône inversé (EC 1)

Les résultats des calculs sont indiqués dans le tableau ci-dessous .

$P_{n1}$	$P_{n2}$	$P_{n3}$	$P_n$
33826	12530	11498	45324

Tableau 15 : Valeurs des pressions ( $Kg/m^2$ ).

### 2.2.2. Contrainte de frottement $P_t$

Cette contrainte Être appliquer parallèlement sur la paroi de la trémie comme indiquer dans la figure 5. Elle est calculée en utilisant l'expression suivante :

$$P_t = P_n \times \mu$$

Donc :

$$P_t = 20396 \text{ Kg/m}^2$$

Après avoir défini la globalité des charges étudiées dans ce travail nous allons maintenant passer à la phase modélisation et dimensionnement.

# Chapitre IV

## Modélisation et dimensionnement

## CHAPITRE IV : MODELISATION ET DIMENSIONNEMENT

### 1. MODELISATION PAR ELEMENTS FINI (ROBOT)

Nous avons utilisé le logiciel « Robot structural Analysis » pour modéliser le silo par éléments finis. Ce logiciel offre plusieurs modules spécialisés dans chacune des étapes de l'étude de la structure (création du modèle de structure, calcul de la structure, dimensionnement).

Après le lancement du « Robot », nous avons choisi la structure de type « Coque » (figure 28).



Figure 28 : Choix du type de structure sur Robot

Une fois on a choisi le type de structure, nous arrivons à un écran avec un certain nombre de zones utiles pour le déroulement de notre modélisation et de l'exploitation des résultats.

Nous avons utilisé la fonctionnalité « structures types » (Figure 29) pour créer le cylindre, la dalle supérieure, le cône inversé et la dalle intérieure en introduisant à chaque étape leurs dimensions.

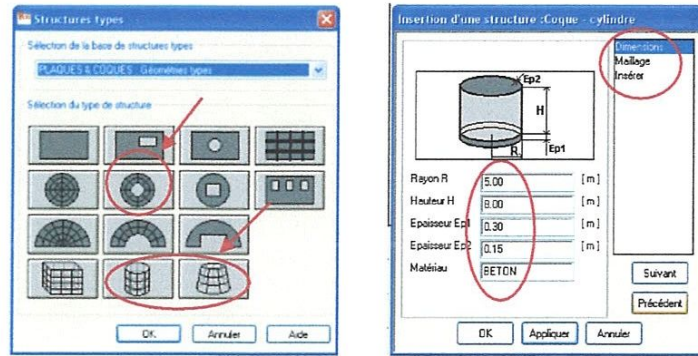


Figure 29 : Création des éléments du silo

La figure ci-dessous présente la modélisation du silo avec le détail du cône inversé.

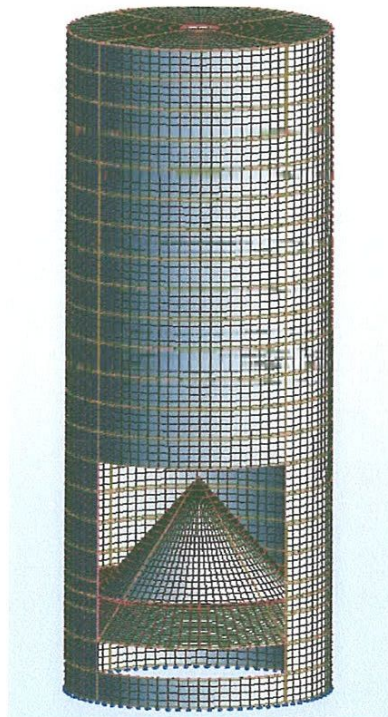
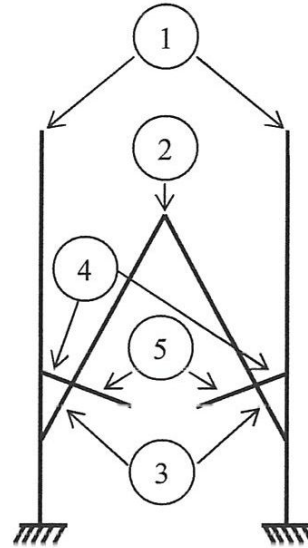


Figure 30 : Modélisation du silo par Robot

Il faut préciser que nous avons découpé notre silo en plusieurs parties pour permettre l'introduction des charges séparément sur chaque zone du silo (Figure 31), ces parties sont :

1. Le fût cylindrique global du silo
2. Le cône inversé
3. Support du cône inversé
4. La dalle inclinée 1
5. La dalle inclinée 2
6. La couverture (dalle supérieure)



### 1.2. Fût cylindrique

Le fût cylindrique global du silo a été décomposé en petits cylindres de 2 m de hauteur superposés l'un sur l'autre avec un encastrement parfait pour assurer la continuité de la matière.

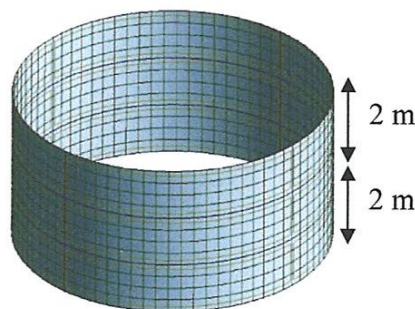


Figure 31 : Modélisation du fût cylindrique

Ensuite, nous avons introduit les charges relatives à cette partie du silo à savoir la poussée horizontale «  $P_{he}$  » et la contrainte de frottement «  $P_{we}$  ».



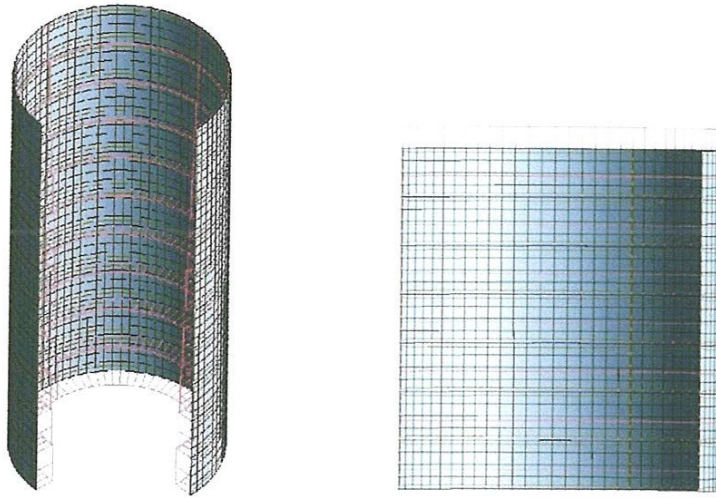


Figure 32 : Introduction de  $P_{he}$  et  $P_{we}$

### 1.2. Cône inversé

On a appliqué la pression normale «  $P_n$  » perpendiculaire au cône inversé et la contrainte de frottement «  $P_t$  » parallèlement à la paroi du cône inversé.

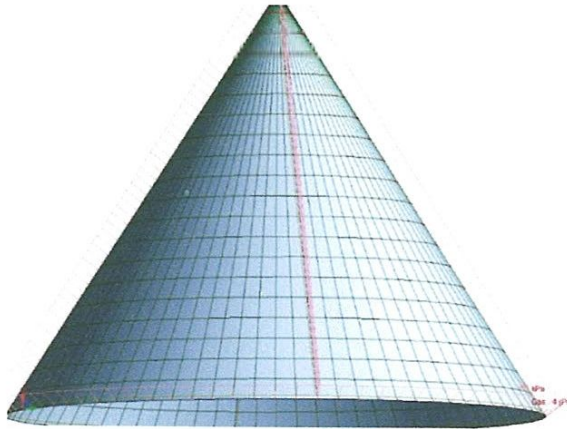


Figure 33 : Introduction de  $P_n$  et  $P_t$

### 1.3. Support du cône inversé

Le support du cône inversé ou la partie inférieure du cône inversé a été modélisé par un cône parfaitement encasté avec le fût cylindrique. Aucune charge (sauf le poids propre bien) n'a été appliquée sur cet élément.

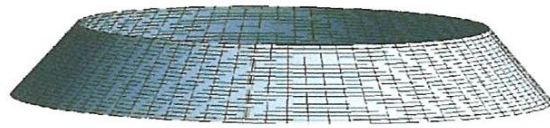


Figure 34 : Support du cône inversé

### 1.4. Dalle inclinée 1

Cette dalle est parfaitement encadrée sur le fût cylindrique et arrive jusqu'à la limite de la base du cône inversé. Nous avons appliqué la charge verticale  $P_{v,Dalle}$  sur cette dalle.

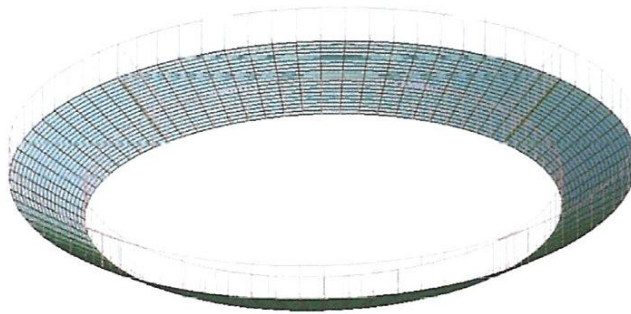


Figure 35 : Chargement de la dalle inclinée 1

### 1.4. Dalle inclinée 2

Cette dalle possède une ouverture de 3 m de diamètre, Aucune charge n'a été appliquée sur cet élément.

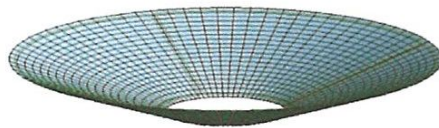


Figure 36 : La dalle inclinée 2

### 1.5. La couverture (dalle supérieure)

Cette dalle dispose d'une ouverture de 2 m de diamètre. On a appliqué deux types de charge à savoir la charge d'exploitation et la charge de neige.

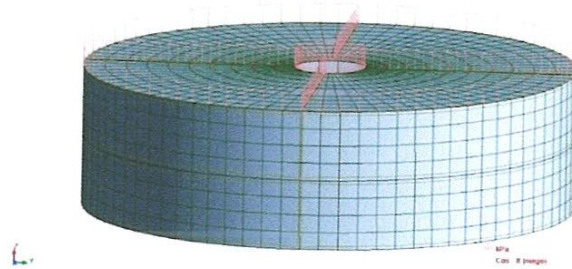


Figure 37 : Charge d'exploitation et charge de neiges appliquées sur la couverture

### 1.6. Introduction du poids propre

Le poids propre de la structure entière a été introduit automatiquement en utilisant la commande « définir charge – poids et masses » (Figure 39).

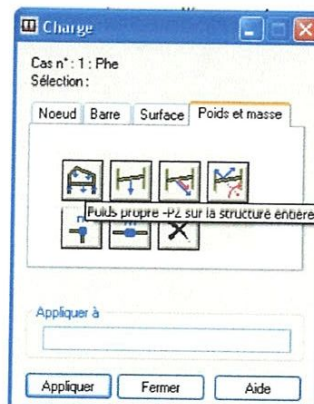


Figure 38 : Introduction du poids propre du silo complet

### 1.7. Introduction de la charge du vent

Le vent a été introduit en utilisant l'opérateur du logiciel « Robot ». Dans un premier temps on a choisi le type de structure, dans notre cas il s'agit d'un cylindre lisse à base circulaire de catégorie VI (Figure 40).

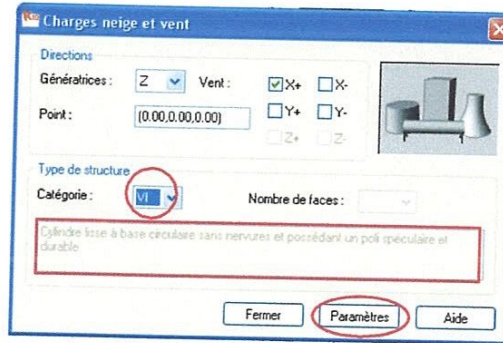


Figure 39 : Catégorie du silo vis-à-vis le calcul du vent

Ensuite, on a introduit les paramètres correspond à notre site (Région 2) et les dimensions du silo (Figure 41), les autres paramètres ne nécessitent aucun changement. Puis on a généré automatiquement le vent.

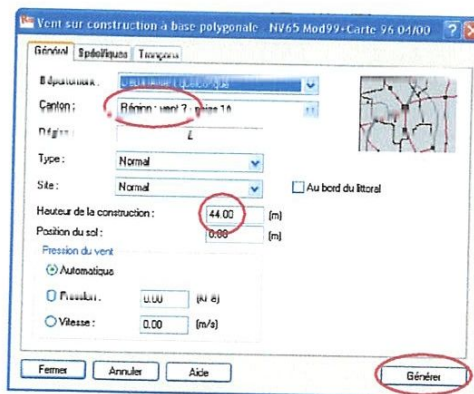


Figure 40 : Génération du vent en utilisant Robot

### 2. DIMENSIONNEMENT DE LA STRUCTURE

#### 2.1. Combinaison d'actions

Vis-à-vis de l'état limite de service (ELS), on considère la combinaison d'actions suivante :

$$G + Q + P_d + T + W$$

Où  $P_d$  représente l'action de la précontrainte prise égale à sa valeur caractéristique  $P_1$  ou  $P_2$  (article 4.1,31 – BAEL 91).

Vis-à-vis de l'état limite ultime de résistance (ELU), on considère les combinaisons d'actions suivantes :

$$G + 1,5 Q + P_m + W' + T$$

$$G + Q + P_m + SI + T$$

$P_m$  étant la valeur probable de la précontrainte (article 4.1,31 – BAEL 91), charges permanentes (G), charges climatiques (W) et (W'), charges d'exploitation (Q), température (T), effets sismiques (SI).

Avec pour le vent (V) et la neige ( $S_n$ ) :

- ELU :  $W' = 1,2 (V + S_n)$
- ELS :  $W = V + S_n$

Il faut préciser aussi que dans toutes ces combinaisons, les actions dues au ciment rentrent dans le terme Q (charge d'exploitation).

Dans notre cas, nous n'avons pas introduit la température et l'action sismique.

#### 2.2. Calcul de la précontrainte

On a utilisé un exemple de calcul de la précontrainte présenté dans le livre « le béton précontraint aux états-limites » pour dimensionner la précontrainte. Cela nous a permis de déterminer le nombre de câble et leur disposition. Il faut préciser qu'il s'agit uniquement d'une **précontrainte horizontale sous forme des cerces.**

## CHAPITRE IV : MODELISATION ET DIMENSIONNEMENT

---

Il faut savoir que la paroi précontrainte du silo doit résister, en état limite de service, à une pression horizontale due au ciment «  $P_{he}$  » en conservant une contrainte résiduelle de compression de 1 MPa.

La pression «  $P_{he}$  » à l'intérieure du silo n'est pas homogène, les aciers de précontrainte devront être soumis, après toutes les pertes, à une traction équilibrant cette pression calculé selon la formule suivante :

$$F_H = P_{he} \times R + \sigma_b \times S$$

$F_H$  : effort horizontale de la précontrainte

$P_{he}$  : pression horizontale du ciment lors de la vidange

$R$  : rayon de silo

$\sigma_b$  : contrainte résiduelle de compression du béton égale à 1 MPa

$S$  : aire d'une section de 1 m de hauteur et 0,35 m d'épaisseur

On a choisie d'utiliser des câbles Freyssinet de type T15 de section  $A_p=139 \text{ mm}^2$

La contrainte des aciers, après pertes, est supposée égale à  $\sigma_s = 1100 \text{ MPa}$  (40% de pertes)

Le nombre des torons par câble est calculé par l'expression :

$$n = \frac{F_H}{A_p \times \sigma_s}$$

A titre d'exemple, pour le tronçon 0 - 2 m :

$P_{he} = 0,03 \text{ MPa}$

$$F_H = (0,03 \times 7) + (1 \times 0,35) = 0,53 \text{ MN}$$

$$n = \frac{0,53 \times 10^6}{139 \times 1100} = 3 \text{ torons}$$

Donc on a **1 câble 3T15 par mètre**

## CHAPITRE IV : MODELISATION ET DIMENSIONNEMENT

---

Les câbles de précontraintes sont disposés sous forme de cercles en utilisant les ancrages X Freyssinet pour assurer un bon ancrage de ceux-ci à l'intérieur de la paroi. Ces ancrages sont noyés dans des nervures conçus à l'intérieur du fût afin de les protéger contre la corrosion. Ce type d'ancrage est le moyen idéal pour la précontrainte circulaire.

Les calculs sont résumés dans le tableau suivant :

<b>Tronçons (m)</b>	<b><math>P_{he}</math> (MPa)</b>	<b><math>F_H</math> (MN)</b>	<b>Câbles</b>
0 - 2	0,026	0,53	<b>2 câbles 3T15</b>
2 - 4	0,051	0,71	<b>2 câbles 5T15</b>
4 - 6	0,076	0,88	<b>2 câbles 6T15</b>
6 - 8	0,100	1,05	<b>2 câbles 7T15</b>
8 - 10	0,124	1,22	<b>2 câbles 8T15</b>
10 - 12	0,148	1,39	<b>2 câbles 9T15</b>
12 - 14	0,172	1,55	<b>2cables 10T15</b>
14 - 16	0,195	1,71	<b>2 câbles 11T15</b>
16 - 18	0,218	1,87	<b>2 câbles 12 T15</b>
18 - 20	0,240	2,03	<b>2 câbles 13T15</b>
20 - 22	0,263	2,19	<b>2 câbles 14T15</b>
22 - 24	0,285	2,34	<b>2 câbles 15T15</b>
24 - 26	0,306	2,49	<b>2 câbles 16T15</b>
26 - 28	0,328	2,64	<b>2 câbles 17T15</b>
28 - 30	0,349	2,79	<b>2 câbles 18T15</b>
30 - 32	0,369	2,94	<b>2cables 19T15</b>
32 - 34	0,390	3,08	<b>2 câbles 20T15</b>
34 - 36	0,410	3,22	<b>2 câbles 21T15</b>
36 - 37	0,420	3,29	<b>1 câble 22T15</b>

**Tableau 16 : Dimensionnement de la précontrainte**

### 2.3. Présentations des résultats

Les charges définies ci-dessus engendrent des efforts internes suivant le méridien et la parallèle  $N_\varphi$ ,  $M_\varphi$  (ou  $N_v$ ,  $M_v$ ) et  $N_\theta$ ,  $M_\theta$  (ou  $N_h$ ,  $M_h$ ) respectivement par unité de longueur de chaque section verticale et horizontale du silo (Figure 42). Ces efforts internes permettent de dimensionner les armatures passive et active et faire les vérifications des contraintes.

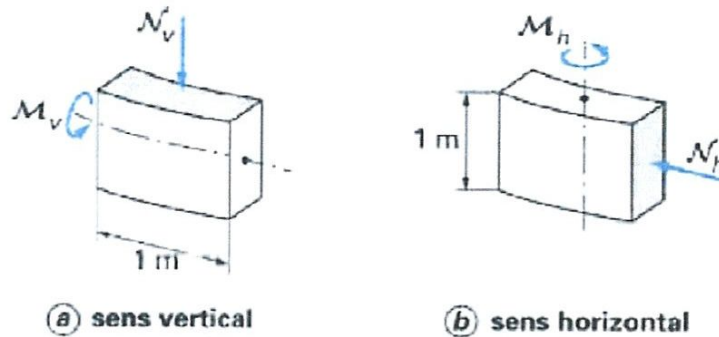


Figure 41 : Efforts internes  $N_v$ ,  $M_v$ ,  $N_h$ ,  $M_h$

#### 2.3.1. Efforts $N_v$ et $N_h$

Après avoir actionné l'analyse sur « Robot », nous obtiendrons les efforts internes en n'importe quel point de la structure sous l'effet des différentes combinaisons d'actions, ainsi que les déplacements et les contraintes.

Les résultats se présentent sous forme de cartographie de couleur avec les valeurs correspondantes (Figure 43 et 44). Il faut préciser que les efforts  $N_{xx}$ ,  $M_{xx}$ ,  $N_{yy}$  et  $M_{yy}$  fournis par le logiciel « Robot » correspondent respectivement à  $N_h$ ,  $M_h$ ,  $N_v$  et  $M_v$ .



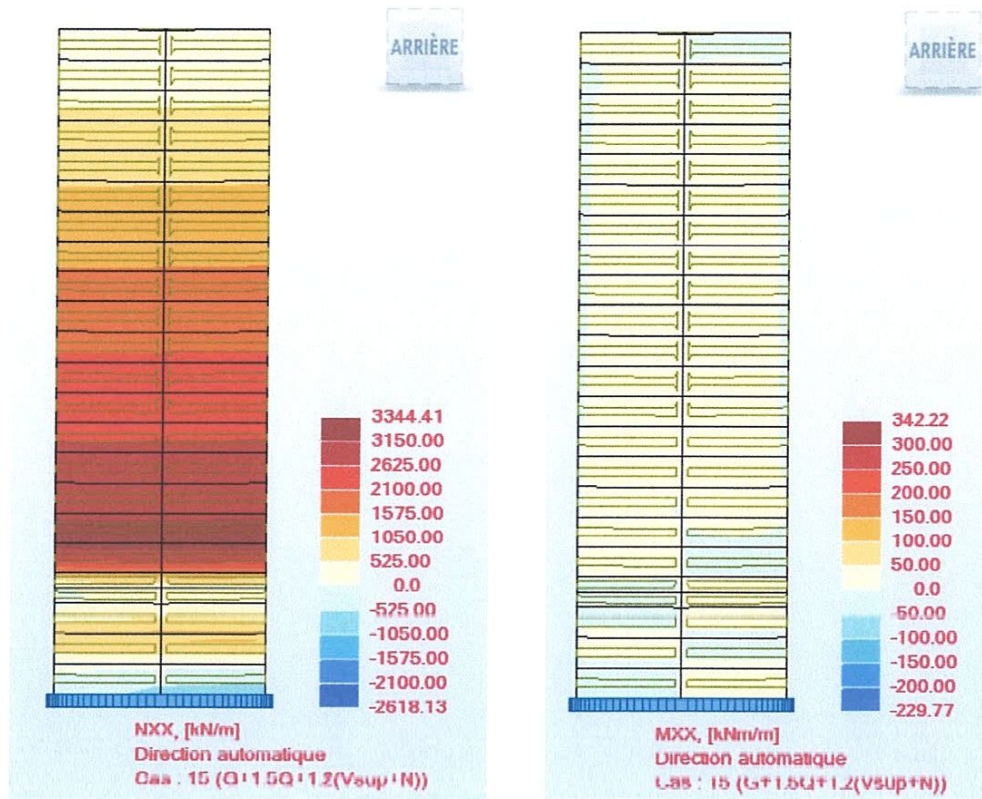


Figure 42 : Cartographie des efforts internes  $N_{xx}$  et  $M_{xx}$  pour la combinaison la plus défavorable

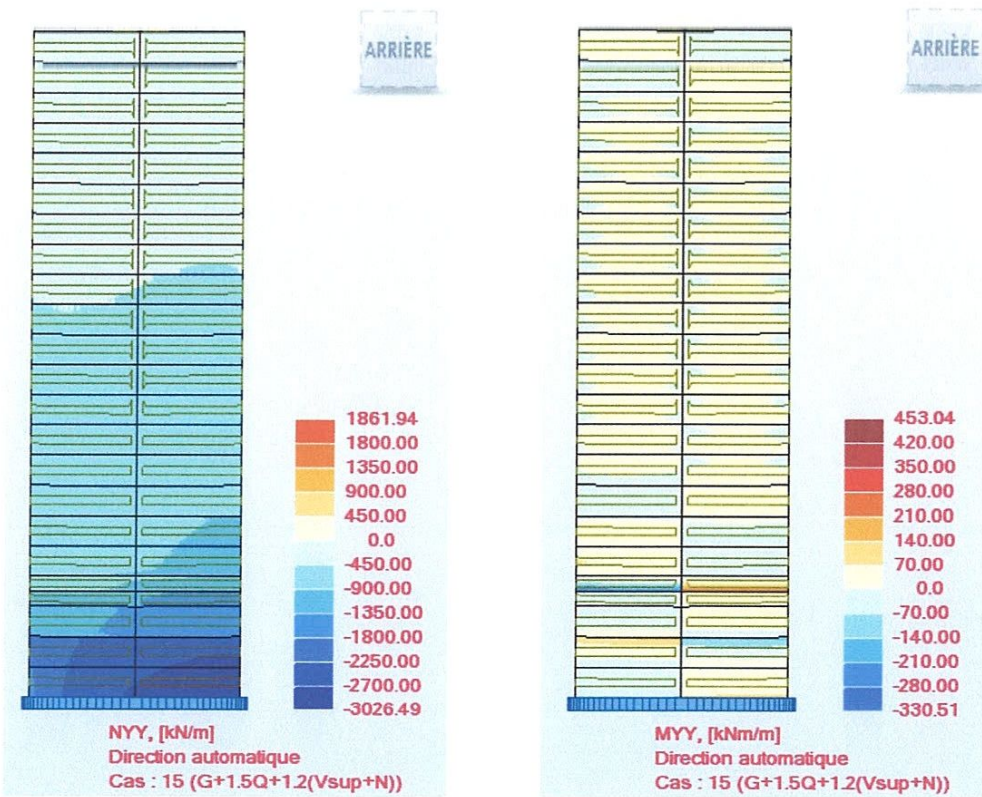


Figure 43 : Cartographie des efforts internes  $N_{yy}$  et  $M_{yy}$  pour la combinaison la plus défavorable

Les valeurs maximales des efforts  $N_{xx}$ ,  $M_{xx}$ ,  $N_{yy}$ ,  $M_{yy}$  sont résumés dans le tableau suivant :

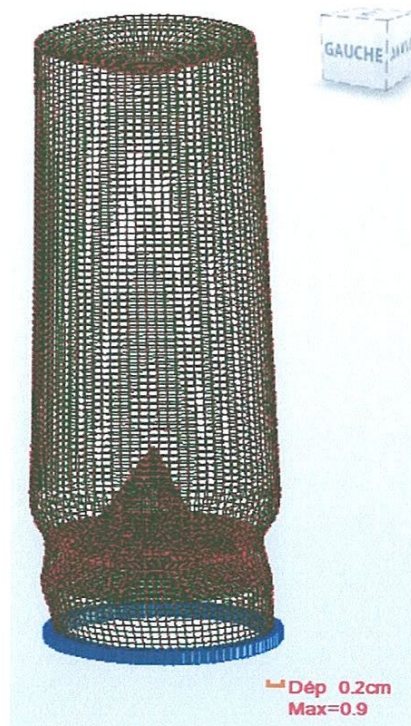
Combinaisons		$N_{xx}$	$M_{xx}$	$N_{yy}$	$M_{yy}$
ELS	COM1 ( $G + Q + P_d + V_{sur} + S_n$ )	1886	215	-2243	285
	COM2 ( $G + Q + P_d + V_{dep} + S_n$ )	1863	213	-2243	288
ELU	COM3 ( $G + Q + P_m$ )	1881	214	-2100	286
	COM4 ( $G + 1,5Q + P_m + 1,2V_{sur} + 1,2S_n$ )	<b>3345</b>	<b>343</b>	<b>-3027</b>	<b>453</b>
	COM5 ( $G + 1,5Q + P_m + 1,2V_{dep} + 1,2S_n$ )	3307	339	-3027	449

**Tableau 17 : Valeurs maximales de  $N_{xx}$ ,  $M_{xx}$ ,  $N_{yy}$ ,  $M_{yy}$  pour les différentes combinaisons**

La combinaison 4 est la plus défavorable, les valeurs des efforts internes de cette combinaison seront retenues pour le dimensionnement des armatures passives.

### 2.3.2. Déplacement maximal

Le déplacement maximal de la structure est de l'ordre de 0,9 cm, ce qui est admissible.



**Figure 44 : Déformation du silo amplifié sous la combinaison 4**

## 2.4. Calcul des armatures passives

La paroi du silo travail en flexion composée selon la direction horizontale et verticale. Elle est soumise aux efforts normaux  $N_{xx}$  et  $N_{yy}$  et les moments fléchissant  $M_{xx}$  et  $M_{yy}$  (Figure 43 et 44). Nous allons calculer la quantité d'armature passive en utilisons les efforts maximaux obtenus grâce au logiciel « Robot » (Tableau 18).

Nous avons utilisé le logiciel « EXPERT » pour calculer les sections des armatures. Les résultats sont présentés dans ce qui suit.

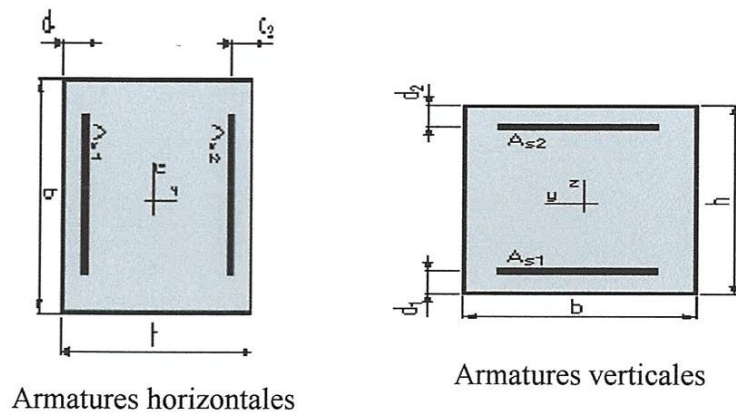
### a) Hypothèses

Béton:  $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$                       Acier:  $f_e = 500 \text{ MPa}$

- Fissuration non préjudiciable
- Pas de prise en compte des dispositions sismiques
- Calcul suivant BAEL 91 mod. 99

### b) Section

$b = 100,0 \text{ cm}$   
 $h = 35,0 \text{ cm}$   
 $d_1 = d_2 = 3,0 \text{ cm}$



	Efforts appliqués		Sections d'acier	
	N (kN)	M (kN.m)	$A_{s1}$ (cm <sup>2</sup> )	$A_{s2}$ (cm <sup>2</sup> )
Horizontal	3345,0	339,0	3,4	<b>17,6</b>
Vertical	3027,0	453,0	9,8	<b>28.0</b>

**Tableau 18. Les armatures passives sens horizontal et vertical**

Les sections d'une direction donnée situées au voisinage d'une face seront prises égales à la section maximale ( $A_{s2}$ ) dans chaque sens (horizontal et vertical)

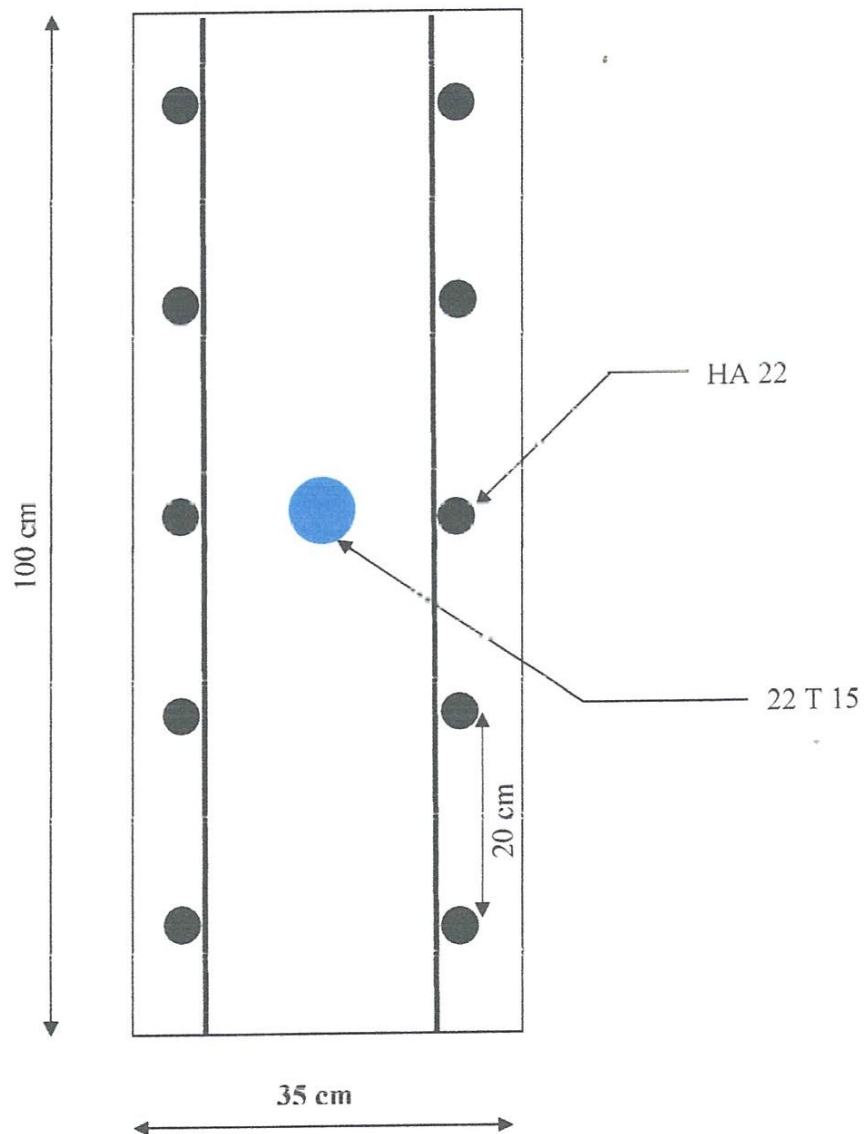
## CHAPITRE IV : MODELISATION ET DIMENSIONNEMENT

---

Nous avons choisi :

-horizontalement : 5 barres HA22

-verticalement : 5 barres HA28



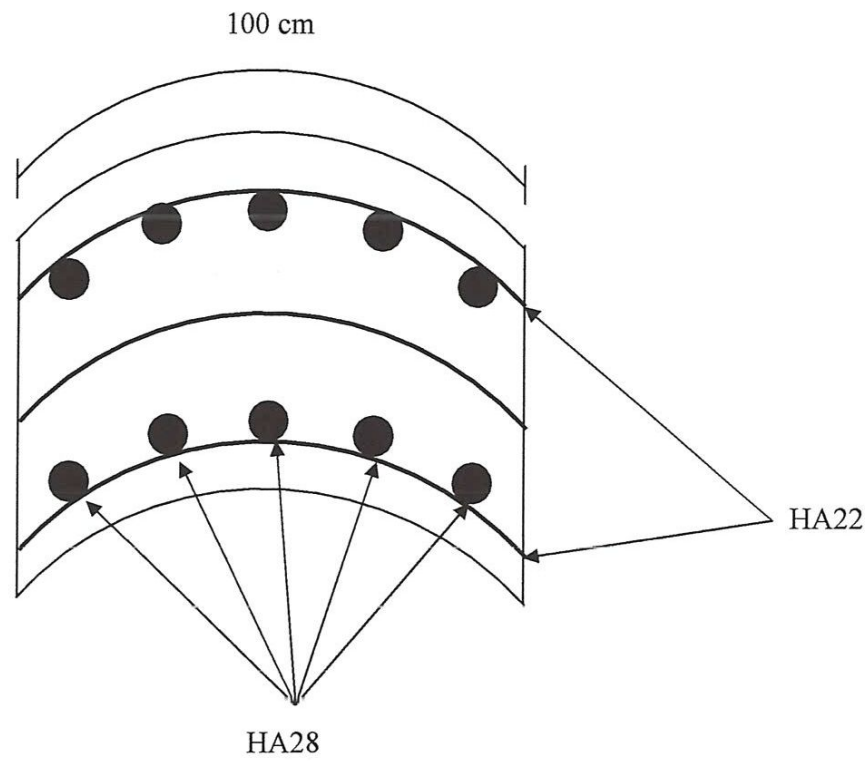


Figure 45 : schéma montre le ferrailage de la variante précontrainte (horizontal et vertical)

# Chapitre V

## Phases de construction

### CHAPITRE V : PHASES DE CONSTRUCTION

#### Etapes de construction

Avant de commencer l'exécution des travaux, il est indispensable de faire une reconnaissance des lieux pour pouvoir piqueter tous les points singuliers dont on aura pour le début d'exécution tout en suivant les plans d'implantation.

Ensuite tous les matériels nécessaires à l'exécution des fondations doivent être acheminés.

La première phase après l'exécution de la fouille de la semelle est le forage des pieux puis la mise en place des armatures de ces derniers et le coulage du béton.

Sur les pieux, le coffrage et le ferrailage de la semelle seront posés puis on procède au bétonnage de la semelle.

Les positions en plan et en altitude doivent être vérifiées au fur à mesure de l'avancement du chantier, c'est-à-dire avant et après chaque nouvelle opération, de manière à corriger à temps les petits écarts qui risquent d'apparaître.

Une fois la semelle réalisée, on met en place une partie des armatures du fût et son coffrage glissant, ce dernier doit respecter les règles suivantes :

- Le coffrage doit être en bois
- Les vérins de levage doivent être mixtes; hydraulique et manuelle, afin de corriger facilement le décalage du coffrage
- Le béton de coulage de la paroi doit être pâteux et sans aucun excès d'eau. Il doit être riche en ciment pour être gras, mais sans excès pour ne pas entraîner de fissuration par retrait.

Il faut aussi contrôler l'absolue verticalité des barres verticales d'appui et de relevage des vérins, ce contrôle doit être permanent.



**Figure 46 : Exécution du fût cylindrique par un coffrage glissant**

La dalle inclinée et le cône inversé seront réalisés au fur et à mesure de l'avancement du fût cylindrique (Figure 48).



**Figure 47 : Exécution de la dalle inclinée et du cône inversé**

Il y a lieu de se méfier, au point de vue météorologique, du risque de gel qui pourrait nécessiter l'interruption du coulage du béton (qui se fait à l'aide de la grue), ce qui provoquerait la création d'un joint de reprises pernicieuses pour la bonne étanchéité de la paroi.



**Figure 48 : Avancement des travaux**



## CHAPITRE V : PHASES DE CONSTRUCTION

---

Il faut noter aussi que le talochage de la surface du silo extérieur se fait directement après le décoffrage (Béton frais).

Ce qui concerne la précontrainte, sa réalisation se fait par l'incorporation des câbles de précontrainte au fur et à mesure du coulage de béton.

Une fois que le fut réalisé, on procède à la réalisation de la couverture.



**Figure 49 : Fin d'exécution du fût cylindrique**

# Conclusion

# CONCLUSION

---

## CONCLUSION

Au cours de cette étude, nous pensons avoir réussi à avoir un aperçu général, sur la majorité des phases d'étude et de réalisation des silos de stockage de ciment.

Nous avons commencé par l'étude globale de trois variantes afin de choisir la variante la plus avantageuse pour la phase de dimensionnement. Cette phase nous a permis de se familiariser avec ce type de structure exceptionnelle.

La phase de dimensionnement a pris la majeure partie de notre travail surtout le volet modélisation. Nous avons parcouru rapidement les phases en essayant de donner le maximum de détails concernant le calcul de cette structure à cause du temps très court qui nous a été imparti.

Lors de cette étude, nous avons tenté d'utiliser des logiciels techniques, afin d'automatiser au maximum les étapes de calcul et de consacrer plus le temps à la réflexion. Car les calculs ne nous permettent pas de résoudre tous les problèmes auxquels nous avons été confrontés, il a fallu donc faire appel à notre bon sens et à la logique pour aboutir à des dispositions qui relèvent plus de l'ordre pratique que technique.

Enfin, ce travail que nous présentés est le couronnement de cinq années d'étude. Il nous a permis de faire une rétrospective de nos connaissances accumulées pendant notre cursus universitaire.

J'espère que ce mémoire servira de guide pour les promotions avenir.

# Références bibliographiques

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

### REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

#### Livres :

Rene Walther en collaboration avec Julieu Treleani. « *Construire en béton synthèse pour architectes* »

Marcel et Anfre Reimbert. « *Silo théorie et pratique* »

Henry Thonier. « *Le béton précontraint aux états -limites* ». Editeur : presses de l'école nationale des ponts et chaussées

Pierre Charron : « *calcul des ouvrages en béton armé suivant les règles B.A.E.L.83 théorie et applications* ». Editeur : eyrolles

Yacine Cheraite: « *le béton précontraint aux états limites (selon les règles B.P.E.L.91)* ». Editeur : direction de la publication universitaire de Guelma. (D.P.U.G) »

« *action du vent et de la neige sur les structures eurocode 1*. Editeur : afnor

Eurocode 1: *Bses de calcul et actions sur les structures Partie 4: Actions dans les silos et réservoirs* éditeur: Membre de la commision de normalisation, président: M Mathez"

#### Articles :

P. Hilgraf et A. Hilck, 2009. Functioning and process engineering design of large aerated silos. Cement international, Sonderdruck aus : Issue No : 1/2009, pp. 42–60.

#### Mémoires :

Bouteldja Fathe « *dimensionnement d'un silo de stockage de ciment*. »Mémoire d'ingénieur école national des travaux publics (Alger) ,2004.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

---

Sites internet :

[www.claudiuspeters.com](http://www.claudiuspeters.com)

[www.scribd.com/.../Eurocode-NF-EN-199114](http://www.scribd.com/.../Eurocode-NF-EN-199114)

# Annexe

### ANNEXES

#### Visite des silos « Amor ben Amor »

Le mercredi 11 Mai, nous nous sommes rendu avec notre encadreur au site de l'entreprise « Ben Amor » pour effectuer une visite des silos de stockage de l'usine. Il s'agit de silo métallique en tôles ondulées.

A notre arrivée nous avons été chaleureusement accueillis par un ingénieur en génie civil, qui était chargé de nous guidé tout le long de notre visite.

Sans hésitation, l'ingénieur nous a amené au près des silos métallique de stockage de blé en nous expliquant le mode d'ensilage et de vidange. L'ingénieur n'a pas manqué de nous montrer une cave sous les silos qui sert à la vidange et au transport du blé à une autre partie de l'usine dans un tunnel sous-sol.

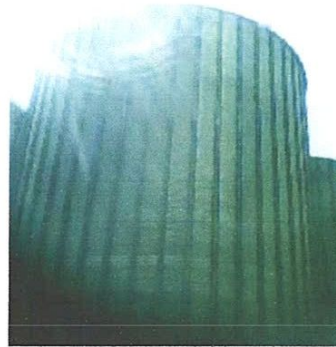


Figure 50 : Silos métalliques de stockage de blé « BEN AMOR »

Ensuite, l'ingénieur nous a fait visiter un autre type de silos, il s'agit d'un autre type de silos métalliques destinés au stockage de la farine nécessaire à la fabrication des pâtes. Ces silos sont de petite taille, ils sont implantés à l'intérieur des hangars de fabrication.





**Figure 51 : Silo métallique de stockage de la farine « BEN AMOR ».**

**En effet, tout le long de notre visite, l'ingénieur s'est soucié de nous expliqué avec précision et beaucoup de détails comment fonctionnent les différents matériels et leurs rôles dans la fabrication.**

Enfin nous dirons que cette visite au sein du site « Ben Amour » nous a permis d'avoir un aperçu global sur les silos utilisés pour le stockage.