

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 Master

Présenté à l'Université 08 Mai 1945 de Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de : Génie Civil & Hydraulique

Spécialité : Génie civil

Option : Structures

Présenté par : - SABER Randa.

- SELAIMIA Nahla.

**Thème : Conception et calcul d'un silo en béton armé
« stockage de blé ».**

Sous la direction de : Dr. M. Himeur.

Octobre 2020

Remerciements

*Toute notre gratitude, grâce et remerciement vont à
dieu le tout puissant qui nous a donné la force, la patience, le
courage et la volonté pour élaborer ce travail.*

*C'est avec une profonde reconnaissance et considération
particulière que nous remercions notre encadreur :*

*Dr.HIMEUR.MOHAMMED pour la sollicitude avec laquelle il a
suivi et guidé ce travail.*

*Nous remercions les membres de jury qui nous font
l'honneur de présider et d'examiner ce modeste travail.*

*Toute notre gratitude va à tous les enseignants qui ont contribué
à notre formation.*

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

Dédicaces

J'ai l'honneur de dédier ce modeste travail:

*A Mes parents. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour
dont ils ne cessent de me combler.*

Que dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A celui que j'aime beaucoup et qui m'a soutenue tout au long de ce projet :

*A Mes frères Nedjmedine, Amine et Iheb et ma sœur Maha,
sans oublier ma meilleure amie Amira que j'aime trop.*

A toute ma famille,

A mes amis.

*Et ceux qui ont contribué de près
ou de loin pour que ce projet soit possible,*

Je vous dis merci.

SABER RANDA

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mon père qui m'a guidé durant les moments les plus pénibles

*de ce long chemin, mon père qui a été à mes côtés et ma
soutenu durant toute ma vie, mon père qui a sacrifié toute sa
vie afin de me voir devenir ce que je suis, merci **mon père**.*

A mes frères « Rami, Mouhamed », pour son encouragement.

*A mes chères sœurs « Nassima, Wided », pour leurs
encouragements et leurs soutien moral*

A tous mes amis sans exception.

A toute ma famille.

*Enfin je veux conclure par mes proches amis et à tous les
collègues de la promotion 2020.*

A vous

SELAIMIA NAHLA

ملخص

لقد أصبحت هياكل التخزين في الوقت الحالي جد مهمة وذلك بسبب إنتاج كميات كبيرة من الحبوب، والحاجة إلى تخزينها وتكييفها مع احتياجات الأسواق الجزائرية، حيث تعتبر هذه الطريقة هي الأكثر شهرة للحفاظ على المحاصيل الزراعية لمدة أطول.

صوامع مجموعات الخرسانة المسلحة هي هياكل شائعة الاستخدام في صناعة الأغذية، حيث يكون من الضروري عادةً فصل تخزين أنواع ومصادر الحبوب المختلفة.

ولبناء هذه المباني الضخمة يتم استخدام الخرسانة بسبب جودتها العالية وصلابتها وطول عمرها. ولكن يجب مراعاة أن الخرسانة تتعرض للعدوان في البيئات الصناعية والزراعية. يرتبط حساب هذه الهياكل بطريقة عمل الأحمال المؤثرة على الجدران الأسطوانية.

شرحنا طرق حساب القوى المطبقة على الصوامع الخرسانية المسلحة الناتجة عن المنتجات التي تخزنها وسنعرض أيضاً النتائج التي تم الحصول عليها واستخدامها لتنفيذ تقوية الهيكل.

الكلمات المفتاحية :

الخرسانة المسلحة – الحبوب – الصوامع – التخزين – الأحمال المؤثرة – الجدران الأسطوانية.

Abstract

Due to the production of large volumes of cereals, and the need to store them and adapt them to the needs of Algerian markets, storage structures are currently more important. This method is becoming the best known for long-term preservation.

Reinforced concrete silo groups are structures commonly used in the food industry, where it is usually necessary to separate the storage of different types and sources of grain.

To structure these colossal buildings, the Concrete is the best choice to use due to its good quality, hardness and longevity. But it must be taken into account that concrete will be subjected to aggression in industrial and agricultural environments.

The calculation of these structures is linked to the mode of action of the loads acting on the cylindrical walls.

We explained the calculation methods of the forces applied to reinforced concrete silos generated by the products they store and we will also present the results obtained and the use of these to carry out the reinforcement of the structure.

Keywords:

Concrete – Cereals– Silo groups – Storage – The loads acting – Cylindrical walls.

Résumé

Actuellement, Les structures de stockages de céréales sont très importantes à cause de la capacité de la production et l'adaptation aux besoins des marchés de l'Algérie. Cette méthode devient la plus connue pour une conservation à long terme.

Les groupes de silos en béton armé sont des structures couramment utilisées dans l'industrie alimentaire, où il est généralement nécessaire de séparer le stockage de différents types et sources de céréales.

La matière la plus convenable pour construire les colossaux bâtiments est le béton à cause de sa rigidité et sa longévité, il sera soumis à l'agression dans les milieux industriels et agricoles. Le calcul de ces structures, est lié au mode d'action des charges agissant sur les parois cylindriques.

Dans ce travail on a expliqué les méthodes de calcul des efforts appliqués sur des silos en béton armé engendrés par les produits qu'ils stockent et nous présentons aussi les résultats obtenus et l'exploitation de celles-ci pour réaliser le ferrailage de la structure.

Mots clés :

Silos – Céréales – Béton armé – Stockage – Action des charges – Parois cylindriques.

Sommaire

Remerciements.....	I
Dédicaces.....	II
Résumés : Arabe.....	IV
Anglais.....	V
Français.....	VI
Sommaire.....	VII
Liste des figures.....	XI
Liste des tableaux.....	XV
Liste des notations.....	IXI
Introduction générale.....	01
Chapitre I : Notions générales sur les silos	
I.1 Introduction.....	04
I.2. Généralités sur les silos.....	04
I.3. Historique.....	08
I.4. Classification des silos.....	09
I.4.1. Taille et géométrie des silos.....	10
I.4.2. Type d'écoulement.....	11
I.4.3. Matière structurale constituant la coque du silo.....	13
I.5. Terminologie.....	15
I.5.1. Rayon hydraulique.....	15
I.5.2. Surface de remplissage.....	15

I.5.3. Plan moyen de remplissage.....	15
I.5.4. Plan de base.....	16
I.6. Mode d'écoulement.....	18
I.6.1. Écoulement en cheminée (ou écoulement central).....	18
I.6.2. Écoulement interne.....	18
I.6.3. Écoulement en masse.....	18
I.7. Types des vidanges.....	19
I.7.1. Vidange normale.....	19
I.7.2. Vidange géométriquement anormale.....	19
I.7.3. Vidange mécaniquement anormale.....	19
I.7.4. Vidange structurellement anormale.....	19
I.8. Exécution des travaux.....	20
I.8.1. Coffrage.....	20
I.8.2. Mise en œuvre du béton.....	23
I.9. Les problèmes des silos.....	24
I.9.1. Risque liées à la vidange.....	24
I.9.2. Accidents de silo.....	25
I.9.3. Risques industriels liés aux silos (incendie et explosion).....	26
I.10. Conclusion.....	27

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

II.1. Introduction.....	29
II.2. Valeur caractérisant le produit ensilé et son interaction avec la paroi.....	30
II.3. Actions exercées par la matière ensilée.....	31
II.3.1. Domaine de définition.....	32

II.3.2. Actions sur la paroi verticale du silo.....	32
II.3.3. Actions corrigées.....	35
II.3.4. Actions sur le fond d'un silo.....	36
II.3.5. Action créées par les vidanges anormales ou le processus d'insufflation d'air.....	38
II.3.6. Actions Créées par les processus d'insufflation d'air (sauf silos d'homogénéisation).....	42
II.3.7. Actions Créés dans Les Silos à Vidange Structurellement Anormale.....	44
II.3.8. Définition des Silos d'homogénéisation par Brassage d'ensemble.....	44
II.4. Calcul en béton armé.....	45
II.4.1. Base du calcul de la structure.....	45
II.4.1.1. Actions à prendre en compte.....	46
II.4.1.2. Combinaisons d'actions.....	46
II.4.2. Calcul des sollicitations.....	47
II.4.2.1. Justification des sections.....	55
II.4.2.2. Dispositions constructives minimales.....	56
II.5. Conclusion.....	58

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

III.1. Introduction.....	60
III.2. Présentation l'ouvrage.....	60
III.2.1. Géométrie et dimensions.....	60
III.2.2. Implantation et contraintes.....	62
III.3. Charges dues au blé.....	63

III.3.1. Données géométriques.....	63
III.3.2. Domaine d’application des formules type silo.....	64
III.3.3. Caractéristiques du produit en sillée (blé).....	64
III.3.4. Actions sur la paroi verticale du silo.....	65
III.3.4.1. Valeurs nominales des actions.....	65
III.3.4.2. Actions corrigées.....	81
III.3.4.3. Calcul des moments.....	90
III.3.5 Action sur le fond du silo.....	95
III.4. Conclusion.....	100

Chapitre IV : Calcul de ferrailage de la paroi du silo

IV.1. Introduction.....	120
IV.2. Contrainte interne uniforme sur la section d’une tranche de silo (Extrémités ouvertes).....	120
IV.3. Etude de la paroi de silo.....	124
IV.3.1. Descente de charge.....	125
IV.3.2. Combinaison de charge.....	127
IV.3.3. Calcul des armatures de la paroi.....	128
IV.3.4. schéma de ferrailage.....	132
IV.4. Etude de la trémie de silo	132
IV.4.1. Calcul des armatures de la paroi.....	134
IV.4.2. Schéma de ferrailage.....	135
IV.5. Conclusion.....	136
Conclusion générale.....	137

Liste des figures :

Chapitre I : Notions générales sur les silos

Figure I.1: les différentes formes et types de silo.....	05
Figure I.2 : Formes de silos et notation des dimensions selon EC1-Partie 4.....	06
Figure I.3 : Formes de silos standards.....	10
Figure I.4 : Comportement des écoulements.....	12
Figure I.5 : Méthode graphique d'analyse du comportement des écoulements.....	13
Figure I.6 : Distribution de la pression horizontale et verticale en fonction de la hauteur d'une matière stockés dans le silo.....	14
Figure I.7 : Surface, plan moyen et rive de remplissage.....	16
Figure I.8 : Plan de base.....	16
Figure I.9: Coordonnée relative.....	17
Figure I.10 : Mode d'écoulement.....	18
Figure I.11 : Nomenclature des éléments constitutifs du coffrage glissant.....	22
Figure I.12 : Exécution du fût cylindrique par un coffrage glissant.....	23
Figure I.13 : Explosion d'un silo en béton armé "céréale".....	26

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

Figure II.1 : Pression verticale sur le plan de cote z.....	33
Figure II.2 : Action sur la paroi d'un silo.....	33
Figure II.3 : Pression sur le fond d'un silo à trémie.....	36
Figure II.4 : Décomposition des forces dans une paroi de trémie.....	37
Figure II.5 : Silos à vidages géométriquement anormale.....	38
Figure II.6 : Diagramme de la fonction G dans le cas de la première configuration.....	41
Figure II.7 : Diagramme de la fonction G dans le cas de la deuxième configuration.....	42
Figure II.8 : Influence de la pression.....	43
Figure II.9 : Sollicitations dues aux actions d'ensemble.....	50
Figure II.10 : Sollicitations dues aux actions d'ensemble et locales.....	51
Figure II.11 : Vérifications sous les sollicitations.....	53

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

Figure III.1 : Silo en béton armé pour stockage des céréales ‘Bouchegouf-Guelma’	60
Figure III.2 : Vu en plan fait par l’autocad.....	61
Figure III.3 : Vu en plan d’une cellule (stockage de blé).....	61
Figure III.4 : Coupe verticale d’une cellule (Stockage de blé).....	62
Figure III.5 : Le rayon intérieur et extérieur de silo.....	63
Figure III.6 : Le plan moyen de remplissage et le plan de base et profondeur de vidange.....	64
Figure III.7 : actions n et t sur la paroi de silo.....	65
Figure III.8 : Distribution de la composante nominale horizontale n_1 en fonction de la hauteur d’une matière stockée dans le silo.....	67
Figure III.9 : Distribution de la composante nominale horizontale n_2 en fonction de la hauteur d’une matière stockée dans le silo.....	69
Figure III.10 : Distribution de la composante nominale tangentielle verticale t_1 en fonction de la hauteur d’une matière stockée dans le silo.....	71
Figure III.11 : Distribution de la composante nominale tangentielle verticale t_2 en fonction de la hauteur d’une matière dans le silo.....	73
Figure III.12 : Distribution de la pression nominale moyenne v_1 sur le plan de base en fonction de la hauteur d’une matière stockée dans le silo.....	75
Figure III.13 : Distribution de la pression nominale moyenne v_2 sur le plan de base en fonction de la hauteur d d’une matière stockée dans le silo.....	77
Figure III.14 : Distribution de la résultante nominale T_1 en fonction de la hauteur d’une matière stockée dans le silo.....	79
Figure III.15 : Distribution de la résultante nominale T_2 en fonction de la hauteur de d’une matière stockée dans le silo.....	81
Figure III.16 : Distribution de la composante nominale horizontale corrigée n_{c1} en fonction de la hauteur d’une matière stockée dans le silo.....	83
Figure III.17 : Distribution de la composante nominale horizontale corrigée n_{c2} en fonction de la hauteur d’une matière stockée dans le silo.....	85
Figure III.18 : Distribution de la pression nominale moyenne v_{c1} sur le plan de base en fonction de la hauteur d’une matière stockée dans le silo.....	87

Figure III.19 : Distribution de la pression nominale moyenne v_{c2} sur le plan de base en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	89
Figure III.20 : Distribution de le moment de referece M_{ref} en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	91
Figure III.21 : Distribution de le moment d'ovalisation M_{ov} en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	94
Figure III.22 : La trémie de silo.....	95
Figure III.23 : Distribution de la force nominale horizontale n_1 en fonction de la profendeur de la trémie.....	96
Figure III.24 : Distribution de la force nominale Horizontale n_2 en fonction de la profendeur de la trémie.....	97
Figure III.25 : Distribution de la presion moyenne v_1 en fonction de la profendeur de la trémie.....	98
Figure III.26 : Distribution de la presion moyenne v_2 en fonction de la profendeur de la trémie.....	99
Figure III. 27 : Distribution de la force nominale corrigées n_{c1} en fonction de la profendeur de la trémie.....	100
Figure III.28 : Distribution de la force corrigée n_{c2} en fonction de la profendeur de la trémie.....	101
Figure III.29 : Distribution la pression nominale moyenne v_{c1} en fonction de la profendeur de la trémie.....	102
Figure III.30 : Distribution de la pression moyenne corrigée v_{c2} en fonction de la profendeur de la trémie.....	103
Figure III.31 : Décomposition des forces dans la paroi de trémie.....	104
Figure III.32 : Distribution de v'_1 en fonction de la profendeur de la trémie.....	104
Figure III.33 : Distribution de v'_2 en fonction de la profendeur de la trémie.....	105
Figure III.34 : Distribution de $(n'_1 \sin(\alpha))$ en fonction de la profendeur de la trémie.....	106
Figure III.35 : Distribution de $(n'_2 \sin(\alpha))$ en fonction de la profendeur de la trémie.....	107
Figure III.36 : Distribution de $[(n'_1 \sin(\alpha)) \cos(\alpha)]$ en fonction de la profendeur de la trémie.....	108
Figure III.37 : Distribution de $[(n'_2 \sin(\alpha)) \cos(\alpha)]$ en fonction de la	109

profondeur de la trémie.....	
Figure III.38: Distribution de $(v'_1 \cos(\alpha) + g)$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	110
Figure III.39 : Distribution de $(v'_2 \cos(\alpha) + g)$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	111
Figure III.40: Distribution de $\left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\sin(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	112
Figure III.41: Distribution de $\left(\frac{v'_2 \cos(\alpha) + g}{\sin(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	113
Figure III.42: Distribution de $\left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	114
Figure III.43: Distribution de $\left(\frac{v'_2 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	115
Figure III.44 : Distribution de $\left[\left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right) \cos(\alpha)\right]$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	116
Figure III.45 : Distribution de $\left[\left(\frac{v'_2 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right) \cos(\alpha)\right]$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	117
 Chapitre IV : Calcul de ferrailage de la paroi du silo	
Figure IV.1: Distribution de la contrainte σ en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans la paroi de silo.....	120
Figure IV.2 : Distribution de σ_p en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans la paroi de silo.....	122
Figure IV.3: Distribution de σ_t en fonction de la hauteur de la trémie de silo.....	123
Figure IV.4 : sollicitation dans la paroi de silo.....	124
Figure IV.5: Schéma de ferrailage de la paroi de silo.....	132
Figure IV.6: Sollicitation dans la trémie de silo.....	133
Figure IV.7: Schéma de ferrailage de la trémie de silo.....	135

Liste des tableaux :

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

Tableau II.1 : Poids volumiques et angles de frottement interne conventionnels de différents produits.....	30
Tableau II.2 : Valeurs conventionnelles de ρ	31

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

Tableau III.1 : Distribution de la composante nominale horizontale n_1 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	66
Tableau III.2 : Distribution de la composante nominale horizontale n_2 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	68
Tableau III.3 : Distribution de la composante nominale tangentielle verticale t_1 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	69
Tableau III.4 : Distribution de la composante nominale tangentielle verticale t_2 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	71
Tableau III.5 : Distribution de la pression nominale moyenne v_1 sur le plan de base en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	74
Tableau III.6 : Distribution de la pression nominale moyenne v_2 sur le plan de base en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	75
Tableau III.7 : Distribution de la résultante nominale T_1 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	77
Tableau III.8 : Distribution de la résultante nominale T_2 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	79
Tableau III.9 : Distribution de la composante nominale horizontale corrigée n_{c1} en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	81
Tableau III.10 : Distribution de la composante nominale horizontale corrigée n_{c2} en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	83
Tableau III.11 : Distribution de la pression nominale moyenne v_{c1} sur le plan de base en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	85
Tableau III.12 : Distribution de la pression nominale moyenne v_{c2} sur le plan	87

de base en fonction de la hauteur de matériau stocké dans le silo.....	
Tableau III.13 : Distribution de le moment de referece M_{ref} en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	90
Tableau III.14 : Valeurs de G pour le cas de la deuxième configuration (jupe liée en pied et en tête.).....	92
Tableau III.15 : Distribution de le moment d'ovalisation M_{ov} en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.....	93
Tableau III.16 : Distribution de la composante nominale horizontale n_1 en fonction de la profondeur de la trémie.....	96
Tableau III.17 : Distribution de la composante nominale horizontale n_2 en fonction de la profondeur de la trémie.....	97
Tableau III.18 : Distribution de la presion moyenne v_1 en fonction de la profondeur de la trémie.....	98
Tableau III.19 : Distribution de la presion moyenne v_2 en fonction de la profondeur de la trémie.....	99
Tableau III.20 : Distribution de la force nominale corrigées n_{c1} en fonction de la profondeur de la trémie.....	100
Tableau III.21 : Distribution de la force corrigée n_{c2} en fonction de la profondeur de la trémie.....	101
Tableau III.22 : Distribution de la pression moyenne corrigée v_{c1} en fonction de la profondeur de la trémie.....	102
Tableau III.23 : Distribution de la pression moyenne corrigée v_{c2} en fonction de la profondeur de la trémie.....	103
Tableau III.24 : Distribution de v'_1 en fonction de la profondeur de la trémie.....	104
Tableau III.25 : Distribution de v'_2 en fonction de la profondeur de la trémie.....	105
Tableau III.26 : Distribution de $(n'_1 \cos(\alpha))$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	106
Tableau III.27 : Distribution de $(n'_2 \cos(\alpha))$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	107
Tableau III.28 : Distribution de $[(n'_1 \sin(\alpha)) \cos(\alpha)]$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	108
Tableau III.29 : Distribution de $[(n'_2 \sin(\alpha)) \cos(\alpha)]$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	109

Tableau III.30 : Distribution de $(v'_1 \cos(\alpha) + g)$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	110
Tableau III.31 : Distribution de $(v'_2 \cos(\alpha) + g)$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	111
Tableau III.32 : Distribution de $\left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\sin(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	112
Tableau III.33 : Distribution de $\left(\frac{v'_2 \cos(\alpha) + g}{\sin(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie...	113
Tableau III.34 : Distribution de $\left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie...	114
Tableau III.35 : Distribution de $\left(\frac{v'_2 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie...	115
Tableau III.36 : Distribution de $\left[\left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right) \cos(\alpha)\right]$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	116
Tableau III.37 : Distribution de $\left[\left(\frac{v'_2 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right) \cos(\alpha)\right]$ en fonction de la profondeur de la trémie.....	117
 Chapitre IV : Calcul de ferrailage de la paroi du silo	
Tableau IV.1 : Distribution de σ_p en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans la parois de silo.....	121
Tableau IV.2 : La somme des actions horizontaux au niveau de la paroi de la trémie.....	123
Tableau IV.3 : Distribution de σ_t en fonction d'une matière stockée.....	123
Tableau IV.4 : Distribution de T en fonction d'une matière stockée dans la paroi de silo.....	125
Tableau IV.5 : La charge permanente.....	126
Tableau IV.6 : Distribution de la charge permanente G en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans la parois de silo.....	126
Tableau IV.7 : combinaisons des charges.....	127
Tableau IV.8 : Calcul de ferrailage horizontal de la paroi.....	128
Tableau IV.9 : Vérification du flambement à la paroi de silo.....	129
Tableau IV.10 : Vérification du moment réduite ultime à la paroi de silo.....	130

Tableau IV.11 : Calcul d'armatures verticales de la paroi de silo.....	131
Tableau IV.12 : Calcul d'armatures horizontales de la trémie de silo.....	134
Tableau IV.13 : Calcul d'armatures verticales de la trémie de silo.....	135

Liste des notations

1. Lettres majuscules latines:

A : Aire de la section horizontale dans la zone à parois verticales.

A : La section d'aciers tendus sur la longueur de paroi.

A_s, A_{min} : Aire de la section d'acier.

C : Le contour de la section de silo au niveau du plan de base.

C' : Le plus petit contour homothétique qui contienne l'ensemble des contours V.

EI : Facteur de rigidité de la paroi.

E_s : Module d'élasticité de l'acier.

E_{ij} : Module de déformation longitudinal instantané.

E_{iv} : Module de déformation différée du béton.

G : Rapport entre le rayon de la zone d'écoulement et le rayon du silo circulaire, Charge permanente.

H : Hauteur totale de la paroi.

H_t : Hauteur totale de la paroi.

I : Moment d'inertie minimal de la section.

I_s : Moment d'inertie de la section constituée exclusivement par les deux nappes d'aciers.

K_t : Valeur caractéristique du coefficient de contrainte latérale au niveau de la ceinture de tête.

K_p : Valeur caractéristique du coefficient de contrainte latérale au niveau de la ceinture de pied.

L : Périmètre intérieur de la coupe horizontale dans la zone de parois verticales.

M_u : Moment de calcul ultime.

M_{ser} : Moment de calcul de service.

M_{ov} : Moment d'ovalisation.

M_{ref} : Moment de référence.

M : Le moment de flexion.

M_v : Le moment de flexion verticale.

$M_{\Delta\theta}$: Moment créé par le gradient thermique.

M_b : Moment de flexion d'axe vertical.

$M_{\Delta\theta,h}$: Moment créé par le gradient thermique horizontal.

$M_{\Delta\theta,v}$: Moment créé par le gradient thermique vertical.

N : L'effort normal.

N_v : L'effort normal vertical.

N_b : Effort normal tangentiel.

O : Le centre de silo au niveau du plan de bas.

Q : Charge d'exploitation.

R : Rayon extérieur de silo.

R' : Rayon intérieur de silo.

SI : Séisme (charge accidentelle).

S : Aire de la section horizontale dans la zone à parois verticales.

S_n : Neige (charge climatique).

S_t : Espacement des armatures transversales.

T_e : La température de l'air extérieur.

T : La résultante nominale des forces de frottement t.

T : Effet de retrait, Effets de la température intérieure et extérieure.

T_R ; T_f : La température de référence.

T_i : Soit la température du volume d'air confiné à l'intérieur du silo, soit du matériau stocké.

U : Périmètre intérieur de la coupe horizontale dans la zone de parois verticales.

V : Effort tranchant.

W : Le vent normal.

V : La projection sur le plan de base de l'ensemble des contours des orifices de vidange du silo considéré.

W : Vent (charge climatique).

X : Hauteur de tas de blé dans le silo.

2. Lettres minuscule latine:

a : Longueur du côté d'un silo rectangulaire, carré ou hexagonal.

b : Largeur d'un silo rectangulaire.

d : Hauteur utile de la section de la paroi.

d_c : a dimension caractéristique d'une section.

e_0 : Excentrement du milieu de l'orifice de vidange.

e_f : Excentrement maximal du sommet de la pile pendant le remplissage.

e_t : Excentrement du milieu du talus de remplissage lorsque le silo est plein.

f_e : Limite d'élasticité de l'acier.

f_{bu} : La contrainte limite dans le béton à l'ELU.

f_{c28} : Résistance caractéristique à la compression du béton à 28 jours d'âge.

f_{t28} : Résistance caractéristique à la traction du béton à 28 jours d'âge.

f_{cj} : Résistance caractéristique à la compression du béton à j jours d'âge.

h : La distance entre l'orifice de la vidange et la surface équivalente, La distance entre le plan moyen de remplissage et le plan de base.

h' : L'abscisse de profondeur de rive de remplissage par rapport au plan moyen de remplissage, La distance entre les deux nappes.

h'' : Profondeur de la rive de remplissage du stock-modèle par rapport au plan moyen de remplissage.

h₀ : Epaisseur de la paroi.

h_f : La hauteur à partir du niveau de l'orifice de vidange, sur laquelle la pression de l'air peut être supérieure à $n_1/20$, ne dépasse pas $H/20$.

i : Coefficient dépendant du pourcentage d'acier $\frac{A}{bd}$

k_v : La valeur caractéristique du coefficient de contrainte latérale.

n_c : La composante normale, horizontale majorée.

n : La composante normale, horizontale de la contrainte appliquée à la paroi du silo le long du contour d'une surface U donnée.

p_v : Pression verticale.

p_h : Pression horizontale.

r : Rayon équivalent du silo.

r_h : Rayon hydraulique.

t : Epaisseur de la paroi.

t : La composante tangentielle, verticale de la contrainte appliquée à la paroi du silo le long du contour d'une surface U donnée.

u : Altitude du point considéré.

v : La pression nominale moyenne sur le plan de base.

v' : La pression verticale.

v_c : La pression nominale moyenne sur le plan de base majorée.

w : Poids de la matière ensilé.

z : Profondeur sous la surface équivalente lorsque le silo est plein.

z_0 : Hauteur de référence.

3. Lettres majuscule grecques :

$\Delta\theta$: Gradient thermique.

\emptyset : Diamètre des barres.

4. Lettres minuscule grecques :

α : Angle d'inclinaison de la paroi de la trémie.

α_a : Angle d'inclinaison de la paroi de la trémie.

α_b : Angle d'inclinaison de la paroi de la trémie.

α_θ : Coefficient de dilatation thermique du béton.

β : L'angle critique de repos de blé.

γ : Poids volumique de produit ensilé.

γ_s : Coefficient de sécurité de l'acier.

γ_b : Coefficient de sécurité dans le béton.

δ : Angle de frottement de la matière ensilée δ sur la paroi du silo.

Ψ : Angle du contact de la veine d'écoulement excentré avec la paroi mesuré depuis le centre de la veine.

μ : Le coefficient de frottement de la paroi vertical utilisé pour les calculs de pression.

φ : Angle de frottement interne de la matière ensilée.

φ_w : Angle de frottement de la paroi de la trémie.

σ_s : Contrainte de traction de l'acier.

σ_{bc} : Contrainte de compression du béton.

σ : Contrainte interne uniforme sur la section d'une tranche de silo.

ρ : La valeur conventionnelle de l'angle de frottement φ sur la paroi.

η : Coefficient de fissuration de l'acier utilisé.

λ : Rapport des charges horizontales verticales $\lambda=n/w$.

ξ : Rapport d'homothétie.

τ : Cisaillement de contrainte.

ω_{tf} : Le pourcentage d'armatures d'une direction.

5. Indices :

e : Vidange de matériaux particuliers.

f : Remplissage et stockage de matériaux particuliers.

h : Trémie.

h : Horizontal.

K : Coefficient de contrainte latérale.

m : Valeur moyenne.

n : Perpendiculaire à la paroi.

nc : Silo non circulaire.

p : Force localisée t le long de la paroi.

u : Réparti v vertical.

w : Relatif au frottement sur la paroi.

γ : Poids volumique du matériau en vrac.

φ : Angle de frottement interne.

μ : Coefficient de frottement sur la paroi.

6. Abréviations :

CEN : Comité européen pour la normalisation.

BAEL : Béton armé à l'état limite.

BA : Béton armé.

ELU : Etat limite ultime.

ELS : Etat limite service.

HA : Acier à Haute adhérence

Introduction générale :

L'Algérie est considérée parmi les pays qui produisent des céréales. A cause de la production de volumes importants, et la nécessité de les stocker et les adapter aux besoins des marchés, les structures de stockage sont actuellement plus qu'importants.

Cette méthode devient la plus connue pour une conservation à long terme. Afin de maintenir ces produits en bon état, il est nécessaire de disposer d'une capacité de stockage répondant aux exigences en termes de sécurité sanitaire et de risques professionnels et industriels.

Les spécifications doivent combiner le choix des sites les plus flexibles et des capacités de stockage compatibles avec les produits. Bien que le choix des méthodes de stockage des céréales soit larges, les plus populaires sont les silos en acier, les silos en béton, les dépôts de stockage et les silos à sacs.

Les silos présentant un domaine d'application très vaste, ils sont également appelés coffres ou soutes. Ils peuvent être construits en acier ou en béton armé et ont la possibilité de se vidanger par écoulement gravitaire ou par un procédé mécanique. De nombreuses études ont été consacrées à la détermination des actions provoquées par ces matières contre la paroi cylindrique. Une bibliographie importante sur ces études est disponible dans les articles et les livres.

La disposition groupée des silos présente de nombreux avantages par rapport aux silos à une seule cellule dans lesquels l'accent est mis sur la création d'un espace supplémentaire pour l'ensilage, normalement appelé interstice.

Ces phénomènes doivent être contrôlés pour assurer la fiabilité de ces constructions.

Afin de pouvoir réaliser des conceptions économiques et sûres, il est donc essentiel de comprendre le comportement structurel de ce type de structure, compte tenu du chargement qui lui est imposé.

Les objectifs de ce travail de recherche se résument en deux parties. La première partie, une revue bibliographique concernant d'une part, les charges de type "silo" données par les règlements actuels d'autre part les formulations mathématiques.

On a expliqué le calcul des efforts appliqués sur des silos en béton armé engendrés par les produits qu'ils stockent et décrire l'analyse structurelle de silos en béton armé.

La deuxième partie, Consiste à présenter une approche numérique concernant le comportement des voiles d'un silo cylindriques parfaites, en béton armé sous charges de type "silo" (actions de frottement et pression horizontale).

Le présent travail se résume en quatre chapitres suivants :

Le chapitre 1, Il présente une synthèse bibliographique sur les silos de stockage et sur les méthodes de calcul. Nous décrivons ces structures ainsi que ses différents types. On présentera aussi les phases et les techniques de construction utilisée pour réaliser les silos de stockage de blé.

Dans le deuxième chapitre, Nous présentons d'abord la conception et 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), et présente aussi la géométrie des silos analysés et une revue des aspects liés aux charges appliquées. Il est également défini comme les paramètres physiques du matériau stocké.

Dans le troisième et le quatrième chapitre, Nous présentons les procédures de calcul de la conception des diagrammes et les tableaux des pressions horizontales et les contraintes à utiliser. Nous avons ainsi obtenu les fonctions de distribution des sollicitations et des déplacements des parois de la coque. En dernier nous présenterons les résultats obtenues et l'exploitation de celles-ci pour réaliser le ferrailage de la structure.

Chapitre I :

Notions générales sur les silos

I.1. Introduction :

En tant que structures importantes pour le stockage des récoltes, les silos constituent un investissement important pour les produits qui sont, soit destinés à la vente ou à une utilisation sur place. Cependant, des installations inadéquates et une mauvaise gestion peuvent causer des pertes importantes, telles que, la détérioration du grain par les insectes, les rongeurs et les incendies (allumage par combustion spontanée), ainsi que la destruction du silo lors d'instabilité suite à un mauvais dimensionnement. Avant de construire de nouvelles installations de stockage, il faut concevoir un système complet de stockage et de manutention qui répond à la fois aux besoins actuels et éventuels. Le nombre et les dimensions des bâtiments de stockage dépendent de la quantité et des types de grain à stocker.¹

La synthèse bibliographique exposée dans ce qui suit est divisée en deux parties ; la première partie c'est des généralités sur les silos ainsi leurs l'historique, et tout ce qui concerne la conception de cette dernière, et une deuxième partie sur l'exécution des travaux et les problèmes qui présentent un risque sur les silos.

I.2. Généralité sur 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 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 utilise notamment en agriculture pour prépare et conserver des ensilages. Le remplissage des silos se fait par le haut et recourt à diverse technique élévatrice à godets, air pulsé...²



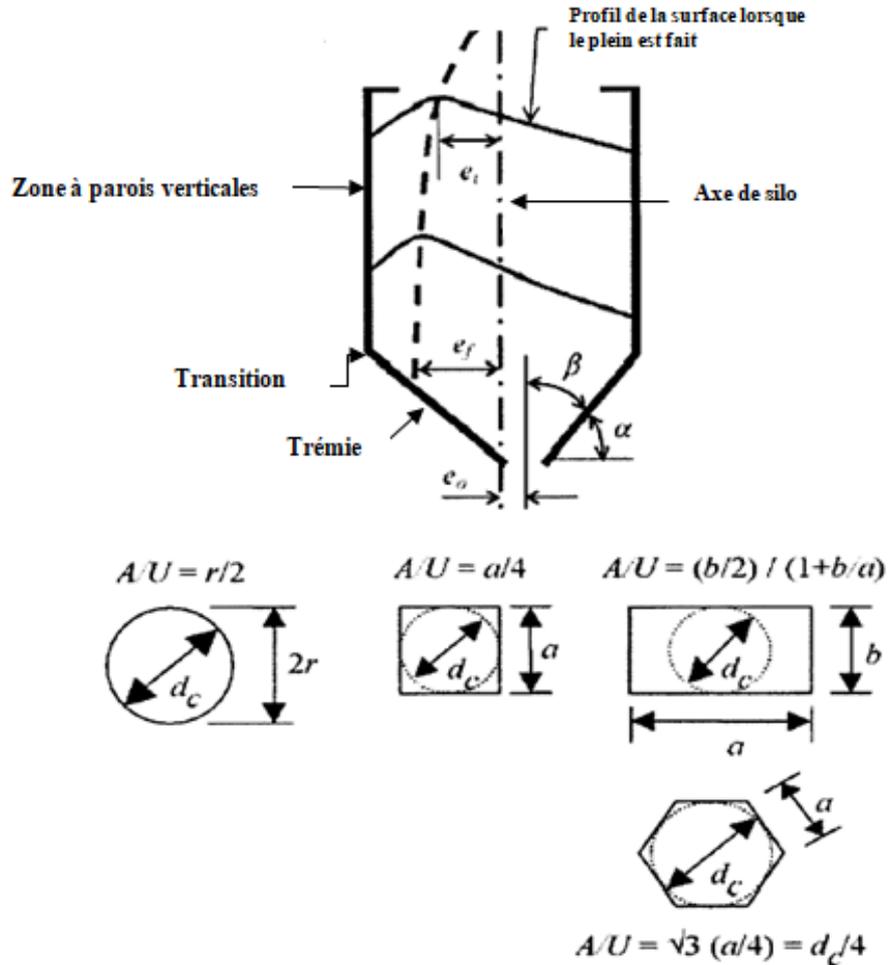
Figure I.1 : les différentes formes et types de silo²⁰.

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

- Le type de matériaux 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 ; L'Eurocode1.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 I.2) ;
- **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.



Sections des formes transversales

Figure I.2 : Formes de silos et notation des dimensions selon EC1-Partie 4.²

- U : Périmètre intérieur de la coupe horizontale dans la zone de parois verticales.
- A : Aire de la section horizontale dans la zone à parois verticales.²

➤ **En quoi consiste l'activité de stockage :**

Bien conserver le grain nécessite une intervention humaine en agissant sur son humidité et sa température de stockage.

Les silos de stockage peuvent comporter des installations pour accueillir plusieurs types d'activités.

Ces installations sont les suivantes :

- **Pour les activités de stockage :**
 - Les capacités de stockage type vrac ;
 - Les tours de manutention ;
 - Les postes de réception et d'expédition ;
 - Les galeries de manutention ;
 - Les dispositifs de transport et de distribution.
- **Les équipements auxiliaires :**
 - Dispositifs d'élimination des corps étrangers ;
 - Appareils de nettoyage ;
 - Dépoussiéreurs ;
 - Ventilation ;
 - Les salles de contrôle et de commande, dont l'emplacement est variable.
- **Pour les activités connexes :**
 - Les séchoirs ;
 - Les ateliers.

Les différentes techniques sont utilisées pour réaliser les stockages :

- Les cellules de stockage verticales en béton armé ;
- Les cellules métalliques verticales ;
- Les cellules de stockage de type magasin (ou silo plat) ;
- Les silos dômes ;
- Les silos de stockage enterrés ;
- Les silos de type structurent gonflables.³

I.3. Historique :

L'histoire des silos surprend le profane... Son apparition aux Etats-Unis d'Amérique dans la première moitié du XIXe siècle, son développement progressif dans les grands pays exportateurs, la colonisation progressive du vieux monde jusque dans les campagnes françaises dans le courant des années 1930 attestent de son caractère international, de la diffusion des modèles, des techniques et des idées.

➤ **1929-1936, Les premiers silos :**

La période 1929-1936 voit l'apparition des premiers silos à grain. Elle est marquée par leur découverte par les groupements agricoles, les architectes et les Ingénieurs du Génie Rural. C'est la période d'expérimentation.

➤ **Le silo naît de la crise :**

En 1929, le silo n'existe pas dans le monde agricole. C'est le temps du négoce qui prospère depuis 1850 et le règne du magasin à sacs.

Dès 1927, survient la crise de mévente du blé plonge l'agriculture dans le marasme.

Le négoce est accusé de profiter de cette crise pour pratiquer une spéculation à la baisse au détriment de l'intérêt des producteurs.

En effet, le secteur des céréales est un des derniers secteurs de l'agriculture à ne pas disposer d'un regroupement de défense professionnel. Autrement dit, « c'est la faute à l'individualisme de l'agriculteur » qui n'est pas organisé et se trouve seul face à un réseau négoce structuré.

➤ **Une expérience économique :**

En 1932, parmi d'autres tentatives pour remédier à la crise de mévente, le gouvernement et les associations agricoles tentent une expérience économique : le stockage et la vente échelonnée pour contrôler la cour du blé sur le marché.

Les coopératives agricoles sont créées afin d'organiser la collecte du blé sur le territoire.

Les premiers silos sont financés par l'Etat à hauteur de 33% des dépenses.

Entre 1932 et 1936, les coopératives et syndicats agricoles, soutenus par le gouvernement français, vont faire construire plus de 170 silos dans le pays.

➤ **Un édifice nouveau :**

Le silo est ressenti comme un édifice nouveau :

- Il n'existe pas en tant qu'édifice autonome ;
- Il n'y a pas de référents dans les campagnes ;
- D'un point de vue technique : personne ne sait s'il peut assurer une bonne conservation des grains.

D'un point de vue conceptuel, les responsables des organisations agricoles, les ingénieurs et architectes ne savent ni comment traiter les plans, ni quelle forme lui donner, ni comment organiser les espaces de travail.

➤ **La recherche de modèles :**

Les dirigeants vont se mettre en quête de modèles à l'étranger comme en France. Ils ne cherchent pas à imiter les exemples prestigieux du grand commerce mais auprès de groupements soumis à des problématiques voisines. Leurs questions sont pragmatiques : conservation, capacités, équipement, ramassage, etc. Les visites entre groupements sont nombreuses.

Ces voyages et ces missions d'étude sont décisifs. Ils ont un impact immédiat sur les premiers silos et dessinent les grands traits des édifices projetés.⁴

I.4. Classification des silos :

Pour des objectifs de calcul, les silos sont classés selon leur taille, leur géométrie, le type d'écoulement lors de leur vidange et la matière structurelle de leur coque.

L'importance de chacun de ces paramètres, pour le dimensionnement, est traitée ci-dessous :

I.4.1. Taille et géométrie des silos :

La géométrie et la taille des silos dépendent des exigences fonctionnelles telles que le volume stocké, la méthode et le taux de vidange, les propriétés du matériau, l'espace disponible et les considérations économiques.

Les silos sont habituellement constitués d'une enveloppe verticale et d'un fond plat ou d'un fond ayant des parois inclinées appelées trémie.

Ils ont la plupart du temps une section circulaire, carrée ou rectangulaire et peuvent être construits isolés ou groupés. Des formes typiques de silos sont montrées sur la figure I.3.

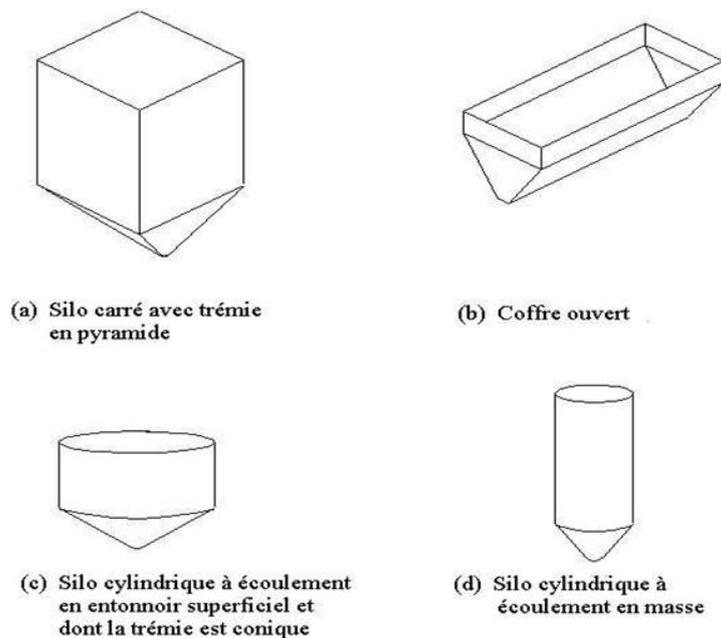


Figure I.3 : Formes de silos standards.⁵

Les structures cylindriques sont plus efficaces que les autres pour des raisons d'économie de matière.

Mais pour une même hauteur donnée un silo carré permet le stockage de 27 % de plus qu'un silo cylindrique dont le diamètre est égal à un des côtés du silo carré. Les réservoirs à fond plat nécessitent une hauteur plus faible que les autres pour un même volume de matériau stocké.

La taille des silos est déterminée par les taux de remplissage et de vidange et par la quantité maximale de matériau à stocker. Un fort taux de vidange induit la présence d'une trémie profonde dont les parois sont inclinées. Des silos à fond plat sont utilisés lorsque le taux de vidange est faible ou lorsque le temps de stockage est long, que la vidange est peu fréquente et que le volume stocké est grand.

Le rapport entre la hauteur du silo et son diamètre a une influence sur les charges amenées par le matériau stocké et par conséquent sur le dimensionnement de la structure. L'Eurocode 1 définit deux types de silo :

-Les minces et les trapus. Un silo est considéré comme mince lorsque $h/d_c \geq 1,5$ et comme trapus lorsque $h/d_c < 1,5$;

-Les trémies sont généralement en forme de cône, de pyramide ou de coin.

Les trémies pyramidales ont l'avantage d'être simples à réaliser, mais elles créent des problèmes d'écoulement. En effet, il se forme des bouchons de matériau stocké à la pointe de pyramide. Les tuyères de vidanges peuvent être soit centrées soit excentrées par rapport au centre du silo, mais on évitera ces dernières car la distribution de pression est délicate à estimer et il peut y avoir des problèmes de ségrégations du matériau stocké. L'angle d'inclinaison de la paroi de la trémie est conçu pour assurer une vidange continue et avec le bon comportement d'écoulement.

I.4.2. Type d'écoulement :

On doit considérer des situations de projet sélectionnées et identifier les cas de charge critiques. Pour les silos, les situations de projet doivent être basées sur les caractéristiques d'écoulement de la matière ensilée.

Deux types d'écoulement sont décrits dans l'Eurocode 1 et illustrés sur la figure I.4. Ce sont les écoulements en masse et les écoulements en entonnoir. La pression de vidange est influencée par le comportement de l'écoulement et donc la prévision du type d'écoulement doit être réalisée avant les calculs des charges issues du matériau stocké.

Dans le cas de silos dont le contenu est prévu pour s'écouler en masse, tout le matériau stocké doit s'écouler en une seule masse et l'écoulement fonctionne alors suivant la règle du « premier rentré, premier sortis ». Dans le cas de silos dont le matériau stocké est prévu pour s'écouler en entonnoir, le contenu s'écoulera à travers un corps central de matière immobile suivant la règle du « dernier rentré, premier sortis ».

Le type d'écoulement dépend de l'inclinaison et du coefficient de frottement de la paroi de la trémie. Un écoulement en masse se produit dans des silos de grande hauteur et dont la trémie a une paroi inclinée, tandis qu'un écoulement en entonnoir se retrouve dans des silos trapus et dont la trémie possède une faible pente. L'Eurocode 1 donne une méthode graphique (Figure I.5) pour déterminer le type d'écoulement dans des trémies coniques ou en forme de coin et ceci dans le but unique de dimensionner la structure. Les silos conçus pour fonctionner avec un écoulement compris entre un en entonnoir et un de masse, doivent être calculés pour satisfaire les deux situations.

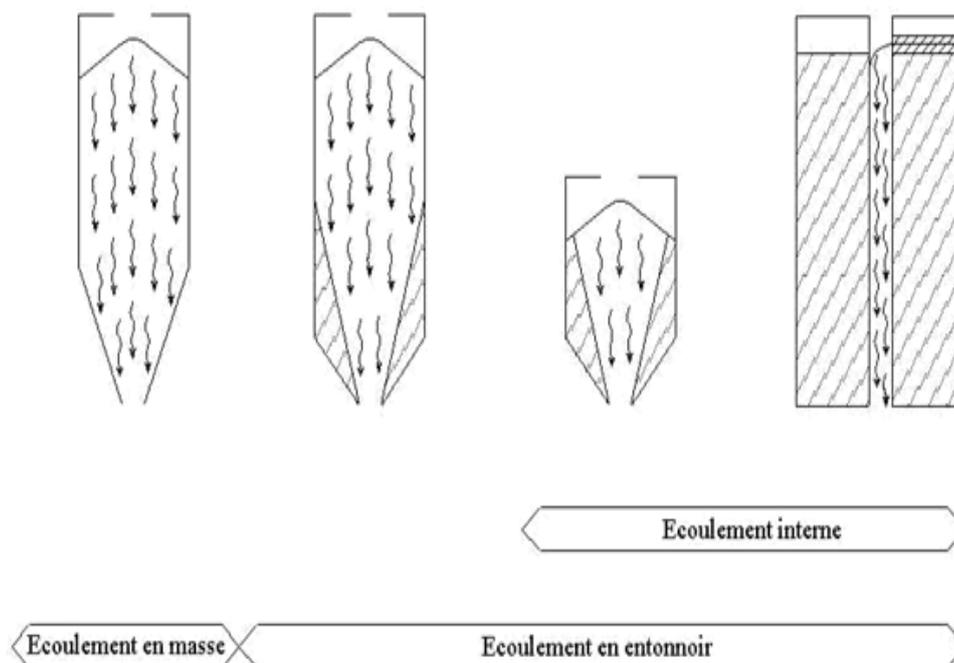


Figure I.4 : Comportement des écoulements.⁵

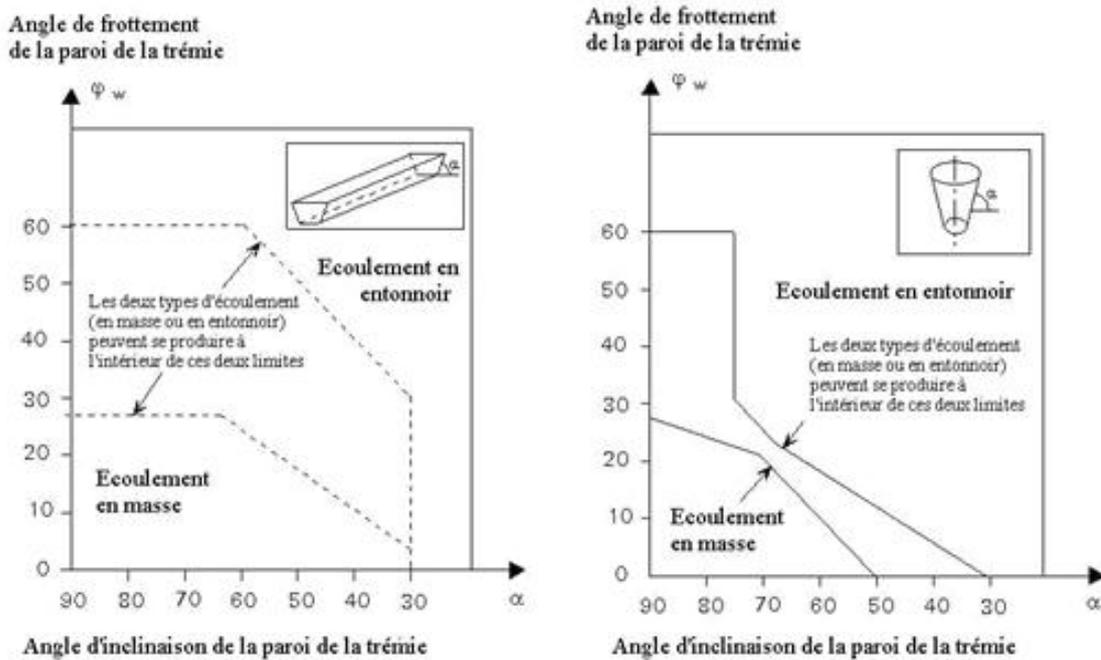


Figure I.5 : Méthode graphique d'analyse du comportement des écoulements.⁵

I.4.3. Matière structurale constituant la coque du silo :

La plupart des silos sont construits en acier ou en béton armé. Le choix économique repose aussi bien sur le coût de la matière première que sur les coûts de fabrication et de montage. D'autres facteurs tels que l'espace disponible sont également influents. Les principaux avantages des silos en acier sur ceux en béton armé coulés sur chantier sont :

- Les silos en acier de petites à moyennes tailles peuvent être préfabriqués par conséquent, le temps de montage est considérablement plus court ;
- Les silos assemblés par boulonnage sont facilement démontables, transportables et reconstructibles ailleurs.

Le principal désavantage de l'acier est la nécessité d'une maintenance régulière pour limiter la corrosion et d'une application sur les parois d'un revêtement pour empêcher les dégradations excessives. De plus ces parois sont soumises à la condensation, ce qui crée des dommages au matériau stocké qui sont putrescibles tels que les céréales et le sucre.

La sélection du matériau structurel pour les parois des silos dépend de la géométrie de ces derniers. Une paroi verticale est sujette à des sollicitations à la fois verticales et horizontales.

Les forces verticales sont dues au frottement entre la paroi et le matériau stocké, tandis que les forces horizontales sont amenées par la poussée latérale du contenu. Le béton armé reprend les sollicitations verticales de compression avec aisance mais tend à rompre sous des sollicitations de traction causées par de fortes poussées latérales. Les silos circulaires en acier reprennent d'habitude facilement ces forces latérales par la mise en traction de la circonférence du silo. Par contre, ils sont plus facilement sujets au flambement sous des charges verticales excessives. L'augmentation des pressions horizontales et verticales avec la profondeur du matériau stocké est montrée sur la figure I.6. Les augmentations de la pression horizontale sont négligeables au-delà d'une certaine profondeur et donc les silos en béton armé sont plus efficaces lorsqu'ils ont une bonne hauteur, alors que les silos en acier tendent à être moins hauts.⁵

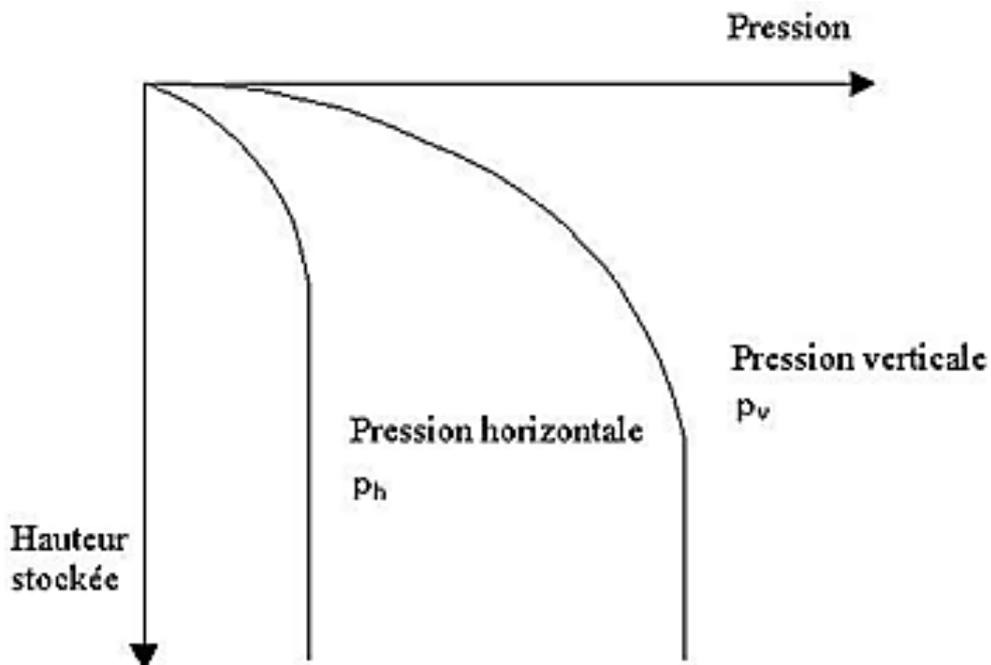


Figure I.6 : Distribution de la pression horizontale et verticale en fonction de la hauteur de matériaux stockés dans le silo.⁵

I.5. Terminologie :

I.5.1. Rayon hydraulique :

C'est le paramètre de base pour caractériser la section droite:

$$r_h = \frac{S}{L} \quad (I.1)$$

Avec:

S: Aire de la section droite.

L: Périmètre de cette section.

I.5.2. Surface de remplissage :

C'est la surface qui rencontre la paroi du silo le long de la rive de remplissage.

I.5.3. Plan moyen de remplissage :

C'est le plan horizontal qui délimite le même volume de produit que la surface de remplissage, il est pris pour origine de l'abscisse de profondeur z .

Considérant en général une surface de remplissage dont la rive de remplissage est située dans un plan horizontal.

On désignera par h' l'abscisse de profondeur de cette rive par rapport au plan moyen de remplissage.

Dans les cas usuels où la surface de remplissage est un cône de révolution. Une pyramide régulière dont les lignes de plus grande pente font l'angle β avec le plan horizontal.

On a :

- Pour les silos de section circulaire ou polygonale régulière.

$$h' = \frac{2}{3} r_h \operatorname{tg}(\beta) \quad (I.2)$$

- Pour les silos de section rectangulaire de petit côté 2a est de grand coté 2b.

$$h' = \frac{a}{6} \left(3 - \frac{a}{b} \right) \operatorname{tg}(\beta) \quad (\text{I.3})$$

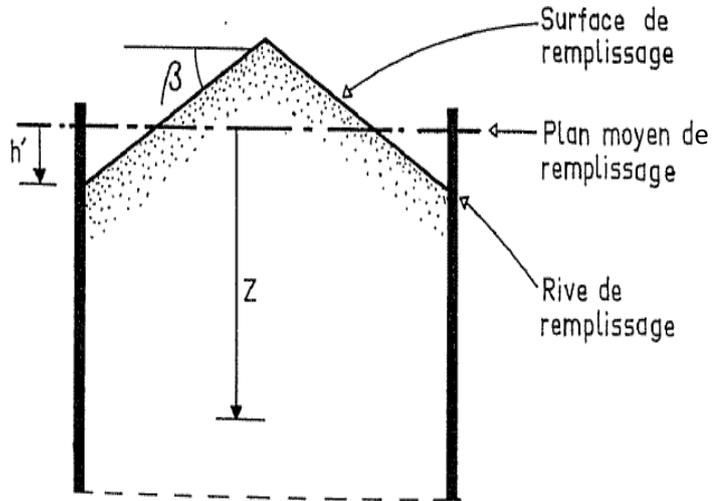


Figure I.7 : Surface, plan moyen et rive de remplissage.⁶

I.5.4. Plan de base :

C'est le plan horizontal le plus profond coupant le silo suivant sa section courante ;

Pour les silos à fond plat et horizontal, le plan de base est le plan constituant le fond du silo.

Pour les silos à trémies, dont la naissance est située dans un plan horizontal, le plan de base est ce plan horizontal.

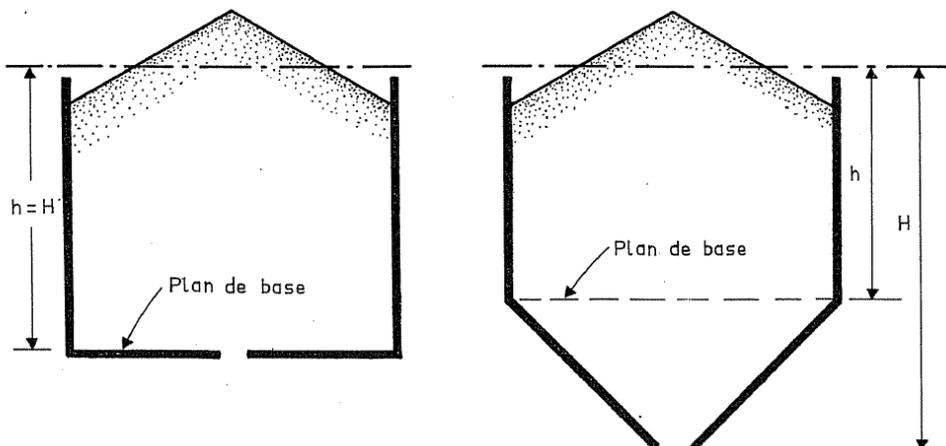


Figure I.8 : Plan de base.⁶

➤ Coordonnée relative :

On considère la section d'un silo au niveau du plan de base.

On désigne par :

C : Contour de cette section.

O : Centre de celle-ci.

V : Projection sur le plan de base de l'ensemble des contours des orifices de vidange du silo considéré.

On appelle ξ le rapport d'homothétie (de centre O) qui fait correspondre au contour C le plus petit contour homothétique C' qui contienne l'ensemble des contours V.

ξ : Coordonnée relative du point de vidange le plus excentré.

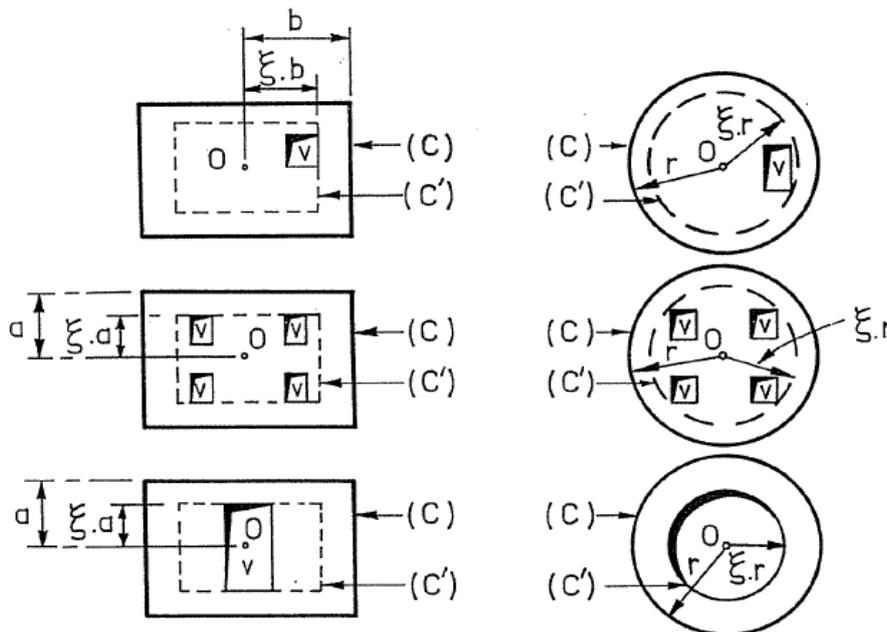


Figure I.9 : Coordonnée relative.⁶

I.6. Mode d'écoulement :

I.6.1. Écoulement en cheminée (ou écoulement central) :

Mode d'écoulement dans lequel se développe une voie d'écoulement de matière dans une zone confinée au-dessus de l'orifice de vidange, la matière adjacente à la paroi à proximité de cet orifice restant en place.

La voie d'écoulement peut atteindre la zone à parois verticales ou s'étendre jusqu'à la surface libre de la matière ensilée.

I.6.2. Écoulement interne :

Mode d'écoulement en cheminée dans lequel la voie d'écoulement atteint la surface libre de la matière ensilée.

I.6.3. Écoulement en masse :

Mode d'écoulement dans lequel toute la matière ensilée est mobilisée lors de la vidange.

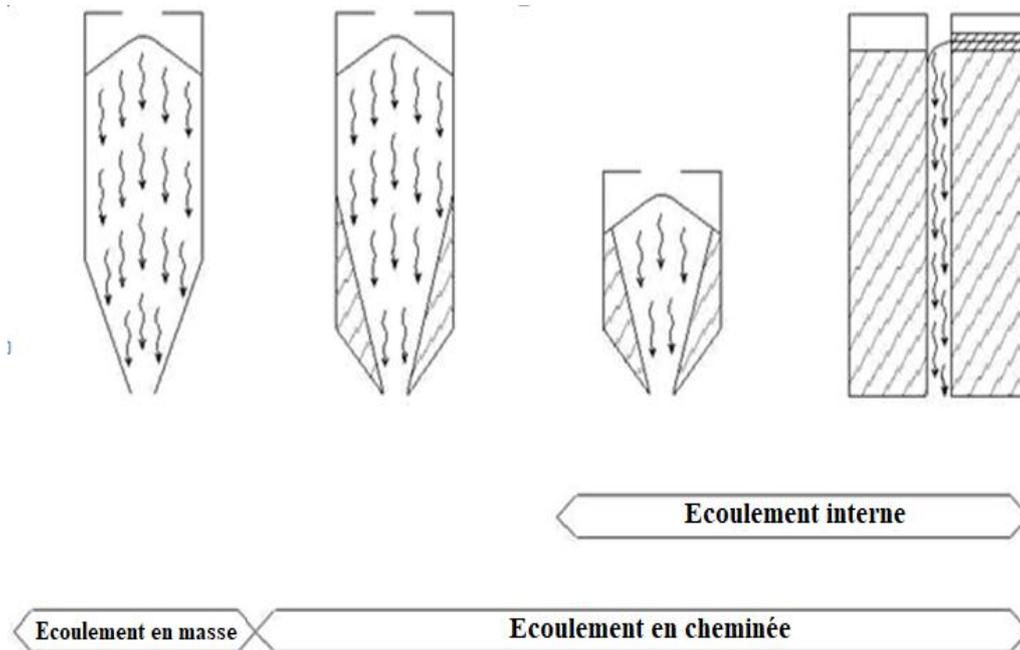


Figure I.10 : Mode d'écoulement.⁶

I.7. Types des vidanges :

I.7.1. Vidange normale :

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

- L'écoulement se fait exclusivement par gravité, sans insufflation d'air ;
- Il n'existe à l'intérieur du silo aucune structure ;
- Le (ou les) orifice (s) de vidange sont situés sur le fond. La coordonnée relative du point de vidange le plus excentré est inférieure ou égale à 0,4.

Si l'une au moins de ces trois conditions n'est pas remplie. On se retrouve dans l'un des trois cas de vidange anormale.

I.7.2. Vidange géométriquement anormale :

Il y a vidange géométriquement anormale lorsque les deux premières conditions définissant la vidange normale étant remplies, la troisième condition ne l'est pas, c'est-à-dire que la coordonnée relative du point de vidange le plus excentré est supérieure à 0,4.

I.7.3. Vidange mécaniquement anormale :

On désigne par vidange mécaniquement anormale une vidange qui, s'effectuant soit par le fond, soit par une paroi latérale à proximité immédiate du fond, est facilitée par l'insufflation d'air sous pression.

I.7.4. Vidange structurellement anormale :

On désigne ainsi tout type de vidange qui fait intervenir une structure interne au silo, fixe ou mobile.

Nous en donnons ci-dessous trois exemples :

- Les procédés à vidange par cheminée centrale, pourvue d'ouvertures à tous les niveaux ;
- Les procédés à vidange par petites ouvertures à très faible débits, situés sur le fond,

l'évacuation des matériaux se faisant sans mise en mouvement de la masse, et le silo comportant un bras racleur qui égalise la surface supérieure ;

- Les procédés avec des éléments de la structure (poutraison ou plaque) en saillie (vers l'intérieur) par rapport à la surface interne (cylindrique) du silo.⁶

I.8. Exécution des travaux :

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.²

I.8.1. Coffrage :

Les coffrages doivent être établis de façon à assurer la continuité des surfaces extérieures et intérieures, ainsi que la verticalité du silo.⁷

Les silos en béton sont construits en coulant le béton dans des coffrages classiques en bois ou en métal, ou dans des coffrages glissants.

L'emploi de coffrage classique ne pose de problème particulière et nécessite simplement de respecter les règles technologique d'emploi des coffrages, du point de vue de obtention des dimensions et de l'état de surface des parois pour que l'aspect de l'ouvrage soit convenable et qu'aucun défaut ne provoque le risque de retenir la matière ensilée à la vidange de celle-ci.⁶

Depuis longtemps, le système de construction à coffrage glissant est une méthode éprouvée et le premier choix lorsqu'il s'agit de construire des tours et des réservoirs aux murs élevés en béton armé, à orientation fortement verticale.⁸

La technique du coffrage glissant est particulière. Elle exige un grand entrainement, et des précautions minutieuses pour garantir la qualité du béton et l'état de surface des parois.

➤ **Technique du coffrage glissant :**

- Avec le coffrage glissant le bétonnage est continu dans un seul coffrage qui s'élève avec la coulée du béton. Il s'agit là d'une mécanisation intégrale du coffrage ;
- Une plate-forme de travail est associée au coffrage en supprimant tout échafaudage ;
- Dès qu'une première coulée a été effectuée sur une épaisseur suffisante et que la prise se fait sentir sur les parois, sans qu'elle affecte la masse du béton, on soulève l'ensemble à raison de 0,15 m en moyenne par heure ;
- Il est indispensable que la pose des armatures précède de façon harmonieuse la coulée du béton pour que cette dernière soit continue.

Chaque ascension élémentaire de quelques millimètres est assortie d'une descente d'amplitude sensiblement moitié, ce qui équivaut à une vibration et assure par ailleurs des parements particulièrement soignés, rendant tout enduit inutile.⁶

Pour réduire le risque de fissuration du béton il est recommandé de procéder au retrait des barres de grimpe et à l'injection de leurs gaines après glissement.⁷

Les vérins de levage doivent être mixtes; hydraulique et manuelle, afin de corriger facilement le décalage du coffrage.²

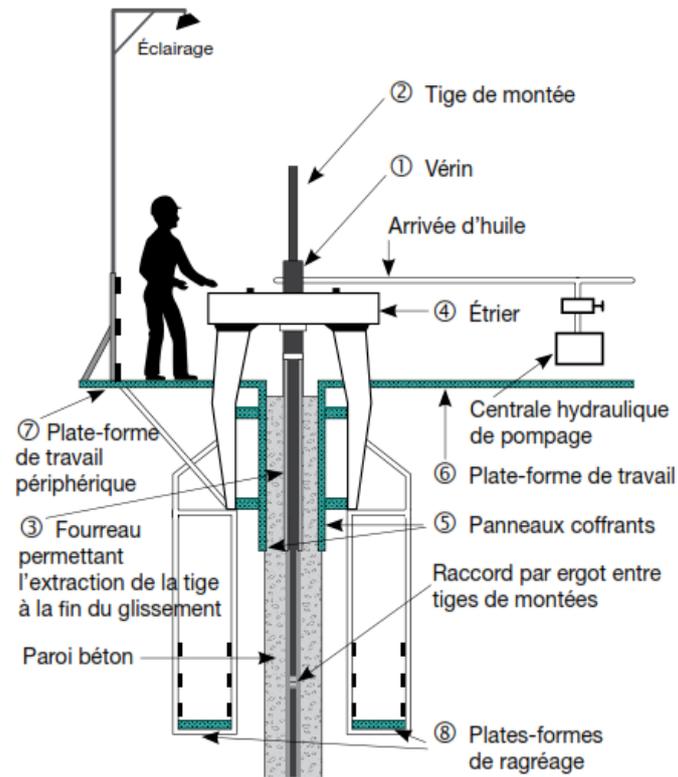


Figure I.11 : Nomenclature des éléments constitutifs du coffrage glissant.²¹

➤ **Avantage :**

Les principaux avantages sont les suivants :

- Rapidité : à 0,10 m ou 0,15 m d'élévation par heure ;
- Economie d'échafaudage : Quelle que soit la hauteur, aucun échafaudage extérieur n'est à prévoir, le coffrage portant sa ou ses passerelles de service ;
- Economie de main d'œuvre : Du fait de la mécanisation du coffrage et de la desserte par passerelles bien appropriées des chantiers de coulage du béton et de pose des armatures.⁶

Parements : Soignés économisant les enduits, aucun appui n'étant demandé au béton frais pour le mouvement ascensionnel des coffrages et des passerelles, ce dernier ne subit pas de contrainte du fait de ce mouvement.⁶

La technique à coffrage glissant est donc synonyme de vitesse dans le processus de construction, d'utilisation économique des ressources et de sécurité de travail optimale.⁸

➤ Différents systèmes de coffrages glissants :

Les systèmes de coffrages glissants varient suivant :

- Les modalités d'appui de l'ensemble coffrage-plateforme de travail ;
- La conception du raidisseur de cet ensemble ;
- Les types de vérins assurant l'ascension.

Quel que soit le système adopté, il faut qu'il s'oppose au phénomène de vrillage. Ce phénomène est dû à une rotation autour de l'axe vertical de l'ouvrage par le fait de déformation des appuis sous diverses dissymétries d'efforts, notamment des vérins.

Il y est en général remédié par un bon centrage des efforts des vérins, par des moments antagonistes créés par des contrepoids ou par des inclinaisons appropriées de la plateforme de travail.⁶



Figure I.12 : Exécution du fût cylindrique par un coffrage glissant²¹

I.8.2. Mise en œuvre du béton :

Les travaux de coffrage sont en règle générale exécutés 24h/24. Il est également possible de procéder au bétonnage uniquement en journée.⁸

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.²

Le béton est coulé par tranches horizontales, la hauteur de ces tranches est limitée en fonction du mode de coulage pour éviter la ségrégation du béton.

Les reprises sont limitées au minimum dans les zones soumises à des moments de flexion importante.⁷

I.9. Les problèmes des silos :

I.9.1. Risque liées 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 dernière 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 rentées 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.

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.²

I.9.2. Accidents de silo :

a) 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 mesures du taux de CO et O₂ dans le silo afin de connaître l'évolution du feu (plus le taux de CO dans l'air est élevé. Plus le feu n'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.²

b) 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 soudure 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.²

I.9.3. Risques industriels liés aux silos (incendie et explosion) :

L'activité de stockage de produits agroalimentaires peut conduire à des accidents industriels graves. Les poussières combustibles des produits agroalimentaires sont à l'origine des risques d'incendie ou d'explosion.³

Les règles générales pour réduire à la source ces risques visent à prévenir la formation d'une atmosphère explosible, supprimer les sources d'inflammation, éviter ou limiter la propagation d'une explosion. Elles permettent aussi de limiter les effets et les conséquences d'une éventuelle explosion en définissant différents périmètres de sécurité. Ces dispositions sont reprises dans différents textes ou référentiels normatif.³



Figure I.13 : Explosion d'un silo en béton armé "céréale".²¹

I.10. Conclusion :

D'après tous ce qu'on a mentionné dans ce chapitre, on peut conclure que, la plus part des silos en béton armé n'exigeant pas de revêtement, et ils n'ont pas besoin beaucoup d'entretien telle que les silos métalliques, donc pouvant être amorti sur une longue période. Ainsi les silos en béton armé peuvent être plus longs que les silos en métal mais ceux-ci ont des diamètres plus grands et donc la capacité totale est plus élevée, pour cette raison, les silos en béton ne conviennent mieux que lorsque l'espace est limité. Les cellules rondes en béton garantissent une bonne isolation thermique des produits, et permettent un développement vertical très supérieur à celui que l'on obtient avec des cellules métalliques.

La complexité du processus concret dans le cadre coulissant augmente comme étant un processus dynamique ou continu. Tels que le statut des barres d'armature, la qualité du béton, etc., tous affectent le produit final. La supervision sur le terrain joue également un rôle important dans les silos à béton: plus de travailleurs travaillent sur site et une plus longue période de mise en service, en raison des conditions météorologiques, et finalement des coûts élevés ;

Les projets de silos comportent de nombreux détails et variables et chaque type de stockage de céréales à ses avantages et ses inconvénients. Le bon choix est celui qui correspond à votre stratégie d'infrastructure.⁹

Chapitre II :
**Méthodes de calcul des silos
circulaires en béton armé**

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

II.1. Introduction :

Les silos en général sont installés en batterie avec certain nombre de cellules de sections variées, juxtaposées de grande hauteur, terminées à leur base par des trémies de vidange de forme conique, et fermées à leur partie supérieure par une calotte ou par un plancher sur lequel sont installés les appareils de remplissage des cellules.

Les phénomènes qui se produisent à l'intérieur d'un silo lors du remplissage ou lors de la vidange sont complexes et difficiles à appréhender par des lois simples. Parmi les diverses méthodes de détermination des actions dans les silos, celles qui sont généralement utilisées font état de courbes de poussée avec asymptote, le plus souvent de type exponentiel.

C'est en 1975 qu'il est apparu en France les premières « Règles professionnelles de conception et de calcul des silos en béton ». Ces Règles ont été révisées en juillet-août 1986. Elles fixent de manière indissociable : un domaine de définition du silo, une méthode de calcul des pressions exercées sur les parois, ainsi que des valeurs numériques conventionnelles pour les paramètres caractérisant un certain nombre de produits couramment ensilés et des coefficients numériques à prendre en compte pour l'interaction nature du produit nature de la paroi.

Ces Règles, auxquelles il convient de se reporter pour de plus amples détails, s'appliquent uniquement aux produits pulvérulents et excluent de leur domaine d'application ceux qui possèdent ou peuvent acquérir une cohésion.

Ces derniers exigent toujours une étude spécifique appropriée. Ils ont en effet souvent donné lieu à de graves mécomptes, car ils sont sujets à un phénomène de prise en masse avec retrait, qui s'accompagne d'une diminution considérable du frottement de la matière ensilée sur les parois et d'un accroissement corrélatif des pressions sur les fonds. Si ce phénomène n'a pas été correctement pris en compte, les pressions sur les fonds peuvent excéder largement les valeurs qui ont été admises pour calculer et armer ces derniers. Les désordres, tels que des arrachements, qui en résultent, nécessitent des réparations longues et coûteuses et entraînent inévitablement des pertes d'exploitation importantes pendant la durée de celles-ci.

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

II.2. Valeur caractérisant le produit ensilé et son interaction avec la paroi :

Un produit ensilé est caractérisé par :

- Son poids volumique γ ;
- Son angle de frottement interne φ ;
- Son angle de frottement δ sur la paroi du silo.

γ , φ et δ sont supposés constants; γ , φ sont définis conventionnellement pour un certain nombre de produits de base.¹⁰

Tableau II.1 : Poids volumiques et angles de frottement interne conventionnels de différents produits.

Produit	γ (KN/m ³)	φ (°)
Ciment	14.7	28
Clinker	14.7 à 15.7	33
Cru de cimenterie	13.0	26
Plâtre	12.25	25
Poudre de charbon	8.35	25
Blé	8.35	26
Mais	7.85	24
Orge	8.1	24
Colza	7.0	24
Soja en graines	7.5	27
Tournesol	5	22
Sorgho	7.35	23
Riz décortiqué	8.6	30
Farine de blé	8.8	20
Sucre granulé	9.0	30

Si la hauteur h de produit stocké au-dessus du plan de base dépasse 10 m, multiplier les valeurs de γ par $1 + \frac{h-10}{500}$. Le poids volumique du clinker peut varier dans les limites indiquées ci-dessus. Il appartient au maître d'ouvrage de préciser la valeur à prendre en compte dans les calculs, en prenant notamment en considération le poids spécifique des grains constitutifs ainsi que la proportion de fines pouvant s'insérer dans la granulométrie.

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

Les parois en béton sont classées en trois catégories :

- Paroi A : paroi à cannelures horizontales ;
- Paroi B : béton non revêtu ;
- Paroi C : béton revêtu d'une peinture.

Dans les règles professionnelles, la valeur conventionnelle de l'angle de frottement φ sur la paroi est définie par la relation :

$$\rho = \frac{\text{tg } \delta}{\text{tg } \varphi} \quad (\text{II.1})$$

Tableau II.2 : Valeurs conventionnelles de ρ .¹⁰

Granularité (selon type de produit)	Paroi A	Paroi B ⁽¹⁾
Poudres	0.87	0.80
Petits grains (céréales, sucre) sauf cas spéciaux	0.87	0.75 ⁽¹⁾
Gros grains (clinker)	0.87	0.70
Cas spéciaux (oléagineux, riz)	0.75	0.65

(1) Seul produit ayant fait l'objet d'essais pour une paroi C, le sucre, avec $\rho = 0,50$.

II.3. Actions exercées par la matière ensilée :

Les actions sur les silos doivent être déterminées en tenant compte de la structure du silo, des propriétés du matériau ensilé, et des modèles d'écoulement qui surviennent pendant la vidange.

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

Il est nécessaire de tenir compte des incertitudes concernant les modèles d'écoulement, de l'influence des excentremets des points de remplissage et de vidange sur les processus de remplissage et de vidange, de l'influence de la forme du silo sur le mode d'écoulement, et de l'évolution dans le temps des contraintes liées au remplissage et à la vidange.¹¹

II.3.1. Domaine de définition :

Les formules qui suivent ne s'appliquent qu'aux cas où :

$$- \frac{H}{r_h} \geq 3.5 \quad (\text{II.2})$$

$$- r_h \leq 7.5 \text{ m} \quad (\text{II.3})$$

$$- h - h' \geq 0.6 H \quad (\text{II.4})$$

II.3.2. Actions sur la paroi verticale du silo:

Les formules données ci-après sont indissociables des valeurs conventionnelles adoptées pour les paramètres, φ et δ (tableaux II.1 et II.2).

Pour l'étude mathématique, on considère l'équilibre d'une tranche de matière comprise entre deux surfaces U et $U + dU$ dites « conjuguées », déduites par translations verticales vers le bas de la surface de remplissage. Le volume de matière compris entre ces deux surfaces est en équilibre sous l'action de son poids, de celui de la matière située au-dessus du volume considéré, de la réaction de la matière située au-dessous et de l'effort de frottement contre les parois.

Les cotes de profondeur sont mesurées par rapport au niveau horizontal du plan moyen de remplissage (cote zéro, prise pour origine).

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

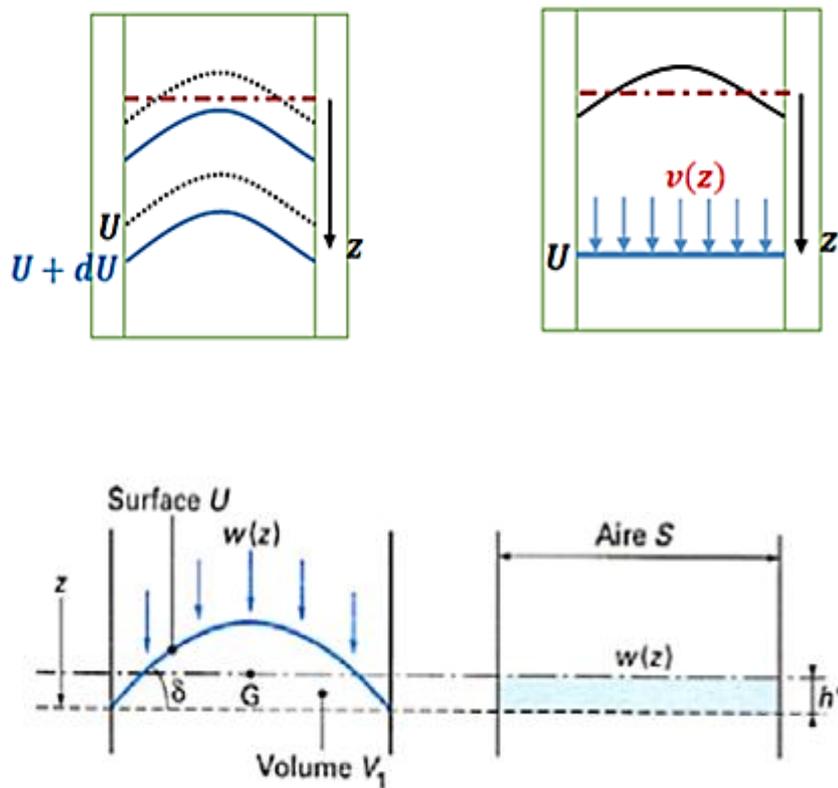


Figure II.1 : Pression verticale sur le plan de cote z .¹⁰

La pression verticale sur le plan de cote z est donnée comme suit :

$$v(z) = w(z) + \gamma h'' \tag{II.5}$$

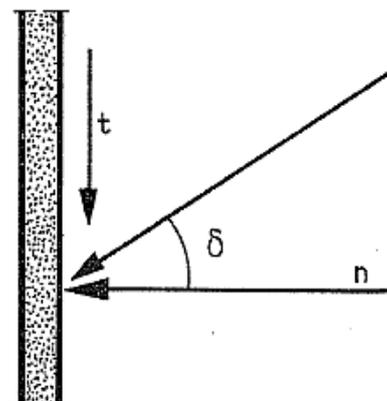


Figure II.2 : Action sur la paroi d'un silo¹².

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

- n : Composante normale de la contrainte appliquée à la paroi du silo le long du contour d'une surface U donnée.
- t : Composante tangentielle, verticale, de la même contrainte, définie par :
 $t = n \tan \delta$.
- w : Contrainte verticale par unité de surface en projection horizontale agissant en tout point de la surface U , et supposée constante sur toute cette surface.
- λ : Rapport n/w qui, comme n et w eux-mêmes, ne dépend que de la surface U considérée.
- T : Résultante des forces de frottement agissant sur une bande de largeur unitaire entre la rive de remplissage et la profondeur z .
- z : Profondeurs sous la surface équivalente lorsque le silo est plein.
- h'' : Profondeur de la rive de remplissage du stock-modèle par rapport au plan moyen de remplissage.

En pratique, deux états de la matière sont à considérer, et les calculs doivent être successivement conduits pour chacun d'eux. Dans chacun de ces états, dits **état 1** et **état 2**, le paramètre λ conserve une valeur constante pour toutes les surfaces U .

- **L'état 1** est caractérisé par un équilibre limite correspondant à l'apparition de plans obliques de glissement au voisinage immédiat de la paroi verticale ; il conduit aux valeurs les plus fortes de la pression moyenne v sur un plan horizontal. Pour cet état

$$\lambda = \lambda_1 = \frac{1 - m \cdot \sin \varphi}{1 + m \cdot \sin \varphi} \cos^2 \delta \quad (\text{II.6})$$

Avec : $m = \sqrt{1 - \rho^2}$

- **L'état 2** correspond en principe au glissement en bloc du « stock-modèle » (stock compris entre la surface U et la surface de remplissage) le long des parois internes ; il conduit aux valeurs les plus défavorables des actions n , t et T appliquées à la paroi verticale. Pour cet état :

$$\lambda = \lambda_2 = \cos^2 \delta \quad (\text{II.7})$$

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

À la valeur de λ relative à chacun des deux états d'équilibre, on fait correspondre une hauteur de référence z_0 définie par :

$$z_0 = \frac{r_h}{\lambda \tan \delta} \quad (z_{01} \text{ associé à } \lambda_1, z_{02} \text{ associé à } \lambda_2) \quad (\text{II.8})$$

Dans ces conditions, on peut montrer que l'expression de la composante nominale horizontale n prend la forme :

$$n(z) = \gamma \cdot \lambda \cdot z_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{z-h''}{z_0}\right) \right] \quad (\text{II.9})$$

Avec h'' profondeur de la rive de remplissage du stock-modèle par rapport au plan moyen de remplissage (qui est aussi la hauteur moyenne de produit entre la surface conjuguée U et le plan horizontal de sa rive).

➤ **Pour un silo à section circulaire :**

$$h'' = \frac{1}{2} r_h \tan \delta \quad (\text{II.10})$$

La pression nominale moyenne sur le plan de base ($z = h$) est :

$$v(h) = w(h) + \gamma h'' = \frac{n(h)}{\lambda} + \gamma h'' \quad (\text{II.11})$$

La résultante nominale T des forces de frottement t ($t = n \tan \delta$) agissant sur une bande de largeur unité entre la rive de remplissage et le plan de base est donnée, quelle que soit la forme du silo, par :

$$T = r_h [\gamma h - v(h)] \quad (\text{II.12})$$

II.3.3. Actions corrigées :

En raison des variations possibles du paramètre λ en fonction de la profondeur qui pourraient entraîner des sous- ou surpressions sur certaines parties de la hauteur, on prend, pour le calcul des parois sous l'action de la poussée horizontale :

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

$$n_c(z) = 1,15 n(z) \quad (\text{II.13})$$

Pour tenir compte d'une part de l'incertitude relative à la loi de distribution de la pression sur le fond due à l'influence, que l'on ne peut évaluer, de la forme de ce dernier et du système de vidange, et d'autre part du risque de surpressions dues à des « ruptures de voûtes » au sein de la matière ensilée, on prend dans le calcul des fonds ou des trémies :

$$v_c(h) = 1,35 v(h) \quad (\text{II.14})$$

(Compte tenu du caractère cumulatif de cette action, la valeur de T n'a pas à être majorée).

II.3.4. Actions sur le fond d'un silo :

On n'envisage ici que le cas où la vidange est normale, Si l'une au moins de ces trois conditions (vidange normale) n'est pas remplie, on se trouve dans un cas de vidange anormale, qui peut être géométriquement, mécaniquement, ou encore structurellement, anormale.

Sur un fond plan horizontal, on admet que l'action exercée par la matière ensilée est une pression verticale uniformément répartie, égale à $v_c(h)$. Pour un silo à trémie, à défaut d'autre méthode, les actions sur le fond incliné sont calculées à partir (figure II.3) :

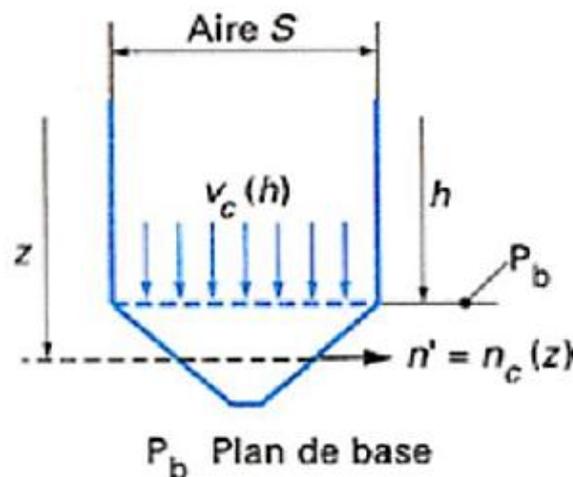


Figure II.3 : Pression sur le fond d'un silo à trémie.⁷

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

- de l'action verticale corrigée $v_c(h)$ à la profondeur h ;
- de l'action horizontale corrigée $n_c(z)$ à la profondeur ($z > h$), cette action étant déterminée comme si, à cette profondeur, la paroi était encore verticale.

Au niveau z , la pression verticale est égale à la pression sur le plan de base, augmentée de celle due au poids de la matière contenue entre les cotes h et z , corrigée par le coefficient $k_v = 1,35$:

$$V' = v_c(h) + k_v \gamma (z - h) \quad (\text{II.15})$$

Sur toute surface unitaire de paroi de trémie, à la profondeur z , d'obliquité α par rapport à l'horizontale (donc de hauteur $\sin \alpha$ en projection verticale et de longueur $\cos \alpha$ en projection horizontale) s'exerce une force ayant pour composantes :

- horizontalement : $n' \sin \alpha$, en posant $n' = n_c(z)$.
- verticalement : $v' \cos \alpha$; à cette composante vient s'ajouter le poids propre g correspondant à la surface unitaire de trémie considérée (figure II.4).

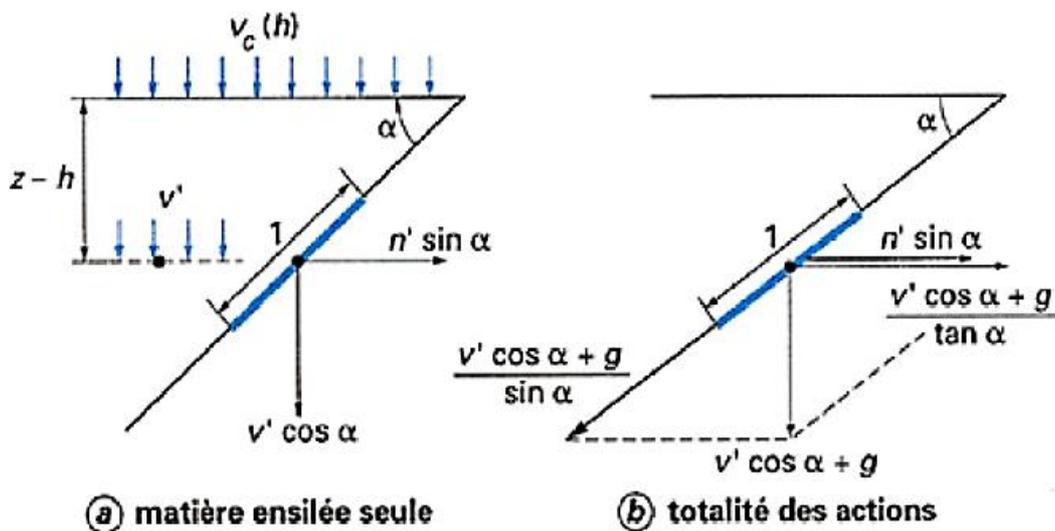


Figure II.4 : Décomposition des forces dans une paroi de trémie.⁷

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

II.3.5. Action créées par les vidanges anormales ou le processus d'insufflation d'air :

Pour les silos à vidages géométriquement anormal, le deuxième état d'équilibre correspond à l'état 3.

La hauteur totale H_t de la jupe est la hauteur comprise entre le plan de base et le niveau supérieur du béton délimitant l'emprise de la cellule.

On désigne par u l'altitude de tout point de la jupe par rapport au plan de base (figure II.5).

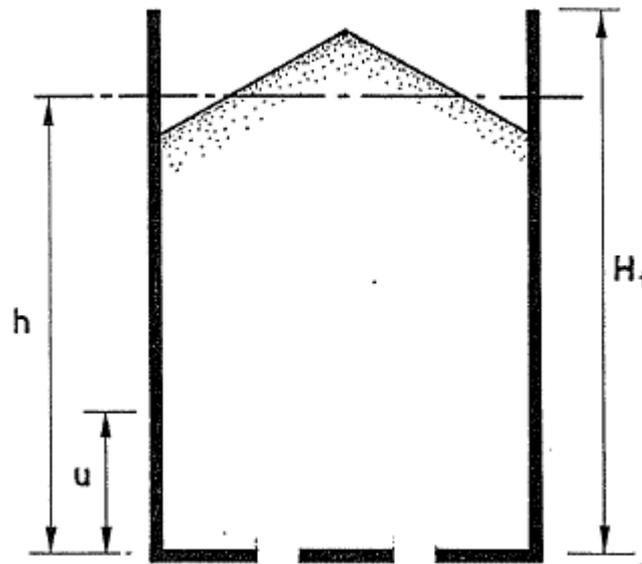


Figure II.5 : Silos à vidages géométriquement anormal ⁷.

- L'état 3 est pour ces silos caractérisé par une action majorée sur la paroi que on prend égal à :

$$n_3 = n_2 + \frac{n_1}{15} \cdot \frac{(1-4u)}{5H_t} \quad \text{lorsque} \quad 0,6 \leq \xi \leq 1$$

$$n_3 = n_2 + \frac{n_1}{15} \cdot (5\xi - 2) \cdot \left(1 - \frac{4u}{5H_t}\right) \quad \text{lorsque} \quad 0,4 < \xi < 0,6$$

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

- n_2 est déterminée comme dans le cas de vidange normale :

$$n(z) = \gamma \lambda Z_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{z-h''}{Z_0}\right) \right] \quad (\text{II.16})$$

- n_1 est déterminée comme dans le cas de vidange normale (pour $z = h$).
- si $n_3 > n_2$ on a une majoration des sollicitations de rapport $\frac{n_3}{n_2}$
- ξ : Rapport d'homothétie.

➤ Dans le cas d'un silo de section circulaire :

A grand nombre de côtés, on considère la plus défavorable des deux charges suivantes:

- Action sur la paroi, uniforme le long du périmètre d'une section horizontale, (égale à n_3) ;
- Action sur la paroi, uniforme le long du périmètre d'une section horizontale, (égale à n_2), l'effort normal dû à cette action étant combiné avec un moment d'ovalisation M_{ov} déterminé à la suite.

Pour le moment d'ovalisation on définit trois configurations importantes :

- Première configuration : jupe solidaire en pied d'un plancher ou d'une ceinture rigide empêchant l'ovalisation à ce niveau, mais libre en tête ;
- Deuxième configuration : jupe solidaire en pied et en tête d'un plancher ou d'une ceinture rigide empêchant l'ovalisation à ces niveaux ;
- Troisième configuration : jupe libre en pied (paroi posée sur appui glissants).

Il y a lieu de distinguer :

- d'une part le moment d'ovalisation dans la paroi qui dépend à la fois de la configuration et de l'altitude u du point considéré ;
- d'autre part le moment d'ovalisation dans les raidisseurs, dont il y a lieu de tenir compte lorsque ceux-ci sont constitués par des ceintures.

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

➤ Ces moments sont respectivement donnés par les expressions suivantes :

$$\text{Paroi:} \quad M_{ov} = \pm M_{ref} \cdot G(\Psi, u / H_t) \cdot \frac{1}{1 + \frac{4n_{02}}{E_i} \cdot \frac{r^3}{h_0}} \quad (\text{II.17})$$

$$\text{Ceinture de tête :} \quad M_{ovt} = \pm M_{ref} \cdot H_t \cdot K_t(\Psi) \quad (\text{II.18})$$

$$\text{Ceinture de pied :} \quad M_{ovp} = \pm M_{ref} \cdot H_t \cdot K_p(\Psi) \quad (\text{II.19})$$

$$\text{Expressions où :} \quad \Psi = \frac{H_t}{r} \sqrt{\frac{h_0}{r}} \quad (\text{II.20})$$

- r : Rayon.
- h₀ : Epaisseur.
- H_t : Hauteur totale de la paroi.
- u : Altitude du point considéré.
- K : Valeur caractéristique du coefficient de contrainte latérale.
- Ψ : Angle du contact de la veine d'écoulement excentré avec la paroi, mesuré depuis le centre de la veine.
- E_i : Module d'élasticité.
- n₀₂ : Valeur de l'action n à l'état 2 au niveau considéré.
- M_{ref} : Moment de référence est défini comme étant :

$$M_{ref} = \mu \cdot n_1 \cdot r^2 \quad \text{lorsque } 0,6 \leq \xi \leq 1 \quad (\text{II.21})$$

$$M_{ref} = \mu \cdot n_1 \cdot (5\xi - 2) \cdot R^2 \quad \text{lorsque } 0,4 < \xi < 0,6 \quad (\text{II.22})$$

➤ Formules dans lesquelles :

μ : Coefficient de frottement de la paroi vertical utilisé pour les calculs de pression ; qui peut être pris égal à :

- 1/200 pour les silos en béton armé de première catégorie ou les silos en béton précontraint.

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

- 1/300 pour les silos en béton armé de deuxième catégorie.
- 1/400 pour les silos en béton armé de troisième catégorie.

Les fonctions G , k_t et k_p sont définies par :

- Cas de la première configuration (jupe liée en pied, libre en tête) la fonction $G(\Psi, u/H_t)$ est donné par (figure II.6).
- Cas de la deuxième configuration voir (figure II.7).
- Cas de la troisième configuration (liaisons négligeables) on adopte pour toute la valeur de Ψ :

$$G(\Psi, u/H_t) = 1 - \frac{4}{5} \frac{u}{H_t} \quad (\text{II.23})$$

$$K_t(\Psi) = K_p(\Psi) = 0$$

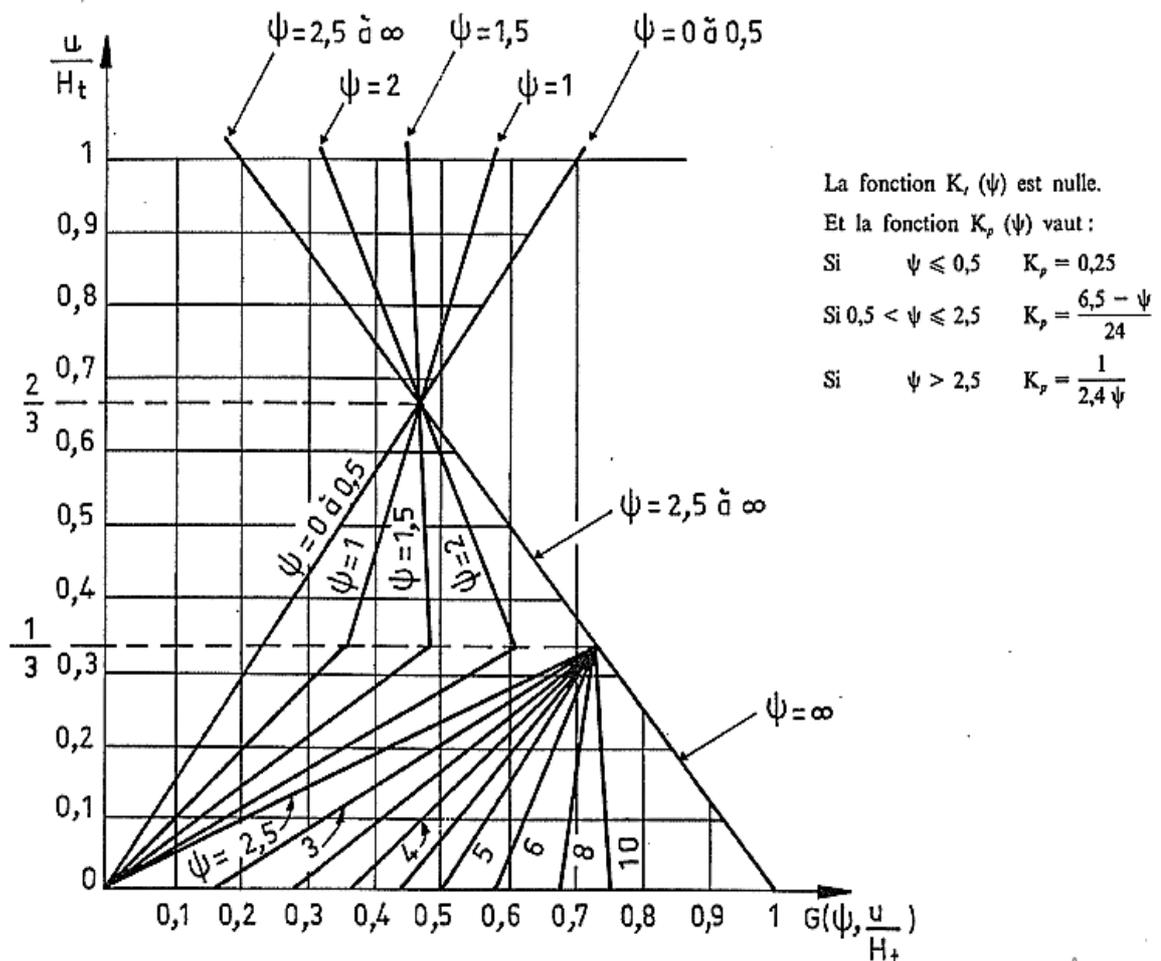


Figure II.6 : Diagramme de la fonction G dans le cas de la première configuration.⁷

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

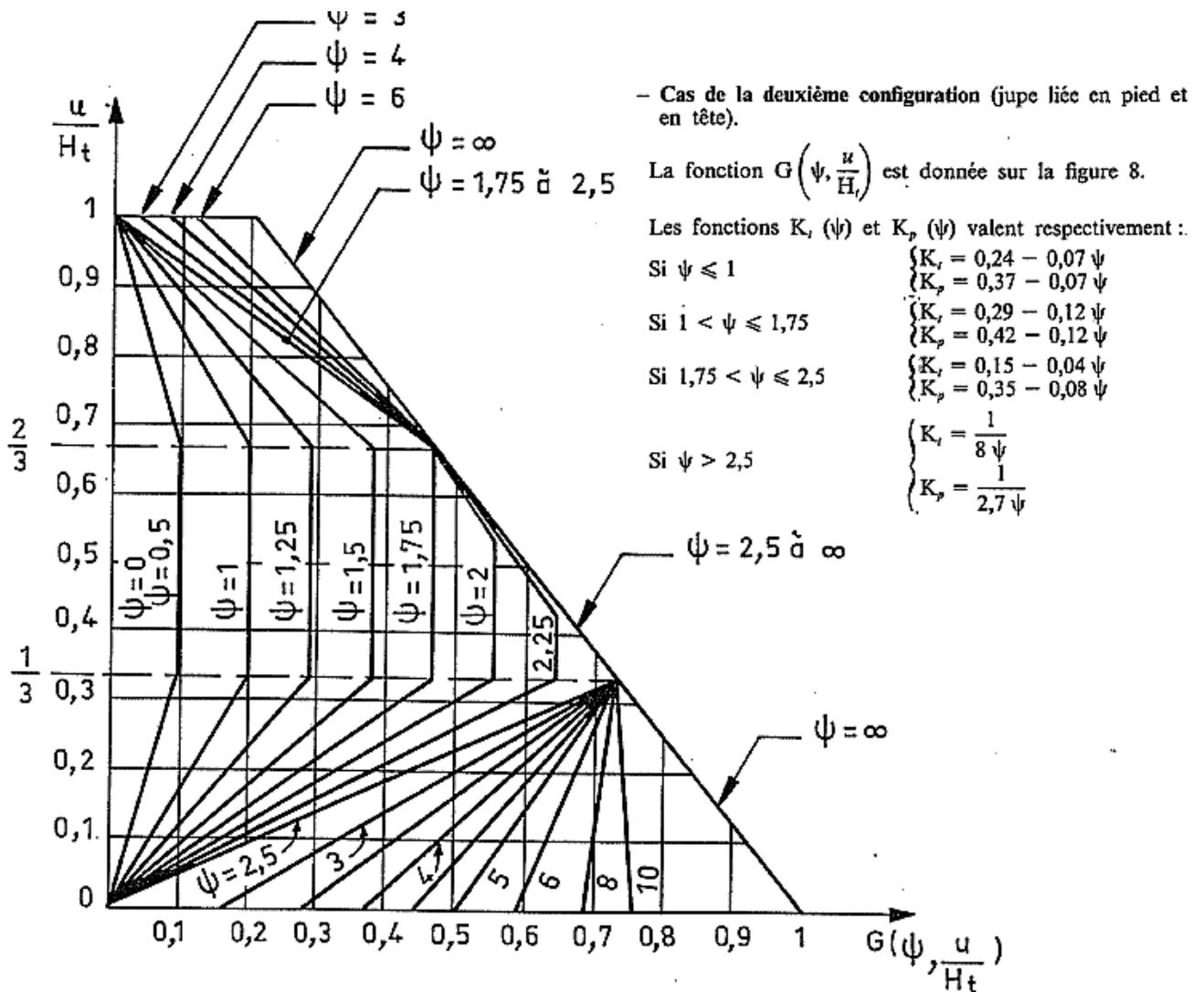


Figure II.7 : Diagramme de la fonction G dans le cas de la deuxième configuration.⁷

II.3.6. Actions Créées par les processus d'insufflation d'air (sauf silos d'homogénéisation) :

Il s'agit des installations où la vidange est mécaniquement anormale par insufflation d'air et celles où une ventilation du matériau est recherchée, indépendamment de toute considération de vidange. Pour l'ensemble de ces installations, il convient de distinguer deux cas, celui où l'influence de la pression d'air ne s'exerce que sur un volume limité, et les autres cas.

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

a) Cas où l'influence de la pression ne s'exerce que sur une portion réduite du volume :

On peut définir un tel cas de la manière suivante :

- la pression de la phase gazeuse ne dépasse pas 5 % de l'action n_1 sur la paroi, à tout niveau entre les profondeurs 0 et $H - h_f$.
- la hauteur h_f (à partir du niveau de l'orifice de vidange), sur laquelle la pression de l'air peut être supérieure à $n_1 / 20$, ne dépasse pas $H / 20$; soit p la valeur de cette pression.

Lorsque ces conditions seront remplies, on pourra négliger la pression de l'air sur les 95 % de la hauteur à partir du haut, et ne prendre en compte au-dessous que la plus défavorable des actions : celles dues au matériau d'une part et celle due à l'air d'autre part.

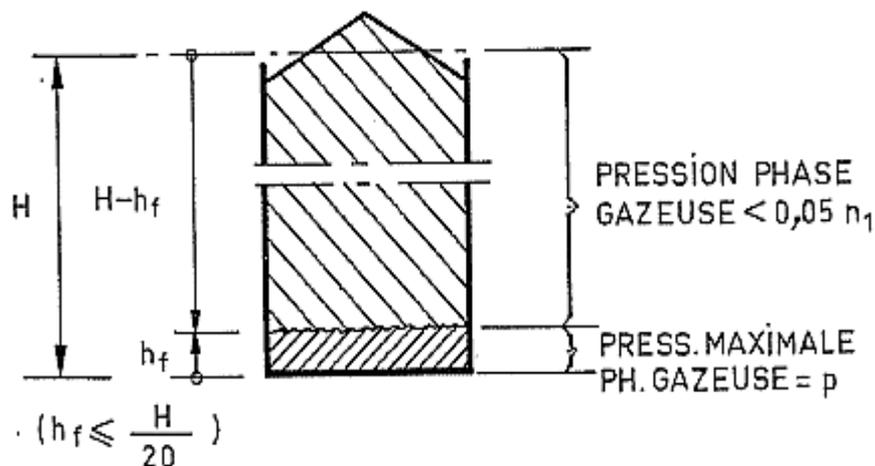


Figure II.8 : Influence de la pression.⁷

b) Autres cas (sauf ceux des silos d'homogénéisation) :

Dans ces cas, le mode de prise en compte de la pression de l'air doit être déterminé en liaison avec le maître de l'ouvrage, à qui il appartient de définir, en particulier, les pressions maximale et minimale de l'air, ainsi que sa loi de répartition et le mode de prise en compte des actions correspondantes.

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

Il arrive en particulier que l'insufflation d'air s'exerce exclusivement lorsque le stock est au repos que la pression de l'air soit alors maximale au niveau du fond diminue linéairement jusqu'à une valeur nulle au niveau origine.

Lorsque toutes ces conditions sont réunies on peut tenir compte de l'air insufflé en ajoutant à chaque niveau la pression de l'air correspondant à la poussée du stock telle qu'elle résulte de l'état d'équilibre 1.

Ce cas doit être bien entendu examiné indépendamment de celui résultats des états d'équilibre 2 (vidange normale) ou (vidange géométriquement anormale).

II.3.7. Actions Créés dans Les Silos à Vidange Structurellement

Anormale:

Le deuxième état d'équilibre, dit « état 4 » est caractérisé par une action n_4 sur la paroi, calculée en prenant pour λ la plus faible des deux valeurs suivantes :

$$\lambda_4 = 1,4 \lambda_1 \text{ et } \lambda_2 \quad (\text{II.24})$$

Dans le cas général, λ_4 est inférieur à λ_2 ; et les vidanges structurellement anormales envisagées correspondent donc à des valeurs de n inférieures à celles d'une vidange normale. (Il est rappelé que ce cas concerne notamment les grands silos à sucre).

II.3.8. Définition des Silos d'homogénéisation par Brassage d'ensemble :

On appelle silo d'homogénéisation par brassage d'ensemble, un silo dans lequel l'introduction d'air sous pression tend à créer un brassage général du stock de matériau ensilé.

➤ **Modèle mécanique :**

On considère comme modèle mécanique des silos (à vidange normale ou géométriquement anormale) un silo dans lequel l'introduction d'air sous pression a pour

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

résultat de faire en sorte que le stock de matériaux pulvérulents brassés se comporte comme un mélange de liquides miscibles.

On désigne par γ' le poids volumique apparent du liquide équivalent, γ' étant inférieur au poids volumique γ du matériau au repos.

➤ Actions à Prendre en Compte dans les Silos d'homogénéisation :

On se place à l'intérieur du domaine de définition admis pour les silos à vidange normale ou géométriquement anormale (ou mécaniquement anormale), et l'on suppose en outre que la définition mécanique des silos d'homogénéisation par brassage d'ensemble est valable dans le cas considéré.

On prendra en compte les trois états suivants, en supposant pour chacun d'eux que le matériau remplit la totalité du silo :

- le premier état, dit « état 1 » ;
- le deuxième état, dit « état 2 » si la vidange est normale, et « l'état 3 » si la vidange est géométriquement anormale ;
- un état, dit « état 5 » dans lequel le matériau est supposé se comporter comme un liquide de poids volumique γ' .

Pour le calcul des actions correspondant aux états 1, 2 et 3, on prend en compte les valeurs de (ϕ et γ fixées pour le matériau stocké (au repos), compte tenu de la nature de la paroi et de la granulométrie.⁷

II.4. Calcul en béton armé :

II.4.1. Base du calcul de la structure :

Les calculs de résistance et de fissurabilité des éléments en béton armé sont conduits suivant les règles¹² BAEL91/99.

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

II.4.1.1. Actions à prendre en compte :

Les actions à prendre en compte sont celles dues aux :

- **Les charges :**
 - permanentes G (poids propre, etc.) ;
 - variable d'exploitation Q (matière ensilée, etc.) ;
 - climatiques (vent W, neige S_n) ;
 - accidentelles (séisme SI) et/ou autres charges, si les documents particuliers du marché en font état et en fixent les valeurs nominales.
- **Déformations imposées :**
 - Effets de la température intérieure et extérieure ;
 - Effets du retrait.⁷

Il y a lieu de tenir compte des températures extérieures extrêmes, conformément à la réglementation en vigueur et compte tenu de l'emplacement du silo (site géographique ; à l'air libre ou dans un local fermé), ainsi que, éventuellement, de la différence de température due à l'ensoleillement.

Les pièces écrites du marché précisent la température de référence T_R ou T_f à prendre en compte pour le produit.¹

II.4.1.2. Combinaisons d'actions :

- **Vis-à-vis des états-limites ultimes de résistance, en dehors des situations accidentelles :**

$$(C_1) = 1,35 G + 1,5 Q + W + T$$

$$(C_2) = G + 1,5 Q + W + T$$

$$(C_3) = G + 1,5 W + 1,5 Q + T$$

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

- **Vis-à-vis des états-limites ultimes de résistance, lors des situations accidentelles (séisme) :**

$$(C_4) = G + Q + SI + T$$

- **Vis-à-vis des états-limites de service (fissuration) :**

$$(C_5) = G + Q + W + T$$

Dans toutes ces combinaisons, les actions dues à la matière ensilée qui rentrent dans le terme Q sont les actions déjà corrigées par les coefficients 1,15 ou 1,35.

Remarque :

1. Dans toutes les combinaisons précédentes, la neige (S_n) peut être substituée au vent (W).
2. Il est rappelé que si l'on désigne par V le vent « normal » défini par les Règles NV 65, dans les combinaisons d'état limite ultime, W représente 1,2 V alors que, dans les combinaisons d'état limite de service, $W = V$.

Les Règles professionnelles [2] contiennent d'utiles indications pour la détermination des effets de la température et du retrait et, en particulier, pour la détermination du moment dû au gradient thermique $\frac{\Delta\theta}{h_0}$ résultant de la différence entre la température T_e de l'air extérieur et celle T_i soit du volume d'air confiné à l'intérieur du silo, soit du matériau stocké

($\Delta\theta < T_i - T_e$; h_0 épaisseur de la paroi).⁷

II.4.2. Calcul des sollicitations :

➤ Définition :

Les sollicitations sont les efforts (normal et tranchant) et les moments (de flexion et de torsion)¹²

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

➤ Silos circulaires :

- Cellules :

Les parois sont soumises à un effort normal de traction dû à $n_c(z)$ et à des efforts de flexion dus :

- aux liaisons entre cellules accolées ;
- à la présence de cellules pleines contiguës à des cellules vides ;
- à l'action des matières stockées dans les cellules en as de carreau.

- Trémies :

Elles se calculent comme précédemment, avec $\alpha_a = \alpha_b = \alpha$. On prévoit généralement une ceinture à la base des parois.

a) Sollicitations à prendre en compte dans la paroi verticale :

Il convient de distinguer d'une part les sollicitations dues aux actions d'ensemble, d'autre part les sollicitations dues aux actions d'ensemble et aux actions locales. Les combinaisons d'actions à considérer sont fixées par les règles spécifiques de calcul de chaque catégorie d'ouvrage. Ce principe général de calcul par superposition d'actions d'ensemble et d'actions locales est également applicable et généralisable à des anneaux non circulaires et même à des ouvrages tubulaires à section creuse.

b) Sollicitations dues aux actions d'ensemble :

Il s'agit des sollicitations qui intéressent l'ensemble de l'ouvrage et qui peuvent être rapportées au centre de gravité de toute section horizontale (figure II.9) :

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

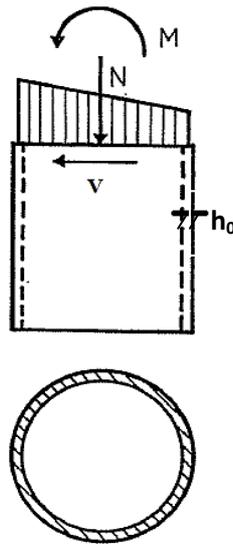


Figure II.9 : Sollicitations dues aux actions d'ensemble.¹²

- l'effort normal N est dû au poids propre, aux équipements divers, aux charges d'exploitation, à l'action de portance du vent, au séisme ;
- le moment de flexion M est dû à l'action d'ensemble du vent, à une dissymétrie éventuelle des charges d'exploitation, à l'ensoleillement, aux actions du second ordre (dus au déplacement d'une section), au séisme ;
- l'effort tranchant V provient de l'action d'ensemble du vent ou de l'action du séisme.

Dans le cas de cellules non indépendantes (batteries de silos par exemple), il faut en outre tenir compte des efforts de liaison avec les autres cellules suivant les cas de charge, ou induits par la torsion d'ensemble sous l'action du séisme, etc.

Les sollicitations définies ci-dessus engendrent des forces verticales N_v par unité de longueur de chaque section horizontale de l'ouvrage, celui-ci étant considéré dans son ensemble comme un tube mince. La loi de distribution de N_v le long du contour de ce tube est déterminée en admettant la loi de Navier, dans l'hypothèse d'une structure élastique et non fissurée.

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

c) Sollicitations dues aux actions d'ensemble et locales :

Il s'agit des sollicitations qui intéressent l'épaisseur du corps de l'ouvrage et qui peuvent être rapportées au centre de gravité de toute section de largeur unitaire soit dans le sens vertical, soit dans le sens horizontal (figure II.10).

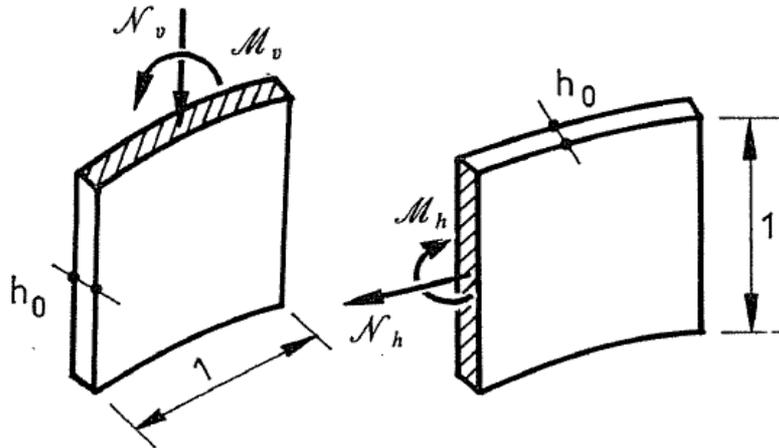


Figure II.10 : Sollicitations dues aux actions d'ensemble et locales.¹²

On distingue ainsi, les indices h (horizontal) et v (vertical) désignant les directions des contraintes engendrées :

➤ dans le sens vertical :

N_v : Effort normal provenant des actions d'ensemble ;

M_v : Moment de flexion d'axe horizontal dû :

- aux liaisons rigides de la paroi à ses extrémités ;
- à l'action d'un gradient thermique $\frac{\Delta\theta}{h_0}$ éventuel dans h_0 l'épaisseur de la paroi :

$$M_{\Delta\theta} = \alpha_{\theta} \frac{\Delta\theta}{h_0} EI \quad (\text{II.25})$$

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

Avec :

- α_θ : Coefficient de dilatation thermique du béton ($\alpha_\theta = 10^{-5}/C^\circ$).
- EI : Facteur de rigidité de la paroi.
- E : Module de déformation à prendre en compte.
- I : Moment d'inertie (par unité de hauteur ou de largeur) de la paroi.
- **dans le sens horizontal :**

N_b effort normal tangentiel dû :

- à la poussée du contenu (cas des silos) ;
- au vent ;
- au séisme.

M_b moment de flexion d'axe vertical dû :

- à l'ensoleillement ;
- à l'ovalisation sous l'effet du vent (ou d'une vidange géométriquement anormale dans le cas de certains silos) ;
- au gradient thermique éventuel ;
- aux liaisons éventuelles le long de certaines génératrices (cas de silos à cellules circulaires accolées).

Les sections unitaires ci-dessus considérées sont ensuite vérifiées en flexion composée sous l'effet des sollicitations combinées aux états –limites de résistance (sans effets du 2^e ordre), ou aux états-limites de service suivant les exigences particulières relatives au type d'ouvrage considéré (silo), la section du béton tendu est négligée (figure II.11).

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

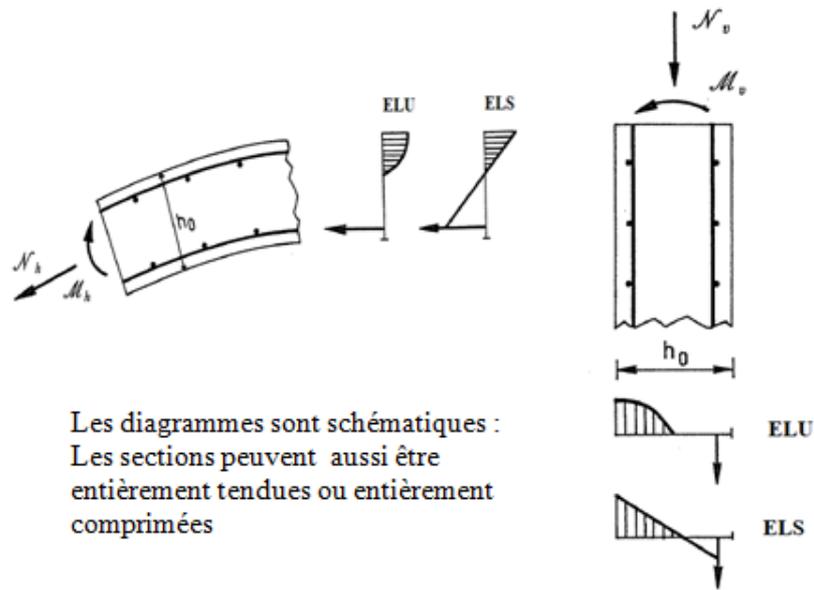


Figure II.11 : Vérifications sous les sollicitations.⁷

Concernant le choix des valeurs z entrant dans le produit EI pour le calcul moment du gradient thermique, il y a lieu de distinguer les cas suivants :

➤ **Vérification à l'état limite ultime de résistance :**

Les valeurs des facteurs E et I , entrant dans l'expression du moment dû au gradient thermique, sont conventionnellement fixées de façon à tenir compte, dans une certaine mesure, de la réduction de la rigidité de la paroi sous l'effet de la fissuration, mais non sous l'effet de la plastification.

- a) Cas de la compression simple ou de la flexion composée avec compression, la totalité de la section étant comprimée :

$E = E_v$: module de déformation différée du béton

$$I = \frac{h_0^3}{12} \tag{II.26}$$

- d) Cas de la flexion simple :

$E = E_v$: module de déformation différée du béton.

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

$$I = i \cdot d^3 \quad (\text{II.27})$$

Où :

- d : Hauteur utile de la section de la paroi,
- i : Coefficient dépendant du pourcentage d'acier $\frac{A}{bd}$
- A : Section d'aciers tendus sur la longueur de paroi b Pour :

$$\frac{A}{bd} < 0.01 : i = 0.01 + 7 \cdot \frac{A}{bd}$$

$$\frac{A}{bd} < 0.01 : i = 0.04 + 4 \cdot \frac{A}{bd}$$

c) Cas de la traction simple ou de la flexion composée avec traction, la totalité de la section étant tendue (avec présence d'une nappe d'acier sur chaque face).

$E = E_s$: Module d'élasticité de l'acier.

$I = I_s$: Moment d'inertie de la section constituée exclusivement par les deux nappes d'aciers.

En particulier si les deux nappes d'aciers sont identiques, et d'une section A chacune pour la longueur de paroi b :

$$I_s = \frac{2A}{bd} \cdot \left(\frac{h'}{2}\right)^2 = \frac{Ah'^2}{2b} = \frac{A}{2bh'} h'^3 \quad (\text{II.28})$$

- h' : Distance entre les deux nappes;
- $\frac{A}{bd}$: Sans dimension.

Pour l'application des méthodes qui précèdent, il y a lieu de s'assurer que la situation reste inchangée (par exemple : section entièrement comprimée, ou entièrement tendue) après superposition de la sollicitation $M_{\Delta\theta}$.

Il est rappelé que le gradient thermique crée des moments dans chaque direction, respectivement $M_{\Delta\theta,h}$ et $M_{\Delta\theta,v}$.

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

Les armatures correspondantes doivent être disposées de la côte de la face la plus froide de la paroi.

Compte tenu du caractère conventionnel du mode de fixation des valeurs des facteurs E et I, entrant dans l'expression de M, il y a lieu, même lorsque la température du béton est supérieure à 100 °C, d'adopter pour le module de déformation différée E, du béton, sa valeur à température normale (alors que les résistances sont à affecter du coefficient minorateur Ψ_b).

➤ Vérification à l'état limite de service :

- Pour les parois de la première catégorie, la fissuration n'étant pas systématique, il y a lieu d'adopter dans tous les cas de sollicitations :

$$E = E_v$$
$$I = \frac{h_0^3}{12} \quad (\text{II.29})$$

- Pour les parois de la seconde catégorie, le produit E.I ne devant toutefois pas être pris inférieur à :

$$\frac{1}{2} \cdot E_v \cdot \frac{h_0}{12} = E_v \cdot \frac{h_0}{24} \quad (\text{II.30})$$

II.4.2.1. Justification des sections :

La justification des sections est conduite conformément aux Règles BAEL91, avec les adaptations suivantes :

- la contrainte limite ultime du béton comprimé est prise égale à :

$$\sigma_{bc} = \frac{0.85 f_{cj}}{\gamma_b} \quad (\text{II.31})$$

état-limite d'ouverture des fissures : les documents particuliers du marché définissent le degré de fissurabilité admis pour chaque ouvrage en fonction de la susceptibilité du produit stocké à l'humidité, de la présence éventuelle d'un revêtement, de la position relative de la paroi, intérieure ou extérieure, de l'environnement, etc.

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

En fonction du degré de fissurabilité admis, les parois sont classées en trois catégories :

- **première catégorie** : parois pour lesquelles il est requis que la probabilité d'apparition des fissures soit aussi faible que possible ;
- **deuxième catégorie** : parois pour lesquelles il est requis que l'ouverture des fissures soit aussi faible que possible ;
- **troisième catégorie** : parois dont la fissuration, tout en restant limitée, est censée ne nuire ni à l'exploitation ni à la durabilité de l'ouvrage ;
- **pour les parois de la seconde catégorie** : $\alpha = 450$ et le rapport de la section totale des armatures de chaque direction à la section de la paroi ne peut excéder 2 % ;
- **pour les parois de la troisième catégorie** : la seule condition imposée est $\sigma_s \leq 150 \eta$, le pourcentage total des armatures devant rester inférieur à 2 %, comme ci-dessus.

II.4.2.2. Dispositions constructives minimales :

- **Épaisseur minimale des parois** :

Quel que soit le type de coffrage employé, la réalisation de paroi d'épaisseur inférieure à 15 cm exige des précautions et un soin particuliers.

- **Armatures** :

Quelle que soit la forme du silo, on prévoit normalement (impérativement pour les cellules de première catégorie) deux nappes d'armatures dans les parois, une près de chaque face.

Dans le cas de cellules circulaires, la nappe intérieure ne doit pas comporter plus de la moitié de la section totale des armatures horizontales.

- **Enrobage** : sauf cas spéciaux (par exemple stockage de produits abrasifs), l'enrobage minimal de toute armature est fixé à 2 cm.

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

- **Pourcentage minimal** : pour l'ensemble des faces, le pourcentage total d'armatures HA dans chaque direction doit être au moins égal à 0,2 % ; le rapport entre la section des armatures secondaires et celle des armatures principales ne peut être inférieur à 1/4.
- **Espacement maximal** : des aciers verticaux : il est égal à : Max [h₀ ; 20 cm]
- **Recouvrements** : la proportion des barres en recouvrement dans une même section ne peut être supérieure à 1/2 ; cette valeur est réduite à 1/3 dans les sections soumises à la flexion composée avec traction, lorsque :

$$\text{L'excentricité } e_0 = \frac{M}{N} \cdot 12 \quad (\text{II.32})$$

Chapitre II : Méthodes de calcul des silos circulaires en béton armé

II.5. Conclusion :

Les effets dynamiques dans un silo sont introduits par les phénomènes qui se produisent dans l'écoulement des grains ensilés à la vidange ou au remplissage. Une ouverture même petite de la vanne de vidange produit un écoulement vers le bas rompant l'équilibre de la masse ensilée et introduit immédiatement des surpressions sur les parois.¹ Ainsi que les calculs des actions dans la paroi de silo différent selon le type de vidange.

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 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.²

Chapitre III :
Calcul des actions de la
matière ensilé sur les parois
du silo de Bouchegouf

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

III.1. Introduction :

On s'intéresse plus particulièrement à la distribution des contraintes, des moments, et des actions des le long des parois d'une cellule à section droite circulaire.¹⁴ Ainsi les précédents chapitres ont déjà rapporté les dispositions générales qui peuvent leur être appliquées.

Les règles de conception et d'exécution de certains des ouvrages examinés, sont actuellement en cours de révision pour être conformes avec la normalisation européenne. Les examens des structures abordées sont fondés sur les normes de l'Eurocode 1, en particulier la partie 4.¹³

III.2. Présentation l'ouvrage :

III.2.1. Géométrie et dimensions :

Dans le cadre d'un projet de construction d'un silo en béton armé, il a été demandé d'étudier un silo contient 10 cellules pour le stockage des céréales (Blé durs, Blé tendres et Orge) d'une capacité de 30 000 tonne.

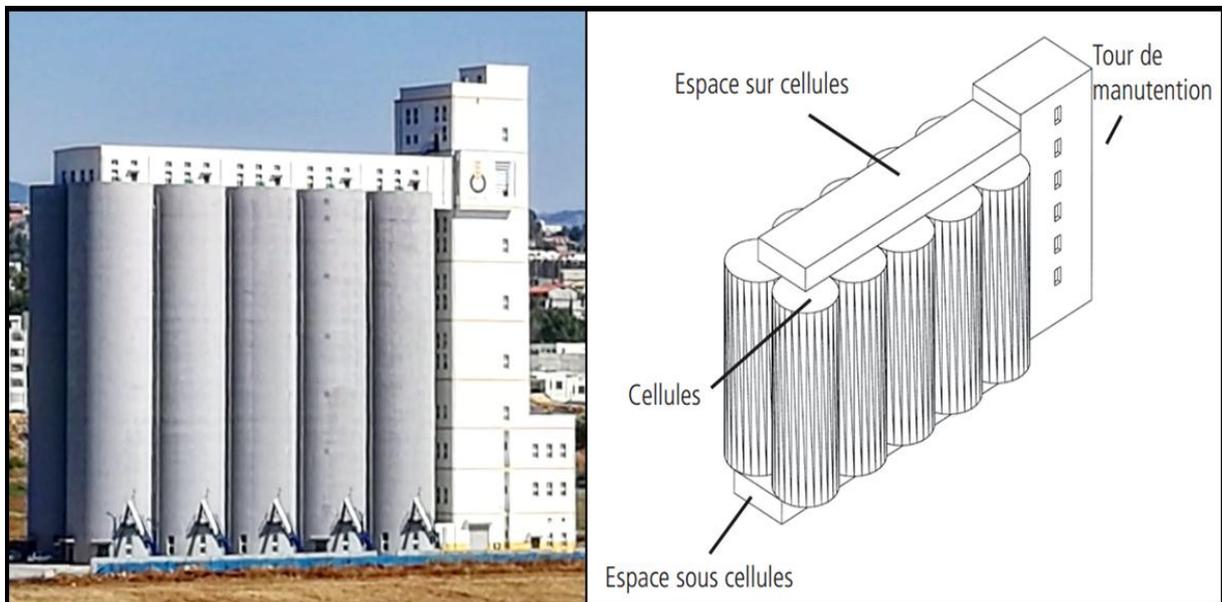


Figure III.1 : Silo en béton armé pour stockage de céréale 'Bouchegouf-Guelma'.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

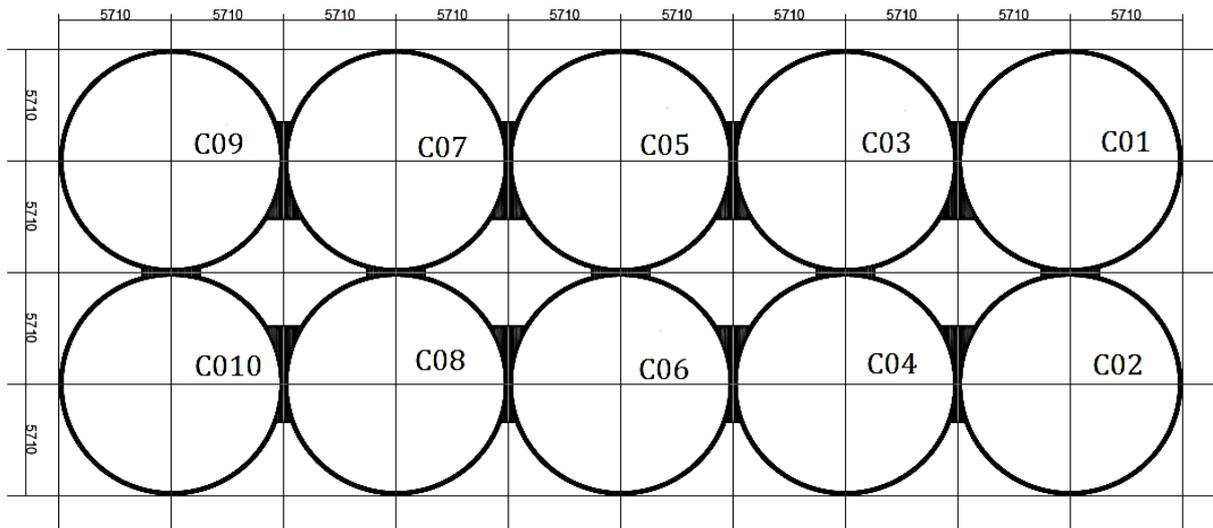


Figure III.2 : Vu en plan fait par l'autocad.

La cellule qui on a étudié c'est la cellule « C06 » pour stockage de blé. Le silo est une coque cylindrique de 47.50 m de hauteur et de 5.71 m de diamètre, il contient une trémie de 4.8 m dans la partie inférieure.

Au niveau 2.7 m le silo contient une ouverture centrée de 5.50 m de diamètre. En bas du silo il y a une voie d'accès servant à l'installation des machines de vidange, l'entretien ainsi à l'accès des camions.

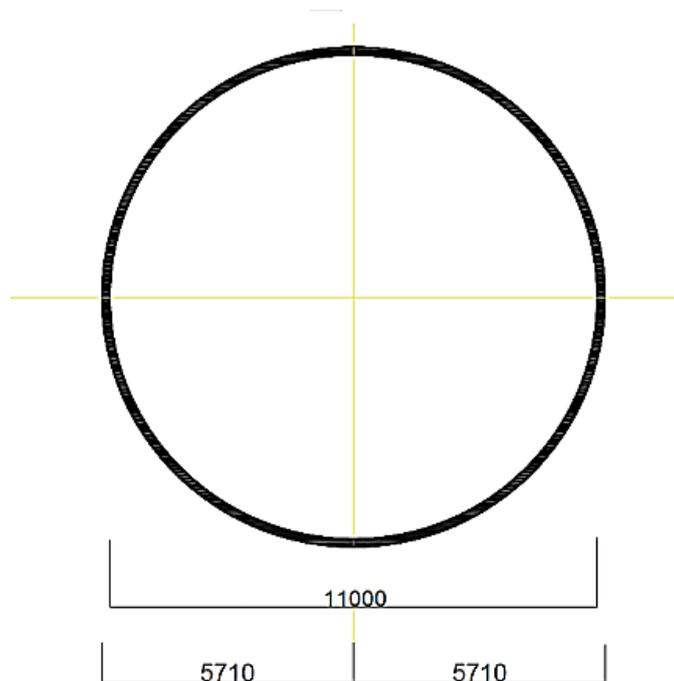


Figure III.3 : Vue en plan de la cellule (stockage de blé).

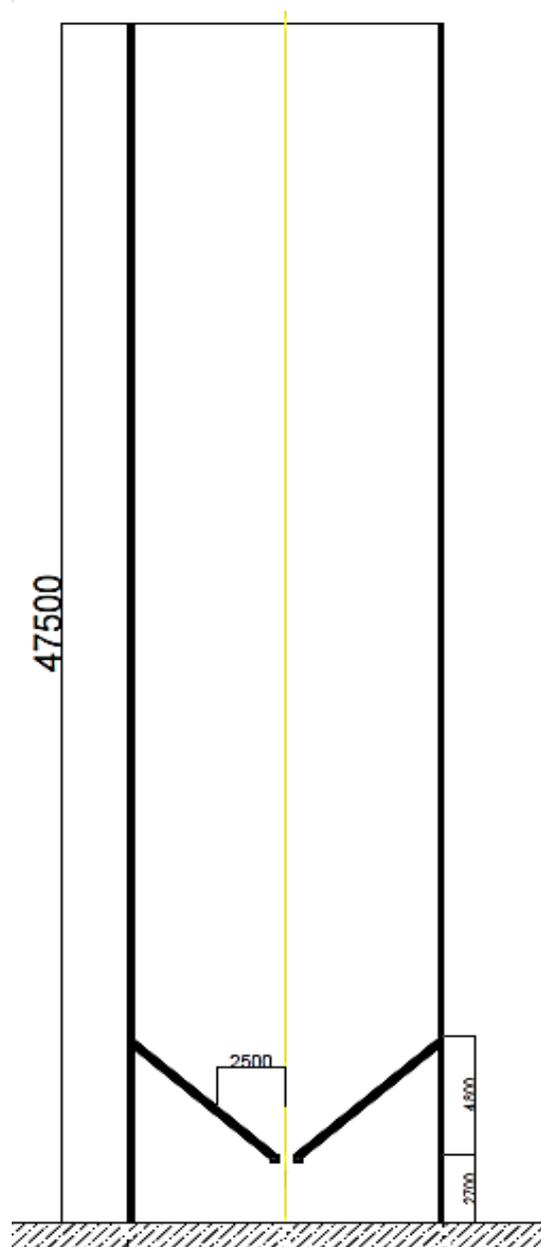


Figure III.4 : Coupe verticale de la cellule
(stockage de blé)

III.2.2. Implantation et contraintes :

Le silo est situé dans la wilaya de Guelma (Bouchegouf) qui est classée en zone de sismicité moyenne (Zone IIa).

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

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

III.3. Charges dues au blé :

III.3.1. Données géométriques :

- **Rayon hydraulique r_h :**

$$\text{Rayon : } r = \frac{R+R'}{2} = \frac{5710+5500}{2} = 5.605 \text{ m}$$

$$\text{Section : } S = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot (5.605)^2 = 98.646 \text{ m}^2$$

$$\text{Périmètre intérieur : } L = 2 \cdot r \cdot \pi = 5605 \times 2 \times \pi = 35.217 \text{ m}$$

$$\text{Donc : } r_h = \frac{S}{L} = \frac{\pi \cdot r^2}{2 \cdot r \cdot \pi} = \frac{r}{2} = 2.803 \text{ m}$$

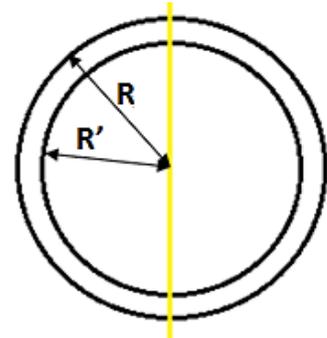


Figure III.5 : Le rayon intérieur et extérieur de silo.

- **Le plan moyen de remplissage :**

$$h' = \frac{2}{3} r_h \cdot \tan \beta \quad \text{avec ; } \beta = 20^\circ \text{ (L'angle de repos de blé)}$$

$$h' = \frac{2}{3} \times 2.803 \times \tan(20^\circ) = 0.680 \text{ m}$$

$$X = r \cdot \tan \beta = 5.605 \times \tan(20^\circ) = 2.040 \text{ m}$$

- **Le plan de base et profondeur de vidange :**

$$\text{Plan de base} = 7.500 \text{ m}$$

$$h = 47.5 - 7.5 - 1.36 = 38.640 \text{ m}$$

$$H = h + 4.8 = 38.640 + 4.800 = 43.44 \text{ m}$$

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

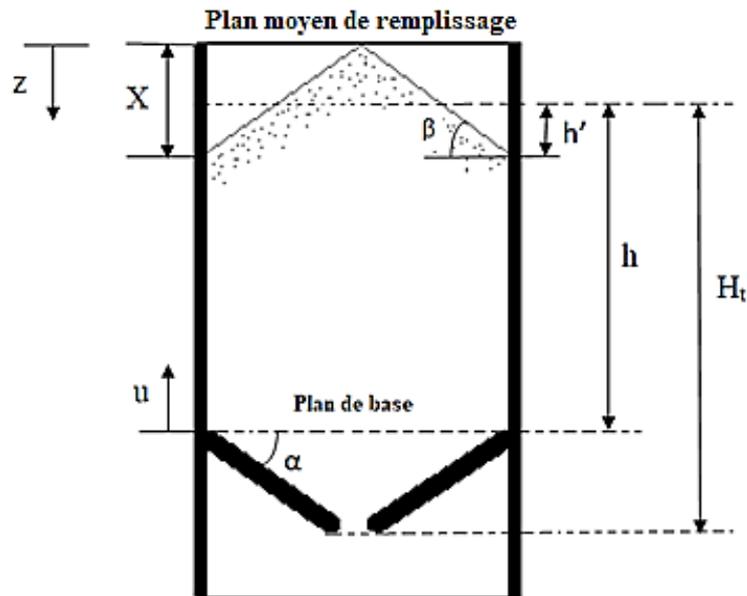


Figure III.6 : Le plan moyen de remplissage et le plan de base et profondeur de vidange.

III.3.2. Domaine d'application des formules type silo :

1. élancement : $\frac{H}{r_h} = \frac{43.44}{2.803} = 15.498 > 3.5$;
2. $r_h = 2.803 < 7.5$ m ;
3. $\frac{h-h'}{H} = \frac{38.640 - 0.680}{43.440} = 0.874 > 0.6$;
4. le rapport d'homothétie (de centre O qui fait correspondre au contour C le plus petit contour homothétique C' qui contient l'ensemble des contours V) :

$$\xi = \frac{\text{le rayon de vidange}}{R} = \frac{2.500}{5.605} = 0.4 \rightarrow \text{silo à vidange normale.}$$

→ Donc les règles « silo » applicables.

III.3.3. Caractéristiques du produit en sillée (blé):

D'après (Tableau II.1, Tableau II.2) pour la paroi B :

- Son poids volumique $\gamma = 8.35 \text{KN/m}^3$;

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Boucheougouf

- Son angle de frottement interne $\varphi = 26^\circ$;
- Son angle de frottement sur la paroi du silo : $\rho = 0.75$

$$\rho = \frac{\tan \delta}{\tan \varphi} \rightarrow \tan \delta = \rho \times \tan \varphi = 0.75 \times \tan(26) = 0.366 \rightarrow \delta = 20.1^\circ$$

III.3.4. Actions sur la paroi verticale du silo:

➤ Valeur du paramètre λ :

$$\lambda = \lambda_1 = \frac{1 - m \sin \varphi}{1 + m \sin \varphi} \cos^2 \delta$$

- L'état 1 : $\lambda = \lambda_1 = \frac{1 - m \cdot \sin \varphi}{1 + m \cdot \sin \varphi} \cos^2 \delta$

Avec : $m = \sqrt{1 - \rho^2} = \sqrt{1 - 0.75^2} = 0.662$

Donc $\lambda_1 = \frac{1 - 0.662 \cdot (\sin 26)}{1 + 0.662 \cdot (\sin 26)} \cdot \cos^2(20.1) = 0.485$

- L'état 2 : $\lambda = \lambda_2 = \cos^2 \delta = \cos^2(20.1) = 0.882$

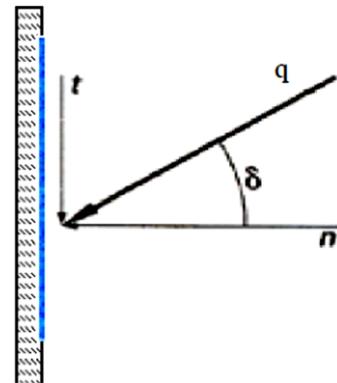


Figure III.7 : actions n et t sur la paroi de silo.¹²

➤ hauteur de référence z_0 :

$$z_0 = \frac{r_h}{\lambda \cdot \tan \delta}$$

- L'état 1 : $z_{01} = \frac{r_h}{\lambda_1 \cdot \tan \delta} = \frac{2.803}{0.485 \cdot \tan(20.1)} = 15.793 \text{ m}$

- L'état 2 : $z_{02} = \frac{r_h}{\lambda_2 \cdot \tan \delta} = \frac{2.803}{0.882 \cdot \tan(20.1)} = 8.684 \text{ m}$

III.3.4.1. Valeurs nominales des actions :

Les calculs ce fait par tranches de 0.5 m au niveau de la hauteur de la paroi du haut jusqu'au niveau de plan de base. $z = h = 38.64 \text{ m}$

➤ La composante nominale horizontale $n(z)$:

$$n(z) = \gamma \cdot \lambda \cdot z_0 \cdot \left[1 - \exp\left(-\frac{z-h''}{z_0}\right) \right] \quad (n_{01} \text{ associé à } \lambda_1, n_{02} \text{ associé à } \lambda_2)$$

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

• L'état 1 : $n_1(z) = \gamma \cdot \lambda \cdot z_{01} \left[1 - \exp\left(-\frac{z-h''}{z_{01}}\right) \right]$

→ $n_1(z) = 8.35 \times 0.485 \times 15.793 \left[1 - \exp\left(-\frac{z-0.513}{15.793}\right) \right]$

Tableau III.1 : Distribution de la composante nominale horizontale n_1 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

z(m)	n ₁ (KN/m ²)	z(m)	n ₁ (KN/m ²)
0,00	-2,11	19,50	44,74
0,50	-0,01	20,00	45,34
1,00	1,94	20,50	45,92
1,50	3,87	21,00	46,48
2,00	5,75	21,50	47,02
2,50	7,56	22,00	47,55
3,00	9,32	22,50	48,06
3,50	11,02	23,00	48,56
4,00	12,67	23,50	49,04
4,50	14,27	24,00	49,50
5,00	15,82	24,50	49,95
5,50	17,32	25,00	50,39
6,00	18,77	25,50	50,81
6,50	20,18	26,00	51,22
7,00	21,54	26,50	51,62
7,50	22,87	27,00	52,00
8,00	24,15	27,50	52,38
8,50	25,39	28,00	52,74
9,00	26,59	28,50	53,09
9,50	27,75	29,00	53,43
10,00	28,88	29,50	53,75
10,50	29,97	30,00	54,07
11,00	31,03	30,50	54,38
11,50	32,06	31,00	54,68
12,00	33,05	31,50	54,97
12,50	34,02	32,00	55,25
13,00	34,95	32,50	55,52
13,50	35,85	33,00	55,78
14,00	36,73	33,50	56,04
14,50	37,58	34,00	56,28
15,00	38,40	34,50	56,52
15,50	39,20	35,00	56,75
16,00	39,97	35,50	56,98
16,50	40,72	36,00	57,20
17,00	41,44	36,50	57,41
17,50	42,14	37,00	57,61

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

z(m)	n ₁ (KN/m ²)	z(m)	n ₁ (KN/m ²)
18,00	42,82	37,50	57,81
18,50	43,48	38,00	58,00
19,00	44,12	38,64	58,24

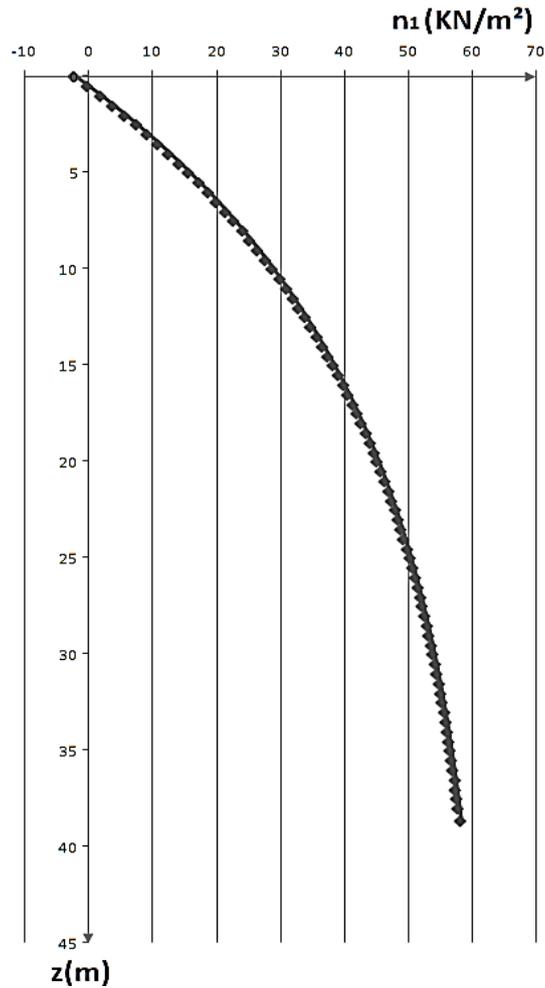


Figure III.8 : Distribution de la composante nominale horizontale n_1 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

- L'état 2 : $n_2(z) = \gamma \cdot \lambda \cdot z_{02} \left[1 - \exp\left(-\frac{z-h''}{z_{02}}\right) \right]$
 → $n_2(z) = 8.35 \times 0.882 \times 8.684 \left[1 - \exp\left(-\frac{z-0.513}{8.684}\right) \right]$

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

Tableau III.2 : Distribution de la composante nominale horizontale n_2 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

z(m)	n_2(KN/m²)	z(m)	n_2(KN/m²)
0,00	-3,89	19,50	56,77
0,50	-0,10	20,00	57,17
1,00	3,49	20,50	57,55
1,50	6,87	21,00	57,91
2,00	10,06	21,50	58,25
2,50	13,08	22,00	58,57
3,00	15,93	22,50	58,87
3,50	18,61	23,00	59,15
4,00	21,15	23,50	59,42
4,50	23,55	24,00	59,68
5,00	25,81	24,50	59,92
5,50	27,94	25,00	60,14
6,00	29,96	25,50	60,36
6,50	31,86	26,00	60,56
7,00	33,65	26,50	60,75
7,50	35,35	27,00	60,93
8,00	36,95	27,50	61,10
8,50	38,46	28,00	61,26
9,00	39,89	28,50	61,41
9,50	41,23	29,00	61,55
10,00	42,51	29,50	61,68
10,50	43,71	30,00	61,81
11,00	44,84	30,50	61,93
11,50	45,91	31,00	62,04
12,00	46,92	31,50	62,15
12,50	47,87	32,00	62,25
13,00	48,77	32,50	62,35
13,50	49,62	33,00	62,44
14,00	50,42	33,50	62,52
14,50	51,18	34,00	62,60
15,00	51,89	34,50	62,68
15,50	52,57	35,00	62,75
16,00	53,21	35,50	62,82
16,50	53,81	36,00	62,88
17,00	54,38	36,50	62,94
17,50	54,91	37,00	63,00
18,00	55,42	37,50	63,05
18,50	55,90	38,00	63,10
19,00	56,35	38,64	63,16

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

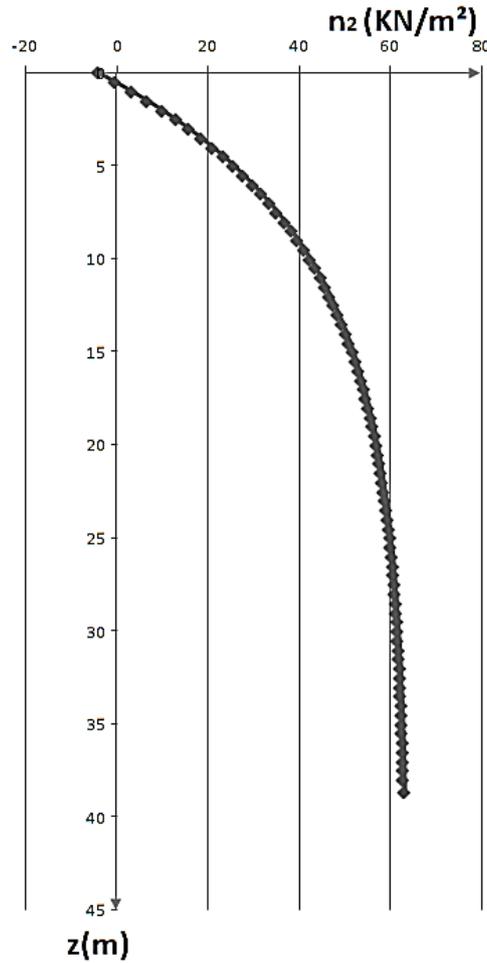


Figure III. 9: Distribution de la composante nominale horizontale n_2 en fonction de la hauteur d'une matière stocké dans le silo.

➤ **La composante nominale tangentielle, verticale t :**

$$t = n \tan \delta \quad ; \quad (t_1 \text{ associé à } n_1, t_2 \text{ associé à } n_2)$$

- **L'état 1 :** $t_1 = n_1 \times \tan (20.1)$

Tableau III.3 : Distribution de la composante nominale tangentielle verticale t_1 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

$z(\text{m})$	$t_1 (\text{KN/m}^2)$	$z(\text{m})$	$t_1 (\text{KN/m}^2)$
0,00	-0,77	19,50	16,37
0,50	-0,02	20,00	16,59
1,00	0,71	20,50	16,80
1,50	1,42	21,00	17,01
2,00	2,10	21,50	17,21

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

z(m)	t₁ (KN/m²)	z(m)	t₁ (KN/m²)
2,50	2,77	22,00	17,40
3,00	3,41	22,50	17,59
3,50	4,03	23,00	17,77
4,00	4,64	23,50	17,94
4,50	5,22	24,00	18,11
5,00	5,79	24,50	18,28
5,50	6,34	25,00	18,44
6,00	6,87	25,50	18,59
6,50	7,38	26,00	18,74
7,00	7,88	26,50	18,89
7,50	8,37	27,00	19,03
8,00	8,84	27,50	19,16
8,50	9,29	28,00	19,30
9,00	9,73	28,50	19,42
9,50	10,16	29,00	19,55
10,00	10,57	29,50	19,67
10,50	10,97	30,00	19,78
11,00	11,36	30,50	19,90
11,50	11,73	31,00	20,01
12,00	12,09	31,50	20,11
12,50	12,45	32,00	20,22
13,00	12,79	32,50	20,31
13,50	13,12	33,00	20,41
14,00	13,44	33,50	20,50
14,50	13,75	34,00	20,59
15,00	14,05	34,50	20,68
15,50	14,34	35,00	20,77
16,00	14,62	35,50	20,85
16,50	14,90	36,00	20,93
17,00	15,16	36,50	21,00
17,50	15,42	37,00	21,08
18,00	15,67	37,50	21,15
18,50	15,91	38,00	21,22
19,00	16,14	38,64	21,31

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilée sur les parois du silo de Bouchegouf

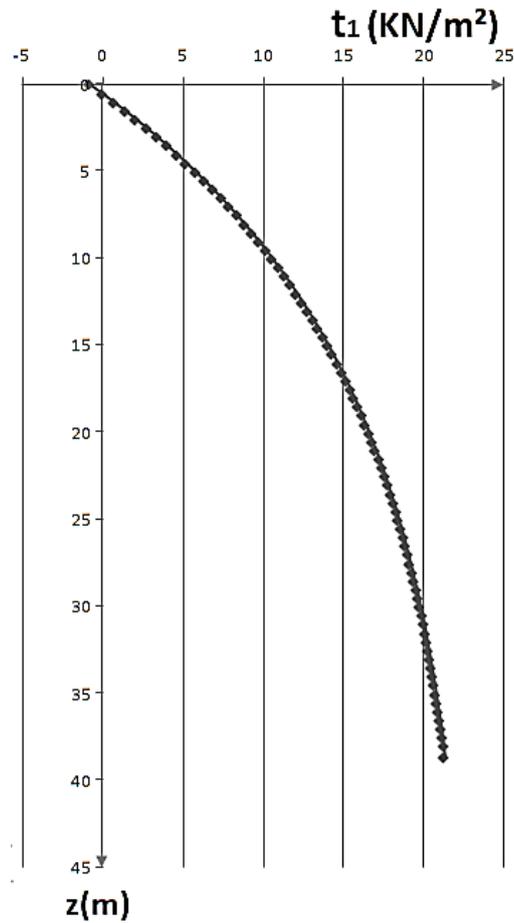


Figure III.10 : Distribution de la composante nominale tangentielle verticale t_1 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

- **L'état 2 :** $t_2 = n_2 \times \tan (20.1$

Tableau III.4 : Distribution de la composante nominale tangentielle verticale t_2 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

$z(\text{m})$	$t_2 (\text{KN/m}^2)$	$z(\text{m})$	$t_2 (\text{KN/m}^2)$
0,00	-1,42	19,50	20,77
0,50	-0,04	20,00	20,92
1,00	1,28	20,50	21,06
1,50	2,51	21,00	21,19
2,00	3,68	21,50	21,31
2,50	4,79	22,00	21,43
3,00	5,83	22,50	21,54
3,50	6,81	23,00	21,64
4,00	7,74	23,50	21,74
4,50	8,62	24,00	21,84
5,00	9,44	24,50	21,92

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

z(m)	t₂ (KN/m²)	z(m)	t₂ (KN/m²)
5,50	10,22	25,00	22,01
6,00	10,96	25,50	22,08
6,50	11,66	26,00	22,16
7,00	12,31	26,50	22,23
7,50	12,93	27,00	22,29
8,00	13,52	27,50	22,36
8,50	14,07	28,00	22,41
9,00	14,59	28,50	22,47
9,50	15,09	29,00	22,52
10,00	15,55	29,50	22,57
10,50	15,99	30,00	22,62
11,00	16,41	30,50	22,66
11,50	16,80	31,00	22,70
12,00	17,17	31,50	22,74
12,50	17,52	32,00	22,78
13,00	17,85	32,50	22,81
13,50	18,16	33,00	22,85
14,00	18,45	33,50	22,88
14,50	18,73	34,00	22,91
15,00	18,99	34,50	22,93
15,50	19,24	35,00	22,96
16,00	19,47	35,50	22,98
16,50	19,69	36,00	23,01
17,00	19,90	36,50	23,03
17,50	20,09	37,00	23,05
18,00	20,28	37,50	23,07
18,50	20,45	38,00	23,09
19,00	20,62	38,64	23,11

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

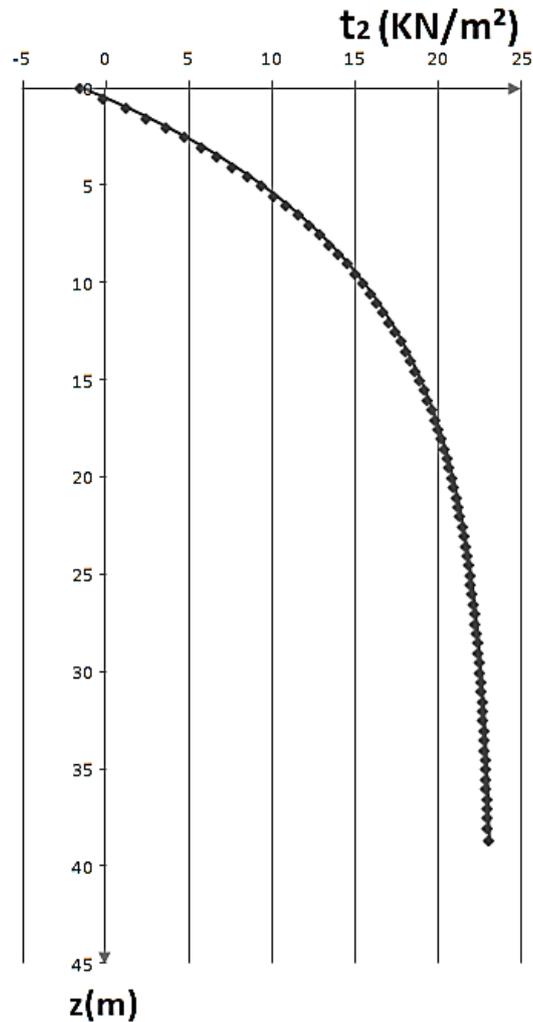


Tableau III.11 : Distribution de la composante nominale tangentielle verticale t_2 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

➤ **La pression nominale moyenne $v(h)$ sur le plan de base ($z = h$) :**

$$v(h) = w(h) + \gamma h'' = \frac{n(h)}{\lambda} + \gamma h'' \quad \rightarrow \quad v(h) = \frac{n(h)}{\lambda} + \gamma h''$$

D'où:

$$h'' = \frac{1}{2} r_h \tan \delta = \frac{1}{2} \times 2.803 \times \tan (20.1)$$

$$h'' = 0.513 \text{ m}$$

- **L'état 1 :** $v_1(h) = \frac{n_1(h)}{\lambda_1} + \gamma h'' = \frac{n_1(h)}{0.485} + 8.35 \times 0.513$

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

Tableau III.5 : Distribution de la pression nominale moyenne v_1 sur le plan de base en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

$z(m)$	$v_1 (KN/m^2)$	$z(m)$	$v_1 (KN/m^2)$
0,00	-0,07	19,50	96,53
0,50	4,17	20,00	97,76
1,00	8,29	20,50	98,96
1,50	12,27	21,00	100,12
2,00	16,13	21,50	101,24
2,50	19,87	22,00	102,33
3,00	23,50	22,50	103,38
3,50	27,01	23,00	104,40
4,00	30,41	23,50	105,39
4,50	33,71	24,00	106,35
5,00	36,90	24,50	107,28
5,50	39,99	25,00	108,18
6,00	42,99	25,50	109,05
6,50	45,89	26,00	109,90
7,00	48,70	26,50	110,71
7,50	51,43	27,00	111,51
8,00	54,07	27,50	112,28
8,50	56,63	28,00	113,02
9,00	59,11	28,50	113,74
9,50	61,51	29,00	114,44
10,00	63,83	29,50	115,12
10,50	66,09	30,00	115,77
11,00	68,27	30,50	116,41
11,50	70,39	31,00	117,02
12,00	72,44	31,50	117,62
12,50	74,42	32,00	118,20
13,00	76,35	32,50	118,76
13,50	78,21	33,00	119,30
14,00	80,02	33,50	119,82
14,50	81,76	34,00	120,33
15,00	83,46	34,50	120,83
15,50	85,10	35,00	121,30
16,00	86,69	35,50	121,77
16,50	88,23	36,00	122,21
17,00	89,73	36,50	122,65
17,50	91,17	37,00	123,07
18,00	92,58	37,50	123,48
18,50	93,93	38,00	123,87
19,00	95,25	38,64	124,36

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

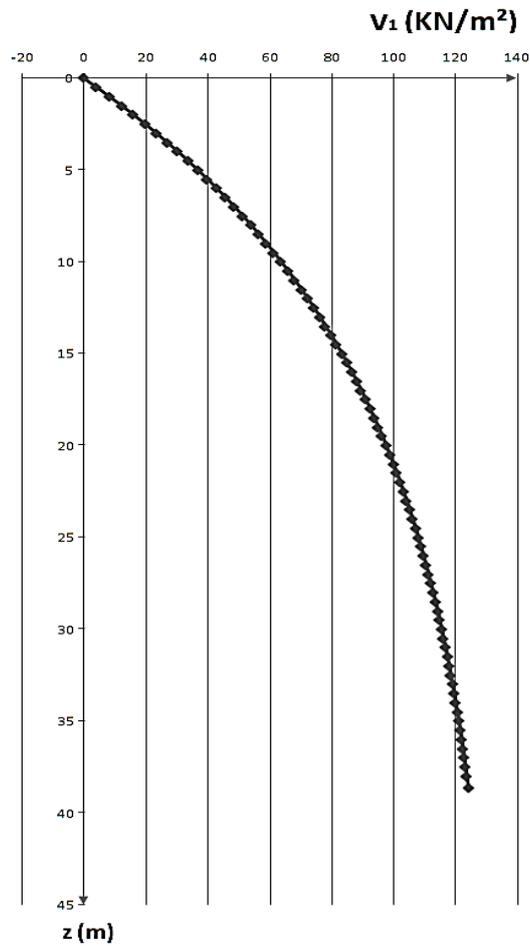


Figure III.12 : Distribution de la pression nominale moyenne v_1 sur le plan de base en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

- **L'état 2 :** $v_2(h) = \frac{n_2(h)}{\lambda_2} + \gamma h = \frac{n_2(h)}{0.882} + 8.35 \times 0.513$

Tableau III.6 : Distribution de la pression nominale moyenne v_2 sur le plan de base en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

z (m)	v_2 (KN/m ²)	z (m)	v_2 (KN/m ²)
0.00	-0,13	19.50	68,65
0,50	4,17	20,00	69,11
1,00	8,24	20,50	69,54
1,50	12,07	21,00	69,94
2,00	15,70	21,50	70,33
2,50	19,11	22,00	70,69
3,00	22,34	22,50	71,03

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

z (m)	v₂ (KN/m²)	z (m)	v₂ (KN/m²)
3,50	25,39	23,00	71,35
4,00	28,26	23,50	71,66
4,50	30,98	24,00	71,94
5,00	33,54	24,50	72,22
5,50	35,96	25,00	72,47
6,00	38,25	25,50	72,71
6,50	40,40	26,00	72,94
7,00	42,44	26,50	73,16
7,50	44,36	27,00	73,36
8,00	46,18	27,50	73,55
8,50	47,89	28,00	73,73
9,00	49,51	28,50	73,91
9,50	51,03	29,00	74,07
10,00	52,48	29,50	74,22
10,50	53,84	30,00	74,36
11,00	55,12	30,50	74,50
11,50	56,33	31,00	74,63
12,00	57,48	31,50	74,75
12,50	58,56	32,00	74,87
13,00	59,58	32,50	74,97
13,50	60,54	33,00	75,07
14,00	61,45	33,50	75,17
14,50	62,31	34,00	75,26
15,00	63,12	34,50	75,35
15,50	63,89	35,00	75,43
16,00	64,61	35,50	75,50
16,50	65,29	36,00	75,58
17,00	65,93	36,50	75,65
17,50	66,54	37,00	75,71
18,00	67,12	37,50	75,77
18,50	67,66	38,00	75,83
19,00	68,17	38,64	75,90

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

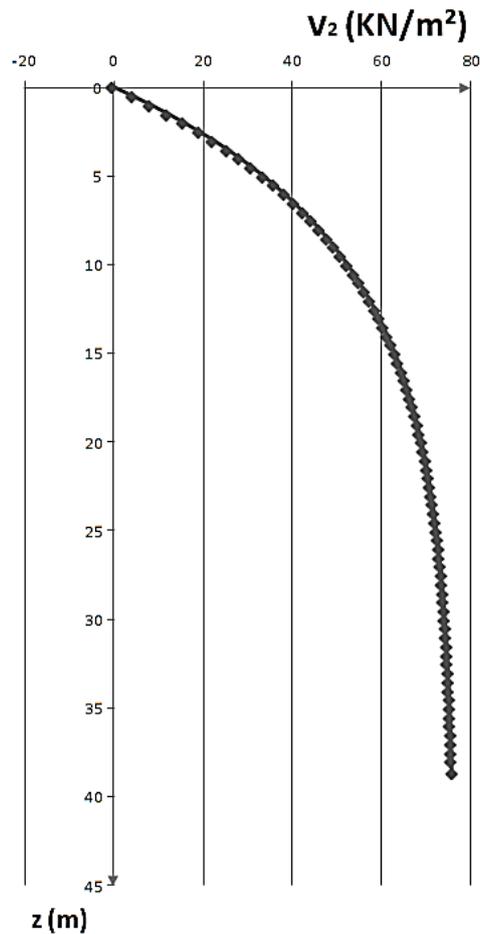


Figure III.13 : Distribution de la pression nominale moyenne v_2 sur le plan de base en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

➤ **La résultante nominale T des forces de frottement t ($t = n \tan \delta$) :**

$$T = r_h [\gamma h - v(h)]$$

- **L'état 1 :** $T_1 = 2.803 \times [8.35 \times z - v_1(z)]$

Tableau III.7 : Distribution de la résultante nominale T_1 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

z (m)	T_1 (KN/m ²)	z (m)	T_1 (KN/m ²)
0,00	0,20	19,50	185,84
0,50	0,00	20,00	194,08
1,00	0,17	20,50	202,43
1,50	0,71	21,00	210,88

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

z (m)	T₁ (KN/m²)	z (m)	T₁ (KN/m²)
2,00	1,59	21,50	219,44
2,50	2,81	22,00	228,09
3,00	4,35	22,50	236,84
3,50	6,21	23,00	245,68
4,00	8,38	23,50	254,60
4,50	10,85	24,00	263,62
5,00	13,60	24,50	272,72
5,50	16,63	25,00	281,90
6,00	19,94	25,50	291,16
6,50	23,50	26,00	300,49
7,00	27,32	26,50	309,90
7,50	31,38	27,00	319,38
8,00	35,68	27,50	328,93
8,50	40,21	28,00	338,55
9,00	44,97	28,50	348,23
9,50	49,94	29,00	357,97
10,00	55,12	29,50	367,78
10,50	60,51	30,00	377,64
11,00	66,09	30,50	387,57
11,50	71,86	31,00	397,54
12,00	77,82	31,50	407,57
12,50	83,96	32,00	417,66
13,00	90,27	32,50	427,79
13,50	96,75	33,00	437,97
14,00	103,39	33,50	448,20
14,50	110,19	34,00	458,48
15,00	117,14	34,50	468,80
15,50	124,24	35,00	479,16
16,00	131,48	35,50	489,57
16,50	138,86	36,00	500,02
17,00	146,38	36,50	510,50
17,50	154,03	37,00	521,02
18,00	161,80	37,50	531,58
18,50	169,69	38,00	542,18
19,00	177,71	38,64	555,79

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

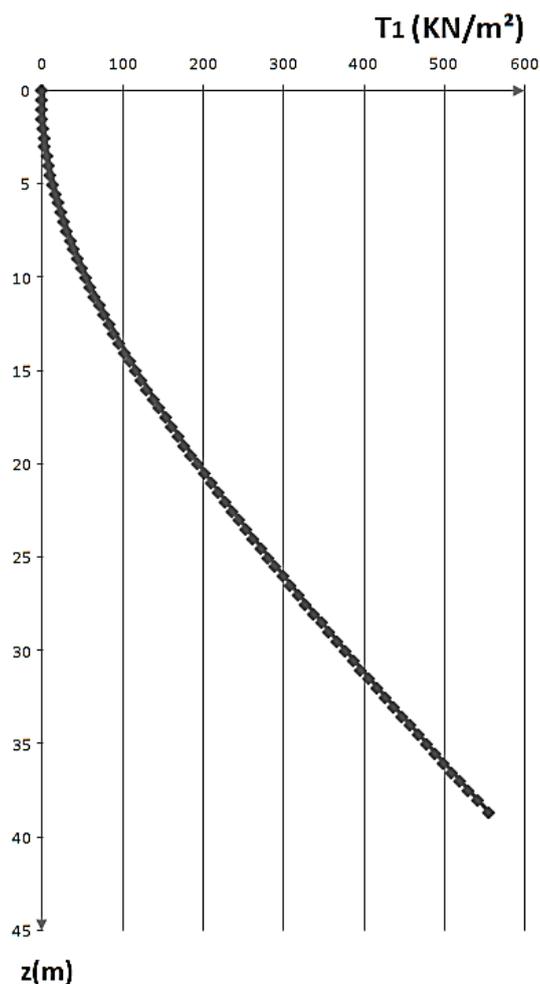


Figure III.14 : Distribution de la résultante nominale T_1 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

- **L'état 2 :** $T_2 = 2.803 \times [8.35 \times z - v_2(z)]$

Tableau III.8 : Distribution de la résultante nominale T_2 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

z (m)	T_2 (KN/m ²)	z (m)	T_2 (KN/m ²)
0,00	0,36	19,50	263,97
0,50	0,00	20,00	274,40
1,00	0,31	20,50	284,89
1,50	1,26	21,00	295,46
2,00	2,82	21,50	306,08
2,50	4,94	22,00	316,77
3,00	7,59	22,50	327,52
3,50	10,76	23,00	338,32
4,00	14,40	23,50	349,16

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

z (m)	T₂ (KN/m²)	z (m)	T₂ (KN/m²)
4,50	18,49	24,00	360,06
5,00	23,00	24,50	371,00
5,50	27,92	25,00	381,99
6,00	33,22	25,50	393,01
6,50	38,88	26,00	404,07
7,00	44,88	26,50	415,17
7,50	51,19	27,00	426,30
8,00	57,81	27,50	437,47
8,50	64,71	28,00	448,66
9,00	71,88	28,50	459,89
9,50	79,30	29,00	471,14
10,00	86,96	29,50	482,41
10,50	94,85	30,00	493,71
11,00	102,95	30,50	505,03
11,50	111,26	31,00	516,37
12,00	119,75	31,50	527,74
12,50	128,42	32,00	539,12
13,00	137,26	32,50	550,52
13,50	146,27	33,00	561,93
14,00	155,42	33,50	573,37
14,50	164,72	34,00	584,81
15,00	174,15	34,50	596,28
15,50	183,71	35,00	607,75
16,00	193,38	35,50	619,24
16,50	203,18	36,00	630,74
17,00	213,07	36,50	642,25
17,50	223,07	37,00	653,77
18,00	233,17	37,50	665,31
18,50	243,35	38,00	676,85
19,00	253,62	38,64	691,63

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilée sur les parois du silo de Bouchegouf

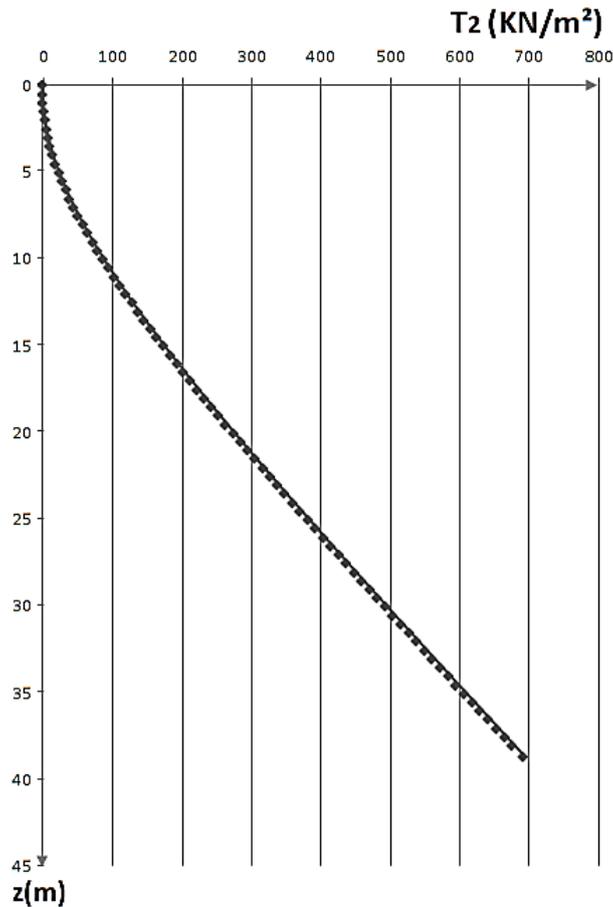


Figure III.15 : Distribution de la résultante nominale T_2 en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

III.3.4.2. Actions corrigées :

➤ La composante nominale horizontale corrigée $n_c(z)$:

$$n_c(z) = 1,15 \times n(z)$$

• L'état 1 : $n_{c1}(z) = 1,15 \times n_1(z)$

Tableau III.9 : Distribution de la composante nominale horizontale corrigée n_{c1} en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

z (m)	n_{c1} (KN/m ²)	z (m)	n_{c1} (KN/m ²)
0,00	-2,43	19,50	51,45
0,50	-0,06	20,00	52,14
1,00	2,23	20,50	52,80
1,50	4,46	21,00	53,45
2,00	6,61	21,50	54,08

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

z (m)	n_{cl} (KN/m²)	z (m)	n_{cl} (KN/m²)
2,50	8,70	22,00	54,68
3,00	10,72	22,50	55,27
3,50	12,67	23,00	55,84
4,00	14,57	23,50	56,39
4,50	16,41	24,00	56,93
5,00	18,19	24,50	57,45
5,50	19,92	25,00	57,95
6,00	21,59	25,50	58,43
6,50	23,21	26,00	58,91
7,00	24,78	26,50	59,36
7,50	26,30	27,00	59,80
8,00	27,77	27,50	60,23
8,50	29,20	28,00	60,65
9,00	30,58	28,50	61,05
9,50	31,92	29,00	61,44
10,00	33,21	29,50	61,82
10,50	34,47	30,0	62,18
11,00	35,69	30,50	62,54
11,50	36,87	31,00	62,88
12,00	38,01	31,50	63,21
12,50	39,12	32,00	63,53
13,00	40,19	32,50	63,85
13,50	41,23	33,00	64,16
14,00	42,24	33,50	64,44
14,50	43,22	34,00	64,73
15,00	44,16	34,50	65,00
15,50	45,08	35,00	65,27
16,00	45,96	35,50	65,53
16,50	46,82	36,00	65,78
17,00	47,66	36,50	66,02
17,50	48,46	37,00	66,25
18,00	49,25	37,50	66,48
18,50	50,00	38,00	66,70
19,00	50,74	38,64	66,97

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

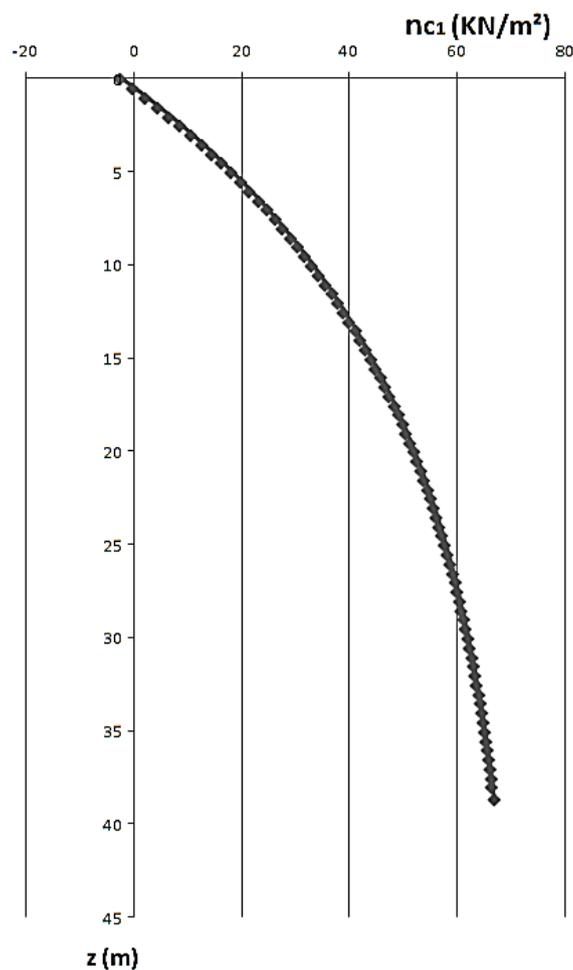


Figure III.16 : Distribution de la composante nominale horizontale corrigée n_{c1} en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

- **L'état 2 :** $n_{c2}(z) = 1,15 \times n_2(z)$

Tableau III.10 : Distribution de la composante nominale horizontale corrigée n_{c2} en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

z (m)	n_{c2} (KN/m ²)	z (m)	n_{c2} (KN/m ²)
0,00	-4,48	19,50	65,29
0,50	-0,11	20,00	65,75
1,00	4,011	20,50	66,19
1,50	7,90	21,00	66,60
2,00	11,57	21,50	66,99
2,50	15,04	22,00	67,35
3,00	18,32	22,50	67,70

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

z (m)	n_{c2} (KN/m²)	z (m)	n_{c2} (KN/m²)
3,50	21,41	23,00	68,03
4,00	24,32	23,50	68,34
4,50	27,08	24,00	68,63
5,00	29,68	24,50	68,90
5,50	32,13	25,00	69,16
6,00	34,45	25,50	69,41
6,50	36,64	26,00	69,64
7,00	38,70	26,50	69,86
7,50	40,65	27,00	70,07
8,00	42,49	27,50	70,26
8,50	44,23	28,00	70,44
9,00	45,87	28,50	70,62
9,50	47,42	29,00	70,78
10,00	48,88	29,50	70,94
10,50	50,26	30,0	71,08
11,00	51,56	30,50	71,22
11,50	52,79	31,00	71,35
12,00	53,96	31,50	71,47
12,50	55,05	32,00	71,59
13,00	56,09	32,50	71,70
13,50	57,06	33,00	71,80
14,00	57,99	33,50	71,90
14,50	58,86	34,00	71,99
15,00	59,68	34,50	72,08
15,50	60,45	35,00	72,16
16,00	61,19	35,50	72,24
16,50	61,88	36,00	72,31
17,00	62,53	36,50	72,38
17,50	63,15	37,00	72,45
18,00	63,73	37,50	72,51
18,50	64,28	38,00	72,57
19,00	64,80	38,64	72,64

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

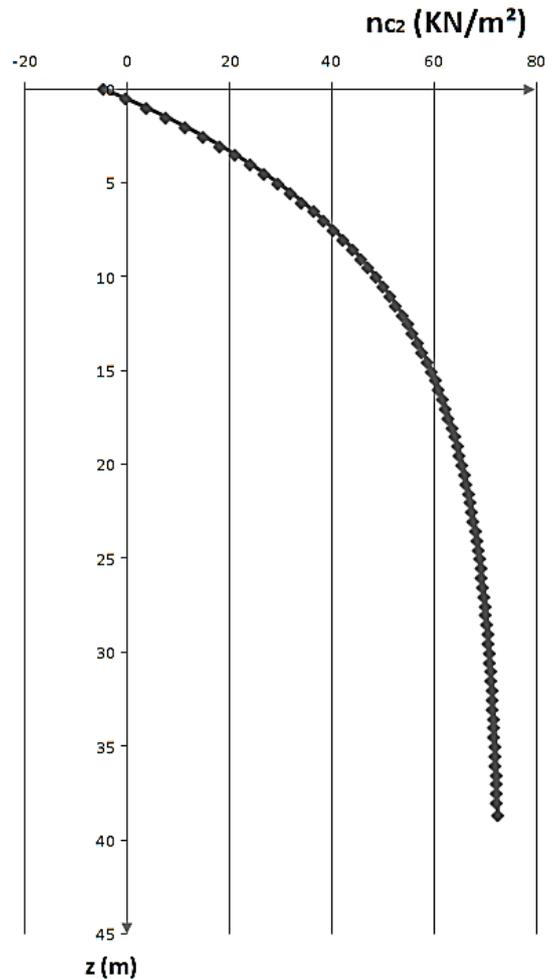


Figure III.17 : Distribution de la composante nominale horizontale corrigée n_{cz} en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

➤ **La pression nominale moyenne corrigée $v(h)$ sur le plan de base ($z = h$) :**

$$v_c(h) = 1,35 \times v(h)$$

- **L'état 1** : $v_{c1}(h) = 1,35 \times v_1(h)$

Tableau III.11 : Distribution de la pression nominale moyenne v_{c1} sur le plan de base en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

z (m)	v_{c1} (KN/m ²)	z (m)	v_{c1} (KN/m ²)
0,00	-0,09	19,50	130,31
0,50	5,77	20,00	131,98
1,00	11,19	20,50	133,59
1,50	16,57	21,00	135,16

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

z (m)	v_{cl} (KN/m²)	z (m)	v_{cl} (KN/m²)
2,00	21,78	21,50	136,67
2,50	26,83	22,00	138,14
3,00	31,72	22,50	139,56
3,50	36,46	23,00	140,94
4,00	41,05	23,50	142,28
4,50	45,50	24,00	143,57
5,00	49,81	24,50	144,83
5,50	53,99	25,00	146,04
6,00	58,03	25,50	147,23
6,50	61,95	26,00	148,36
7,00	65,75	26,50	149,46
7,50	69,43	27,00	150,53
8,00	72,99	27,50	151,57
8,50	76,45	28,00	152,58
9,00	79,79	28,50	153,55
9,50	83,04	29,00	154,49
10,00	86,18	29,50	155,41
10,50	89,22	30,0	156,29
11,00	92,17	30,50	157,15
11,50	95,02	31,00	157,98
12,00	97,79	31,50	158,78
12,50	100,47	32,00	159,56
13,00	103,07	32,50	160,32
13,50	105,58	33,00	161,05
14,00	108,02	33,50	161,76
14,50	110,38	34,00	162,45
15,00	112,67	34,50	163,11
15,50	114,89	35,00	163,76
16,00	117,04	35,50	164,38
16,50	119,12	36,00	164,99
17,00	121,13	36,50	165,58
17,50	123,09	37,00	166,14
18,00	124,98	37,50	166,69
18,50	126,81	38,00	167,23
19,00	128,59	38,64	167,89

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

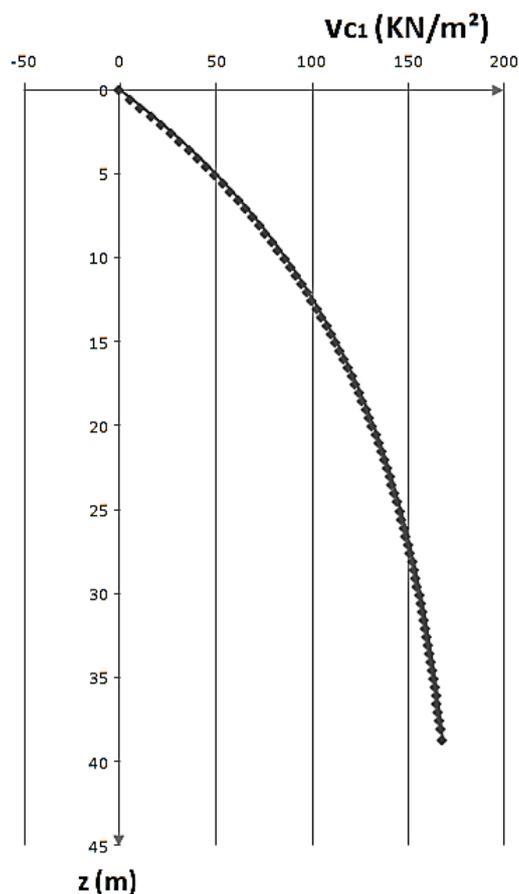


Figure III.18 : Distribution de la pression nominale moyenne v_{c1} sur le plan de base en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

- **L'état 2 :** $v_{c2}(h) = 1,35 v_2(h)$

Tableau III.12 : Distribution de la pression nominale moyenne v_{c2} sur le plan de base en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

z (m)	v_{c2} (KN/m ²)	z (m)	v_{c2} (KN/m ²)
0,00	-0,17	19,50	92,68
0,50	5,64	20,00	93,29
1,00	11,12	20,50	93,87
1,50	16,30	21,00	94,42
2,00	21,19	21,50	94,94
2,50	25,80	22,00	95,43
3,00	30,16	22,50	95,89
3,50	34,27	23,00	96,33
4,00	38,16	23,50	96,74

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

z (m)	v_{c2} (KN/m²)	z (m)	v_{c2} (KN/m²)
4,50	41,82	24,00	97,12
5,00	45,28	24,50	97,49
5,50	48,55	25,00	97,84
6,00	51,63	25,50	98,16
6,50	54,55	26,00	98,47
7,00	57,29	26,50	98,76
7,50	59,89	27,00	99,04
8,00	62,34	27,50	99,30
8,50	64,65	28,00	99,54
9,00	66,84	28,50	99,77
9,50	68,90	29,00	99,99
10,00	70,84	29,50	100,20
10,50	72,68	30,0	100,39
11,00	74,41	30,50	100,58
11,50	76,05	31,00	100,75
12,00	77,60	31,50	100,91
12,50	79,05	32,00	101,07
13,00	80,43	32,50	101,21
13,50	81,73	33,00	101,35
14,00	82,96	33,50	101,48
14,50	84,12	34,00	101,60
15,00	85,21	34,50	101,72
15,50	86,25	35,00	101,83
16,00	87,22	35,50	101,93
16,50	88,14	36,00	102,03
17,00	89,01	36,50	102,12
17,50	89,83	37,00	102,21
18,00	90,61	37,50	102,29
18,50	91,34	38,00	102,37
19,00	92,03	38,64	102,46

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

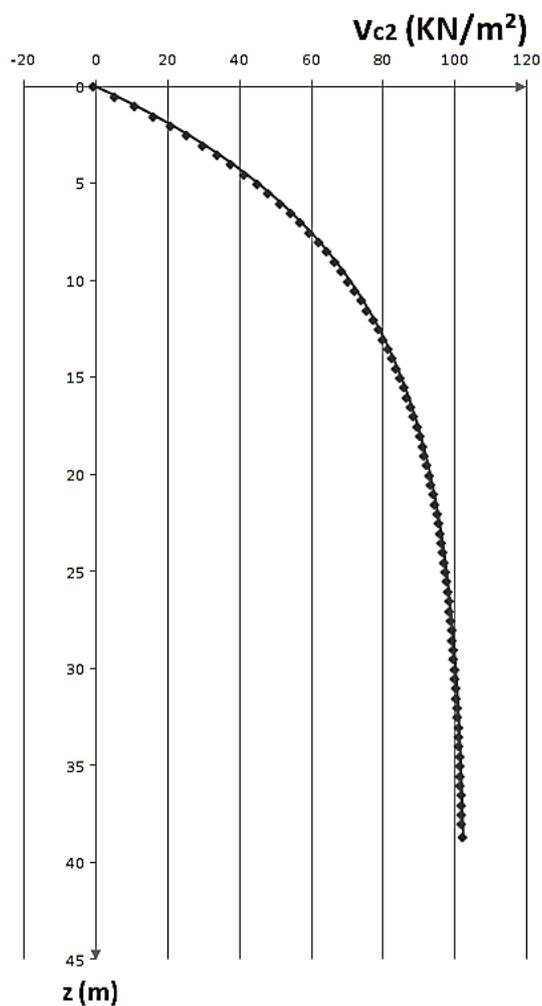


Figure III.19 : Distribution de la pression nominale moyenne v_{c2} sur le plan de base en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

- la valeur de T n'a pas à être majorée.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

III.2.4.3. Calcul des moments :

➤ Au niveau de la paroi :
$$M_{ov} = \pm M_{ref} \cdot G(\Psi, u / H_t) \cdot \frac{1}{1 + \frac{4n02 \cdot r^3}{Ei \cdot h_0}}$$

D'où :
$$\Psi = \frac{Ht}{r} \sqrt{\frac{h_0}{r}} = \frac{43.44}{5.605} \sqrt{\frac{0.210}{5.605}} = 1.5$$

Et :
$$E_i = 11000(f_{c28})^{1/3} = 32164.2 \text{ MPA} \quad ; \quad \mu = \frac{1}{300}$$

Et aussi :
$$\left\{ \begin{array}{l} \xi = 0.44 \quad \text{donc ; } 0,4 < \xi < 0,6 \\ \Rightarrow M_{ref} = \mu \cdot n_1 \cdot (5 \xi - 2) \cdot r^2 = \left(\frac{1}{300}\right) \cdot n_1 \cdot (5 \cdot 0.44 - 2) \cdot (5.605)^2 \end{array} \right.$$

Tableau III.13 : Distribution de le moment de referece M_{ref} en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

z(m)	M _{ref} (KN.m)	z(m)	M _{ref} (KN.m)
0,00	-0,04	19,50	0,94
0,50	-0,00	20,00	0,95
1,00	0,04	20,50	0,96
1,50	0,08	21,00	0,97
2,00	0,12	21,50	0,98
2,50	0,16	22,00	1,00
3,00	0,20	22,50	1,01
3,50	0,23	23,00	1,02
4,00	0,27	23,50	1,03
4,50	0,30	24,00	1,04
5,00	0,33	24,50	1,05
5,50	0,36	25,00	1,06
6,00	0,39	25,50	1,06
6,50	0,42	26,00	1,07
7,00	0,45	26,50	1,08
7,50	0,48	27,00	1,09
8,00	0,51	27,50	1,10
8,50	0,53	28,00	1,10
9,00	0,56	28,50	1,11
9,50	0,58	29,00	1,12
10,00	0,60	29,50	1,13
10,50	0,63	30,00	1,13

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

z(m)	M _{ref} (KN.m)	z(m)	M _{ref} (KN.m)
11,00	0,65	30,50	1,14
11,50	0,67	31,00	1,15
12,00	0,69	31,50	1,15
12,50	0,71	32,00	1,16
13,00	0,73	32,50	1,16
13,50	0,75	33,00	1,17
14,00	0,77	33,50	1,17
14,50	0,79	34,00	1,18
15,00	0,80	34,50	1,18
15,50	0,82	35,00	1,19
16,00	0,84	35,50	1,19
16,50	0,85	36,00	1,20
17,00	0,87	36,50	1,20
17,50	0,88	37,00	1,21
18,00	0,90	37,50	1,21
18,50	0,91	38,00	1,21
19,00	0,92	38.64	1,22

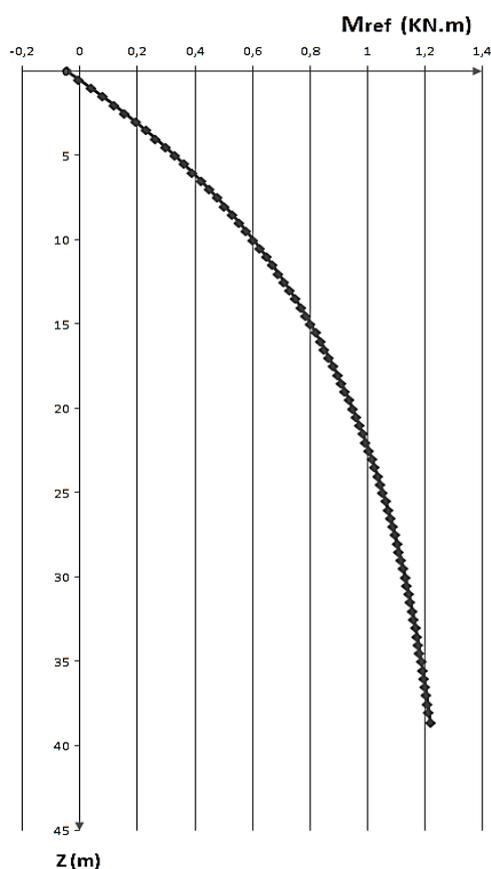


Figure III.20 : Distribution de le moment de referece M_{ref} en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

Tableau III.14 : Valeurs de G pour le cas de la deuxième configuration (jupe liée en pied et en tête.)

z(m)	$u/H_t = (h-z)/H_t$	G (Ψ , u / H_t)	z(m)	$u/H_t = (h-z)/H_t$	G (Ψ , u / H_t)
0,00	0,89	0,13	19,50	0,44	0,38
0,50	0,88	0,17	20,00	0,43	0,38
1,00	0,87	0,18	20,50	0,42	0,38
1,50	0,85	0,19	21,00	0,41	0,38
2,00	0,84	0,2	21,50	0,39	0,38
2,50	0,83	0,21	22,00	0,38	0,38
3,00	0,82	0,22	22,50	0,37	0,38
3,50	0,81	0,23	23,00	0,36	0,38
4,00	0,80	0,24	23,50	0,35	0,38
4,50	0,79	0,26	24,00	0,34	0,38
5,00	0,77	0,27	24,50	0,33	0,37
5,50	0,76	0,28	25,00	0,31	0,36
6,00	0,75	0,29	25,50	0,30	0,35
6,50	0,74	0,3	26,00	0,29	0,34
7,00	0,73	0,31	26,50	0,28	0,32
7,50	0,72	0,32	27,00	0,27	0,31
8,00	0,71	0,34	27,50	0,26	0,3
8,50	0,69	0,35	28,00	0,24	0,29
9,00	0,68	0,36	28,50	0,23	0,27
9,50	0,67	0,37	29,00	0,22	0,26
10,00	0,66	0,38	29,50	0,21	0,25
10,50	0,65	0,38	30,00	0,20	0,24
11,00	0,64	0,38	30,50	0,19	0,23
11,50	0,62	0,38	31,00	0,18	0,22
12,00	0,61	0,38	31,50	0,16	0,19
12,50	0,60	0,38	32,00	0,15	0,18
13,00	0,59	0,38	32,50	0,14	0,17
13,50	0,58	0,38	33,00	0,13	0,15
14,00	0,57	0,38	33,50	0,12	0,14
14,50	0,56	0,38	34,00	0,11	0,13
15,00	0,54	0,38	34,50	0,10	0,12
15,50	0,53	0,38	35,00	0,08	0,11
16,00	0,52	0,38	35,50	0,07	0,08
16,50	0,51	0,38	36,00	0,06	0,07
17,00	0,50	0,38	36,50	0,05	0,05
17,50	0,49	0,38	37,00	0,04	0,04
18,00	0,48	0,38	37,50	0,03	0,03
18,50	0,46	0,38	38,00	0,01	0,03
19,00	0,45	0,38	38.64	0	0

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

Tableau III.15 : Distribution du moment d'ovalisation M_{ov} en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

z(m)	M_{ov} (KN.m)	z(m)	M_{ov} (KN.m)
0,00	$7,94 \times 10^{-8}$	19,50	$3,37 \times 10^{-7}$
0,50	$1,05 \times 10^{-7}$	20,00	$3,39 \times 10^{-7}$
1,00	$1,13 \times 10^{-7}$	20,50	$3,41 \times 10^{-7}$
1,50	$1,21 \times 10^{-7}$	21,00	$3,43 \times 10^{-7}$
2,00	$1,29 \times 10^{-7}$	21,50	$3,45 \times 10^{-7}$
2,50	$1,37 \times 10^{-7}$	22,00	$3,47 \times 10^{-7}$
3,00	$1,45 \times 10^{-7}$	22,50	$3,49 \times 10^{-7}$
3,50	$1,53 \times 10^{-7}$	23,00	$3,51 \times 10^{-7}$
4,00	$1,62 \times 10^{-7}$	23,50	$3,53 \times 10^{-7}$
4,50	$1,77 \times 10^{-7}$	24,00	$3,55 \times 10^{-7}$
5,00	$1,86 \times 10^{-7}$	24,50	$3,47 \times 10^{-7}$
5,50	$1,95 \times 10^{-7}$	25,00	$3,40 \times 10^{-7}$
6,00	$2,05 \times 10^{-7}$	25,50	$3,32 \times 10^{-7}$
6,50	$2,14 \times 10^{-7}$	26,00	$3,24 \times 10^{-7}$
7,00	$2,23 \times 10^{-7}$	26,50	$3,06 \times 10^{-7}$
7,50	$2,33 \times 10^{-7}$	27,00	$2,98 \times 10^{-7}$
8,00	$2,50 \times 10^{-7}$	27,50	$2,89 \times 10^{-7}$
8,50	$2,60 \times 10^{-7}$	28,00	$2,81 \times 10^{-7}$
9,00	$2,70 \times 10^{-7}$	28,50	$2,63 \times 10^{-7}$
9,50	$2,80 \times 10^{-7}$	29,00	$2,54 \times 10^{-7}$
10,00	$2,91 \times 10^{-7}$	29,50	$2,45 \times 10^{-7}$
10,50	$2,93 \times 10^{-7}$	30,00	$2,36 \times 10^{-7}$
11,00	$2,96 \times 10^{-7}$	30,50	$2,27 \times 10^{-7}$
11,50	$2,99 \times 10^{-7}$	31,00	$2,18 \times 10^{-7}$
12,00	$3,01 \times 10^{-7}$	31,50	$1,89 \times 10^{-7}$
12,50	$3,04 \times 10^{-7}$	32,00	$1,80 \times 10^{-7}$
13,00	$3,07 \times 10^{-7}$	32,50	$1,70 \times 10^{-7}$
13,50	$3,09 \times 10^{-7}$	33,00	$1,51 \times 10^{-7}$
14,00	$3,12 \times 10^{-7}$	33,50	$1,41 \times 10^{-7}$
14,50	$3,14 \times 10^{-7}$	34,00	$1,32 \times 10^{-7}$
15,00	$3,17 \times 10^{-7}$	34,50	$1,22 \times 10^{-7}$
15,50	$3,19 \times 10^{-7}$	35,00	$1,12 \times 10^{-7}$
16,00	$3,21 \times 10^{-7}$	35,50	$8,17 \times 10^{-8}$
16,50	$3,24 \times 10^{-7}$	36,00	$7,17 \times 10^{-8}$
17,00	$3,26 \times 10^{-7}$	36,50	$5,13 \times 10^{-8}$
17,50	$3,28 \times 10^{-7}$	37,00	$4,12 \times 10^{-8}$
18,00	$3,31 \times 10^{-7}$	37,50	$3,10 \times 10^{-8}$
18,50	$3,33 \times 10^{-7}$	38,00	$3,10 \times 10^{-8}$
19,00	$3,35 \times 10^{-7}$	38.64	0

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

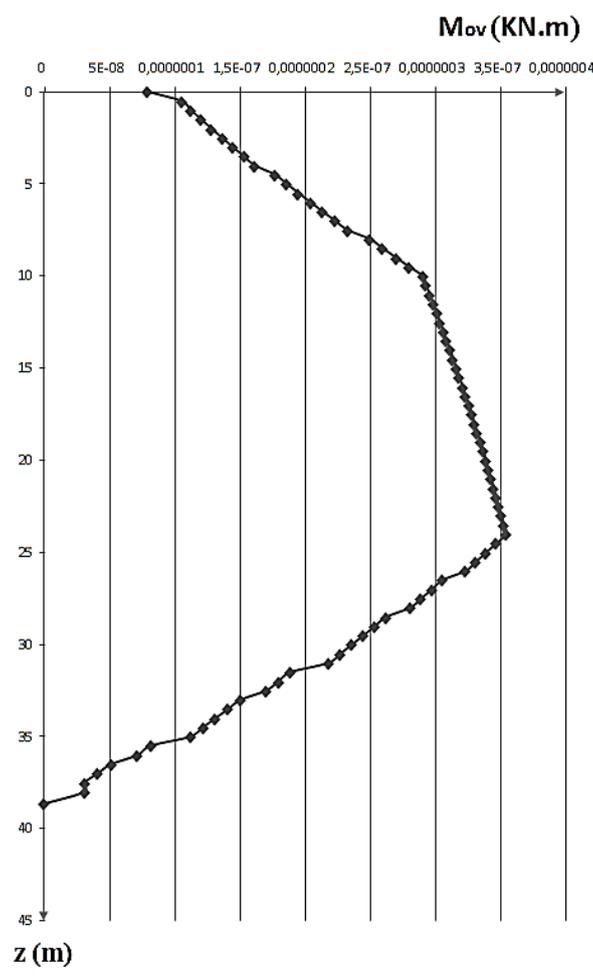


Tableau III.21 : Distribution du moment d'ovalisation M_{ov} en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans le silo.

➤ Ceinture de tête : $M_{ov\ t} = \pm M_{ref}(z = 0) \times H_t \times K_t(\Psi)$

D'où : $\Psi = 1.500 \rightarrow 1 < \Psi < 1.75$

$$\Rightarrow \begin{cases} K_t = 0.29 - 0.12 \times (1.5) = 0.11 \\ K_p = 0.42 - 0.12 \times (1.5) = 0.24 \end{cases}$$

$\Rightarrow M_{ov\ t} = (-0,0442) \times 43.44 \times 0.11 = -0.211 \text{ KN/m}$

➤ Ceinture de pied : $M_{ov\ p} = \pm M_{ref}(z = 38.64) \times H_t \times K_p(\Psi)$

$\Rightarrow M_{ov\ p} = 1,219 \times 43.44 \times 0.24 = 12.709 \text{ KN/m}$

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

III.3.5 Action sur le fond du silo :

La géométrie de la trémie détermine si l'écoulement du matériau dans le silo se produira en masse. Les trémies coniques sont les plus courantes car les plus économiques à construire. Le principal critère de dimensionnement est l'angle du sommet du cône. Il définit la pente de la paroi.¹⁸

C'est une trémie de profondeur de 4.800 m. Les calculs ce fait par tranches de 0.5 m au niveau de la hauteur de trémie du haut jusqu'au base de la trémie.

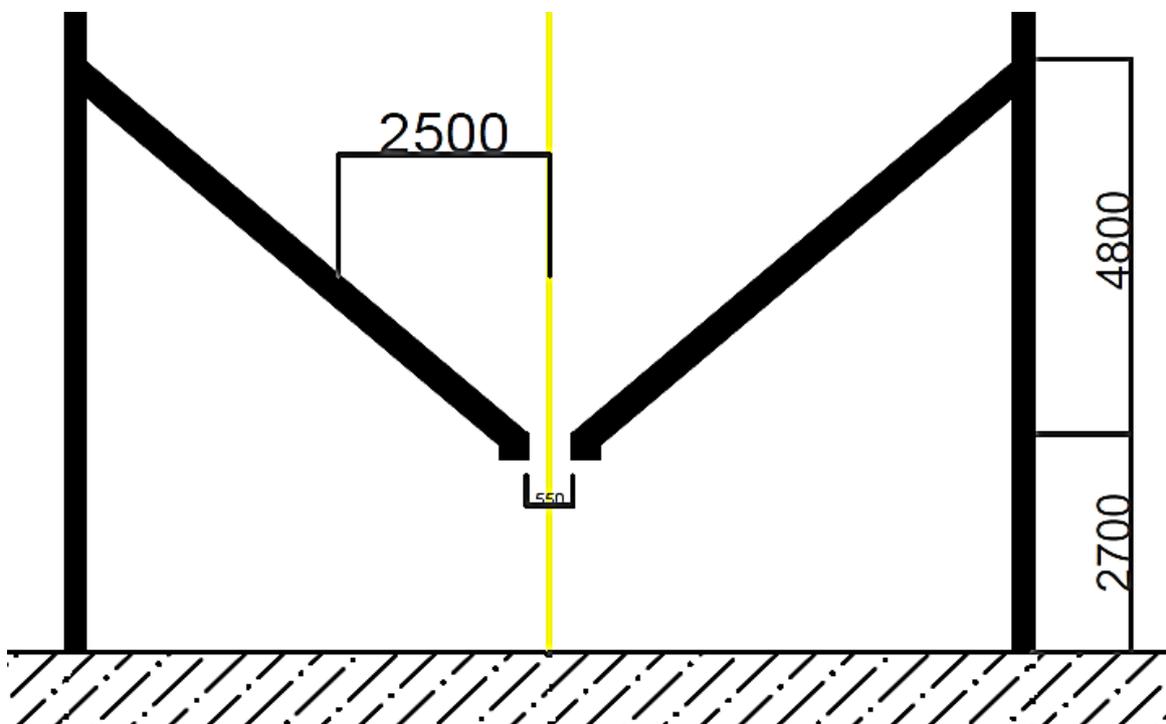


Figure III.22 : La trémie de silo.

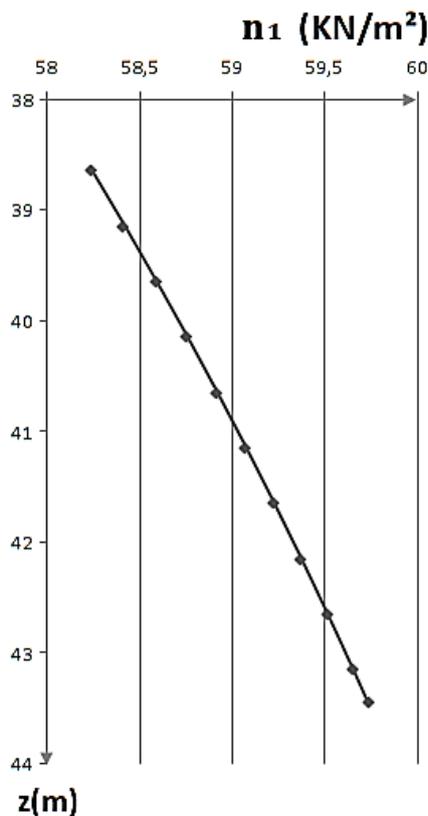
Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

➤ **La composante normale horizontale $n(z)$:**

$$n(z) = \gamma \cdot \lambda \cdot z_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{z-h''}{z_0}\right) \right]$$

- **L'état 1 :** $n_1(z) = \gamma \cdot \lambda_1 \cdot z_{01} \left[1 - \exp\left(-\frac{z-h''}{z_{01}}\right) \right]$

Tableau III.16 : Distribution de la composante nominale horizontale n_1 en fonction de la profondeur de la trémie.



z (m)	n₁ (KN/m²)
38,64	58,24
39,14	58,42
39,64	58,59
40,14	58,76
40,64	58,92
41,14	59,07
41,64	59,23
42,14	59,37
42,64	59,52
43,14	59,66
43,44	59,74

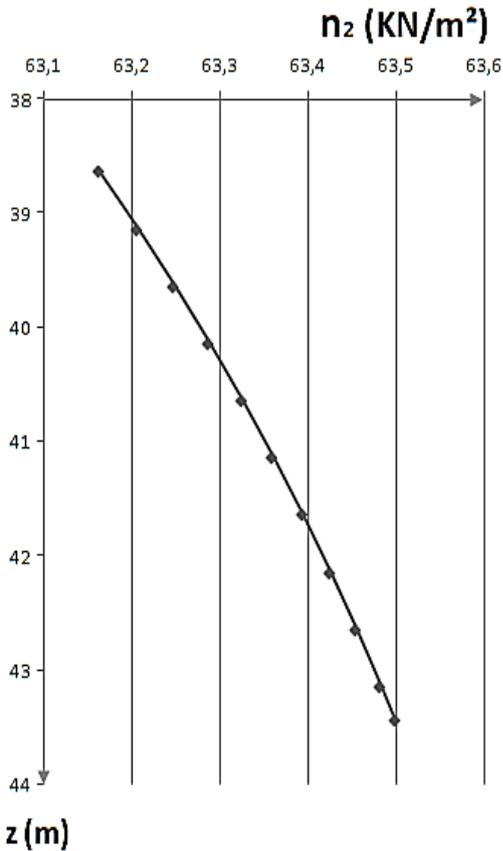
Figure III.23 : Distribution de la force nominale

horizontale n_1 en fonction de la profondeur de la trémie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

- L'état 2 : $n_2(z) = \gamma \cdot \lambda_2 \cdot z_{02} \left[1 - \exp \left(-\frac{z-h''}{z_{02}} \right) \right]$

Tableau III.17 : Distribution de la composante nominale horizontale n_2 en fonction de la profondeur de la trémie.



z (m)	n_2 (KN/m^2)
38,64	63,16
39,14	63,21
39,64	63,25
40,14	63,29
40,64	63,33
41,14	63,36
41,64	63,39
42,14	63,43
42,64	63,45
43,14	63,48
43,44	63,50

Figure III.24 : Distribution de la force nominale

Horizontale n_2 en fonction de la profondeur de la trémie.

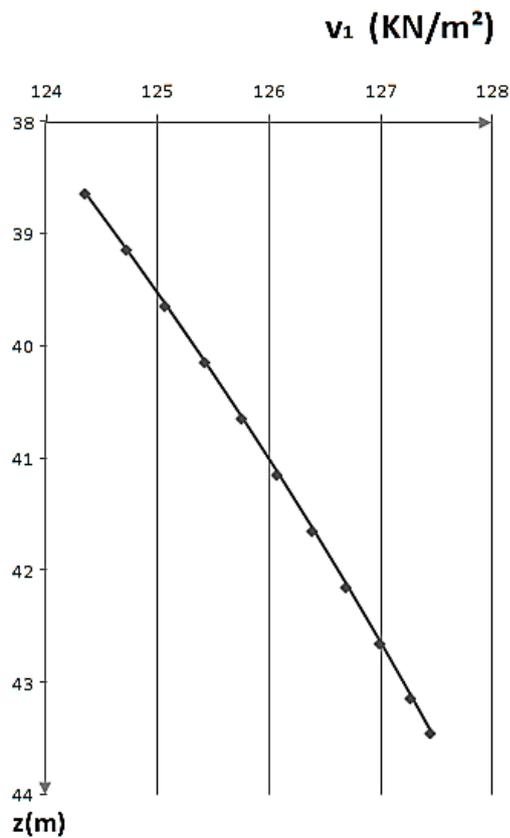
Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

➤ la pression nominale moyenne $v(h)$:

$$v(h) = w(h) + \gamma h'' = \frac{n(h)}{\lambda} + \gamma h''$$

- L'état 1 : $v_1(h) = \frac{n_1(h)}{\lambda_1} + \gamma h''$

Tableau III.18 : Distribution de la pression moyenne v_1 en fonction de la profondeur de la tremie.



z (m)	v₁ (KN/m²)
38,64	124,36
39,14	124,73
39,64	125,08
40,14	125,43
40,64	125,76
41,14	126,09
41,64	126,40
42,14	126,70
42,64	127,00
43,14	127,28
43,44	127,45

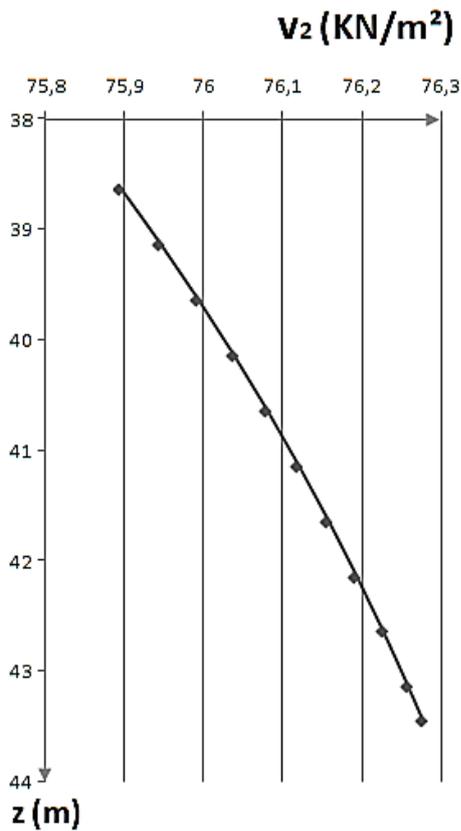
Figure III.25 : Distribution de la pression moyenne v_1

en fonction de la profondeur de la tremie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

- L'état 2 : $v_2(h) = \frac{n_2(h)}{\lambda_2} + \gamma h''$

Tableau III.19: Distribution de la pression moyenne v_2
en fonction de la profondeur de la tremie.



Z (m)	v₂ (KN/m²)
38,64	75,90
39,14	75,95
39,64	75,99
40,14	76,04
40,64	76,08
41,14	76,12
41,64	76,16
42,14	76,19
42,64	76,23
43,14	76,26
43,44	76,28

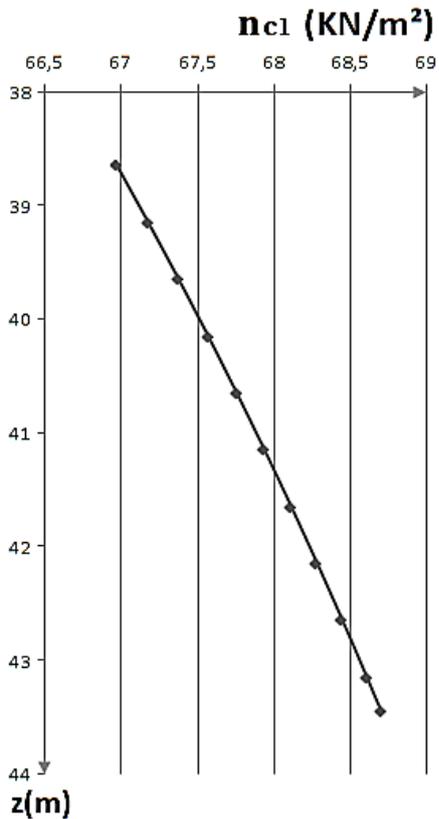
Figure III.26 : Distribution de la pression moyenne v_2
en fonction de la profondeur de la tremie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

➤ **La composante normale horizontale corrigées $n_c(z)$:**

- **L'état 1 :** $n_{c1}(z) = 1,15 n_1(z)$

Tableau III.20 : Distribution de la force nominale corrigées n_{c1} en fonction de la profondeur de la trémie.



z (m)	n_{c1} (KN/m²)
38,64	66,97
39,14	67,18
39,64	67,38
40,14	67,57
40,64	67,76
41,14	67,94
41,64	68,11
42,14	68,28
42,64	68,44
43,14	68,60
43,44	68,70

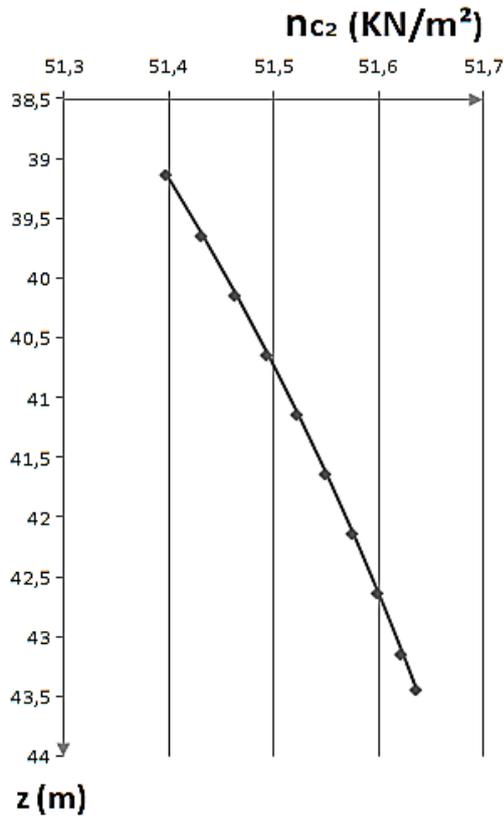
Figure III.27 : Distribution de la force nominale corrigée

n_{c1} en fonction de la profondeur de la trémie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

- **L'état 2** : $n_{c2}(z) = 1,15 n_2(z)$

Tableau III.21 : Distribution de la force corrigée n_{c2} en fonction de la profondeur de la trémie.



z (m)	n_{c2} (KN/m²)
38,64	72,64
39,14	72,69
39,64	72,74
40,14	72,78
40,64	72,82
41,14	72,86
41,64	72,90
42,14	72,94
42,64	72,97
43,14	73,01
43,44	73,0238

Figure III.28 : Distribution de la force corrigée n_{c2} en fonction de la profondeur de la trémie.

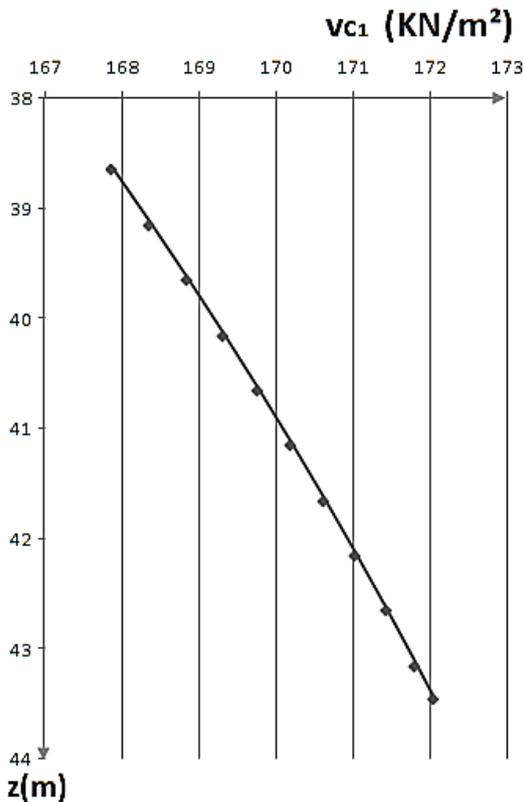
Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

➤ la pression nominale moyenne corrigée $v_c(h)$:

$$v_c(h) = 1.35 \times v(h)$$

- L'état 1 : $v_{c1}(h) = 1.35 \times v_1(h)$

Tableau III.22: Distribution de la pression moyenne corrigée v_{c1} en fonction de la profondeur de la trémie.



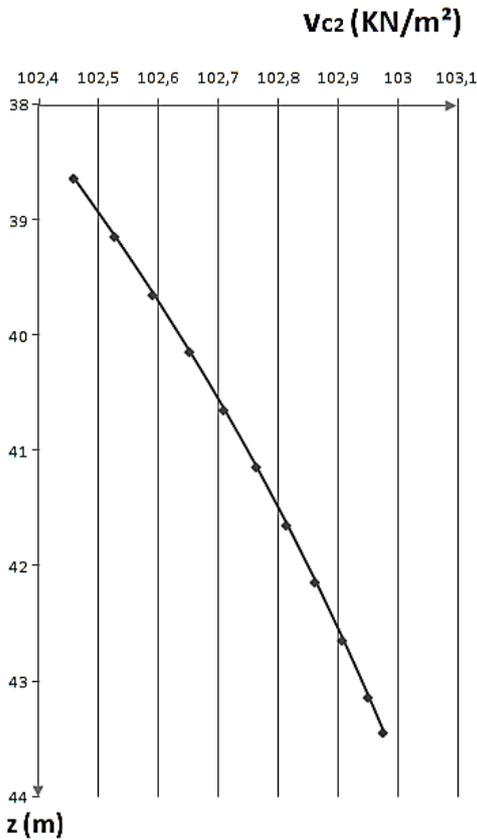
Z (m)	v_{c1} (KN/m^2)
38,64	167,89
39,14	168,38
39,64	168,86
40,14	169,33
40,64	169,78
41,14	170,22
41,64	170,64
42,14	171,05
42,64	171,45
43,14	171,83
43,44	172,06

Figure III.29 : Distribution la pression nominale moyenne v_{c1} en fonction de la profondeur de la trémie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

- **L'état 2** : $v_{c2}(h) = 1.35 \times v_2(h)$

Tableau III.23: Distribution de la pression moyenne corrigée v_{c2} en fonction de la profondeur de la trémie.



Z (m)	v_{c2} (KN/m²)
38,64	102,46
39,14	102,53
39,64	102,59
40,14	102,65
40,64	102,71
41,14	102,76
41,64	102,81
42,14	102,86
42,64	102,91
43,14	102,95
43,44	102,98

Figure III.30 : Distribution de la pression moyenne corrigée v_{c2} en fonction de la profondeur de la trémie.

$v' = v_c(h) + k_v \gamma (z - h)$ Sur toute surface unitaire de paroi de trémie, à la profondeur z , d'obliquité α par rapport à l'horizontale ; s'exerce une force ayant pour composantes :

- horizontalement : $n' \sin \alpha$, en posant $n' = n_c(z)$.
- verticalement : $v' \cos \alpha$; à cette composante vient s'ajouter le poids propre g correspondant à la surface unitaire de trémie considérée :

D'où : $\alpha = 45^\circ$; $k_v = 1,35$; $g = (1 \cdot 0,5 \cdot 0,3) \cdot 2500 = 375 \text{ kg/m}$

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

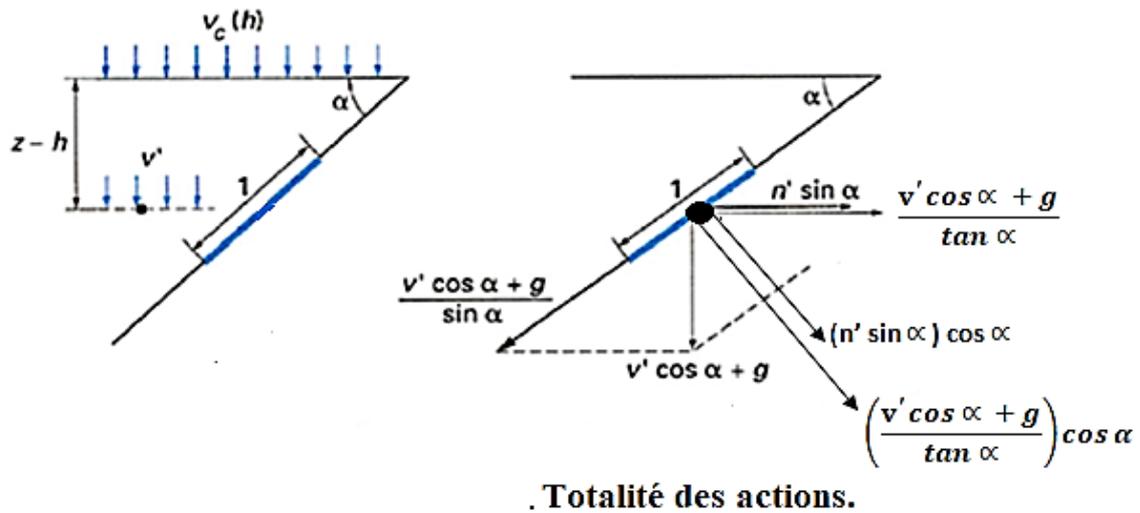


Figure III.31 : Décomposition des forces dans la paroi de trémie.

- $v' = v_c(h) + kv \gamma (z - h)$:
- **L'état 1** : $v'_1 = v_{c1}(h) + kv \gamma (z - h)$

Tableau III.24 : Distribution de v'_1 en fonction de la profondeur de la trémie.

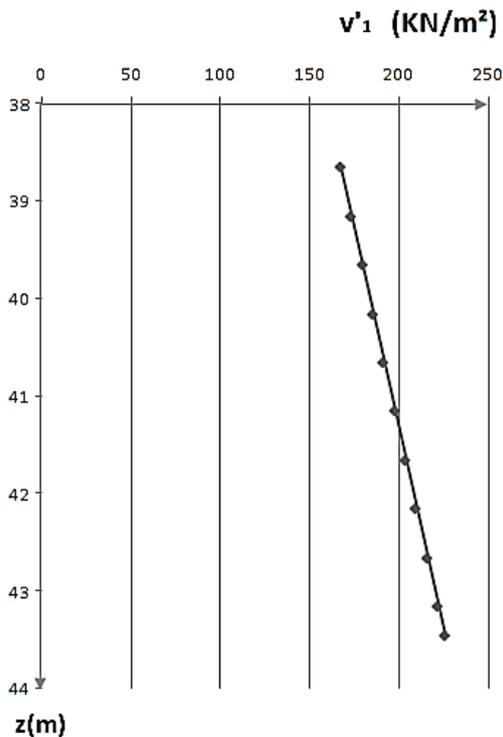


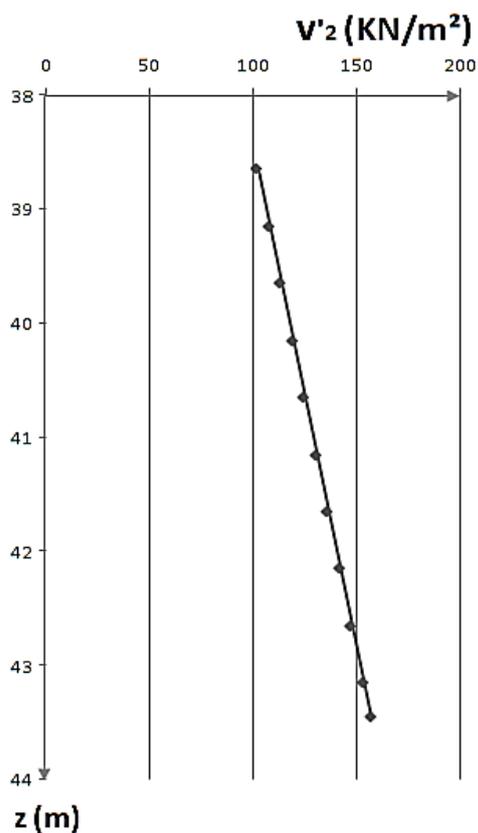
Figure III.32 : Distribution de v'_1 en fonction de la profondeur de la trémie.

z (m)	v' ₁ (KN/m ²)
38,64	167,89
39,14	174,02
39,64	180,14
40,14	186,24
40,64	192,33
41,14	198,40
41,64	204,46
42,14	210,51
42,64	216,54
43,14	222,56
43,44	226,17

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

- **L'état 2** : $v'_2 = v_{c2}(h) + kv \gamma (z - h)$

Tableau III.25 : Distribution de v'_2 en fonction de la profondeur de la trémie.



Z (m)	v'_2 (KN/m²)
38,64	102,46
39,14	108,16
39,64	113,86
40,14	119,56
40,64	125,25
41,14	130,94
41,64	136,63
42,14	142,32
42,64	148,00
43,14	153,68
43,44	157,08

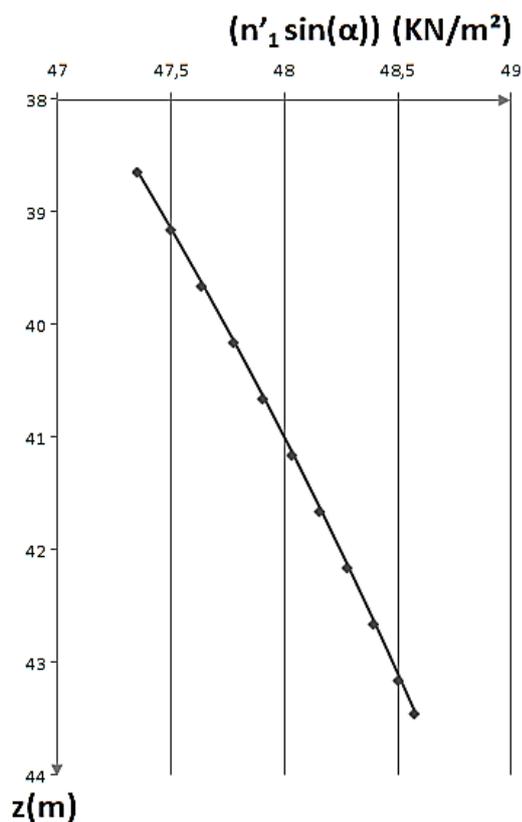
Figure III.33 : Distribution de v'_2 en fonction de la profondeur de la trémie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

➤ $n' \sin(\alpha)$:

- L'état 1 : $n'_1 \sin(45)$

Tableau III.26 : Distribution de $(n'_1 \sin(\alpha))$ en fonction de la profondeur de la trémie.



z (m)	$n'_1 \sin(\alpha)$ (KN/m ²)
38,64	47,36
39,14	47,50
39,64	47,64
40,14	47,78
40,64	47,91
41,14	48,04
41,64	48,16
42,14	48,28
42,64	48,40
43,14	48,51
43,44	48,58

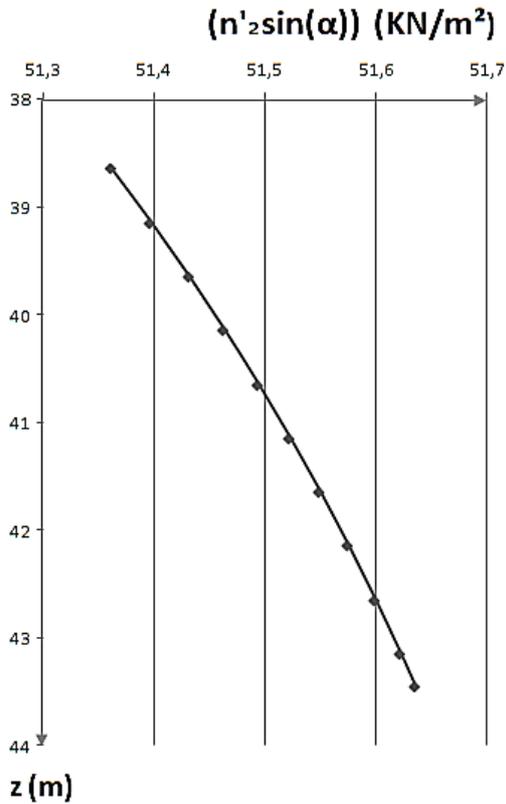
Figure III.34 : Distribution de $(n'_1 \sin(\alpha))$ en

fonction de la profondeur de la trémie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

- L'état 2 : $n'_2 \sin(45)$

Tableau III.27 : Distribution de $(n'_2 \sin(\alpha))$ en fonction de la profondeur de la trémie.



z (m)	$n'_2 \sin(\alpha)$ (KN/m²)
38,64	51,36
39,14	51,40
39,64	51,43
40,14	51,46
40,64	51,49
41,14	51,52
41,64	51,55
42,14	51,58
42,64	51,60
43,14	51,62
43,44	51,64

Figure III.35 : Distribution de $(n'_2 \sin(\alpha))$ en fonction de la profondeur de la trémie.

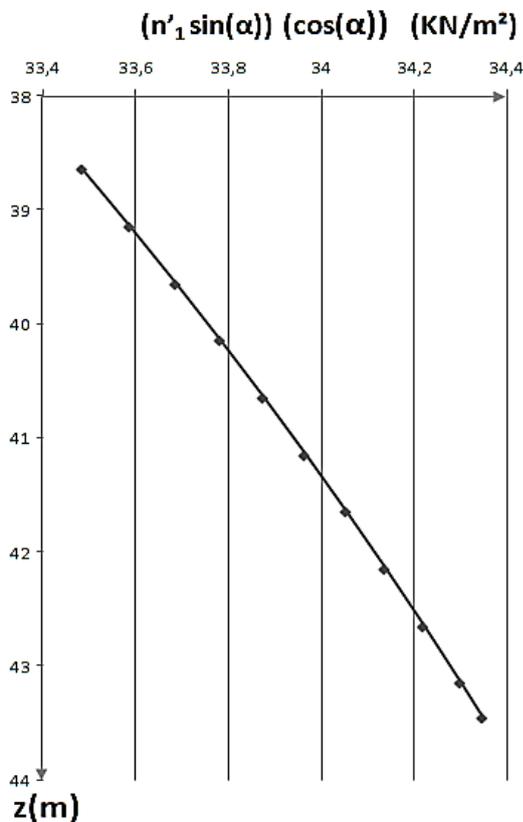
Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

- La projection de l'action ($n' \sin(\alpha)$) perpendiculaire à la parois de la trémie, donner comme suite :

$$[(n' \sin(\alpha)) \cos(\alpha)]$$

- L'état 1 : $[(n'_1 \sin(45)) \cos(45)]$

Tableau III.28 : Distribution de $[(n'_1 \sin(\alpha)) \cos(\alpha)]$ en fonction de la profondeur de la trémie.



z (m)	$[(n'_1 \sin(\alpha)) \cos(\alpha)]$ (KN/m²)
38,64	33,69
39,14	33,79
39,64	33,88
40,14	33,97
40,64	34,06
41,14	34,14
41,64	34,23
42,14	34,30
42,64	34,38
43,14	34,46
43,44	34,50

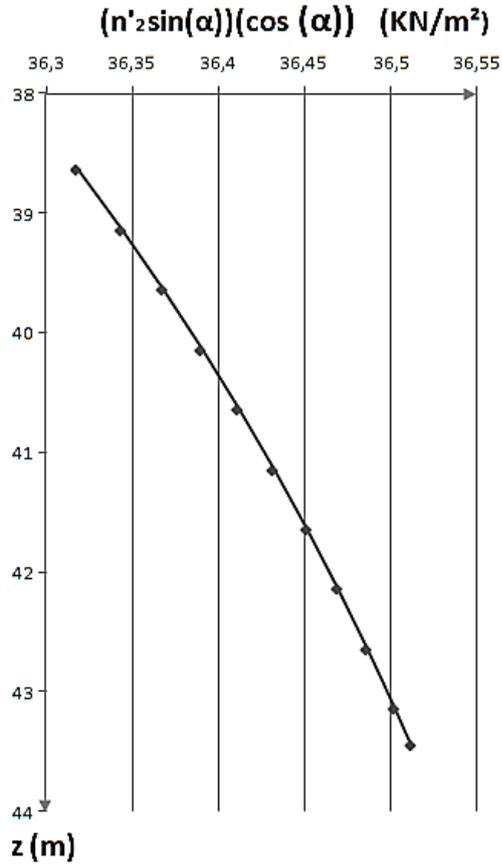
Figure III.36 : Distribution de $[(n'_1 \sin(\alpha)) \cos(\alpha)]$

en fonction de la profondeur de la trémie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

- L'état 2 : $[(n'_2 \sin(45)) \cos(45)]$

Tableau III.29 : Distribution de $[(n'_2 \sin(\alpha)) \cos(\alpha)]$ en fonction de la profondeur de la trémie.



z (m)	$[(n'_2 \sin(\alpha)) \cos(\alpha)]$ (KN/m ²)
38,64	36,37
39,14	36,39
39,64	36,41
40,14	36,43
40,64	36,45
41,14	36,47
41,64	36,49
42,14	36,50
42,64	36,52
43,14	36,53
43,44	36,54

Figure III.37 : Distribution de $[(n'_2 \sin(\alpha)) \cos(\alpha)]$

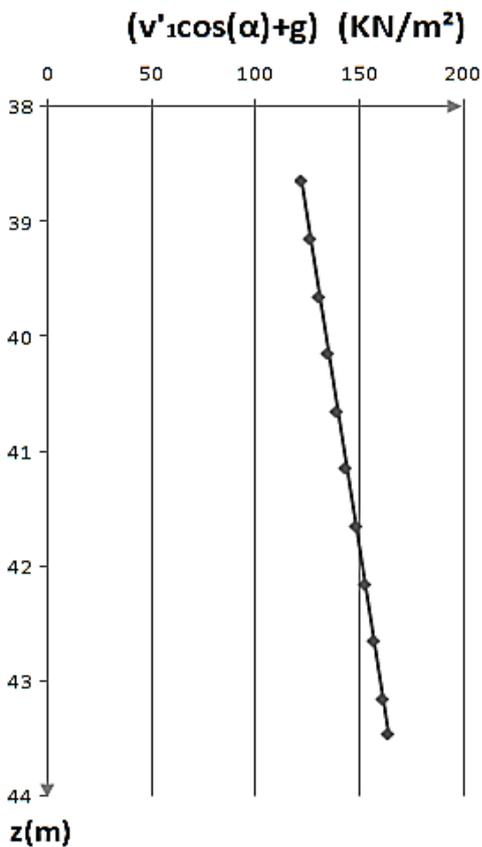
en fonction de la profondeur de la trémie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

➤ $v' \cos(\alpha) + g$:

- L'état 1 : $v'_1 \cos(45) + 3.75$

Tableau III.30 : Distribution de $(v'_1 \cos(\alpha) + g)$
en fonction de la profondeur de la trémie.



z (m)	$v'_1 \cos(\alpha) + g$ (KN/m²)
38,64	122,46
39,14	126,80
39,64	131,13
40,14	135,44
40,64	139,74
41,14	144,04
41,64	148,32
42,14	152,60
42,64	156,87
43,14	161,12
43,44	163,67

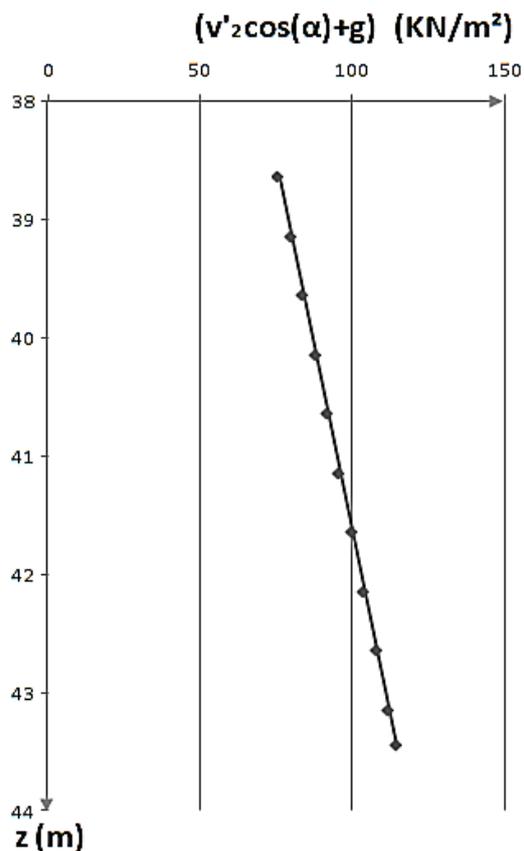
Figure III.38 : Distribution de $(v'_1 \cos(\alpha) + g)$

en fonction de la profondeur de la trémie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

- L'état 2 : $v'_2 \cos(45) + 3.75$

Tableau III.31 : Distribution de $(v'_2 \cos(\alpha) + g)$
en fonction de la profondeur de la trémie.



z (m)	$v'_2 \cos(\alpha) + g$ (KN/m ²)
38,64	76,20
39,14	80,23
39,64	84,26
40,14	88,29
40,64	92,32
41,14	96,34
41,64	100,36
42,14	104,38
42,64	108,40
43,14	112,42
43,44	114,82

Figure III.39 : Distribution de $(v'_2 \cos(\alpha) + g)$

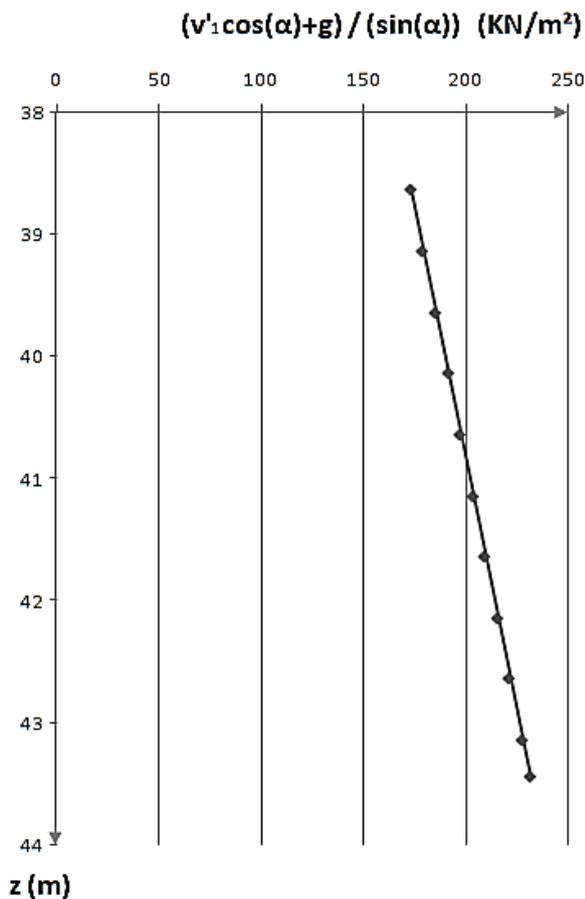
en fonction de la profondeur de la trémie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

➤ $\frac{v' \cos(\alpha) + g}{\sin \alpha}$:

- L'état 1 : $\frac{v'_1 \cos(45) + g}{\sin(45)}$

Tableau III.32 : Distribution de $\left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\sin(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie.



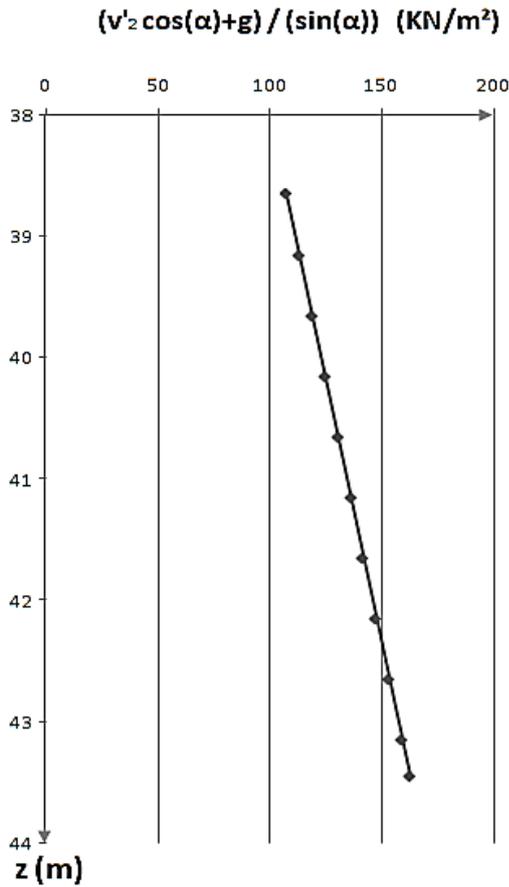
z (m)	$\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\sin(\alpha)}$ (KN/m ²)
38,64	173,19
39,14	179,32
39,64	185,44
40,14	191,54
40,64	197,63
41,14	203,70
41,64	209,76
42,14	215,81
42,64	221,84
43,14	227,86
43,44	231,47

Figure III.40 : Distribution de $\left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\sin(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

- L'état 2 : $\frac{v'_2 \cos(45) + g}{\sin(45)}$

Tableau III.33 : Distribution de $\left(\frac{v'_2 \cos(\alpha) + g}{\sin(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie.



z (m)	$\frac{v'_2 \cos(\alpha) + g}{\sin(\alpha)}$ (KN/m ²)
38,64	107,76
39,14	113,47
39,64	119,17
40,14	124,86
40,64	130,56
41,14	136,25
41,64	141,94
42,14	147,62
42,64	153,30
43,14	158,98
43,44	162,39

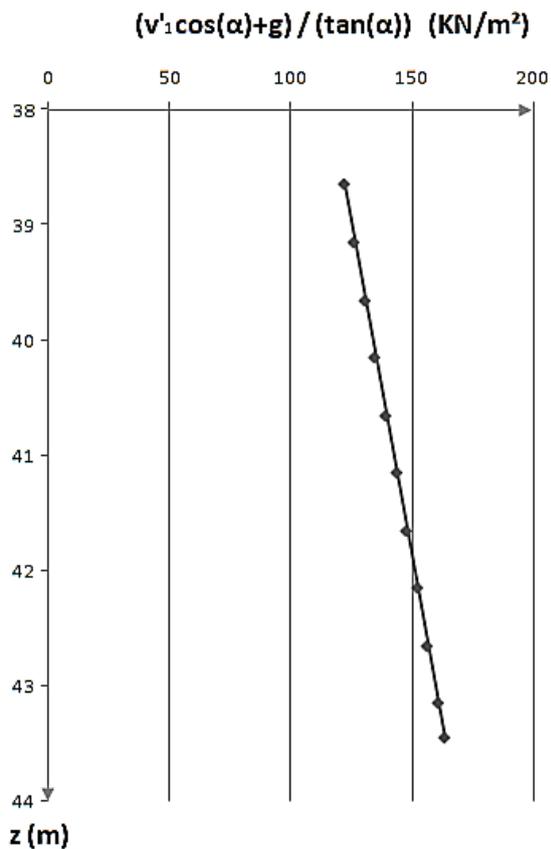
Figure III.41 : Distribution de $\left(\frac{v'_2 \cos(\alpha) + g}{\sin(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

➤ $\frac{v' \cos(\alpha) + g}{\tan \alpha}$:

- L'état 1: $\frac{v'_1 \cos(45) + g}{\tan(45)}$

Tableau III.34 : Distribution de $\left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie.



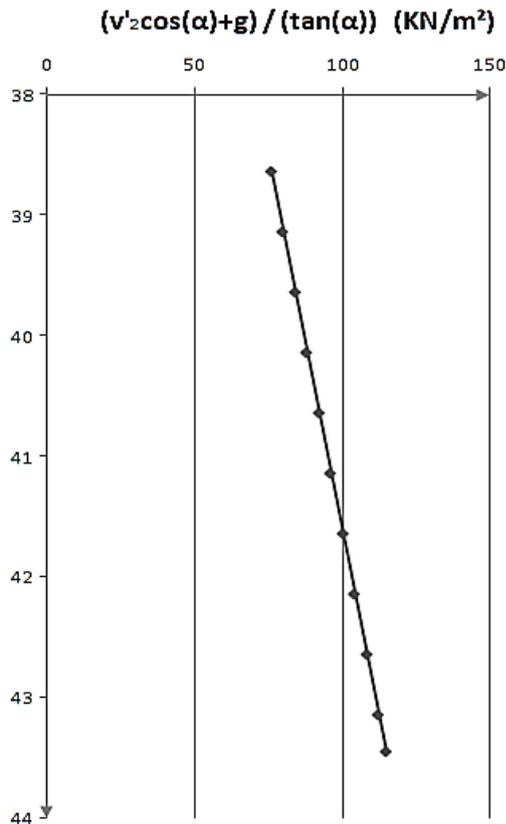
z (m)	$\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}$ (KN/m ²)
38,64	122,46
39,14	126,80
39,64	131,13
40,14	135,44
40,64	139,74
41,14	144,04
41,64	148,32
42,14	152,60
42,64	156,87
43,14	161,12
43,44	163,67

Figure III.42 : Distribution de $\left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

- L'état 2 : $\frac{v'_2 \cos(45) + g}{\tan(45)}$

Tableau III.35 : Distribution de $\left(\frac{v'_2 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie.



z (m)	$\frac{v'_2 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}$ (KN/m²)
38,64	76,20
39,14	80,23
39,64	84,26
40,14	88,29
40,64	92,32
41,14	96,34
41,64	100,36
42,14	104,38
42,64	108,40
43,14	112,42
43,44	114,82

Figure III.43 : Distribution de $\left(\frac{v'_2 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right)$ en fonction de la profondeur de la trémie.

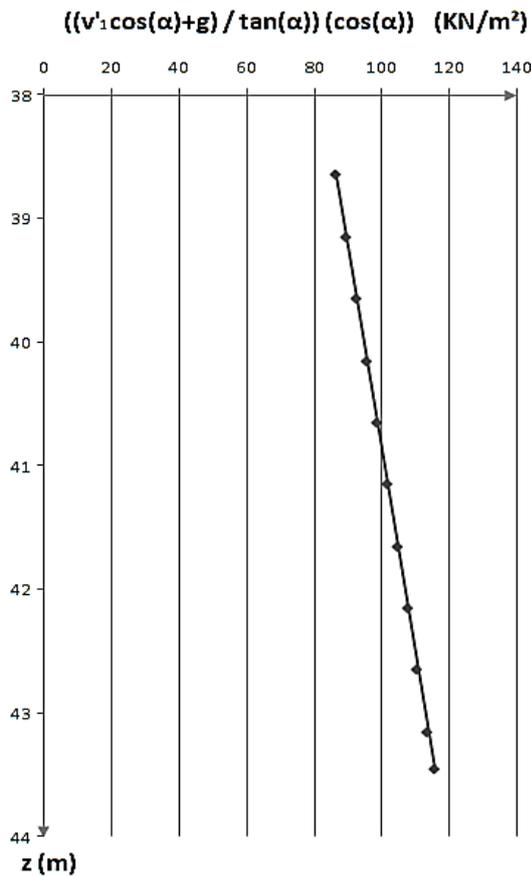
Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

- La projection de l'action $\left(\frac{v' \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right)$ perpendiculaire à la paroi de la trémie, donner comme suite :

$$\left(\frac{v' \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right) \cos(\alpha)$$

- L'état 1 : $\left(\frac{v'_1 \cos(45) + g}{\tan(45)}\right) \cos(45)$

Tableau III.36 : Distribution de $\left[\left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right) \cos(\alpha)\right]$ en fonction de la profondeur de la trémie.



z (m)	$\left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right) \cos(\alpha) \text{ (KN/m}^2\text{)}$
38,64	87,09
39,14	90,14
39,64	93,19
40,14	96,22
40,64	99,25
41,14	102,28
41,64	105,29
42,14	108,30
42,64	111,31
43,14	114,31
43,44	116,10

Figure III.44 : Distribution de $\left[\left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right) \cos(\alpha)\right]$

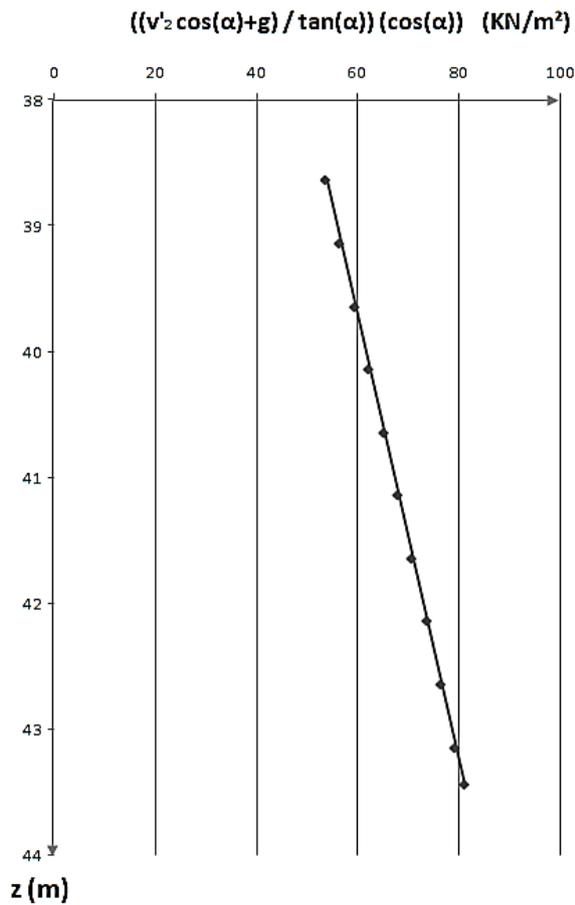
en fonction de la profondeur de la trémie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilé sur les parois du silo de Bouchegouf

- L'état 2 : $\left(\frac{v'_2 \cos(45) + g}{\tan(45)} \right) \cos 45$

Tableau III.37 : Distribution de $\left[\left(\frac{v'_2 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)} \right) \cos(\alpha) \right]$

en fonction de la profondeur de la trémie.



z (m)	$\left(\frac{v'_2 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)} \right) \cos(\alpha)$ (KN/m ²)
38,64	53,95
39,14	56,80
39,64	59,64
40,14	62,49
40,64	65,33
41,14	68,17
41,64	71,01
42,14	73,85
42,64	76,69
43,14	79,53
43,44	81,23

Figure III.45 : Distribution de $\left[\left(\frac{v'_2 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)} \right) \cos(\alpha) \right]$

en fonction de la profondeur de la trémie.

Chapitre III : Calcul des actions de la matière ensilée sur les parois du silo de Bouchegouf

III.4. Conclusion :

Les notes de calcul ainsi que les vérifications nécessaires ont été établies conformément aux règles de calcul des structures en béton armé. Ainsi les variations suivant les formules générales des normes sont bien évidemment intégrées dans nos calculs.

Les grains de la matière ensilée (blé) ont une vitesse verticale moindre le long des parois en raison des frottements sur celle-ci ; la vitesse est au contraire accrue dans l'axe de la trémie à l'aplomb de laquelle il se forme un cône d'ébranlement dans la masse et un entonnoir à la partie inférieure.¹

Les actions et les pressions augmentent au fur et mesure qu'on descend en bas de la paroi. Ainsi l'état 1 conduit aux valeurs les plus fortes de la pression moyenne v , et l'état 2 il conduit aux valeurs les plus défavorables des actions n , t et T . Ce qui affecte de la même manière sur les sections de ferrailage.

Chapitre IV :
Calcul de ferrailage de la
paroi du silo

IV.1. Introduction :

Le recours au treillis soudé est en général possible quelle que soit l'importance de l'ouvrage. Cependant, dans le cas des grands silos réalisés en coffrage glissant, les projeteurs hésitent à l'utiliser du fait de la présence des vérins de levage qui rendent plus difficile la conception et la mise en œuvre des panneaux. Malgré cette difficulté, les treillis soudés restent une solution économique pour le ferrailage des silos.¹³

Dans ce chapitre on va montrer ici le champ de possibles emplois du ferrailage des voiles et les trémies et de fournir des précisions complémentaires sur des applications déjà traitées dans chaque tranche. Le ferrailage de ces éléments doit être calculé de manière à résister les combinaisons de différentes actions, en considérant le cas le plus défavorable.

Le ferrailage de les parois a été uniquement calculé sous l'action de la poussé du blé sur les parois. Les actions (vent la neige, dilatation et le séisme) n'ont pas été prise en considérations.

IV.2. Contrainte interne uniforme sur la section d'une tranche de silo (Extrémités ouvertes) :

La Contrainte interne uniforme sur la section d'une tranche de silo, est donnée comme suit¹⁵ :

$$\sigma = \frac{p r}{e}$$

σ : Contrainte perpendiculaire à l'axe du cylindre.

p : Pression horizontale à la paroi de silo.

e : Epaisseur de paroi.

r : Rayon de silo.

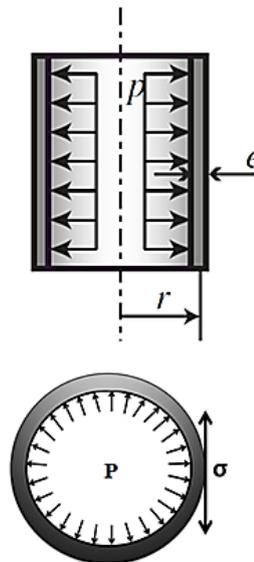


Figure IV.1 : Distribution de la contrainte σ en fonction de la hauteur de matériau stocké dans la parois de silo.

Chapitre VI : Calcul de ferrailage de la paroi du silo

➤ La Contrainte interne uniforme dans la paroi de silo, sur la cote z :

p : Pression horizontale (n_{c2} telle que le cas défavorable $n_{c1} < n_{c2}$) ;

Epaisseur : $e = 0.21$ m ;

Rayon : $r = 5.605$ m.

Les résultats se résument dans le tableau suivant :

Tableau IV.1 : Distribution de σ_p en fonction de la hauteur d'une matière stockée dans la parois de silo.

z (m)	n_{c2} (KN/m ²)	σ_p (KN/m ²)
0 – 2	3,55	94,74
2 – 4	17,95	479,07
4 – 6	29,39	784,34
6 – 8	38,47	1026,81
8 – 10	45,68	1219,40
10 – 12	51,42	1372,38
12 – 14	55,97	1493,89
14 – 16	59,59	1590,40
16 – 18	62,46	1667,05
18 – 20	64,74	1727,94
20 – 22	66,55	1776,30
22 – 24	67,99	1814,72
24 – 26	69,13	1845,23
26 – 28	70,04	1869,46
28 – 30	70,76	1888,71
30 – 32	71,34	1904,00
32 – 34	71,79	1916,15
34 – 36	72,15	1925,79
36 – 38,64	72,48	1934,39

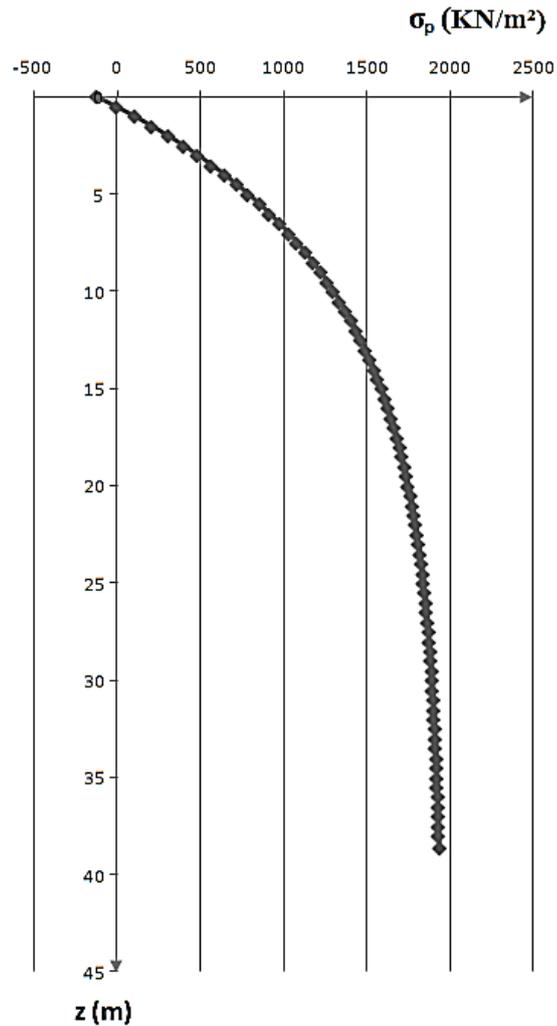


Figure IV.2 : Distribution de σ_p en fonction d'une matière stockée dans la paroi de silo.

➤ La Contrainte interne uniforme dans la trémie de silo, sur la cote z :

$$\text{Pression : } F = [(n'_2 \sin(\alpha)) \cos(\alpha)] + \left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)} \right) \cos(\alpha)$$

Epaisseur : $e = 0.3 \text{ m}$;

Rayon : $r = \text{variable}$.

Les résultats se résument dans les tableaux suivants :

Chapitre VI : Calcul de ferrailage de la paroi du silo

Tableau IV.2 : La somme d'actions horizontales au niveau de la paroi de la trémie.

z (m)	$[(n'_2 \sin(\alpha)) \cos(\alpha)]$ (KN/m ²)	$\left[\left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right) \cos(\alpha)\right]$ (KN/m ²)	$\sum F = [(n'_2 \sin(\alpha)) \cos(\alpha)]$ $+ \left[\left(\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\tan(\alpha)}\right) \cos(\alpha)\right]$ (KN/m ²)
38,64 - 39,64	90,14	126,48	216,62
39,64 - 40,64	96,22	132,61	228,83
40,64 - 41,64	102,27	138,70	240,98
41,64 - 42,64	108,30	144,77	253,07
42,64 - 43,44	113,70	150,20	263,91

Tableau IV.3 : Distribution de σ_t en fonction de la hauteur de la trémie de silo.

z (m)	r (m)	$\sigma_t = \frac{F \cdot r}{e}$ (KN/m ²)
38,64 - 39,64	4.96	3580,04
39,64 - 40,64	4.21	3215,06
40,64 - 41,64	3.47	2788,91
41,64 - 42,64	2.78	2302,08
42,64 - 43,44	1.99	1747,08

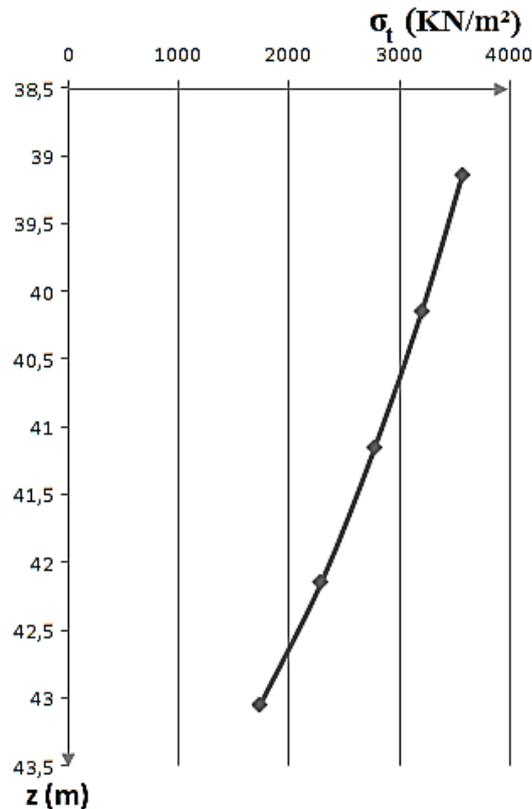


Figure IV.3 : Distribution de σ_t en fonction de la hauteur de la trémie de silo.

IV.3. Etude de la paroi de silo :

On considère une tranche de dimension 1m de largeur et 2m de hauteur. Celle-ci est sollicitée par les efforts suivants :

- Poids propre G .
- Moment d'ovalisation M_{ov} .
- Pression vertical T du au frottement de la matière ensilée dans la paroi.
- Contrainte horizontale σ_p du a la pression nominale horizontale n_{e2} .

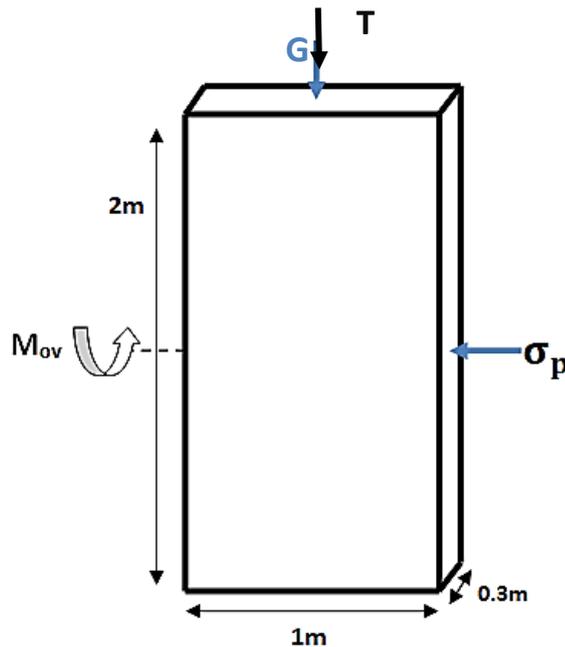


Figure IV.4 : sollicitation dans la paroi de silo.

Dans les situations suivantes :

- Béton : $\gamma_b = 1,5$; $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$; $\sigma_{bc} = 164.973 \text{ MPa}$.
- Acier : $\gamma_s = 1,15$; Nuance FeE500 ; $\sigma_s = 434.782 \text{ MPa}$.

Pour le ferrailage du voile, il faut satisfaire certaines conditions imposées par le RPA99/version2003:

Pourcentage minimum d'armatures verticales et horizontales :

- Lorsqu'une partie du voile est tendue sous l'action des forces verticales et horizontales, l'effort de traction doit être pris en totalité par les armatures, le pourcentage minimum des armatures verticales sur toute la zone tendue est de 0.20%.
- Globalement dans la section du voile 0,15%.

Chapitre VI : Calcul de ferrailage de la paroi du silo

L'espacement des barres horizontales et verticales :

- $St \leq \text{Min} (15 a ; 30 \text{ cm})$

Les longueurs des recouvrements doivent être égales :

- $40 \varnothing$ pour les barres situées dans les zones où le recouvrement du signe des efforts est possible.
- $20\varnothing$ pour les barres situées dans les zones comprimées sous l'action de toutes les combinaisons d'actions.

Dans chaque nappe, les barres horizontales doivent être disposées vers l'extérieur.

Le diamètre des barres verticales et horizontales des voiles (à l'exception des zones d'about) ne devrait pas dépasser 1/10 de l'épaisseur du voile.¹⁷

IV.3.1. Descente de charge :

La descente de charge est le chemin suivi par les différentes actions (charges et surcharges) du niveau le plus haut de la structure jusqu'au niveau le plus bas.

a) Surcharge d'exploitation :

C'est la pression qui due à le frottement de la matière ensilée sur la paroi de silo le plus défavorable T_2 , telle que $T_1 < T_2$.

Tableau IV.4 : Distribution de T en fonction d'une matière stockée dans la parois de silo.

z (m)	T_2 (KN/m ²)	h_z (m)	$T = T_2 \cdot h_z$ (KN/ml)
0 – 2	0,89	2	1,79
2 – 4	4,99	4	19,94
4 – 6	14,16	6	84,95
6 – 8	27,81	8	222,47
8 – 10	45,40	10	454,03
10 – 12	66,47	12	797,68
12 – 14	90,60	14	1268,46
14 – 16	117,43	16	1878,94
16 – 18	150,59	18	2710,57
18 – 20	177,94	20	3558,78
20 – 22	211,08	22	4643,84

Chapitre VI : Calcul de ferrailage de la paroi du silo

z (m)	T₂ (KN/m²)	h_z (m)	T = T₂ · h_z (KN/ml)
22 – 24	245,85	24	5900,50
24 – 26	282,06	26	7333,46
26 – 28	319,52	28	8946,57
28 – 30	358,10	30	10742,88
30 – 32	397,65	32	12724,84
32 – 34	438,07	34	14894,36
34 – 36	479,25	36	17252,92
36 – 38,64	595,82	38,64	22641,34

b) Charge permanente :

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

Tableau III.5 : La charge permanente.

On calcul d'abord leur poids surfacique G :	Epaisseur (m)	D (KN/m²)	g (KN/m²)
Pois propre	0.21	25	5.25
Enduit de ciment	0.2	2	0.40
La charge permanente $\sum g = 5.65 \text{ KN/m}^2$			

Tableau IV.6 : Distribution de la charge permanente **G** en fonction de la hauteur de matériau stocké dans la parois de silo.

z (m)	h_z (m)	G = g · h_z (KN/ml)
0 – 2	2	11,3
2 – 4	4	22,6
4 – 6	6	33,9
6 – 8	8	45,2
8 – 10	10	56,5
10 – 12	12	67,8
12 – 14	14	79,1
14 – 16	16	90,4
16 – 18	18	101,7

Chapitre VI : Calcul de ferrailage de la paroi du silo

z (m)	h_z (m)	G = g · h_z (KN/ml)
18 – 20	20,00	113,00
20 – 22	22,00	124,30
22 – 24	24,00	135,60
24 – 26	26,00	146,90
26 – 28	28,00	158,20
28 – 30	30,00	169,50
30 – 32	32,00	180,80
32 – 34	34,00	192,10
34 – 36	36,00	203,40
36 – 38,64	38,64	218,32

IV.3.2. Combinaison de charge :

Le calcul se fera à l'ELU en fonction de la combinaison suivante :

Tableau IV.7 : combinaisons des charges.

z (m)	ELU	
	Nu = (1.35 G+1.5 T) (KN/ml)	Mu = Mov 1.5 (KN.m)
0 – 2	17,93	$1,56 \times 10^{-7}$
2 – 4	60,42	$2,18 \times 10^{-7}$
4 – 6	173,19	$2,18 \times 10^{-7}$
6 – 8	394,73	$3,41 \times 10^{-7}$
8 – 10	757,33	$3,98 \times 10^{-7}$
10 – 12	1288,05	$2,18 \times 10^{-7}$
12 – 14	2009,48	$4,60 \times 10^{-7}$
14 – 16	2940,45	$4,75 \times 10^{-7}$
16 – 18	4203,15	$4,89 \times 10^{-7}$
18 – 20	5490,73	$5,02 \times 10^{-7}$
20 – 22	7133,57	$5,15 \times 10^{-7}$
22 – 24	9033,80	$5,27 \times 10^{-7}$
24 – 26	11198,51	$5,09 \times 10^{-7}$
26 – 28	13633,42	$4,53 \times 10^{-7}$
28 – 30	16343,15	$3,88 \times 10^{-7}$
30 – 32	19331,34	$3,12 \times 10^{-7}$
32 – 34	22600,88	$2,34 \times 10^{-7}$
34 – 36	26153,97	$1,52 \times 10^{-7}$
36 – 38,64	34256,73	$5,38 \times 10^{-8}$

IV.3.3. Calcul des armatures de la paroi :

Les calculs des armatures horizontales et verticales se font par tranches de 2 m de longueur et 1m de largeur.

a) Les armatures horizontales :

Pour une section de béton soumise à un effort de traction, de largeur $b = 200$ cm et d'épaisseur $h = 21$ cm et de bras de levier des aciers tendus, et d'enrobage $c = 2$ cm, les calculs du ferrailage se résument dans le tableau suivant :

D'où :

$$N_u = \sigma_p = \frac{n_c z r}{e}$$

Tableau IV.8 : Calcul de ferrailage horizontal de la paroi.

z (m)	A_{min} = $\frac{f_{tj}}{f_e} \cdot B$ (cm²)	A_u = $\frac{N_u}{f_e/\gamma_s}$ (cm²)	A_{adop} (cm²)	Choix	St (cm)
0 - 2	17,64	2,18	31,42	2(20HA10)	10
2 - 4	17,64	17,92	31,42	2(20HA10)	10
4 - 6	17,64	18,04	31,42	2(20HA10)	10
6 - 8	17,64	23,62	31,42	2(20HA10)	10
8 - 10	17,64	28,05	31,42	2(20HA10)	10
10 - 12	17,64	31,57	45,24	2(20HA12)	10
12 - 14	17,64	34,36	45,24	2(20HA12)	10
14 - 16	17,64	36,58	45,24	2(20HA12)	10
16 - 18	17,64	38,34	45,24	2(20HA12)	10
18 - 20	17,64	39,74	45,24	2(20HA12)	10
20 - 22	17,64	40,85	45,24	2(20HA12)	10
22 - 24	17,64	41,74	45,24	2(20HA12)	10
24 - 26	17,64	42,44	45,24	2(20HA12)	10
26 - 28	17,64	42,99	45,24	2(20HA12)	10
28 - 30	17,64	43,44	45,24	2(20HA12)	10
30 - 32	17,64	43,79	45,24	2(20HA12)	10
32 - 34	17,64	44,07	45,24	2(20HA12)	10
34 - 36	17,64	44,29	45,24	2(20HA12)	10
36- 38,64	17,64	44,49	45,24	2(27HA12)	10

Chapitre VI : Calcul de ferrailage de la paroi du silo

b) Les armatures verticales :

Sous l'effet des sollicitations de moment fléchissant (M_{ov}) et pression verticale due au frottement de la matière ensilée (T), les calculs des ferrailages seront effectués en flexion composée.

Pour une section de béton, de largeur $b = 100$ cm et d'épaisseur $h = 21$ cm et de bras de levier des aciers tendus, $d = 19$ cm et d'enrobage $c = 2$ cm, on calcul à LEU.

Pour la détermination du ferrailage on utilise la méthode du moment fictif qui nous amène à faire un calcul à la flexion simple.

En effet, on doit vérifier en premier lieu le flambement des parois, pour cela on calcul :

L'élancement λ donné par : $\lambda = \frac{l_f}{i}$ qui doit être inférieur à λ_{max} avec

l_f : Longueur de flambement donnée par : $l_f = 1 \cdot l_0$ (pour notre cas) soit $l_f = 1 \cdot 2$

D'où : $l_f = 2$ m

i : Rayon de giration de la section calculée donnée par : $i = \sqrt{\frac{I}{B}}$ avec

I : Moment d'inertie de la section calculée donné par : $I = \frac{b e^3}{12}$ (pour notre cas)

D'où $I = 0.00077$ m⁴.

B : Surface de la section calculée donné par : $B = b \times e = 1 \times 0,21$ d'où $B = 0,21$ m²

Donc : $i = \sqrt{\frac{0.00077}{0.21}} = 0.060$.

Soit : $\lambda = \frac{2}{0.060} = 33.33$

$\lambda_{max} = \max(50, \min(67 \cdot \frac{e_0}{e}, 100))$.

L'excentricité « e_0 », $e_0 = \frac{M_u}{N_u}$ soit $e_0 =$ variable ; Nous obtenons ainsi les résultats dans le

tableau suivant :

Tableau IV.9 : Vérification du flambement à la paroi de silo.

z (m)	λ	e_0 (m)	λ_{max}	Application de condition $\lambda < \lambda_{max}$
0 – 2	33,33	$6,52 \times 10^{-9}$	50	Condition vérifié
2 – 4	33,33	$4,13 \times 10^{-9}$	50	Condition vérifié
4 – 6	33,33	$2,37 \times 10^{-9}$	50	Condition vérifié

Chapitre VI : Calcul de ferrailage de la paroi du silo

z (m)	λ	e_0 (m)	λ_{\max}	Application de condition $\lambda < \lambda_{\max}$
6 - 8	33,33	$2,43 \times 10^{-9}$	50	Condition vérifié
8 - 10	33,33	$2,03 \times 10^{-9}$	50	Condition vérifié
10 - 12	33,33	$8,39 \times 10^{-10}$	50	Condition vérifié
12 - 14	33,33	$1,40 \times 10^{-9}$	50	Condition vérifié
14 - 16	33,33	$1,18 \times 10^{-9}$	50	Condition vérifié
16 - 18	33,33	$9,94 \times 10^{-10}$	50	Condition vérifié
18 - 20	33,33	$8,85 \times 10^{-10}$	50	Condition vérifié
20 - 22	33,33	$7,85 \times 10^{-10}$	50	Condition vérifié
22 - 24	33,33	$7,06 \times 10^{-10}$	50	Condition vérifié
24 - 26	33,33	$6,06 \times 10^{-10}$	50	Condition vérifié
26 - 28	33,33	$4,84 \times 10^{-10}$	50	Condition vérifié
28 - 30	33,33	$3,75 \times 10^{-10}$	50	Condition vérifié
30 - 32	33,33	$2,75 \times 10^{-10}$	50	Condition vérifié
32 - 34	33,33	$1,89 \times 10^{-10}$	50	Condition vérifié
34 - 36	33,33	$1,14 \times 10^{-10}$	50	Condition vérifié
36 - 38,64	33,33	$3,35 \times 10^{-10}$	50	Condition vérifié

⇒ Donc y'a pas de risque de flambement.

Le calcul du ferrailage se résume dans les tableaux suivants :

Tableau IV.10 : Vérification du moment réduite ultime à la paroi de silo.

z (m)	$M_{uA} = M_u + N_u(d - \frac{h}{2})$ (KN/m)	$\mu_a = \frac{M_{uA}}{b \cdot d^2 \cdot f_{bu}}$	μ_l	Application de condition $\mu_a < \mu_l$
0 - 2	2,03	0,00	0,39	Condition vérifié
2 - 4	4,49	0,01	0,39	Condition vérifié
4 - 6	7,82	0,02	0,39	Condition vérifié
6 - 8	11,92	0,02	0,39	Condition vérifié
8 - 10	16,70	0,03	0,39	Condition vérifié
10 - 12	22,08	0,04	0,39	Condition vérifié
12 - 14	27,97	0,05	0,39	Condition vérifié

Chapitre VI : Calcul de ferrailage de la paroi du silo

z (m)	$M_{uA} = M_u + N_u(d - \frac{h}{2})$ (KN/m)	$\mu_a = \frac{M_{uA}}{b \cdot d^2 \cdot f_{bu}}$	μ_1	Application de condition $\mu_a < \mu_1$
14 - 16	34,34	0,07	0,39	Condition vérifié
16 - 18	41,80	0,08	0,39	Condition vérifié
18 - 20	48,25	0,09	0,39	Condition vérifié
20 - 22	55,71	0,12	0,39	Condition vérifié
22 - 24	63,45	0,12	0,39	Condition vérifié
24 - 26	71,43	0,14	0,39	Condition vérifié
26 - 28	79,62	0,16	0,39	Condition vérifié
28 - 30	88,01	0,17	0,39	Condition vérifié
30 - 32	96,57	0,19	0,39	Condition vérifié
32 - 34	105,28	0,21	0,39	Condition vérifié
34 - 36	114,12	0,22	0,39	Condition vérifié
36-38,64	136,49	0,27	0,39	Condition vérifié

Donc les armatures comprimée ne pas nécessaire => $A' = 0$

Tableau IV.11 : Calcul d'armatures verticales de la paroi de silo.

z (m)	$\alpha = \frac{1.25(1 - \sqrt{1 - 2\mu})}{\sqrt{1 - 2\mu}}$	$\beta = 1 - 0.4 \alpha$	$A_u = \frac{M_{uA}}{\beta \cdot d \left(\frac{f_e}{\gamma_s}\right)}$ (cm ²)	$A = A_u - \frac{N_u}{\sigma_s}$ (cm ²)	A_{adop} (cm ²)	Choix	St (cm)
0 - 2	0,01	1,00	0,25	0,19	8,55	16HA8	14
2 - 4	0,01	1,00	0,56	0,42	8,55	16HA8	14
4 - 6	0,02	0,99	0,95	0,74	8,55	16HA8	14
6 - 8	0,03	0,98	1,46	1,14	8,55	16HA8	14
8 - 10	0,04	0,98	2,05	1,60	8,55	16 HA8	14
10 - 12	0,05	0,98	2,73	2,13	8,55	16HA8	14
12 - 14	0,07	0,97	3,48	2,73	8,55	16HA8	14
14 - 16	0,08	0,97	4,31	3,38	8,55	16HA8	14
16 - 18	0,11	0,96	5,29	4,15	8,55	16HA8	14
18 - 20	0,12	0,95	6,15	4,84	8,55	16HA8	14
20 - 22	0,14	0,94	7,16	5,65	8,55	16HA8	14
22 - 24	0,17	0,93	8,23	6,51	8,55	16HA8	14
24 - 26	0,20	0,92	9,35	7,42	8,55	16HA8	14
26 - 28	0,21	0,91	10,54	8,38	18,10	16HA10	14
28 - 30	0,24	0,90	11,77	9,39	18,10	16HA10	14
30 - 32	0,26	0,89	13,07	10,46	18,10	16HA10	14
32 - 34	0,29	0,88	14,42	11,58	18,10	16HA10	14

Chapitre VI : Calcul de ferrailage de la paroi du silo

z (m)	$\alpha = \frac{1.25(1 - \sqrt{1 - 2\mu})}{\sqrt{1 - 2\mu}}$	$\beta = 1 - 0.4 \alpha$	$A_u = \frac{M_{uA}}{\beta \cdot d \left(\frac{f_e}{\gamma_s}\right)}$ (cm ²)	$A = A_u - \frac{N_U}{\sigma_s}$ (cm ²)	A_{adop} (cm ²)	Choix	St (cm)
34 - 36	0,32	0,87	15,84	12,75	18,10	16HA12	14
36-38,64	0,40	0,84	19,64	15,94	18,10	16HA12	14

IV.3.4. schéma de ferrailage :

Nous prenons la tranche qui se trouve dans la partie de (34 – 36) mètre :

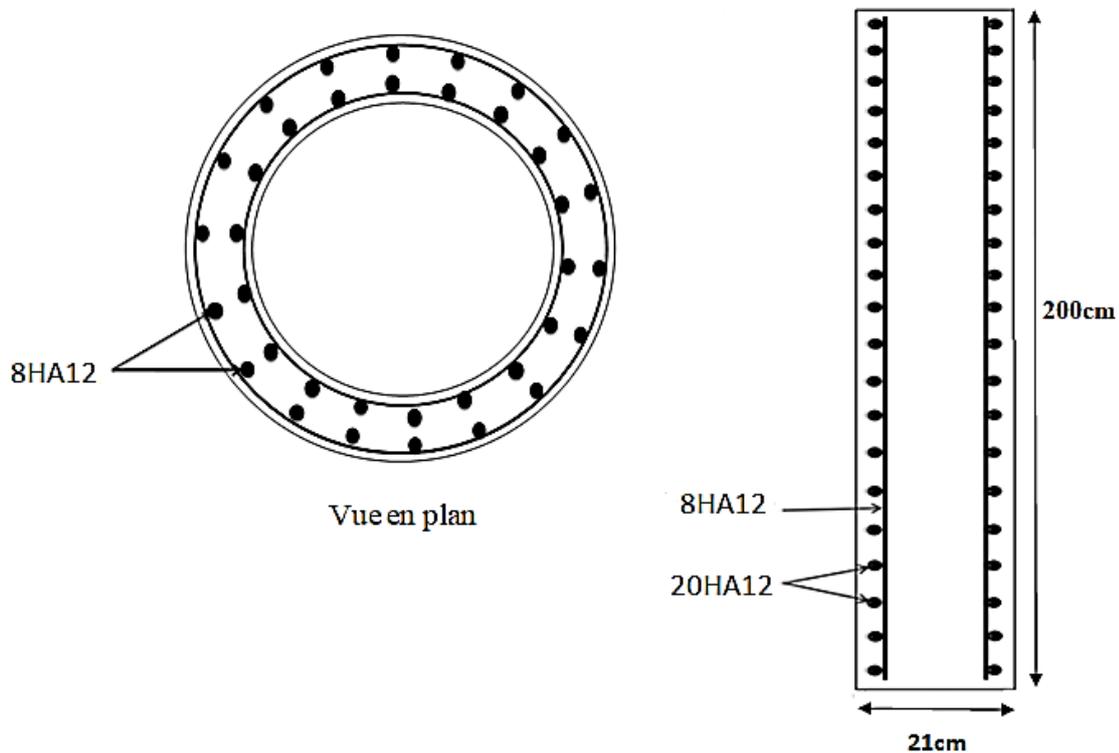


Figure IV.5 : Schéma de ferrailage de la paroi de silo.

IV.4. Etude de la trémie de silo :

On considère une tranche de dimension 1m de largeur et de hauteur. Celle-ci est sollicitée par les efforts suivants (cas le plus défavorable) :

- Contrainte horizontale σ_t du a la somme F des pressions horizontales corrigées.
- La pression verticale $\frac{v'_1 \cos(\alpha) + g}{\sin(\alpha)}$.

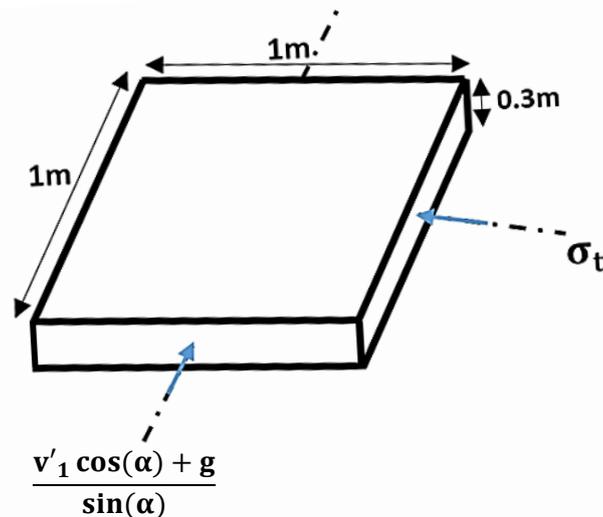


Figure IV.6 : Sollicitation dans la trémie de silo.

Dans les situations suivantes :

- Béton : $\gamma_b = 1,5$; $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$.
- Acier : $\gamma_s = 1,15$; Nuance FeE500 ; $\sigma_s = 434,782 \text{ MPa}$.

Pour le ferrailage du voile, il faut satisfaire certaines conditions imposées par le RPA99/version2003:

Pourcentage minimum d'armatures verticales et horizontales :

- Lorsqu'une partie du voile est tendue sous l'action des forces verticales et horizontales, l'effort de traction doit être pris en totalité par les armatures, le pourcentage minimum des armatures verticales sur toute la zone tendue est de 0.20%.
- Globalement dans la section du voile 0,15%.

L'espacement des barres horizontales et verticales :

- $St \leq \text{Min}(15a ; 30 \text{ cm})$.

Les longueurs des recouvrements doivent être égales :

- $40 \varnothing$ pour les barres situées dans les zones où le recouvrement du signe des efforts est possible.
- $20 \varnothing$ pour les barres situées dans les zones comprimées sous l'action de toutes les combinaisons d'actions.

Dans chaque nappe, les barres horizontales doivent être disposées vers l'extérieur.

Le diamètre des barres verticales et horizontales des voiles (à l'exception des zones d'about)

Chapitre VI : Calcul de ferrailage de la paroi du silo

ne devrait pas dépasser 1/10 de l'épaisseur du voile.¹⁷

IV.4.1. Calcul des armatures de la trémie :

Les calculs des armatures horizontales et verticales se font par tranches de 1m de longueur et même de largeur.

a) Les armatures horizontales :

Pour une section soumise à un effort de traction de béton, de largeur $b = 100$ cm et d'épaisseur $h = 30$ cm et de bras de levier des aciers tendus, et d'enrobage $c = 2$ cm, on calcule à LEU. Les calculs du ferrailage se résument dans le tableau suivant :

D'où :

$$N_u = \sigma_t = \frac{F r}{e}$$

Tableau IV.12 : Calcul d'armatures horizontales de la trémie de silo.

z(m)	$A_{min} = \frac{f_{tj}}{f_e} \cdot B$ (cm ²)	$A_u = \frac{N_u}{f_e/\gamma_s}$ (cm ²)	A_{adop} (cm ²)	Choix	St (cm)
38,64 - 39,64	12,6	82,34	84,44	2(21HA16)	5
39,64 - 40,64	12,6	73,95	84,44	2(21HA16)	5
40,64 - 41,64	12,6	64,14	84,44	2(11HA16+10HA14)	5
41,64 - 42,64	12,6	52,95	84,44	2(11HA14+10HA12)	5
42,64 - 43,44	12,6	40,18	84,44	2(21HA12)	5

a) Les armatures verticales :

Pour une section soumise à un effort de compression ultime, de largeur $b = 100$ cm et d'épaisseur $h = 30$ cm et de bras de levier des aciers tendus, et d'enrobage $c = 2$ cm, on calcule à LEU.

Calcul du rayon de giration i :

$$i = \sqrt{\frac{I}{B}} = \sqrt{\frac{(b \cdot h^3)/12}{b \cdot h}} = \sqrt{\frac{(100 \cdot 30)/12}{100 \cdot 30}} = 28 \text{ cm}$$

Calcul de l'élanement : $\lambda = \frac{l_f}{i} = \frac{1 \times 480}{28} = 17.14$

Chapitre VI : Calcul de ferrailage de la paroi du silo

$$\Rightarrow \alpha = \frac{0.85}{1+0.2\left(\frac{\lambda}{35}\right)^2} = \frac{0.85}{1+0.2\left(\frac{17.14}{35}\right)^2} = 0.81$$

Calcul de la section réduite B_r :

$$B_r = (b - 2)(h - 2) = (100 - 2)(30 - 2) = 2744 \text{ cm}^2$$

Calcul de la section d'armatures longitudinales est donné par le tableau suivant :

D'où :

$$N_u = \frac{(v'_1 \cos(\alpha) + g)}{\sin(\alpha)}$$

Tableau IV.13 : Calcul d'armatures verticales de la trémie de silo.

z(m)	$A_u = \left[\frac{N_u}{\alpha} - \frac{B_r \cdot f_{c28}}{0.9 \cdot \gamma_b} \right] \frac{1}{f_{ye}}$ (cm ²)	Section adopté	choix	St (cm)
38,64 - 39,64	111,78	113,1	2(18HA20)	6
39,64 - 40,64	111,44	113,1	2(18HA20)	6
40,64 - 41,64	111,09	113,1	2(18HA20)	6
41,64 - 42,64	110,75	113,1	2(18HA20)	6
42,64 - 43,44	110,44	113,1	2(18HA20)	6

IV.4.1. Schéma de ferrailage :

Nous prenons la tranche supérieure de la trémie qui se trouve dans la partie de (38.64 – 39.64) mètre :

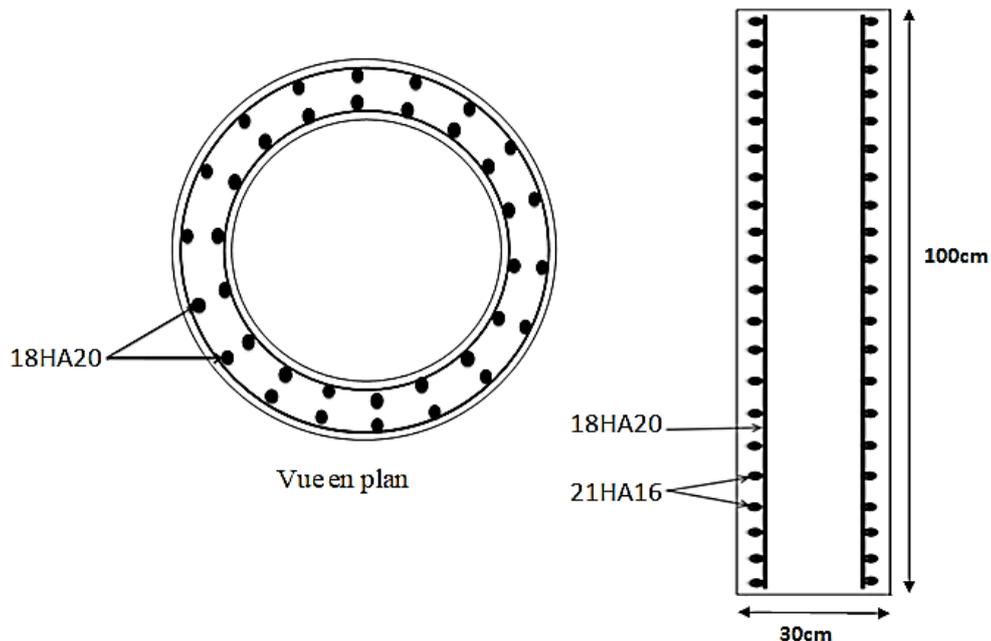


Figure IV.7 : Schéma de ferrailage de la trémie de silo.

IV.5. Conclusion :

Les résultats numériques obtenus montrent que notre étude consiste donc améliorer l'état actuel des connaissances du voile d'un silo cylindriques, Nous proposons une approche analytique pour le calcul des contraintes ultimes de résistance de la structure du silo. Cette approche est basée sur une étude paramétrique par voie numérique.

Conclusion générale:

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

Au début de ce mémoire nous avons montré que le silo circulaire en béton armé est le type le plus avantageux pour atteindre notre objectif. Le muret en béton armé facilite le drainage, prolonge la durée de vie du silo et est en mesure de récupérer le jus d'ensilage plus facilement. D'autre part le silo de béton armé garantit une solution de stockage pérenne et économique et une automatisation haut de gamme de toute l'installation. Prise en compte de la néantité partielle accidentelle qu'on a la possibilité de contrôler.

Les quelques études théoriques et expérimentales effectuées sur le comportement des parois d'un silo rond ne traitent que des cas de charges simples (En prenant compte les actions simultanées de la pression interne et du frottement latéral de la matière ensilée contre la paroi et la trémie dans les calculs). Les calculs des actions dans la paroi de silo différent selon le type de vidange.

L'étude analytique montre la distribution des sollicitations dans les parois de la coque. Telle que les pressions et les actions augmentent dans la base de la paroi de silo ou y'a une surcharge de la matière ensilée.

Cette analyse de comportement est complétée par l'étude de l'effet des charges. Les résultats obtenus montrent une flexion importante des parois, localisée à un niveau donné du silo.

Nous proposons une approche analytique pour le calcul des contraintes ultimes de résistance de la structure du silo. Les silos doivent être construits suivant les règles de l'art.

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

Références Bibliographiques :

- [1] **L Louterfi** Mémoire. « Contribution à la modélisation numérique du comportement des silos à trémie lors du remplissage et de la vidange -Evaluation numérique du chargement de la matière ensilée sur les parois du silo ». Université d'Annaba 2009.
- [2] **I Bouachaa, C Bougherara** « Conception et dimensionnement d'un silo de stockage de ciment ». Mémoire. Université de Guelma.2011.
- [3] <https://www.techniques-ingenieur.fr> .Consulté le 3/1/2020 à 22:38, 3/01/2020 à 22:29.
- [4] <http://www.lessilosmodernes.fr> .Consulté le 29/12/2019 à 15:17,1/01/2020 à 18:29.
- [5] **L Dahmani** « Calcul et conception des silos et réservoirs métalliques ».2017.
- [6] Calcul et dimensionnement d'un silo. Mémoire de Fin d'Études Juin 2013.
- [7] **SI Ahmed, SI Nassib** « Calcul et dimensionnement des silos en béton armé et béton précontraint (BAEL-BPEL91) ». 2006/2007.
- [8] <https://www.gleitbau.com/fr> .Consulté le 1/12/2019 à 13 :26.
- [9] <https://siloscordoba.com> .Consulté le29/12/2019 à 16 :09.
- [10] **M Himeur** « Cour de l'ouvrages spéciaux .Chapitre IV ».
- [11] Eurocode 1 partie 4.
- [12] Règles professionnelles de conception et de calcul des silos en béton armé ou précontraint.1986.
- [13] <file:///C:/Users/Administrateur/Desktop/silo1/doc%20pdf/Chapitre-7---Les-ouvrages> , consulté le 16/08/2020 à 15 :36.
- [14] **Z Belhouchet** « Comportement et stabilité des coques cylindrique sous charges de type (silo). Étude analytique et numérique ».Université de Lorraine.

- [15] **A Delaplace, F Gatuingt et F Ragueneau** « Mécanique des structures » Paris 2008.
- [16] Eurocode 1 partie 2.
- [17] Règles parasismiques algériennes RPA 99 / version 2003.
- [18] <http://processs.free.fr/Pages/VersionWeb.php?page=1120> .Consulté le 17/09/2020 à 13:21.
- [19] BAEL 91/version 99 « Béton Armé a l'Etat Limite ».
- [20] Google image.
- [21] file:///C:/Users/Administrateur/Desktop/silo1/doc%20pdf/D3F041.pdf