

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI-MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY  
UNIVERSITE BADJI-MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Faculte des sciences de l'ingeniorat  
Département de Génie Civil

Année 2016

## THESE

Presentée en vue de l'obtention du diplôme de DOCTORAT

# ETUDE NUMERIQUE DU RENFORCEMENT ET DE LA REPARATION DES SILOS PAR LES MATERIAUX COMPOSITES

Option

Structure

Par

**Latifa LOUETRI**

DIRECTEUR DE THESE: Kamel DJEGHABA Pr Université de Annaba  
CO-DIRECTEUR : Eutiquio GALLEGO VAZQUEZ Ass Pr Université de Madrid

DEVANT LE JURY

PRESIDENT : Bachir REDJEL Pr Université de Annaba  
EXAMINATEURS : Abdelaziz BENMARCE Pr Université de Guelma  
Med Salah NOUAOURIA Pr Université de Guelma

## **Dédicace:**

Je dédie ce modeste travail, à mon père, à ma mère, a toute ma famille,  
Et a tous ceux et toutes celles qui m'ont accompagné et soutenu durant  
ces années.

# Remerciement

Mes sentiments de reconnaissance vont en premier lieu à mon encadrant, monsieur

***Kamel Djeghaba***, merci pour tout ce qu'il a fait, et pour m'encadrer.

Il a dirigé et accompagné de très près, à vrai dire pas à pas, jour à jour, et avec beaucoup de patience, la longue et lente rédaction de la thèse.

Merci monsieur pour votre soutien pendant ces années.

J'adresse mes remerciements à mon Co-encadreur monsieur ***Etiquio Gallego Vasques***, pour sa disponibilité, ses idées pertinentes et pour toutes les lumières qu'il a toujours bien voulu m'apporter.

Je tiens à exprimer ma gratitude à tous les membres du jury, pour avoir bien voulu donner de leur temps pour examiner ce travail, certains ont pris la peine de se déplacer de leur lieu de travail. Qu'ils soient particulièrement remerciés.

Mes profondes reconnaissances vont à tous mes enseignants particulièrement : ***Mr M.F Habita, B. Kebaili, Y. Hadidane, B. Redjel, F.Slimani, et M. Behim*** , pour leurs conseils avisés, leur soutien et leur encouragement.

Un très grand merci à ***Saci Cherait***, Directeur du laboratoire de travaux publics-Est- Daira d'Annaba, qui a très volontiers accepté mon stage au niveau de ce laboratoire, et à l'ensemble des travailleurs particulièrement aux ingénieurs :

***Djamel Djemili et Samain Chaoui***

À toutes les personnes qui ont contribué à l'accomplissement de ce travail, et l'ensemble des travailleurs du département de Génie Civil-Annaba-

## Résumé

Ce travail présente, une analyse numérique par éléments finis du renforcement et de la réparation des silos métalliques à trémie centrée par l'utilisation de matériaux composites (TFC). Les silos sont destinés à stocker différents types de matière granulaire (blé, ciment, etc..). L'évaluation des actions de la matière ensilée sur les parois du silo est obtenue en modélisant non seulement les parois des silos, mais aussi la matière ensilée en tenant compte de l'interaction entre les deux éléments. La loi de comportement de Druger-Prager est utilisée pour simuler le comportement non linéaire de la matière ensilée.

La simulation est effectuée en analysant différentes zones à renforcer et à réparer en utilisant différents nombres de couches démontrant ainsi l'efficacité de l'utilisation du TFC pour le renforcement et la réparation des silos. En effet, une réduction significative des contraintes circonférentielles et méridionales est constatée notamment en zones critiques (zone de transition). Tenant compte du coût du TFC, une analyse paramétrique est ensuite menée pour définir la zone à renforcer et le nombre de couches de TFC nécessaire pour donner un renforcement optimisé. Globalement, l'analyse effectuée a permis d'aboutir à un taux de réduction de l'ordre de 30% de la contrainte avant renforcement dans les zones critiques. Par la suite, une application de cette approche a été testée pour la réparation des silos endommagés. En effet, il est apparu intéressant de proposer cette analyse numérique pour renforcer et réparer un silo altéré suite à une réduction de l'épaisseur de sa coque causée par une forte corrosion.

Les résultats obtenus ont permis de proposer une solution de réparation simple rendant ainsi au silo sa résistance initiale.

## Mots clés

Éléments finis, renforcement, réparation, matériaux composites, TFC, Druger-Prager, circonférentielles, méridionales.

## ملخص

هذا العمل يعرض التحليل بطريقة العناصر المحدودة، لتعزيز وإصلاح الصوامع المعدنية ذات منخل مركزي باستخدام المواد المركبة (TFC). هذه الصوامع موجهة لتخزين أنواع مختلفة من المواد الحبيبية (القمح والاسمنت...). نحصل على تأثير هذه المواد المخزنة على جدران الصومعة ليس فقط عبر تمثيل جدران الصوامع ولكن أيضا بتمثيل المواد المخزنة مع الأخذ بعين الاعتبار التفاعل بين العنصرين واستخدام القانون Druger-Prager لمحاكاة السلوك غير الخطي للمواد المخزنة.

نفدت المحاكاة بتحليل مختلف مواقع التعزيز والإصلاح باستخدام عدد مختلف من طبقات (TFC). هذه التحاليل وضحت فعالية استخدام (TFC) لتعزيز وإصلاح الصوامع. في الواقع تم العثور على خفض كبير للاجهادات على وجه الخصوص في المناطق الحرجة. مع الأخذ بعين الاعتبار سعر (TFC)، تم إجراء تحليل لتحديد منطقة التعزيز وعدد طبقات (TFC) المطلوبة لإنتاج التعزيز الأمثل. عموماً، بلغ حد التخفيض 30٪ بالنسبة للإجهاد قبل الإصلاح. بعدها، تم اختبار تطبيق هذا النهج لإصلاح صوامع تالفة. في الواقع، يبدو اقتراح هذا التحليل الرقمي مثيراً للاهتمام لتعزيز وإصلاح الصوامع التي تعرضت إلى خفض سماكة جدرانها بسبب التآكل القوي. النتائج المتحصل عليها سمحت باقتراح حل بسيط لإصلاح الصومعة لإعادة قوتها الأصلية.

### كلمات المفاتيح

الصوامع، العناصر المحدودة، تعزيز، إصلاح، منخل مركزي، المواد المركبة، (TFC)، Druger-Prager، الاجتهادات.

### Abstract

This thesis presents, a numerical analysis of the reinforcement and reparation of steel slender silos having concentric hopper with carbon fiber-reinforced polymer (CFRP). The numerical model has been developed using the finite element method. The actions of the stored material over the silo wall were obtained by simultaneously modeling the silo, and the stored material. The interaction between both materials was properly simulated. The Drucker Prager elastoplastic criterion was used to define the behaviour of the stored material. The simulations analysed the influence of different reinforcement layers and their placement.

In all cases, the effectiveness of the CFRP used for reinforcing and repairing steel slender silos was obtained. Indeed, a significant reduction of the circumferential and meridional stresses, especially for the bin – hopper junction was also obtained. Taking into account the cost of the CFRP, a parametric analysis is then conducted to define the reinforced zone and the number of CFRP layers required to produce an optimized reinforcement. The results shows that the reduction rate obtained of stresses in the silo are about 30% compared to a silo with non-reinforced or repaired wall. Subsequently, an application of this approach was tested for the repair of damaged silos. Indeed, it seemed that, the reinforcement and the reparation with CFRP can be of interest for silos having suffered damage and alterations that induced a reduction in the thickness of their walls.

### Keywords

Silos, numerical analysis, reinforcement, reparation, concentric hopper, Drucker Prager, circumferential, meridional, stresses, CFRP.

# SOMMAIRE

<b>Liste des figures</b> .....	III
<b>Liste des tableaux</b> .....	VII
<b>Introduction générale</b> .....	01
<b>CHAPITRE 1 : Renforcement et réparation et des structures</b> .....	
<b>I.1 Introduction</b> .....	04
<b>I.2 Définitions</b> .....	04
I.2.1 Le renforcement .....	04
I.2.2 La réparation .....	04
<b>I.3 Endommagement des structures en béton</b> .....	05
<b>I.4. Techniques de réparation des structures en béton</b> .....	05
<b>I.5. Endommagements des structures métalliques</b> .....	06
<b>I.6. Techniques de réparation des structures en charpente métallique</b> .....	07
<b>CHAPITRE II : Les matériaux composites</b> .....	11
<b>II.1 Introduction</b> .....	11
<b>II .2 Définition</b> .....	11
<b>II.3 Les caractéristiques générales des matériaux composites</b> .....	12
<b>II.4. Les constituants d'un matériau composite</b> .....	12
II.4.1.Les matrices .....	12
II.4.2.Les renforts.....	13
II.4.2.1. Les fibres de carbone.....	14
II.4.2.2. Les fibres de verre .....	15
II.4.2.3. Les fibres d'aramides.....	16
II.4.3. Les caractéristiques générales des fibres et des renforts.....	16
II.4.4. Forme des renforts .....	17
<b>II.5. Les laminés composites</b> .....	19
<b>II.6. Définition de l'orthotropie dans le cas des contraintes planes</b> .....	22

<b>CHAPITRE III : Les silos</b> .....	23
<b>III.1 Introduction</b> .....	23
<b>III.2 Définition</b> .....	23
<b>III.3. Modes d'écoulement de la matière granulaire dans les silos</b> .....	24
<b>III.4. Paramètres influençant sur les pressions dans les silos</b> .....	25
III.4.1. la vitesse d'écoulement .....	26
III.4.2. La variation des caractéristiques physiques et mécaniques de la matière ensilée .....	26
III.4.3. Nature des parois des silos .....	27
III.4.4. La vidange des silos .....	28
<b>III.5. Sollicitations agissant sur les parties principales des silos</b> .....	29
III.5.1. Parois cylindriques .....	29
III.5.2. La trémie conique .....	30
III.5.3. La jonction - transition .....	31
III.5.4. Le toit conique .....	31
<b>III.6. Les méthodes utilisées pour le calcul et le dimensionnement des silos</b> ...	32
III.6.1. Introduction .....	32
III.6.2. Méthodes analytiques .....	33
III.6.2.1. Théories de calcul des silos .....	33
III.6.2.2 Les normes de calcul des silos .....	35
III.5.3. Méthodes numériques .....	36
<b>III.7. Objectifs</b> .....	37
 <b>CHAPITRE IV : Aspect développement</b> .....	 38
<b>IV.1. Introduction</b> .....	38
<b>IV.2. Les normes Eurocode</b> .....	38
IV.2.1. Eurocode 1- partie 4 .....	39
IV.2.1.1. Différents paramètres intervenant dans la détermination des actions .....	40
IV.2.2. Calcul des actions de la matière ensilée par les formules de l'Eurocode ...	45
IV.2.2.1. Action de remplissage .....	45
IV.2.2.2. Action due à la vidange .....	47
<b>IV.3 Méthode des éléments finis</b> .....	49

IV.3.1 Introduction.....	49
IV.3.2. Présentation du code de calcul utilisé « ABAQUS » .....	50
IV.3.3. Présentation des différents types d'éléments dans ABAQUS....	50
IV.3.4 Interactions de contact.....	51
IV.3.4.1. Interactions normales à la surface de contact.....	52
IV.3.4.2. Interactions tangentielles à la surface de contact .....	52
IV.3.4.3. Gestion des contacts sous ABAQUS .....	53
IV.3.5. Lois de comportement de la matière entreposée.....	54
IV.3.5.1 Introduction.....	54
IV.3.5.2 Lois de comportement utilisées dans les anciens travaux .....	54
IV.3.5.3 Loi élastique –plastique.....	55
IV.3.5.4 Le modèle Drucker-Prager .....	56
IV.3.5.5 Modèle Drucker Prager dans ABAQUS .....	58
IV.3.6. Modélisation du remplissage et de la vidange sur ABAQUS.....	60
 <b>CHAPITRE V : Analyses et résultats</b> .....	 63
<b>V.1. Introduction</b> .....	63
V.2 Résultats obtenues dans le cas du renforcement .....	64
V.2.1. Modélisation .....	64
V.2.1.1. Géométrie et caractéristiques du model analysé .....	64
V.2.1.2. Paramètres du modèle numérique d'analyse .....	66
A. Lois de comportement de la matière granulaire (blé) .....	66
B. Densité de maillage pour une solution stable.....	67
C. Caractéristiques de la matière (blé), angle de dilatation et module d'élasticité.....	69
D. Type d'analyse utilisé et méthode de simulation du remplissage et de la vidange du silo.....	72
E. Modélisation du matériau composite TFC.....	73
V.2.2. Analyse du renforcement du silo .....	74
V.2.2.1.Phase de remplissage du silo.....	75
A. Renforcement de tout le silo .....	75
B. Recherche de la zone optimale à renforcée .....	79



B.1. Renforcement de la localisation N°1.....	80
B.2. Résultats obtenus pour les localisations N° 2,3 et 4 .....	82
C. Comparaison globale des rapports des contraintes.....	83
V.2.1.2. Phase de la vidange du silo .....	86
A. Surpression due à la vidange des silos .....	86
B. Renforcement de tout le silo .....	87
C. Comparaison globale des rapports des contraintes .....	90
<b>V.3. Réparation des silos par les matériaux composites (TFC).....</b>	<b>93</b>
V.3.1. Introduction .....	93
V.3.2. Géométrie et caractéristiques du silo à réparer .....	94
V.3.3. Analyse de dimensionnement du silo .....	96
V.3.4. Modélisation .....	97
V.3.5. Résultats des contraintes circonférentielles et méridionales par les deux méthodes de calcul (MEF et Eurocode) .....	100
V.3.6. Réparation du silo par le tissu de fibre de carbone .....	101
V.3.7. Conclusion .....	102
<b>V.4. Conclusions et perspectives.....</b>	<b>103</b>

## Liste des figures

Figure	Titre	Page
I.1	Exemple de la mise en place de plaques de renfort d'un élément de cornières	09
I.2	Détails de mise en place de renforts de poutre à larges ailes	09
II.1	Phases constituant le matériau composite	11
II.2	Organigramme des différentes familles des matrices	13
II.3	Organigramme des différentes familles des fibres	14
II.4	Tissus en fibre de carbone	14
II.5	Tissus en fibre de verre	15
II.6	Tissus en fibre d'aramide	16
II.7	Fibres de carbone : (a) en rouleaux unidirectionnels, (b) en bobines de fils, (c) en rouleaux de tissu 2D équilibré	18
II.8	Orientation des couches d'un laminé orthotrope	21
III.1	Silos de stockage des grains	23
III.2	Les parties constituant les silos à trémie	24
III.3	Représentation des modes d'écoulement.	25
III.4	Flambement d'une coque cylindrique sous compression axiale	30
III.5	Éclatement d'un silo à assemblage mal détaillé	30
III.6	Flambement du pied d'éléphant dans un réservoir	30
III.7	Flambement des parois ondulées d'un silo non raidie sous compression verticale	30
III.8	Flambement au-dessus du support des parois des silos à bague raidie	30
III.9	Trémie fendue sur les joints méridionaux	31
III.10	Compression de la bague de la transition à cause de la tension supérieure de la trémie	31
III.11	Modes de chute plastique pour les toits coniques à coque mince	32
III.12	Toit conique après claquement à travers le flambement	32
III.13	Flambement de la paroi cylindrique et du toit conique sous le vent	32
IV.1	Les caractéristiques physiques des silos	39

IV.2	Types d'écoulement pendant la décharge, silo à trémie conique (a) et trémie allongée (b).	44
IV.3	les différentes actions sur les silos	46
IV.4	Actions sur la trémie et forces de traction au sommet	47
IV.5	Modélisation de la coque du silo (a) et de la matière granulaire (b)	49
IV.6	Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque d'ABAQUS	51
IV.7	Pénétration de la surface maîtresse	52
IV.8	Modèle de Coulomb pour le frottement	53
IV.9	Modèles de comportement élastoplastique	56
IV.10	Surface d'écoulement de Drucker-Prager	57
IV.11	Ecrouissage: a) Par Drucker-Prager et b) Préféré	58
IV.12	Modèle Ducker-Prager linéaire	58
IV.13	La surface limite par Drucker Prager dans le plan déviatorique	59
IV.14	La surface limite et la direction d'écoulement plastique dans le plan p-t	59
IV.15	Remplissage progressif avec une augmentation graduelle de la charge gravitationnelle	60
IV.16	Remplissage progressif avec une augmentation graduelle de la matière entreposée	61
IV.17	Courbe de la pression normale à la paroi avec les différentes méthodes de remplissage	62
V.1	Dimensions du silo analysé	65
V.2	Effet de maillage sur les pressions normales à la paroi	68
V.3	Maillage (M1) utilisé du silo (a) et de la matière granulaire (b)	68
V.4	Effet de variation de l'angle de dilatation sur les pressions normales à la paroi	70
V.5	Effet de variation du module d'élasticité sur les pressions normales à la paroi	71
V.6	Modèle coque multicouche	74
V.7	Comparaison des pressions normales à la paroi obtenues par la méthode des éléments finis et celles calculées par l'Eurocode avant le renforcement du silo	75

V.8	Comparaison des contraintes obtenues par la méthode des éléments finis et celles calculées par l’Eurocode avant le renforcement du silo	76
V.9	Renforcement de tout le silo	77
V.10	Pourcentage de réduction des contraintes pour le renforcement de tout le silo à $Z=12.5m$	78
V.11	Les différentes localisations du renforcement	80
V.12	Pourcentage de réduction des contraintes à $Z=12.5m$ - localisation N°1-	80
V.13	Comparaison des pourcentages de réduction des contraintes circonférentielles (a) et méridionales (b) pour le renforcement de tout le silo et la localisation N°1 à $Z=12.5m$	81
V.14	Les localisations (2,3 et 4) utilisées pour tester le renforcement	82
V.15	Pourcentages de réduction des contraintes circonférentielles(a) et méridionales (b) pour les localisations de renforcement 2,3 et 4 à $Z=12.5m$	83
V.16	Rapport des contraintes circonférentielles par rapport à la longueur renforcée de la trémie	84
V.17	Rapport des contraintes méridionales par rapport à la longueur renforcée de la trémie	85
V.18	Comparaison des contraintes circonférentielles (a) et méridionales (b) obtenues par la méthode des éléments finis et celles calculées par l’Eurocode (cas de la vidange du silo)	87
V.19	Renforcement de tout le silo (cas de la vidange du silo)	88
V.20	Pourcentage de réduction des contraintes pour le renforcement de tout le silo à $Z=12.5m$ (cas de vidange du silo)	89
V.21	Comparaison des pourcentages de réduction des contraintes circonférentielles (a) et méridionales (b) dans le cas de renforcement de tout le silo a $Z=12.5m$ (remplissage et vidange du silo)	90
V.22	Rapport des contraintes circonférentielles par rapport à la longueur renforcée de la trémie	91
V.23	Rapport des contraintes méridionales par rapport à la longueur renforcée de la trémie	91
V.24	Photographie de la batterie des 12 silos	94
V.25	Géométrie du silo à traiter (8m de diamètre)	96

V.26	Essai oedométrique sur les échantillons du ciment (laboratoire de travaux publics-Est-Annaba)	98
V.27	Courbes des contraintes avant réparation du silo obtenues par la méthode des éléments finis et celles calculées par l'Eurocode	100
V.28	Contraintes circonférentielles (a) et méridionales (b) avant et après réparation (1 couche) pour la localisation N°3	101

## Liste des tableaux

N°	Titre	Page
II.1	Les caractéristiques des fibres et des renforts	17
II.2	Comparaison des différents types d'architecture des fibres suivant leurs performances	18
II.3	Comparaison des différents types de tissu	19
IV.1	Classe des silos en fonction de la capacité et de l'excentricité de décharge ou de remplissage	42
IV.2	Classification des silos d'après la rugosité des parois	43
IV.3	Combinaisons des propriétés de la matière pour la détermination des différents types d'actions	43
IV.4	Caractéristiques des matières granulaires	44
V.1	Les dimensions du silo	64
V.2	Caractéristiques de l'acier utilisé	64
V.3	Nombre des éléments coque et cubique	67
V.4	Valeurs de l'angle de dilatation	69
V.5	Valeurs du module de Young	69
V.6	Caractéristiques mécaniques du blé ensilé	72
V.7	Caractéristiques mécaniques de TFC	73
V.8	Les dimensions du silo (modèle réel)	95
V.9	Caractéristiques de l'acier utilisé (modèle réel)	95
V.10	Les épaisseurs adoptées pour la partie « cylindre » du silo	95
V.11	Les épaisseurs adoptées pour la partie « trémie et couverture » du silo	95
V.12	Caractéristiques mécaniques du ciment ensilé	99

## *Introduction générale*

## Introduction générale

Les unités de stockage « comme les silos », qu'elles soient pour les besoins industriels ou agroalimentaires, ont toujours été plus que nécessaires, du fait de l'importance économique, de la disponibilité immédiate en volumes importants des matières ensilées. Ces matières peuvent être de différentes natures (ciment, sable, céréales, sucre, etc...) et leurs actions sont tout aussi différentes sur les parois des silos qui les renferment et restent en général très difficiles à évaluer, notamment lors des phases sensibles du remplissage ou de la vidange.

Par ailleurs, l'utilisation continue de ces structures, le chargement et le déchargement, les années d'utilisation (vieillessement), la corrosion, la réaffectation pour d'autres matières induisant des actions plus élevées ou plus généralement toutes actions pouvant altérer les caractéristiques mécaniques de ces structures, poussent à penser à leur maintenance (renforcement ou réparation). Il est évident que cette maintenance serait beaucoup plus intéressante si elle ne nécessitait pas un temps important d'arrêt de l'activité de ces silos. En effet et en général, les méthodes les plus utilisées pour le renforcement et la réparation des silos métalliques par exemple, est l'ajout d'éléments de structures (montants, ceintures, ou tôles) qui sont soit soudés soit boulonnés sur les zones fragilisées. Ces actions de renforcement et de réparation nécessitent dans la plupart des cas, une vidange complète du silo et évidemment ainsi l'arrêt prolongé de son exploitation pendant ce temps. Pour remédier à ce problème, il est recherché actuellement des solutions qui soient plus fiables et sécuritaires pour renforcer ou réparer ces silos tout en continuant si possible leur exploitation ou au moins en réduisant significativement le temps d'arrêt de cette exploitation.

Une solution intéressante qui est proposée actuellement concernant le renforcement et la réhabilitation de ce genre de structure (solution utilisée aussi pour d'autres structures dans le domaine des travaux publics) est l'utilisation de couches collées de polymères composites. En effet, ces derniers présentent l'avantage d'une faible densité, de caractéristiques mécaniques élevées, et une bonne résistance à la corrosion. Leur mise en œuvre est relativement facile puisqu'il suffit de coller ce matériau sur la face extérieure fragilisée en utilisant la résine, sans être obligé de décharger la structure. Cette approche de l'utilisation du composite polymère pour le renforcement des structures en génie civil a été utilisée depuis des années.

On peut citer les quelques situations suivantes :

- ❖ La réparation des structures endommagées (fissurées).



- ❖ Le renforcement des structures en raison d'une modification des charges ou pour cause de sous dimensionnement.
- ❖ Le renforcement des structures pour la modification du besoin en ductilité (nouveau zonage sismique).

L'intérêt porté à cette technique a poussé plusieurs chercheurs à proposer des modèles d'analyse numérique appliqués surtout à des structures en béton armé. Il s'agit notamment de développement du modèle numérique uniaxial de béton confiné adapté au cas des chargements monotones et cycliques en vue d'un renforcement de poteaux ou de poutres par collage d'un polymère composite appelé tissu de fibres de carbone (TFC) [1]. Cela a concerné aussi une étude expérimentale de renforcement des dalles en béton armé endommagées sous des sollicitations de membrane et de flexion dans les deux directions par le collage des bandes de tissu de fibres de carbone. Cette étude a montré l'efficacité de ce matériau dans l'augmentation de capacité portante des dalles qui peut atteindre jusqu'à 50%. D'un autre côté cela a permis une limitation de l'ouverture excessive des fissures [2]. D'autres études expérimentales et numériques du renforcement des coques métalliques par un tissu de fibres de carbone TFC [3] ont montré un accroissement significatif de la charge critique de la coque renforcée de près de 30% dès l'application d'une couche de TFC. Ainsi, on constate que le champ d'application de ce genre de renforcement s'élargit de plus en plus. Des travaux théoriques ont été publiés récemment, comme par exemple ceux étudiant le renforcement des coques métalliques cylindriques sous des déformations connues dans les silos et les réservoirs et appelées pattes d'éléphant [4]. Cependant, ce genre de renforcement n'est pas exempt de toutes critiques qui sont généralement liées à la technique de mise en place du TFC. En effet et dans le cas du renforcement des structures en acier par le TFC, il peut se poser principalement des problèmes de liaison (décollement) entre l'acier et le TFC dans le cas par exemple de la flexion des poutres en acier renforcées. D'autres problèmes peuvent aussi apparaître comme la fatigue de ces structures renforcées, le flambement des structures... etc. [5] auxquels il faudra remédier. En tout état de cause, nous pensons que cette solution reste de manière générale une bonne solution à investiguer.

C'est dans ce contexte que nous nous proposons dans ce travail de nous intéresser au renforcement et à la réparation de coque en général et plus particulièrement au cas des silos métalliques par l'utilisation d'un matériau composite polymère très utilisé actuellement : le TFC (Tissu de Fibre de Carbone).

Plus précisément, nous proposons une analyse par une approche numérique pour voir l'influence du rajout de TFC pour le renforcement des structures de type silos.

La difficulté principale dans le calcul des silos est l'évaluation des actions des matières ensilées sur les parois en raison de leurs comportements pulvérulents ou granulaires. Les méthodes qui existent actuellement pour le calcul des silos sont basées sur le règlement de l'Eurocode qui est inspiré de la méthode de Janssen. Cela permet d'évaluer les actions agissant sur les parois des silos et ainsi de les dimensionner en passant par une modélisation par éléments finis de la structure du silo. Cependant, du fait de la puissance des moyens de calcul numérique dont on dispose actuellement, d'autres approches utilisant une modélisation par éléments finis proposent de mieux évaluer ses actions en modélisant, en plus de la structure du silo, la matière ensilée elle-même en la considérant comme matière continue.

L'idée de cette approche est de considérer la matière granulaire comme continue, et grâce à ses caractéristiques, il est aussi possible d'analyser des phénomènes comme l'interaction entre la matière granulaire et les parois, les effets thermiques, les modèles d'écoulements, l'influence de plusieurs paramètres de la matière ainsi que l'influence de l'épaisseur des parois sur les pressions. L'intérêt principal de l'approche modélisant la matière ensilée est justement la possibilité de pouvoir appliquer différentes théories de comportement de la matière.

Ainsi, l'analyse sera menée en modélisant la structure du silo, les éléments de renforcement de TFC par des éléments multicouches et l'évaluation des actions se fera en modélisant réellement la matière ensilée.

## **Organisation du document**

L'ensemble de notre travail défini ci-dessus sera réparti en deux parties :

- ❖ La première partie concerne l'utilisation de la méthode des éléments finis, pour l'analyse du renforcement d'un modèle académique de silo dans le but d'obtenir une réduction des contraintes. Le but recherché étant d'optimiser le nombre de couches de TFC à utiliser et surtout leur localisation dans les zones fortement sollicitées.
  
- ❖ La deuxième partie concerne une application des résultats précédents pour la réparation ou le renforcement d'un silo réel endommagé par corrosion.

## *Chapitre I*

### *Renforcement et réparation des structures*

## **I. Renforcement et réparation des structures**

### **I.1 Introduction**

La durabilité d'un ouvrage dépend en général de nombreux paramètres : de la qualité de conception, de l'environnement d'implantation, des matériaux utilisés, de la qualité de sa réalisation ainsi que des diverses conditions d'usage, d'exploitation et de maintenance. Généralement les ouvrages résistent au temps, mais pour augmenter leur durée d'utilisation ou offrir de nouvelles fonctionnalités, ils peuvent nécessiter des opérations de renforcement ou de réparation.

### **I.2 Définitions**

#### **I.2.1. Le renforcement**

Dans le cas d'utilisation d'une structure sous des sollicitations dont on n'a pas tenu compte dans le dimensionnement, ou des conditions non prévues ou même d'un changement des conditions d'utilisation de cette structure, on doit recourir à un renforcement. Ainsi, le renforcement consiste en général à augmenter le niveau de service (augmentation de la ductilité, de la résistance). Il peut aussi concerner une anticipation à la réparation si une auscultation et un diagnostic fiable décèlent des risques de désordres futurs dans une structure.

#### **I.2.2. La réparation**

La réparation d'une structure ou d'une construction qui était endommagée ou détériorée est une opération qui consiste à lui restituer sa fonction ou bien sa forme originale, et donc une à une remise en bon état par des travaux appropriés. Cette action requiert évidemment et avant tout une évaluation de cet endommagement par un diagnostic approprié. Ce dernier peut résulter de toutes sortes de causes. Les plus fréquentes sont la dégradation progressive des matériaux (agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux etc..), l'utilisation intensive (effet de répétition des charges), l'utilisation au-delà des charges prévues, les accidents et sinistres (incendies, choc, séisme, ...) [6,7]. Dans tous ces cas la réparation a pour objet de remettre en état la structure et d'empêcher si possible le renouvellement des désordres. [8]

### I.3. Endommagements des structures en béton

On considère en général que la durée d'exploitation d'un ouvrage en béton armé est comprise entre 50 et 120 ans selon sa composition et sa fonction. Or, de nombreuses pathologies imprévues liées à l'utilisation ou à l'environnement sont susceptibles d'intervenir avant la fin de cette période. [9]. Il est actuellement difficile de dire si celle-ci est apparue pendant la construction, peu après, ou longtemps après l'analyse. Il apparaît le plus souvent qu'une dégradation n'a pas une cause unique et qu'elle est favorisée par un grand nombre de paramètres comme :

- ❖ Les erreurs de conception ou de mise en œuvre.
- ❖ Mauvais choix des composants.
- ❖ Chocs et impact de toute nature.
- ❖ Erosions et usures naturelles.
- ❖ Contraintes trop élevées.
- ❖ Vibration et travail à la fatigue.
- ❖ Effets des cycles thermiques naturels ou accidentels.
- ❖ Pollution accidentelle interne ou externe.
- ❖ Attaque du liant par les agents atmosphériques.
- ❖ Attaque des autres constituants par les agents atmosphériques.
- ❖ Phénomènes électro- chimiques [8].

### I.4. Techniques de réparation des structures en béton

Les techniques de réparations et/ou renforcements structuraux des ouvrages en béton ou en béton armé consiste généralement à :

- ❖ Ajout de matières comme le béton projeté.
- ❖ Ajout de forces comme le cas de la précontrainte additionnelle.
- ❖ Ajout des renforts collés (plaques métalliques ou composites).

#### I.4.1. Réparation par béton projeté

Cette technique consiste à projeter du béton convenablement dosé sur un support préalablement sablé.

La technique du béton projeté implique des moyens importants contrairement aux techniques traditionnelles. Il existe deux techniques de projection : la projection par voie humide et la projection par voie sèche. Sous l'effet de la vitesse de projection et des accélérateurs de prise,

ou raidisseurs, qui y sont inclus, le béton s'accroche très solidement sur le support et forme avec lui une structure homogène. [7,9] Néanmoins, le béton projeté nécessite des camions-ateliers sur lesquels est monté un compresseur de grande taille.

#### **I.4.2. Réparation par précontrainte additionnelle**

La technique de réparation par précontraintes additionnelles concerne l'utilisation des câbles de précontrainte ou des torons gainés ou graissés placés soit à l'intérieur soit à l'extérieur de l'ouvrage, ce dernier aspect facilite leur surveillance. L'élément de renfort apporte une compression additionnelle dans les zones tendues.

Cette technique est particulièrement adaptée pour réparer des poutres dont la résistance à la flexion ou à l'effort tranchant est insuffisante. [9]

#### **I.4.3. Renforcement par collage de plats métalliques**

La technique du collage acier – béton présente l'avantage d'être économique. Sa mise en œuvre est relativement facile et simple car la structure subit peu de modifications géométriques.

Premièrement, le béton subit l'opération de sablage, ensuite les plats métalliques seront collés à l'aide d'une résine bien choisie suivant la qualité de renfort et du béton, finalement les éléments seront serrés.

Cette technique s'est développée au début des années soixante suite de l'apparition sur le marché des colles de type résines époxyde possédant des caractéristiques d'adhésion élevée et susceptible de transmettre des efforts non négligeables. [9]

### **I.5. Endommagements des structures métalliques**

Il existe plusieurs formes de dégradations à examiner en ce qui concerne les ouvrages métalliques. Principalement, il s'agit de la corrosion, du jeu dans les assemblages et des efforts de fatigue.

#### **I.5.1. La corrosion**

La corrosion des structures métalliques est un phénomène naturel et courant et désigne l'altération par réactions chimiques avec un oxydant en formant la rouille. C'est surtout le milieu marin qui est réputé être le plus corrosif pour les structures métalliques.

Les symptômes sont : Une surface oxydée, piquée, d'aspect rouge brun typique, dans ce cas la surface endommagée s'en trouve réduite.

Il est évident que dans ce genre de situation, la réduction d'épaisseur de la surface engendre forcément une augmentation des contraintes et donc une diminution de la résistance de l'élément corrodé.

### **I.5.2. La prise de jeu des assemblages**

Les assemblages des structures métalliques se réalisent généralement par les boulons ou la soudure. Les deux moyens d'assemblage ont chacun leurs points faibles. Il s'agit pour l'opération de soudage, d'un affaiblissement de la résistance statique de l'assemblage, un risque d'initiation de fissure par fatigue, ou même des ruptures fragiles. Pour les assemblages boulonnés, les principales pathologies peuvent être les défauts de pose, la corrosion, et le glissement des pièces suite au dépassement de la résistance de l'assemblage.

Ainsi, la déconsolidation des assemblages boulonnés ou rivés (suite à un serrage insuffisant) se matérialise par des mouvements entre pièces (jeu d'assemblage) souvent mis en évidence par la rupture du film de protection anticorrosion. Ces observations peuvent être localisées à un ou plusieurs boulons ou rivets, ou encore entre les pièces de l'assemblage.

De plus, les assemblages peuvent créer des zones d'accumulation des contraintes très élevées. Celles des ouvrages et éléments en acier qui supportent des charges transitoires doivent être vérifiées régulièrement.

### **I.5.3. L'effet de fatigue**

En général on définit la fatigue par la modification des propriétés mécaniques locales d'un matériau sous l'action des contraintes ou des déformations variables dans le temps. C'est aussi la rupture d'un élément de structure sous efforts répétés et variables. Les symptômes sont de petites stries perpendiculaires à la direction des contraintes.

Si les fissures de fatigue ne sont pas détectées et décelées, elles peuvent provoquer l'effondrement de l'ouvrage sans aucun signe précurseur.

## **I.6. Techniques de réparation des structures en charpente métallique**

### **I.6.1. Assurer la propreté de l'ouvrage**

La protection des sections corrodées s'effectue par le balayage et le nettoyage à l'air comprimé ou par aspiration aux endroits accessibles, car la corrosion sera fortement accélérée

si on laisse s'accumuler les saletés sur l'élément considéré. Ce nettoyage se fera aussi sur les endroits les moins accessibles et à intervalles réguliers.

### **I.6.2. La peinture**

La peinture est une technique de protection de surface utilisée depuis très longtemps. C'est le mode universel de protection de l'acier contre la corrosion. L'obtention d'une épaisseur suffisante de peinture est souvent obtenue par l'application de plusieurs couches successives.

Les étapes à suivre pour réussir cette méthode de réparation sont les suivantes :

- ❖ Le nettoyage de la surface à protéger : c'est l'étape principale de cette méthode de réparation, car la durée de la protection étant d'autant plus longue que, le nettoyage a été plus soigné.
- ❖ Appliquer la première couche de peinture avant que la surface ne soit salie à nouveau.
- ❖ Vérifier après chaque couche de peinture qu'il ne reste pas de vides, de manques et de cloques qu'il conviendrait de retourner (il convient d'utiliser des couleurs différentes pour faciliter les vérifications).
- ❖ Vérifier l'épaisseur des différentes couches.

### **I.6.3. Le zingage**

Ce revêtement est utilisé pour obtenir une protection plus durable que celle fournie par les procédés classiques de peinture. C'est le traitement d'une surface d'acier en y apposant une couche de zinc remplissant une fonction de protection anticorrosion.

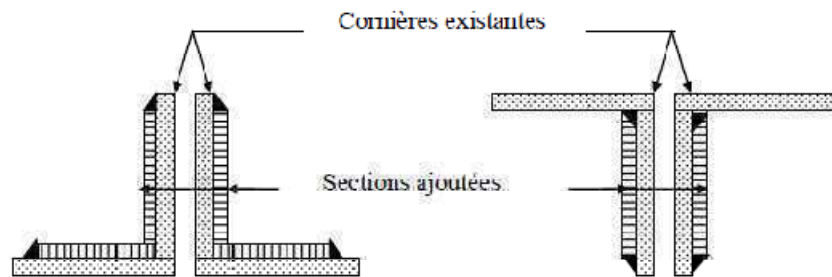
La couche de zinc est protégée elle-même par une bonne peinture dans les climats humides ou tropicaux. Les opérations de pliages, le brûlage ou les soudures doivent être effectuées avant le zingage, car elles brûlent ou écaillent le zinc protecteur.

### **6.4. Le placage**

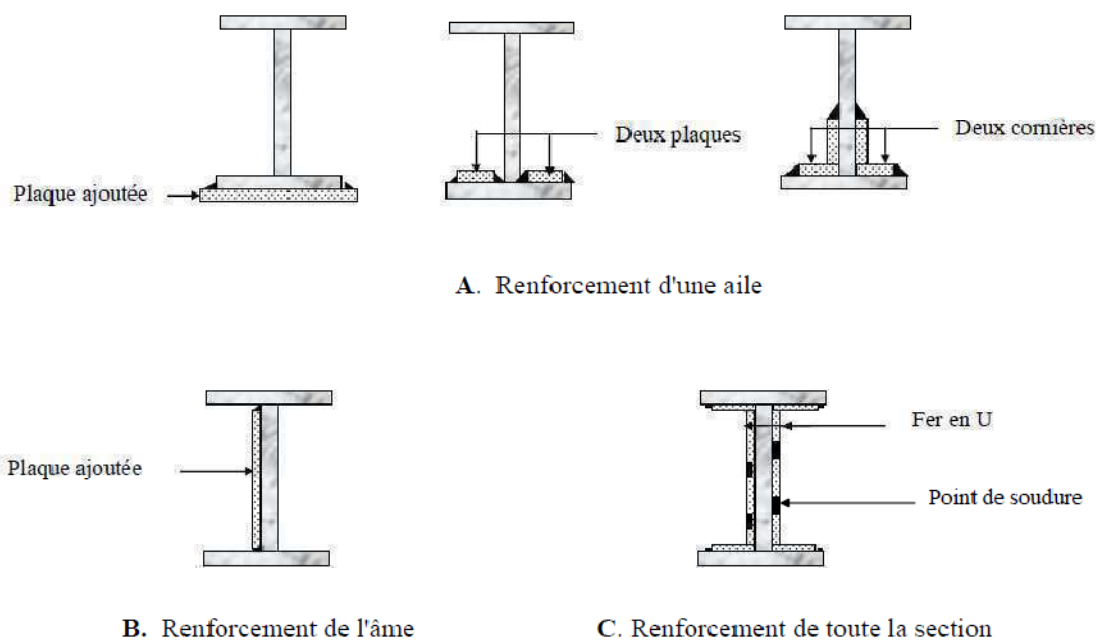
Il est possible de renforcer une structure métallique en augmentant la section de ses éléments les plus faibles par ajout d'un profilé ou d'une tôle. Lorsque l'abrasion et la corrosion sont limitées à quelques éléments ou parties d'éléments d'ouvrage, une manière commode et économique de compenser la diminution de section est d'ajouter des nouvelles sections sur les pièces détériorées. L'ajout de matière peut aussi être réalisé par des éléments plats au niveau



des âmes et des membrures des profilés (**Fig.I.1** et **I.2**). L'assemblage pourra être effectué par soudage, par rivetage ou boulonnage. [7]



**Fig.I.1.** Exemple de la mise en place de plaques de renfort d'un élément de cornières. [7]



**Fig.I.2.** Détails de mise en place de renforts de poutre à larges ailes. [7]

### I.6.5. Réparation par soudage, boulonnage

Pour réaliser la réparation par les deux méthodes : zingage ou bien placage, on doit utiliser soit la soudure soit le boulonnage.

Ces deux types de réparation sont les techniques les plus utilisées pour la réparation des structures en charpente métallique.

La première technique (la soudure) est considérée comme étant le moyen le plus souple et le plus efficace pour réparer ou renforcer un ouvrage. C'est une opération d'assemblage qui assure la continuité métallique de deux pièces par phénomène de fusion locale.

La deuxième technique (le boulonnage) peut être utilisée pour certains petits ouvrages. Elle permet d'éviter tout assemblage soudé.

- Ces méthodes classiques de renforcement et de réparation des structures sont très lourdes à mettre en œuvre et donc coûteuses.

Dans les dernières années, l'utilisation de la technique de polymère composite pour la réparation et le renforcement des structures est devenue à la mode en raison de son attrait lié à sa facilité de mise en place. [2]

Plusieurs travaux de recherche ont été effectués sur des modèles réduits ou de dimensions réelles sur des structures en béton ou en charpente métallique renforcés en utilisant cette technique. Ces tests ont montrés l'efficacité de l'utilisation des matériaux composites pour augmenter la capacité portante de ces structures.

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels tels que légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de forme. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains éléments grâce à leurs propriétés. Ils offrent une meilleure isolation thermique et pour certains d'entre eux une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger les structures et de réaliser des formes complexes aptes à remplir plusieurs fonctions. [10]

La plupart des renforts composites utilisés dans le génie civil sont des composites carbone – époxyde ou verre –époxyde. Leurs performances mécaniques spécifiques sont en effet supérieures à celles de l'acier, principalement la résistance à la traction et à la compression. [9]

Le chapitre qui suit concernera cette technique, il contient les différentes informations : composition, caractéristiques et types des matériaux composites.

## *Chapitre II*

### *Les matériaux composites*

## II. Les matériaux composites

### II.1. Introduction

L'utilisation des matériaux composites s'est développée depuis des années dans tous les domaines et surtout ceux du génie civil et des travaux publics. Ces matériaux sont utilisés pour la réparation ou le renforcement des structures endommagées. L'utilisation des matériaux composites offre aux industriels et aux concepteurs des possibilités nouvelles d'associer fonction, forme et matériau au sein de la réalisation. [10]

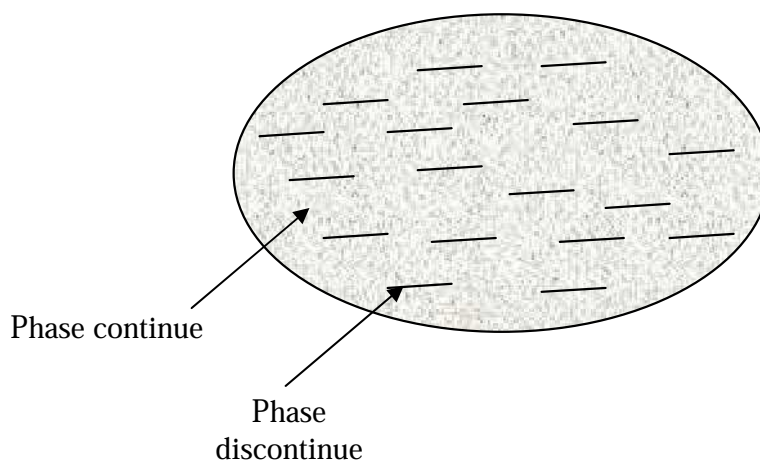
Vu les avantages que ces matériaux offrent du point de vue gain de masse, et mise en forme de pièces complexes ainsi que la grande résistance à la fatigue, ils sont de ce fait très utilisés, et encore davantage au fur et à mesure que s'accumulaient plus de connaissances concernant leurs processus de fabrication, leurs caractéristiques mécaniques et physiques ainsi que leur durabilité et comportement sous chargement. [3]

### II.2. Définition

En général, le mot " composite " signifie, constitué de deux ou plusieurs parties différentes. Les matériaux composites sont des matériaux performants constitués de plusieurs composants élémentaires dont l'association leur confère des propriétés qu'aucun des composants pris seules, ne possède.

Ce matériau est constitué de deux phases (**Fig.II.1**) :

- ❖ Une phase continue appelée : matrice.
- ❖ Une phase discontinue (dispersée) appelée : renfort.



**Fig.II.1.** Phases constituant le matériau composite.

### II.3 Les caractéristiques générales des matériaux composites

Ce sont les renforts qui assurent la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité) du matériau composite, leurs propriétés mécaniques sont supérieures à celles de la matrice, qui a le rôle de lier les fibres.

Les propriétés des matériaux composites résultent des propriétés des matériaux constituants, de leurs distributions géométriques, et de leurs interactions. En général, la concentration des renforts est mesurée en fraction massique ou volumique. Cependant, dans le cas d'une distribution uniforme l'homogénéité est assurée, contrairement à la distribution non uniforme, où la rupture peut être initiée dans les zones pauvres en renforts conduisant automatiquement à la diminution de la résistance du composite. [10]

Ainsi, il sera nécessaire de spécifier certains paramètres pour la construction de la structure du matériau composite. Nous citons par exemple:

- ❖ La nature et les propriétés des constituants.
- ❖ La texture, la forme et la distribution des renforts.
- ❖ Le taux de renforcement (concentration en renforts).
- ❖ La qualité de l'interface: matrice-renfort.
- ❖ La qualité de la résine.
- ❖ La géométrie de la pièce à réaliser.
- ❖ Le procédé de mise en œuvre utilisé.

*Pour une bonne utilisation de ce genre de matériau, il est toujours recherché à orienter au mieux les renforts en fonction des efforts auxquels la structure est soumise.*

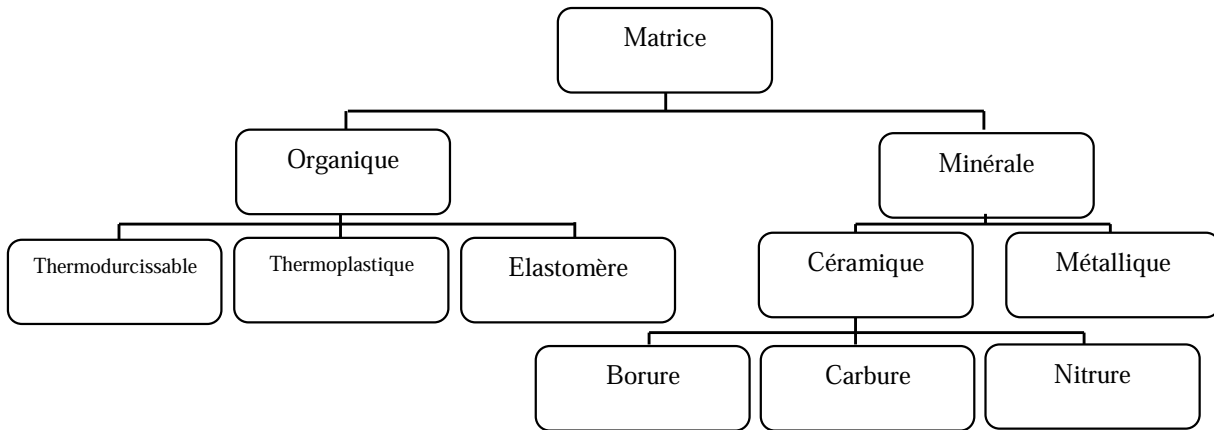
### II.4. Les constituants d'un matériau composite

#### II.4.1. Les matrices

C'est la partie continue du matériau composite, son rôle est de:

- ❖ Lier les fibres entre elles.
- ❖ Transférer les charges mécaniques aux fibres.
- ❖ Protéger les fibres de l'environnement extérieur.

Les matrices sont originaires de deux familles: organique et minérale. Comme cela est présenté sur l'organigramme suivant :



**Fig. II.2.** Organigramme des différentes familles des matrices. [11]

La matrice elle-même est composée d'une résine (polyester, époxy, etc.) et des charges, dont le but est d'améliorer les caractéristiques de cette résine. L'ensemble résine-charge se comporte comme un matériau homogène. Elles doivent avoir une bonne compatibilité, leurs caractéristiques mécaniques et leur masse volumique doivent être spécifiquement élevées, et la résine doit être assez déformable.

Les types des résines qui sont actuellement utilisés sont:

- ❖ Les résines thermodurcissables (TD) comme les résines polyesters insaturés, les époxydes, les vinylesters, phénoliques et polyimides.
- ❖ Les résines thermoplastiques (TP) comme le polypropylène, le polyamide, le polyétherimide, et le poly (sulfure de phénylène).

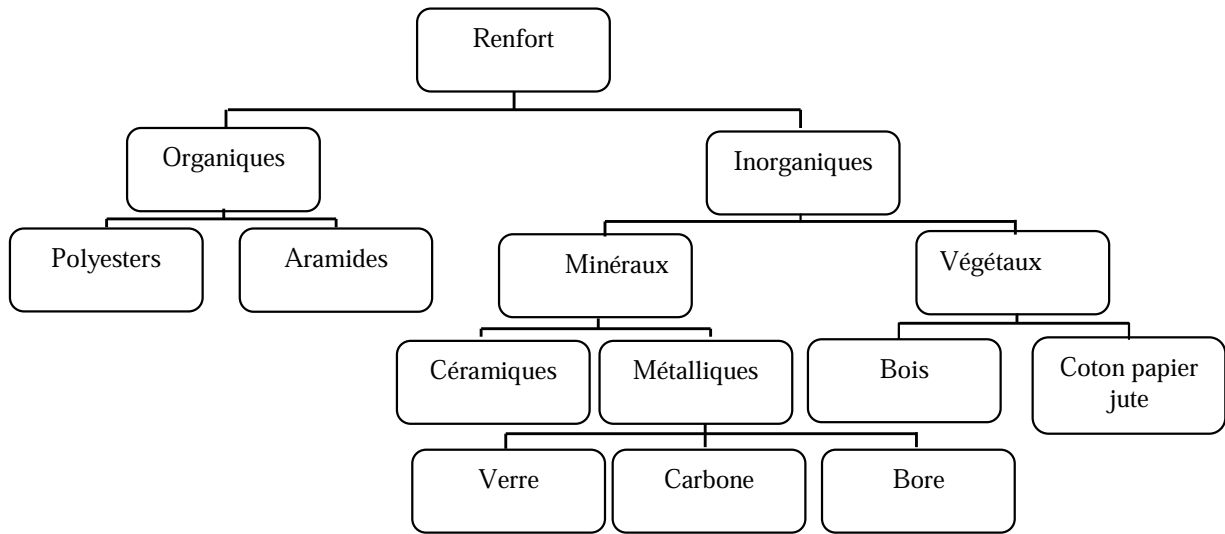
#### II.4.2. Les renforts

La partie discontinue constituant le matériau composite (les renforts) contribue à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites. Elle est souvent de nature filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques de diamètre compris entre 5 et 15  $\mu\text{m}$ ). Généralement, elles possèdent une bonne résistance à la traction, mais une résistance faible à la compression.

Les renforts peuvent être classés selon:

- ❖ La nature de la fibre: minérale ou organique (**Fig. II.3**).

- ❖ Leur forme : on trouve des fibres courtes (0,1 - 1 mm), longues (1 - 50 mm) ou continues (> 50 mm).
- ❖ leur disposition : Tissé ou non tissé (en vrac).



**Fig. II.3.** Organigramme des différentes familles des fibres. [11]

Parmi les fibres les plus utilisés, on trouve :

#### II.4.2.1. Les fibres de carbone

Suivant les conditions de fabrication, il existe toute une variété de fibres de carbone que l'on peut actuellement classer selon trois types :

- ❖ Les fibres à haute résistance HR.
- ❖ Les fibres à module intermédiaire IM.
- ❖ Les fibres à haut module HM.



**Fig. II.4.** Tissus en fibre de carbone. [12]

Ils se composent de fibres extrêmement fines d'environ 5 à 10 micromètres de diamètre, et sont composés principalement d'atomes de carbone.

Les fibres de carbone sont produites à partir de précurseurs à base de polyacrylonitrile (PAN). Ils possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques : une faible densité (1,7 à 1,9), une résistance élevée à la traction, une flexibilité, et une bonne conductivité électrique et thermique. En outre, il faut noter que les fibres de carbone ont une excellente tenue à haute température. En effet, leurs caractéristiques mécaniques sont maintenues jusqu'à 1500°C environ. Cette propriété a conduit à développer des composites : fibres de carbone/matrice de carbone, à haute tenue thermique, utilisés dans les tuyères de fusées, les éléments de fours. Ces matériaux revêtus d'une couche protectrice antioxydante trouvent également des applications en atmosphère oxydant dans le domaine spatial.

#### II.4.2.2. Les fibres de verre

Les fibres de verre constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Ce sont des filaments de verre extrêmement fins. [10]. Les conditions de refroidissement et de vitesse d'étirage permettent d'obtenir, soit des filaments continus, soit des fibres discontinues.

Il existe trois types des fibres de verre :

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).



**Fig. II.5.** Tissus en fibre de verre. [13]

Il est intéressant de noter que les fibres de verre conservent leurs caractéristiques mécaniques jusqu'à des températures relativement élevées, de l'ordre de 200°C pour le verre du type E et de 250°C pour le verre du type R. Ces fibres sont donc bien adaptées pour le renforcement des



résines à tenue thermique élevée. Parmi les autres propriétés, citons l'inertie chimique, la résistance aux chocs, l'isolation,...

#### II.4.2.3. Les fibres d'aramides

Les polyamides aromatiques, où aramides connus sous le nom de « Kevlar » est une classe de matériaux résistant à la chaleur et/ou présentant de bonnes propriétés mécaniques. Ils ne peuvent être utilisés que comme fibres.

Les fibres d'aramide disposent d'une certaine légèreté, des bonnes propriétés mécaniques en traction, de bonnes résistances aux chocs et à l'abrasion, une résistance au feu (faible combustibilité), résistance à la chaleur (ne fondent pas), et aux solvants organiques (exemple : carburants).



**Fig. II.6.** Tissus en fibre d'aramide. [14]

Néanmoins, leur utilisation est limitée pour diverses faiblesses dues à leur faible résistance à la compression, la flexion, au flambement, et la grande difficulté à couper (résistance au cisaillement) ou à usiner, la reprise d'humidité importante, une adhérence moyenne entre matrice et fibre, et à un prix élevé.

#### II.4.3. Les caractéristiques générales des fibres et des renforts

Le tableau (**Tab.II.1**) suivant résume les caractéristiques des différents types des renforts cités dans la partie précédente :

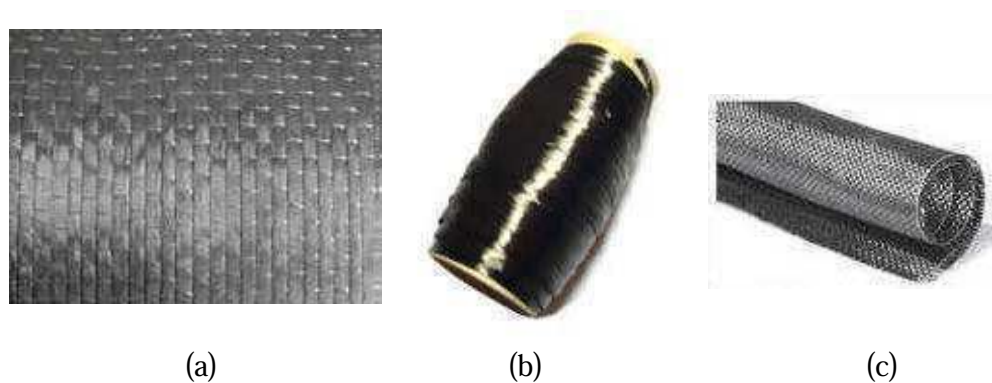
**Tab.II.1.** Les caractéristiques des fibres et des renforts. [11]

Renforts	Diamètre du filament ( $\mu\text{m}$ )	Masse volumique ( $\text{kg}/\text{mm}^3$ )	Module d'élasticité longitudinal ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	Module de cisaillement ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	Coefficient de poisson	Contrainte de rupture (traction) ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )	Allongement à la rupture (%)	Coefficient de dilatation thermique
	D	Mv	E	G	$\nu$	G	A	u
Verre E	16	2600	74 000	30 000	0.25	2 500	3.5	$0.5^\circ 10$
Verre R	10	2500	86 000		0.2	3 200	4	$0.3^\circ 10$
Carbone HM	6.5	1800	390 000	20 000	0.35	2 500	0.6	$0.08^\circ 10$
Carbone HR	7	1750	230 000	50 000	0.3	3 200	1.3	$0.02^\circ 10$
Kevlar 49	12	1450	130 000	12 000	0.4	2 900	2.3	$0.2^\circ 10$

#### II.4.4. Forme des renforts

Il est très connu que la pièce du matériau composite n'est pas nécessairement sollicitée de la même façon d'une direction à une autre. Ainsi c'est surtout l'architecture et l'orientation des fibres qui permet de renforcer cette dernière dans les directions selon lesquelles elle est la plus sollicitée. Cependant, les fibres étant de diamètre microscopique (quelques micromètres), donc, leur disposition une à une n'est naturellement pas envisageable. Elles sont donc fournies sous la forme de semi-produits pouvant être de plusieurs types soit:

- ❖ Des plis ou nappes, pouvant être unidirectionnels (toutes les fibres sont parallèles), ces plis sont fournis en rouleaux (**Fig. II.7 (a)**).
- ❖ Des fils formés de nombreuses fibres tressées entre elles, fournis en bobines (**Fig. II.7(b)**).
- ❖ Des tissus plans bidirectionnels préfabriqués à l'aide de ces fils, fournis en rouleaux (**Fig. II.7(c)**).



**Fig. II.7.** Fibres de carbone : (a) en rouleaux unidirectionnels, (b) en bobines de fils, (c) en rouleaux de tissu 2D équilibré. [15]

Le tableau (**Tab.II.2**) présente une comparaison des différentes architectures des fibres suivant leurs performances :

**Tab.II.2.** Comparaison des différents types d'architecture des fibres suivant leurs performances. [10]

Architecture des fibres	Comportement mécanique recherché	Orientation de la tenue mécanique	Taux maximal de renfort	Type de fibre
Fibres coupées et broyées	Moyen	quelconque	30%	verre
Mats fibres coupées	Moyen	quelconque	30%	Verre ou carbone
Mats fibres continues	Moyen	orientée	30%	verre
Fibres continues	Intermédiaire	unidirectionnelle	50% a 70%	toutes
Tissus	Fort	Bi ou tri directionnelle	30%a 70%	toutes
Nappes	Très fort	Unidirectionnelle (bidirectionnelle si superposition)	50% a 85%	toutes

Ainsi, nous présentons sur le tableau (**Tab.II.3**) une comparaison entre les différents types des tissus :

**Tab.II.3.** Comparaison des différents types de tissu [3]

Caractéristiques	Tissus avec des fibres de verre	Tissu avec des fibres d'aramide	Tissu avec des fibres de carbone
Résistance à la traction	Très bonne	Très bonne	Très bonne
Résistance à la compression	Bonne	Faible	Bonne
Raideur	Faible	Grande	Très grande
Résistance à la fatigue statique	Faible	Bonne	Excellente
Résistance à la fatigue cyclique	Assez bonne	Bonne	Excellente
Densité	Assez faible	Très faible	Faible
Résistance aux produits chimiques	Faible	Bonne	Très bonne
Coût	Bon	Assez cher	Cher

- ❖ A partir de ce qui a été déjà vu et d'après le tableau (**Tab.II.3**), on peut conclure que ce sont les tissus de fibres de carbone qui sont souvent retenus pour la confection d'un composite. Ses caractéristiques mécaniques optimales comparativement aux autres tissus de différentes fibres sont confortées par une excellente résistance à la fatigue et aux sollicitations dynamiques. [3]

## II.5. Les laminés composites

Un laminé ou bien stratifié est constitué d'un empilement de monocouches (éléments de base de la structure composite), ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. On peut aussi définir le laminé comme étant un ensemble ordonné de couches d'orientations et d'épaisseurs données, constituées de divers matériaux. Une couche d'un laminé est souvent appelée un lamina ou une strate.

Parmi les propriétés essentielles des matériaux composites est le caractère directionnel de leurs propriétés mécaniques. Ainsi, ces propriétés ne sont pas les mêmes dans toutes les directions (direction de renfort et direction perpendiculaire). Ainsi lorsqu'il s'agit de les analyser ou de les modéliser, on utilise généralement une loi de comportement élastique orthotrope.

Ainsi, le milieu orthotrope est celui qui possède trois plans de symétrie orthogonaux, son comportement élastique est alors défini par neuf coefficients dans le tenseur d'élasticité.

La loi de comportement d'un matériau orthotrope élastique en déformation infinitésimale, exprimée dans le repère d'orthotropie du matériau, s'écrit [16]:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{13} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{23} & 0 & 0 & 0 \\ \bar{C}_{13} & \bar{C}_{23} & \bar{C}_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{bmatrix}$$

$$\text{Avec: } \bar{C}_{11} = \frac{1 - \nu_{23}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta}; \bar{C}_{12} = \frac{\nu_{21} + \nu_{31}\nu_{23}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{12} + \nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_3 \Delta}; \bar{C}_{13} = \frac{\nu_{31} + \nu_{21}\nu_{32}}{E_2 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{13} + \nu_{12}\nu_{23}}{E_1 E_2 \Delta}$$

$$\bar{C}_{22} = \frac{1 - \nu_{13}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta}; \bar{C}_{23} = \frac{\nu_{32} + \nu_{12}\nu_{31}}{E_1 E_3 \Delta} = \frac{\nu_{23} + \nu_{21}\nu_{13}}{E_1 E_2 \Delta}; \bar{C}_{33} = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21}}{E_1 E_2 \Delta}$$

$$\bar{C}_{44} = G_{23}, \bar{C}_{55} = G_{31}, \bar{C}_{66} = G_{12}$$

$$\Delta = \frac{1 - \nu_{12}\nu_{21} - \nu_{23}\nu_{32} - \nu_{13}\nu_{31} - 2\nu_{21}\nu_{32}\nu_{13}}{E_1 E_2 E_3}$$

$$\nu_{ji} = \frac{E_j}{E_i} \nu_{ij} \quad (\text{Pour } i, j = 1, 2, 3)$$

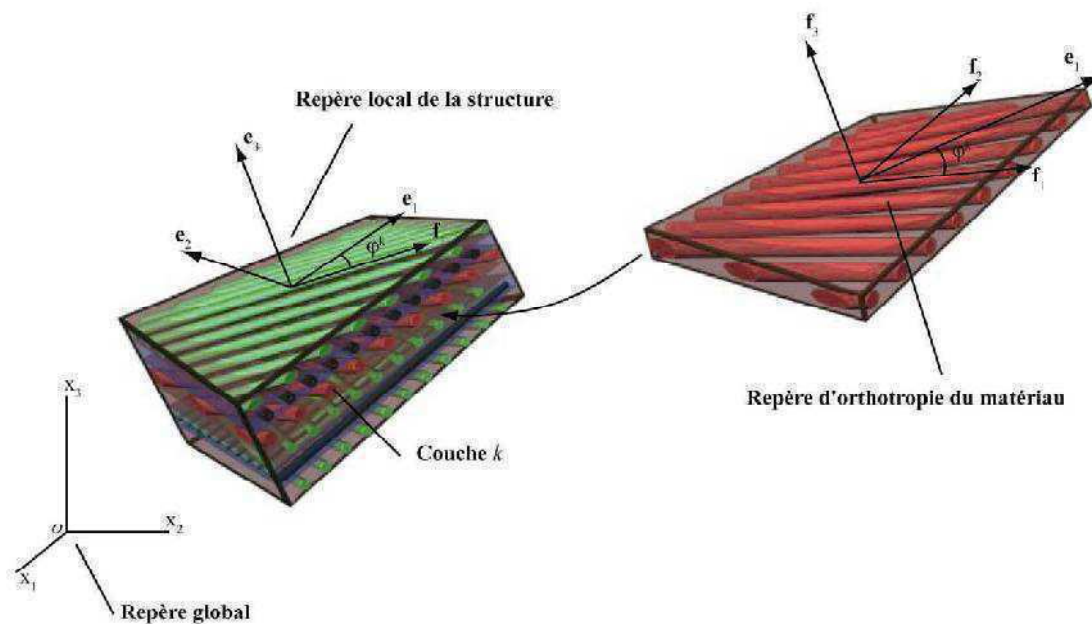
Où les différentes variables sont définies ainsi :

- $\sigma_{ij}$ : Tenseur des contraintes nominales représenté sous forme vectorisée.
- $\varepsilon_{ij}$ : Tenseur des déformations infinitésimales représenté sous forme vectorisée.
- $\bar{C}_{ij}$ : Tenseur d'élasticité linéaire orthotrope exprimé sous forme matricielle dans le repère des directions principales du matériau.
- $E_i$ : module d'élasticité dans la direction principale  $i$ .
- $\nu_{ij}$ : coefficient de Poisson dans la direction  $j$  pour une traction en  $i$ .
- $G_{ij}$ : module de cisaillement dans le plan  $ij$ .

Il faut également noter que le modèle d'élasticité orthotrope est plus général qu'un modèle de composite unidirectionnel, souvent considéré comme transotrope (ou isotrope transverse). On obtient un modèle de matériau composite fibreux transotrope en imposant que :

- ❖  $E_2$  et  $E_3$  sont égaux au module d'élasticité transverse  $E_T$ ,  $E_1$  étant alors égal au module d'élasticité  $E_L$  dans la direction principale (des fibres).
- ❖  $G_{12}$  et  $G_{13}$  sont égaux au module de cisaillement  $G_{LT}$  entre la direction principale et le plan transverse,  $G_{23}$  étant alors égal au module de cisaillement  $G_{TT}$  dans le plan transverse.
- ❖  $\nu_{12}$  et  $\nu_{13}$  sont égaux au coefficient de Poisson  $\nu_{LT}$  entre les directions principales et transverses,  $\nu_{23}$  étant alors égal au coefficient de Poisson  $\nu_{TT}$  dans le plan transverse.

On peut ainsi décrire un matériau composite unidirectionnel transotrope par 6 constantes de matériau :  $E_L$ ,  $E_T$ ,  $G_{LT}$ ,  $G_{TT}$ ,  $\nu_{LT}$  et  $\nu_{TT}$ . Cependant, en raison des procédés de mise en œuvre des matériaux composites, on remarque souvent qu'un matériau composite unidirectionnel réel ne peut pas être considéré comme parfaitement transotrope. Ainsi, en toute généralité, pour des structures plaques ou coques, les constantes nécessaires à la caractérisation d'un matériau orthotrope sont  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $G_{12}$ ,  $G_{23}$ ,  $G_{31}$  et finalement  $\nu_{12}$ . [16]



**Fig.II.8.** Orientation des couches d'un laminé orthotrope [16].

Ce type de loi permet à la fois de modéliser des composites fibreux unidirectionnels et des composites à fibres tissées, comme aussi des matériaux isotropes comme, par exemple, les plastiques renforcés de fibres courtes ou même des matériaux isotropes standard.

## II.6. Définition de l'orthotropie dans le cas des contraintes planes

Dans le cas des contraintes planes comme un cas de coque seule, seuls les paramètres suivants sont nécessaires  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $\nu_{12}$ ,  $G_{12}$ ,  $G_{13}$ , et  $G_{23}$  pour définir l'orthotropie matérielle (dans tous les éléments de contraintes planes, les surfaces (1,2) sont les surfaces de contraintes planes de sorte que la condition de contraintes planes est  $\sigma_{33}=0$ ).

On écrit les coefficients de la matrice de souplesse  $K^{-1}$  du pli élémentaire dans le repère global de la structure comme suit :

$$E_x(\theta) = \frac{1}{\frac{C^4}{E_1} + \frac{S^4}{E_t} + C^2 S^2 \left[ \frac{1}{G_{1t} - 2 \frac{\nu_{tl}}{E_1}} \right]} \dots \dots \dots (1)$$

$$E_y(\theta) = \frac{1}{\frac{S^4}{E_1} + \frac{C^4}{E_t} + C^2 S^2 \left[ \frac{1}{G_{1t} - 2 \frac{\nu_{tl}}{E_1}} \right]} \dots \dots \dots (2)$$

$$G_{xy}(\theta) = \frac{1}{4C^2 S^2 \left[ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_t} + 2 \frac{\nu_{tl}}{E_t} \right] + \frac{(C^2 - S^2)^2}{G_{1t}}} \dots \dots \dots (3)$$

$$\frac{\nu_{yx}}{E_y}(\theta) = \frac{\nu_{tl}}{E_t} (C^4 + S^4) - C^2 S^2 \left[ \frac{1}{E_1} + \frac{1}{E_t} + \frac{1}{G_{1t}} \right] \dots \dots \dots (4)$$

$$\frac{n_{yx}}{G_{xy}}(\theta) = -2CS \left[ \frac{C^2}{E_1} - \frac{S^2}{E_t} + (C^2 - S^2) \left[ \frac{\nu_{tl}}{E_t} - \frac{1}{2G_{1t}} \right] \right] \dots \dots \dots (5)$$

$$\frac{\mu_{yx}}{G_{xy}}(\theta) = -2CS \left[ \frac{S^2}{E_1} - \frac{C^2}{E_t} + (C^2 - S^2) \left[ \frac{\nu_{tl}}{E_t} - \frac{1}{2G_{1t}} \right] \right] \dots \dots \dots (6)$$

### Conclusion

❖ L'utilisation de tissu de fibres de carbone pour le renforcement ou la réparation des structures paraît un moyen intéressant. Pour cette raison, nous avons opté dans ce travail de le tester dans les deux cas de renforcement et de réparation des structures de type silos métalliques.

Cependant, du fait du comportement complexe des matières ensilées lors du remplissage et de la vidange, il est nécessaire d'évaluer au mieux les actions induites par ces dernières et qui se manifestent par deux actions principales : action de frottement et pression latérale sur la paroi.

Ces actions ainsi que d'autres paramètres qui peuvent jouer sur le comportement des parois des silos sont présentées dans le chapitre suivant.

## *Chapitre III*

### *Les silos*



### III. Les silos

#### III.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. Les produits en vrac peuvent être (pulvérulents, en granulés, en copeaux, etc.) utilisés dans diverses industries (brasseries, cimenteries, matières plastiques, engrais, matériaux divers, etc.) et dans le domaine agricole. La taille des silos industriels est très diverse ainsi que leur type : à fond plat ou à trémie. Leur diamètre peut varier de un mètre et plusieurs dizaines de mètres et le rapport hauteur/diamètre entre 1 et 10 (voir plus).



**Fig. III.1.** Silos de stockage des grains. [17]

Ainsi, des installations inadéquates et une mauvaise gestion peuvent causer des pertes importantes par détérioration de la matière ensilées ainsi que par ruine du silo lors d'instabilités 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 satisfasse à la fois aux besoins actuels et éventuels. Le nombre et les dimensions des bâtiments de stockage dépendent de la quantité et des types du produit à stocker. En plus de la structure cylindrique à fonction unique, on peut également envisager différents bâtiments rectangulaires polyvalents; ces derniers permettent un stockage plus économique pour les grandes quantités.

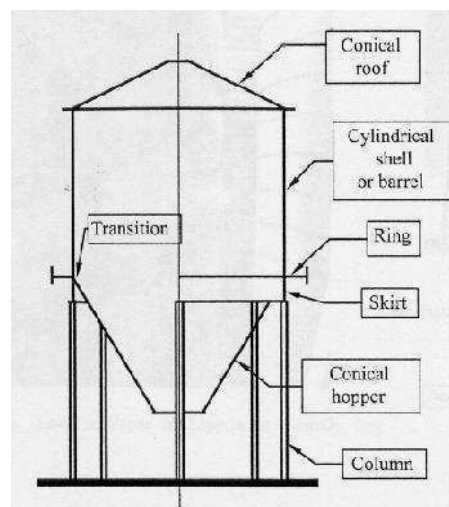
### III.2. Définition

Un silo est un réservoir de grandes capacités prévues pour le stockage commercial ou industriel de grandes quantités de produit (plusieurs milliers de tonnes). [18] Il s'agit dans la plupart des cas des céréales, soit pour les consommer, soit pour les faire germer et les semer ensuite. [19].

Généralement ils sont de forme cylindrique à fond plat ou à trémie centrée. Ils sont construits en béton armé ou en métal (plusieurs éléments coques assemblés). Généralement ils comportent des cellules juxtaposées de sections variables et de grande hauteur.

Les silos sont terminés à leur base par les mamelles de vidange, mais fermés à leur partie supérieure par un plancher sur lequel sont installés les appareils de remplissage.

La paroi cylindrique, la trémie conique, la bague de transition qui s'allonge entre les deux, et le toit conique, sont les quatre parties principales constituant les silos à trémie (**Fig.III.2**).



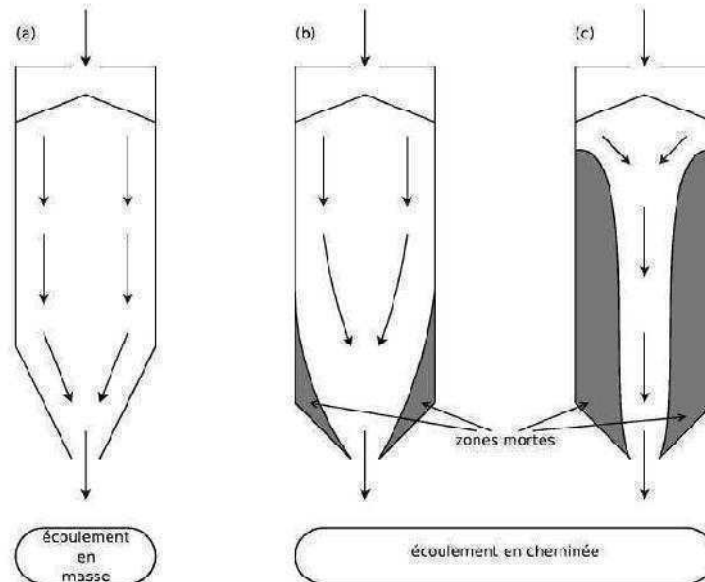
**Fig.III.2.** Les parties constituant les silos à trémie. [20]

### III.3. Modes d'écoulement de la matière granulaire dans les silos

Le matériau granulaire est un système composé d'un grand nombre de particules macroscopiques, dit particules discrètes (solides), leurs dimensions caractéristique sont supérieure à 1  $\mu\text{m}$ , ces grains solides restent dans la plupart du temps, en contact. [21]

*L'écoulement en masse* et *l'écoulement en cheminée* sont les deux principaux modes d'écoulement rencontrés lors de la vidange d'un silo [21,22]. *L'écoulement en masse* (**Fig III.3. (a)**) est le mode d'écoulement où toutes les particules solides sont en mouvement, mais

pas nécessairement à la même vitesse. Dans *l'écoulement en cheminée* (**Fig III.3. (b) et (c)**), le matériau situé au-dessus de l'orifice est en mouvement, laissant de part et d'autre de la trémie des zones appelées zones mortes ou zones stagnantes. Le matériau composant les zones mortes peut s'écouler une fois que le reste du silo est vidangé. [21,22]



**Fig. III.3.** Représentation des modes d'écoulement. (a) Écoulement en masse, (b) Écoulement en semi- masse, et (c) Écoulement interne. [21]

Le type d'écoulement rencontré au cours d'une vidange dépend de la géométrie du silo, et des propriétés mécaniques des parois et de la matière ensilée. Pour les silos à fond plats, la présence de zones mortes de part et d'autre de l'ouverture est inévitable. En revanche, dans les silos à trémie, il est possible d'éviter la présence de ces zones stagnantes et les inconvénients engendrés, en inclinant la trémie de façon à ce que l'angle d'inclinaison de celle-ci soit supérieur ou égal à l'angle du critère du matériau. [21,22]

### Remarque

Dans le cas d'un écoulement en masse le frottement se produit entre les parois et le matériau. Lors d'un écoulement en cheminée, le frottement se produit entre le matériau en mouvement et le matériau stagnant. [21]

### III.4. Paramètres influençant sur les pressions dans les silos

Il est connu que les paramètres principaux qui jouent un grand rôle sur le comportement des silos sont ceux liés aux matières granulaires (ses caractéristiques, le type d'écoulement, la

vitesse d'écoulement...) et la structure des silos elle-même (la forme du silo, nature des parois...) ces paramètres doivent être bien pris en compte pour avoir une structure capable de jouer son rôle parfaitement. Ainsi, nous citons par exemple les paramètres suivants :

#### III.4.1. la vitesse d'écoulement

Durant l'écoulement granulaire dans un silo, deux régions sont observées: *-région d'écoulement rapide* et *région d'écoulement lent*. *L'écoulement lent* est caractérisé par un taux de déformation lent et de petites forces internes. *L'écoulement rapide* est caractérisé par un grand taux de déformations et de grandes forces internes. Les particules se détachent souvent, leur contact et soumis à de courtes collisions impulsives et à un chevauchement. La matière se comporte plus comme un fluide dense ou gaz, durant l'écoulement lent les contraintes internes sont produites seulement de forces normales et de frottement entre les particules. Pour l'écoulement rapide, les contraintes produites sont dues aux deux: forces normales et frottements entre les grains et la collision. Pour un écoulement lent, l'énergie est légèrement perdue à cause du frottement entre les grains, pour un écoulement, rapide l'énergie est légèrement perdue parce que la collision des particules est fondamentalement non élastique. Durant l'écoulement des grains dans le silo avec une vitesse de trappe contrôlée, généralement l'écoulement lent prend place dans les solides entiers, cependant, durant l'écoulement des grains dans le silo avec une vitesse de trappe libre, les deux types d'écoulements peuvent se produire simultanément dans différentes parties du silo. Habituellement, la matière proche de la trappe est dans un régime d'écoulement rapide, la matière de position plus haute bouge lentement. [23]

#### III.4.2. La variation des caractéristiques physiques et mécaniques de la matière ensilée

Il est important dans le calcul des sollicitations agissant sur les éléments constituant les silos de prendre en considération la variation de certaines caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux granulaires tels que :

- ❖ **La densité** : Ce paramètre peut-être modifié en raison de la compression des couches inférieures de la matière granulaire ensilée par celles supérieures. Il est donc nécessaire de tenir en compte cette modification lors du calcul des pressions exercées sur les parois du silo. Il est nécessaire dans ce cas de prendre une valeur moyenne entre celles qui sont maximales des couches supérieures et minimales des couches inférieures. Ces valeurs

peuvent être déterminées par un essai expérimental en appliquant une contrainte représentant celle du poids des couches.

- ❖ **l'angle de frottement interne** : La variation de l'angle de frottement interne doit être prise en considération dans certains cas d'humidification de la matière. [24]
- ❖ **Le frottement sur les parois**: Le frottement sur la paroi du silo peut aussi être modifié pour les mêmes raisons de surcharge dues aux couches supérieures et l'humidification de la matière ensilée. [24]

### III.4.3. Nature des parois des silos

Pour le calcul des pressions maximales, correspondantes aux états limites qui peuvent caractériser le milieu pulvérulent, nous tiendrons en compte la nature des parois qui peuvent être classées en *parois lisses* et *parois rugueuses*. Les parois *lisses* sont celles pour lesquelles l'angle de frottement  $\varphi'$  de la matière pulvérulente sur les parois, est inférieur à l'angle du frottement interne maximal des grains. Les autres parois sont dites rugueuses et  $\varphi'$  est au plus égal à l'angle du frottement interne maximal des grains. Le glissement se produit alors dans la masse, à une petite distance de la paroi.

Par rapport aux états limites pouvant caractériser le milieu pulvérulent, *les pressions latérales sont les plus fortes* lorsque le *remplissage est effectué rapidement*, et dans ce cas, la densité apparente des grains est minimale ainsi que l'angle de frottement interne correspondant.

*Les pressions verticales* sur le fond sont les plus fortes *lorsque le remplissage est effectué lentement*, avec des arrêts ainsi que l'angle de frottement correspondant. Il y aura donc une pleine sécurité pour la détermination des pressions dues au remplissage en calculant:

- a) *les poussées latérales* sur les parois rugueuses, en fonction de la densité *minimale* due au remplissage rapide des silos, de l'angle de frottement interne *minimal* correspondant, et l'angle de frottement *minimal* des grains sur les parois.
- b) *les pressions verticales* sur le fond, en fonction de la densité *maximale* due au remplissage lent et au tassement, de l'angle de frottement interne *maximal* correspondant, et l'angle de frottement *minimal* des grains sur les parois.

Toutefois, dans le cas particulier des silos lisses, il aura lieu d'examiner, par un calcul rapide, si les pressions latérales ne sont pas maximales dans le cas de la densité maximale de l'angle

de frottement interne minimal et de l'angle de frottement minimal des grains sur les parois. [24]

#### III.4.4. La vidange des silos

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.

Dans le cas de la vidange, les grains passent d'un état actif (la fin du remplissage) à un état passif (la vidange du silo). Selon [M et A.Reimbert], cette variation est la cause des surpressions qui produisent les accidents dans les silos en service. Selon d'autres auteurs les grains de la matière ensilée 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 supérieure. Ces phénomènes ont été étudiés d'un point de vue théorique et expérimentale, ils ont cependant toujours été connus au moins qualitativement, et jusqu'à maintenant, aucun règlement ne fixe leur magnitude. D'autre part, dans le cas où l'orifice de la vidange est excentré, on constate des augmentations de pression sur les parois opposées.

Enfin, les effets produits par les grains ensilés pendant le séjour en silos et les phénomènes de tassement venant de la « solidification » de la matière peuvent diminuer les poussées latérales surtout en partie basses, ce qui introduit une surpression sur les mamelles.

On peut distinguer que la surpression due à la vidange des silos est la cause de la majorité des problèmes provoquant la détérioration de ces structures.

##### ❖ Cas exceptionnel de la vidange excentrée

Un silo métallique soumis à la vidange excentrée est particulièrement susceptible de rupture du flambement de coque de la paroi sous pression axiale compressive, donc, les concepteurs des silos ont souvent conseillé d'éviter la vidange excentrique s'il est possible, cependant, les considérations pratiques telles que le coût et la facilité d'accès souvent exigent l'usage de la vidange excentrique. En revanche, même pour un silo conçu pour une vidange concentrique, les effets de décharge excentrique sont difficiles à éviter à cause des facteurs tels que la ségrégation de la matière et la séquentielle d'ouverture et de la fermeture de la trappe. [25]

La conséquence la plus connue de la vidange excentrique est le développement de la pression horizontale non uniforme.

Cette non-uniformité de pression produit la tension circonférentielle ainsi que les cintrages méridionaux, et les actions membranes associées, donnent à terme la possibilité d'un mode de rupture. [25]

Les fonds des silos sont sollicités par la matière stockée tassée, quels que soient leurs types (fond plat ou à trémie). Lors de la vidange des silos, nous pouvons remarquer la formation des voûtes qui présentent une action exceptionnelle difficile à estimer quantitativement [24]. Ainsi, dans notre calcul et dimensionnement, nous devons prendre en considération le risque de chute d'une quantité importante de la matière à une certaine hauteur retenue par cohésion, ainsi que son poids.

### **III.5. Sollicitations agissant sur les parties principales des silos**

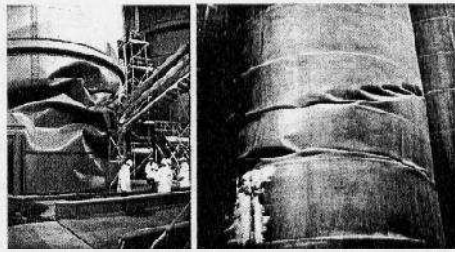
Chacune des parties constituant les silos à son propre mode de déformation et ainsi poussent à une exigence de conception.

Ainsi, nous pouvons résumer les sollicitations agissant sur chacune d'entre elles comme suit :

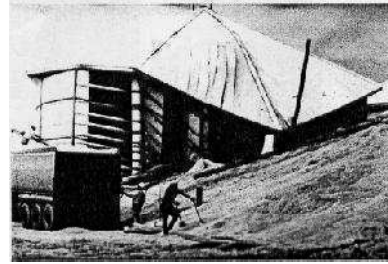
#### **III.5.1. Parois cylindriques**

Les parois cylindriques sont le sujet de la majorité des travaux de recherche, leur première forme testée était une paroi fabriquée de plaque non raidie (isotrope) capable de flamber sous compression axiale (**Fig.III.4**).

La paroi cylindrique est soumise à la tension circonférentielle (conduit rarement à l'éclatement) (**Fig.III .5**), et à la compression verticale (la source des principales déformations).

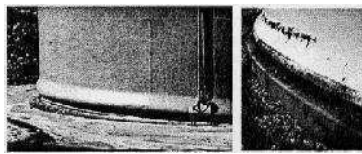


**Fig.III.4** : Flambement d'une coque cylindrique sous compression axiale. [20]

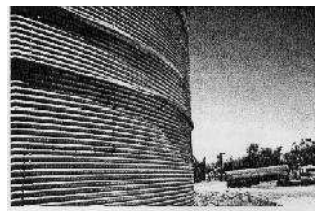


**Fig III.5** : Éclatement d'un silo à assemblage mal détaillé. [20]

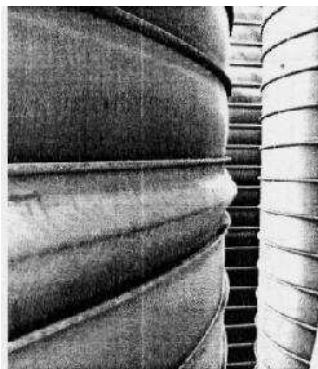
La compression axiale et la pression interne causent la flexion des parois des silos, ce qui conduit à l'ajout des supports supplémentaires. Cette combinaison mène au flambement du pied d'éléphant (**Fig. III.6**). Le flambement au-dessus du support a des formes spéciales comme les parois ondulées (**Fig.III.7**), et paroi à bague raidie (**Fig.III.8**).



**Fig. III.6** Flambement du pied d'éléphant dans un réservoir [20]



**Fig.III.7.** Flambement des parois ondulées d'un silo non raidie sous compression verticale. [20]

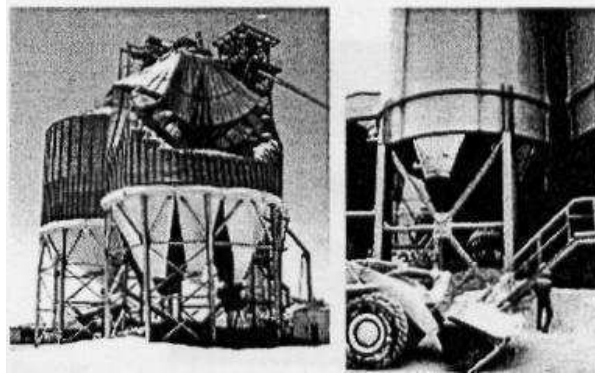


**Fig.III.8.** Flambement au-dessus du support des parois des silos à bague raidie. [20]

### III.5.2. La trémie conique

La trémie conique est soumise à la pression interne et à la traction causée par le glissement des grains dans sa surface interne, elle est normalement en tension biaxiale.

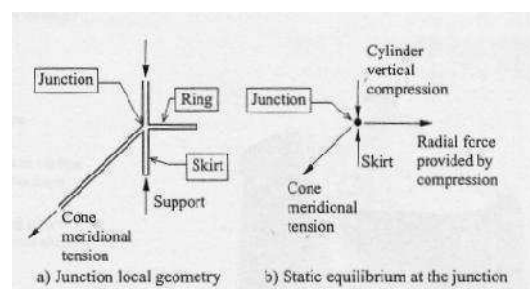




**Fig.III.9.** Trémie fendue sur les joints méridionaux. [20]

### III.5.3. La jonction - transition

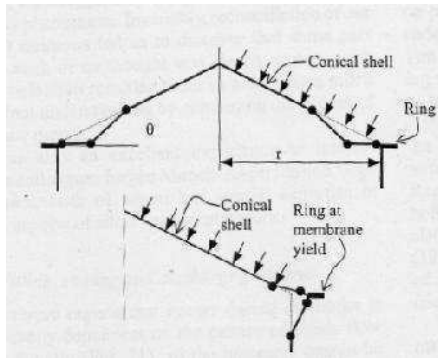
La jonction entre la trémie conique et la paroi cylindrique (**Fig.III.2**) est appelée zone de transition. Une bague est exigée normalement à cet emplacement dans les silos à grande largeur. Cette bague sert à résister à la traction radiale de la tension de la trémie (conduit à une compression circonférentielle dans la bague) (**Fig.III.10**), mais on peut aussi s'attendre à la redistribution des forces discrètes des supports de la colonne (**Fig.III.3**).



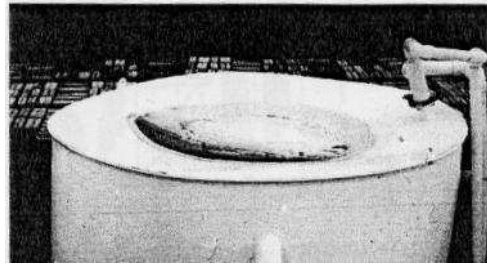
**Fig.III.10** : Compression de la bague de la transition à cause de la tension supérieure de la trémie. [20]

### III.5.4. Le toit conique

C'est la composante structurelle définitive du silo, c'est généralement une coque mince sur les silos à petit diamètre, mais c'est une structure importante sur les silos et les réservoirs de grands diamètres. Cette coque mince à différents modes de flambement et de déformation de chute plastique (**Fig.III.11, III.12**). Le toit peut participer dans le flambement des parois cylindriques sous le vent quand le silo est vide (**Fig.III.13**).



**Fig.III.11.** Modes de chute plastique pour les toits coniques à coque mince. [20]



**Fig.III.12.** Toit conique après claquement à travers le flambement. [20]



**Fig.III.13.** Flambement de la paroi cylindrique et du toit conique sous le vent. [20]

## III.6. Les méthodes utilisées pour le calcul et le dimensionnement des silos

### III.6.1. Introduction

Pour parer aux quantités importantes produites des matières destinées à la vente ou au stockage, de nombreux silos ont été construits. La construction des silos de plus en plus économiques, combinée souvent à un dimensionnement ne tenant pas compte du comportement particulier de ce genre d'ouvrage a inévitablement conduit à des accidents souvent spectaculaires et provoquant des pertes tant humaines qu'économiques. Cela a amené à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle à des études dans le but de déterminer des méthodes analytiques permettant de calculer les pressions latérales qui s'exercent sur les parois du silo et celles verticales sollicitant le fond et cela afin de mieux dimensionner ces silos. En effet si le

problème du calcul structurel des silos ne pose pas de problème particulier surtout avec l'utilisation actuelle des méthodes numériques, le problème crucial reste cependant l'évaluation au mieux de l'action de la matière ensilée sur les parois du silo (cylindres et trémies). À cet effet des méthodes ont été proposées depuis longtemps (dédiées des tests expérimentaux) permettant d'aboutir à une évaluation correcte des actions sur les parois des silos.

En général, il existe deux méthodes de calcul des silos :

- ❖ Les méthodes analytiques qui se divisent en deux : les théories et les normes de calcul.
- ❖ Les méthodes numériques qui se divisent elles-mêmes en deux types la méthode des éléments finis et la méthode des éléments discrets.

### III.6.2. Méthodes analytiques

#### III.6.2.1. Théories de calcul des silos

Les théories de calcul des silos sont la théorie de Janssen et la théorie de Reimbert :

##### A- Théorie de Janssen (1895)

La *théorie de Janssen* (1895) complétée plus tard par Koenen sert de base à la plupart des normes de calcul existantes, elle est aussi connue sous le nom de méthode de tranche [26], qui consiste à trouver des solutions pour les équations différentielles correspondant à l'équilibre vertical dans la tranche horizontale des grains du silo [26].

Le rapport de pression horizontale a celle verticale  $p/q$  est fixé égal à :  $\frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi}$

Avec :  $\varphi$  : angle de frottement interne.

La pression horizontale s'écrit :  $p_h = \frac{\delta}{\mu} \cdot \frac{A}{U} \left( 1 - e^{\left(\frac{U}{K\mu}\right) \cdot Z} \right) \dots\dots\dots (7)$

Avec K : le rapport de pression horizontale à la verticale, égale à celui du coefficient de Rankine.

$\delta$  : la densité des grains.

$\mu$  : coefficient de frottement des grains avec les parois.

A: surface intérieure de la section droite de la cellule du silo.

U: périmètre intérieur de la cellule suivant cette section.

Une étude expérimentale sur des silos profonds a montré que la théorie de Jansen peut donner de meilleurs résultats en calculant le coefficient K par :  $K = 1 - \sin\varphi$

Il a été rapporté que plusieurs investigations ont obtenu analytiquement :  $\frac{1 - \sin\varphi}{1 + \sin\varphi} < K < 1$ , [27]

❖ Les hypothèses considérées par cette théorie sont

- Les pressions verticales, q, restent constantes dans le cas de surfaces horizontales.
- La valeur de l'angle du frottement entre la paroi et la matière entreposée, est constante.
- Le poids spécifique de la matière entreposée, ne varie pas en tout point du silo.
- la considération que les parois du silo sont totalement rigides.
- Le rapport entre les pressions horizontales et verticales, K est constant pour chaque hauteur

du silo:  $K = \frac{P_h}{q_v} = \text{constant}$  ..... (8)

- L'application de la théorie de Mohr-Coulomb et Rankine pour les matières granuleuses entreposées dans le silo. [28]

B- Théorie des frères Reimbert

Des essais expérimentaux ont été effectués, comme ceux de Reimbert et ont été contrôlés par le bureau "Sécuritas", ont montré que le rapport p/q n'est pas constant et change selon la profondeur et la forme des silos.

D'après Reimbert, la pression et la charge sur le fond sont en équilibre avec la force de frottement produite entre les grains avec la paroi dépendant de la profondeur considérée.

❖ Dans le cas d'un silo cylindrique, les expressions de Reimbert peuvent être exprimées Comme suit :

Poussée latérale maximale :  $p_{\max} = \frac{r \delta}{\text{tg}\varphi'}$ ; ..... (9)

Abscisse caractéristique :  $A = \frac{r}{\text{tg}\varphi' \text{tg}^2\left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2}\right)} - \frac{h}{3}$  ..... (10)

Poussée latérale sur les parois, à la profondeur (z) :  $p_z = p_{\max} \left[ 1 - \left( \frac{Z}{A} + 1 \right)^{-2} \right]$  ..... (11)

Pression verticale unitaire moyenne sur le fond, à la profondeur

$$z : q_z = \delta \left[ Z \left( \frac{Z}{A} + 1 \right)^{-1} + \frac{h}{3} \right] \dots \dots \dots (12)$$

Charge unitaire équilibrée par le frottement à la profondeur  $z : F = \delta S \frac{Z^2}{Z + A} \dots (13) [24, 28]$

Avec :

$\delta$ : est le poids spécifique de la matière ensilée.

$r$  : rayon moyen hydraulique  $r=S/L$  ; et  $S$  : surface de la section droite du silo.

$L$  : périmètre de cette section.

$h$  : est la hauteur de cône supérieur d'ensilage.

$Z$  : profondeur à partir du sommet d'une section droite du silo.

$\phi'$  : angle de frottement sur les parois.

$\phi$  : angle de frottement interne. [24]

Cette théorie a été considérée dans quelques normes (ACI 313-77, 1983; ENV 1991-4, 2003), mais analytiquement il a été démontré que les théories de Janssen et Reimbert étaient équivalentes, et qu'ils ont présenté seulement deux suppositions différentes au sujet du coefficient  $K$  (rapport de pressions). D'après des résultats présentés par des auteurs différents, la théorie de Reimbert surestime les pressions latérales par rapport à ceux qui sont prévus par Janssen. [27,28] Aussi, non seulement la géométrie du silo est fondamentale, mais il existe une influence notable des paramètres qui définissent la matière entreposée.

### III.6.2.2 Les normes de calcul des silos

Les normes de calcul ont toujours fait face aux problèmes sollicitant les structures, ces derniers peuvent être parfois incertains et, malheureusement mal compris, comme ceux qui touchent les silos. Face à l'importance de ce type de structure, et face aux accidents qui augmentent chaque année lors de l'exploitation de ce type d'ouvrage, il a été clair qu'il faut avoir un règlement définitif qui fixe leur mode de calcul. Le comportement du silo est très complexe, surtout au niveau de l'interaction entre les parois et la matière, le comportement des grains lui-même est un problème. Leur type d'écoulement ainsi que d'autres paramètres ne peuvent pas être fixés au niveau du calcul face au manque d'informations et de recherche.

Les normes de calcul actuelles des silos sont :

- ❖ La norme allemande DIN (1055-6).

- ❖ La norme américaine ACI 313-97.
- ❖ Le standard international ISO-11697.
- ❖ L'anglais BMHB.
- ❖ L'Australien.
- ❖ La norme Française.
- ❖ L'Eurocode ENV 1991-4.

Parmi toutes ces normes le plus utilisé et le plus proche pour notre cas est certainement le code européen : L'Eurocode ENV 1991-4.

### III.6.3.Méthodes numériques

Comme il a été déjà mentionné, les méthodes numériques se divisent en deux types :

- ❖ la méthode des éléments discrets où la matière est modélisée grain par grain ainsi que leur interaction est prise en compte, cette méthode est très difficile à réaliser vu le nombre important des grains à prendre en compte.
- ❖ la deuxième méthode, c'est la méthode des éléments finis, c'est l'une des plus importantes méthodes parmi celles qui sont citées si avant.

À la fin de l'année (1970), les modèles des éléments finis réalisés par Mahmoud (1975) et ceux de Joffriet et Al (1977) ont proposé l'origine d'une nouvelle étape d'investigation des silos. [28]

La perspective de cette méthode (méthode des éléments finis) est de voir la matière granulaire comme continu, grâce à ses caractéristiques. Il est ainsi possible aussi d'analyser des phénomènes comme l'interaction entre la matière granulaire et les parois, les effets thermiques, les modèles d'écoulements, l'influence de plusieurs paramètres de la matière ainsi que l'influence de l'épaisseur des parois sur les pressions.

Le plus grand avantage de cette méthode est la possibilité d'appliquer différentes théories de comportement à la matière.

Parmi les travaux effectués par le biais de cette méthode, on peut citer :

- ❖ Le travail de R.J Goodey, C.J Brown, J .M Rotter [29] et [30]
- ❖ C.J Brown et R.I Goodey [31]
- ❖ M.Guaita, A.Couto, F.Ayuga [32] basé sur l'excentricité de la trémie.
- ❖ M.A Martinez, I. Alfaro, M.Doblaré [26].

- ❖ P Vidal, E Gallego, M Guaita, F Ayuga [33]: Dans ce travail le comportement des grains est élastique avec le critère de Drucker Prager de plasticité, le silo est classé comme silo à parois flexibles ces résultats sont comparés avec le travail d'un silo à parois rigides [33].

### III.7. Objectifs

Ce travail concerne l'étude de renforcement et de réparation des silos métalliques à trémie centrée par l'un des types des matériaux composites les plus reconnus et le plus utilisé (tissu de fibres de carbone), en utilisant la méthode des éléments finis. Cette méthode concerne la modélisation des parois du silo par des éléments coques, ainsi que la modélisation de la matière granulaire par des éléments cubiques et en tenant compte de l'interaction entre les deux. Une loi de comportement basée sur le comportement élastique-plastique est donnée à la matière granulaire, pour définir son comportement non linéaire.

L'étape essentielle dans cette méthode est la simulation du remplissage et de la vidange du silo en utilisant la méthode de l'augmentation ou la diminution de la charge gravitationnelle.

En vue de valider nos résultats numériques, les courbes des contraintes circonférentielles et celles méridionales avant le renforcement et la réparation seront comparés avec celles obtenues par la réglementation Eurocode.

Le travail est donc divisé en deux parties :

- La première partie consiste le renforcement des silos, le silo étant utilisé est un modèle académique.

Sachant que le pic des contraintes se trouve à la transition (partie entre la paroi verticale et la trémie du silo), diverses localisations ainsi qu'une variation du nombre de couches de TFC seront réalisées pour savoir la bonne localisation et le nombre de TFC à utiliser.

- La deuxième partie consiste la réparation d'un silo modèle réel (silo qui existe ou port Djendjen à Jijel) : dans cette partie la bonne localisation trouvée dans la première partie sera utilisée pour la réparation des parois altérées par corrosion.

## *Chapitre IV*

### *Aspect développement*



## IV. Aspect développement

### IV.1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre les deux méthodes d'analyse des silos que nous nous proposons d'utiliser dans ce travail pour calculer les actions de la matière granulaire sur les parois des silos. Il s'agit des règles préconisées dans les normes européennes « Eurocodes » (il n'existe pas de normes algériennes concernant le calcul des silos) et de l'approche consistant à évaluer l'action de la matière ensilée en la modélisant par la méthode des éléments finis.

La première étant utilisée pour comparer les résultats des contraintes avant le renforcement et la réparation avec celles obtenues par la méthode des éléments finis afin de s'assurer la validité de cette 2<sup>ème</sup> approche. Par la suite, cette deuxième approche est utilisée pour étudier le renforcement et la réparation des silos en recherchant les localisations et le nombre de couches de TFC nécessaire pour un renforcement optimum.

### IV.2. Les normes Eurocode

Les normes Eurocodes constituent un ensemble de 60 normes européennes regroupées en Dix familles. Leur but est d'harmoniser les méthodes de calcul utilisables pour vérifier la stabilité et le dimensionnement des différents éléments constituant des bâtiments ou ouvrages de génie civil, quels que soient les types d'ouvrages ou de matériaux (structures en béton, en métal, structures mixtes acier/béton, maçonnerie, bois, aluminium, règles de calcul pour les ouvrages de géotechnique et règles parasismiques).

Organisation des Eurocodes :

Les Eurocodes sont organisés en dix familles, chacune est subdivisée en sections et annexes :

- EN 1990, Eurocode 0: Bases de calcul des structures.
- EN 1991, Eurocode 1 : Actions sur les structures.
- EN 1992, Eurocode 2 : Calcul des structures en béton.
- EN 1993, Eurocode 3 : Calcul des structures en acier.
- EN 1994, Eurocode 4 : Calcul des structures mixtes acier béton.
- EN 1995, Eurocode 5 : Calcul des structures en bois.

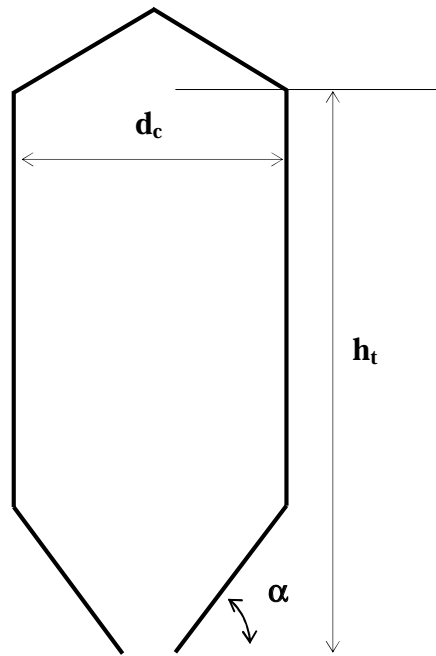
- EN 1996, Eurocode 6 : Calcul des structures en maçonnerie.
- EN 1997, Eurocode 7 : Calcul géotechnique.
- EN 1998, Eurocode 8 : Calcul des structures pour leur résistance aux séismes.
- EN 1999, Eurocode 9 : Calcul des structures en aluminium. [34]

Les Eurocodes 0, 1, 7 et 8 constituent le tronc commun des méthodes proposées. Les autres Eurocodes concernent les méthodes spécifiquement adaptées aux matériaux employés.

Pour ce qui concerne le calcul des silos, (Eurocode 1, partie 4), les règles Eurocode définissent les procédures et les règles analytiques qui permettent de calculer les actions de la matière granulaire sur les parois de la coque des silos (pression normale et frottement sur la paroi). Par la suite, le calcul de structure selon le cas sera mené soit par un calcul analytique ou à l'aide de méthodes numérique sur des codes de calcul par éléments finis.

#### IV.2.1. Eurocode 1-partie 4

La partie 4 de l'Eurocode 1 permet de déterminer les actions exercées sur les parois d'un silo par le produit stocké dans un large domaine d'application dont les principales limites sont rappelées ci-après :



**Fig.IV.1.** Les caractéristiques physiques des silos

- Le silo comporte un corps cylindrique à génératrices verticales, dont la section droite peut être circulaire, carrée, rectangulaire, en as de carreau, ou polygonale régulière à six côtés ou plus ;
- Le silo peut être à fond plat ou équipé d'une trémie ;
- La jonction entre paroi verticale et trémie est située dans un plan horizontal ;
- Le remplissage, comme la vidange, peuvent être centrés ou excentrés ;
- Les dimensions générales sont limitées comme suit :
  - ✓ Diamètre du cercle inscrit dans la section droite ( $d_c$ ) inférieur à 60 mètres,
  - ✓ Hauteur totale ( $h_t$ ) depuis le niveau du plan moyen de remplissage jusqu'à l'orifice de vidange inférieur à 100 mètres,
  - ✓ Rapport  $h_t/d_c$  limité à 10 ; aucune limitation inférieure de ce rapport n'est fixée : c'est-à-dire que la partie 4 de l'Eurocode 1 permet de traiter des silos très trapus ;
- Les parois peuvent être constituées de différents matériaux. Pour le calcul des actions locales, on distingue deux familles de parois, les parois épaisses (ex : Silos en béton), les parois minces ( $d_c/t > 200$ , ex : Silos métalliques) et ( $t$  : épaisseur de la paroi)
- Seul le cas des matériaux à libre écoulement gravitaire est envisagé :
  - ✓ Pas de matériaux à cohésion non négligeable dans lesquels des voûtes de décharge pourraient se former ;
  - ✓ Pas d'équipement ou structure interne formant obstacle ou guidage à l'écoulement, à l'exception des tubes de vidange et à exception aussi des tirants structurels des silos à section carrée ou rectangulaire.
- Le diamètre des particules de matériaux stockés est limité à  $0.03 d_c$ .

#### IV.2.1.1. Différents paramètres intervenant dans la détermination des actions

On peut classer ces paramètres en trois catégories :

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

##### A. Caractéristiques géométriques du silo

Le premier paramètre géométrique qui intervient dans le choix de la méthode de détermination des actions exercées par le matériau stocké est l'élancement du silo. Il est

déterminé par le rapport  $h_c/d_c$  de la hauteur  $h_c$  du corps cylindrique à génératrices verticales, comptée du niveau de remplissage au plan de jonction avec la trémie ou le fond plat, au même cylindre. On distingue :

- ✓ Les silos élancés, pour lesquels  $h_c/d_c$  est supérieur ou égale à 2,0.
- ✓ Les silos moyennement élancés, pour lesquels  $h_c/d_c$  est compris entre 1,0 et 2,0.
- ✓ Les silos plats, pour lesquels  $h_c/d_c$  est compris entre 0,4 et 1,0.
- ✓ Les silos magasins, pour lesquels  $h_c/d_c$  est inférieur ou égal à 0,4.

Les lois de détermination des actions sur les parois verticales sont différentes suivant le type de silo.

Le deuxième paramètre géométrique qui intervient concerne :

- ✓ L'excentrement du sommet du talus de remplissage, désigné  $e_f$ , par rapport à l'axe du corps cylindrique à génératrices verticales.
- ✓ L'excentrement de l'orifice de vidange, désigné  $e_0$ , par rapport au même axe.

Le troisième paramètre géométrique qui intervient est la pente du fond du silo. C'est un élément déterminant dans le calcul des actions exercées sur ce fond. On utilise la section 6 de l'EN 1991-4 ou les règles alternatives données par son annexe H (informative).

Dans la section 6 on distingue :

- Fond plat : fond dont l'angle à l'horizontale est limité à  $5^\circ$ .
- Trémie à faible pente.
- Trémie à forte pente.

La limitation entre faible et forte pente est en fonction de la matière ensilée et de son coefficient de frottement sur la paroi de la trémie.

Le calcul des actions sur le fond diffère suivant la catégorie de celui-ci :

- Pour les fonds plats :  $c_f$ .EN 1991-4, 6.2
- Pour les trémies à forte pente  $c_f$ .EN 1991-4, 6.3
- Pour les trémies à faible pente :  $c_f$ .EN 1991-4, 6.4

## B. Classe de fiabilité

La partie 1 de l'Eurocode 3 conduit à distinguer trois classes de fiabilité. L'attribution d'une classe de fiabilités 1,2 ou 3 à un ouvrage a des conséquences sur l'évaluation des actions : les

méthodes d'évaluation sont d'autant plus précises que la classe retenue est élevée. En classe 1 la norme autorise des approximations qu'elle ne permet plus en classe 2 et moins encore en classe 3. [35]

**Tab.IV.1.** Classe des silos en fonction de la capacité et de l'excentricité de décharge ou de remplissage. [36]

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

### C. Caractéristiques des produits ensilés

Les actions exercées sur les parois dépendent évidemment de la nature du produit ensilé et donc de ses caractéristiques et qui sont :

- Le poids spécifique  $\gamma$  du produit ensilé. Cette valeur pouvant varier selon plusieurs paramètres comme les conditions de conservation, état de la matière humide, sèche, etc...

On utilise en général la valeur caractéristique supérieure dans les calculs.

- L'angle de frottement interne  $\theta_i$ . Sa valeur moyenne est notée  $\theta_{im}$ . Un facteur de corrélation noté  $a_\theta$  permet de calculer les valeurs caractéristiques (supérieure et inférieure) pour que ces valeurs soient, respectivement :  $a_\theta \theta_{im}$  et  $\theta_{im}/a_\theta$ .
- L'angle de talus naturel.
- Le coefficient de frottement  $\mu$  sur la paroi : sa valeur moyenne est  $\mu_m$  et le facteur de corrélation est  $a_\mu$  ; les valeurs caractéristiques (supérieure et inférieure) sont respectivement  $a_\mu \mu_m$  et  $\mu_m/a_\mu$ .
- Le coefficient de frottement sur la paroi dépend à la fois de la matière ensilée et de la nature de la paroi du silo pour laquelle on distingue quatre classes de rugosité [36]:

**Tab. IV.2.** Classification des silos d'après la rugosité des parois. [36]

Catégorie	Intitulé	Exemples
<b>D1</b>	Frottement faible Paroi glissante	Parois lisses en acier inoxydable poli Parois lisses en aluminium poli Parois avec revêtement glissant
<b>D2</b>	Frottement modéré Paroi lisse	Parois lisses en acier noir ou inox non poli Parois lisses en acier galvanisé Parois avec revêtement anti-corrosion ou abrasion
<b>D3</b>	Frottement fort Paroi rugueuse	Parois en acier « âgé », ou résistant à l'abrasion Parois en béton Tuiles céramiques
<b>D4</b>	Paroi irrégulière	Parois à ondes horizontales Parois non- standard avec irrégularités importantes

- Le coefficient de pression latérale **K** dont la valeur moyenne est **K<sub>m</sub>** et le coefficient de corrélation **a<sub>K</sub>** ; les valeurs caractéristiques (supérieure et inférieure) sont respectivement **a<sub>K</sub> K<sub>m</sub>** et **K<sub>m</sub>/ a<sub>K</sub>**.
- Une valeur approchée de **K<sub>m</sub>** peut être obtenue par l'expression **K<sub>m</sub>(app) = 1.1 .(1- sin Ø<sub>im</sub>)**.

Le tableau suivant montre la combinaison des différentes valeurs de propriétés mécaniques de la matière quels doivent être considérées pour chaque type des forces [36] :

**Tab.IV.3.** Combinaisons des propriétés de la matière pour la détermination des différents types d'actions. [36]

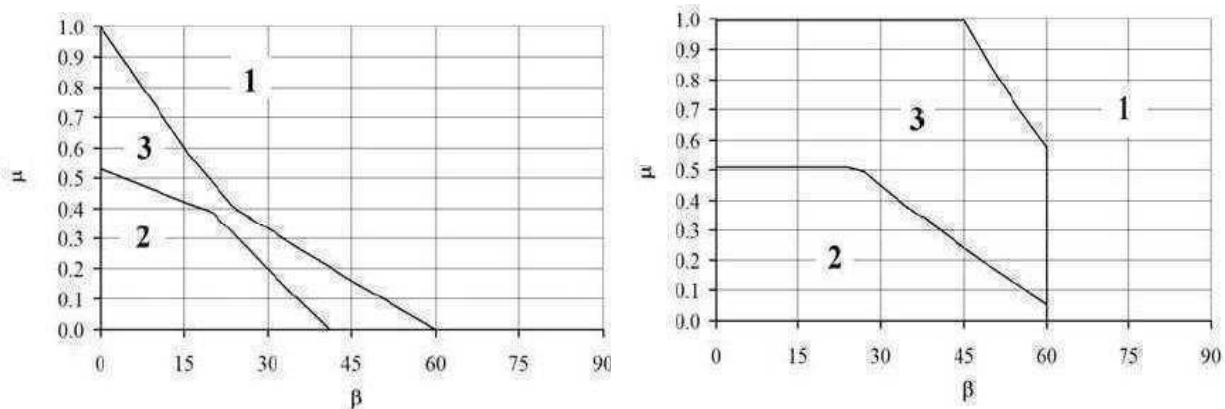
OBJECTIF		Valeur caractéristique à adopter		
Parois verticales		Coefficient de frottement sur paroi $\mu$	Rapport de pression latérale K	Angle de frottement interne $\phi_i$
	Pression maxi. normale à la paroi	INF	SUP	INF
	Frottement maximal sur la paroi	SUP	SUP	INF
	Pression verticale maximale sur le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

### ○ Type d'écoulement

Les actions exercées sur les parois dépendent beaucoup du type d'écoulement.

Comme cela a déjà été présenté au chapitre III, il existe 2 types d'écoulements : écoulement en masse et écoulement en cheminée.

La courbe suivante montre les types d'écoulement de la matière lors de la vidange :



**Fig.IV.2.** Types d'écoulement pendant la décharge, silo à trémie conique (a) et trémie allongée (b). [36]

Avec :

1 : écoulement en cheminée.

2 : écoulement en masse.

3 : écoulement en cheminée ou en masse peut intervenir dans ces limites.

$\beta$  : angle d'inclinaison de la paroi de la trémie.

$\mu$  : coefficient de frottement sur la paroi.

Suivant l'Eurocode les caractéristiques des matières entreposées sont présentées sur le tableau suivant :

**Tab.IV.4.**Caractéristiques des matières granulaires [37]

Matière granulaire	Poids volumique $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Rapport des pressions ( $K_{s,m}$ )	Coefficient de frottement sur la paroi $\mu_m$		Coefficient maximal d'amplification $C_0$
			Acier	Béton	
Orge	8.5	0.55	0.35	0.45	1.35
Ciment	16.0	0.50	0.40	0.50	1.40
Clinker	18.0	0.45	0.45	0.55	1.40
Sable sec	16.0	0.45	0.40	0.50	1.40

Farine	7.0	0.40	0.30	0.40	1.45
Cendre	14.0	0.45	0.45	0.55	1.45
Maïs	8.5	0.50	0.30	0.40	1.40
Sucre	9.5	0.50	0.45	0.55	1.40
Blé	9.0	0.55	0.30	0.40	1.30
charbon	10.0	0.50	0.45	0.55	1.45

**Remarque :** Les caractéristiques des matières sont définies sur le tableau (Tab.IV.4) les valeurs de  $\gamma$  correspondent à des limites supérieures, celles de  $\mu_m$  et  $K_{s,m}$  a des valeurs moyennes.

En raison de la variation des valeurs qui représentent les caractéristiques inhérentes aux matières et afin d'obtenir des valeurs qui représentent les caractéristiques extrêmes, il convient de modifier les valeurs de  $\mu_m$  et  $K_{s,m}$  par les facteurs de conversion 0.9 et 1.15.

Les combinaisons suivantes sont utilisées lors du calcul des actions maximales :

**$P_h$  max**, pour  $K_s=1.15 K_{s,m}$  et  $\mu=0.9\mu_m$

**$P_v$  max** pour  $k_s=0.9 K_{s,m}$  et  $\mu=0.9\mu_m$

**$P_w$  max** pour  $k_s =1.15 K_{s,m}$  et  $\mu=1.15\mu_m$

Pour les structures en coque, les valeurs minimales des actions stabilisatrices peuvent être les plus défavorables [37]

#### IV.2.2.Calcul des actions de la matière ensilée par les formules de l'Eurocode

Pour calculer les actions de la matière entreposée par les règles Eurocode, on utilise les formules citées ci-dessous :

##### IV.2.2.1. Action de remplissage

###### A . Partie cylindre

Contrainte de frottement de paroi en fin de remplissage :  $P_{wf}(z) = \gamma \frac{A}{U} c_z(z)$  .....(14)

Pression horizontale en fin de remplissage  $P_{hf}(z) = \frac{\gamma A}{\mu U} c_z(z)$  .....(15)

Pression verticale due a la matière ensilée  $P_v(z) = \frac{\gamma A}{E_s \mu U} c_z(z)$  .....(16)

Coefficient de Janssen  $c_z(z) = 1 - e^{(-z/z_0)}$  ..... (17)

Paramètre utilisé pour le calcul des actions  $Z_0 = \frac{A}{E_s \mu U}$  .....(18)

$\gamma$  : est le poids volumique ;

$\mu$  : est le coefficient de frottement sur la paroi ;



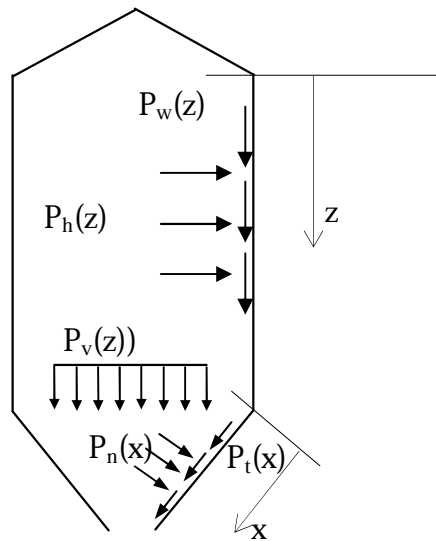
$K_z$  : Valeur de calcul du rapport de pression horizontale / pression verticale ;

Z : est la profondeur considérée (**Fig.IV.3**) ;

U : est le périmètre intérieur. [37]

La force verticale résultante dans la paroi  $P_w(z)$  par unité de longueur du périmètre agissant à toute profondeur **Z** est :

$$P_w(z) = \int_0^z P_{wv}(z) dz = \gamma \frac{U}{U} [z - z_0 c_s(z)] \dots\dots\dots (19)$$



**Fig.IV.3.** Les différentes actions sur les silos [37]

**B. Actions sur la trémie**

Pour le calcul des efforts statiques, qui s'exercent sur les parois des trémies, on utilise les formules suivantes :

$$P_n = P_{n1} + P_{n2} + (P_{n1} - P_{n2}) \frac{X}{l_n} \dots\dots\dots (20)$$

$$P_{n1} = P_{v0} (c_b \cos^2 \alpha + \sin^2 \alpha) \dots\dots\dots (21)$$

$$P_{n2} = c_b P_{v0} \cos^2 \alpha \dots\dots\dots (22)$$

$$P_{n3} = 3,0 \frac{U}{U} \frac{\gamma K_z}{\gamma K_z} \sin^2 \alpha \dots\dots\dots (23)$$

Ou

X : est la longueur comprise entre 0 et  $l_n$ ; voir (**Fig.IV.3**)

$P_{n1}$  et  $P_{n2}$  sont les pressions correspondant à la pression verticale dans la matière ensilée directement au-dessus de la transition ;

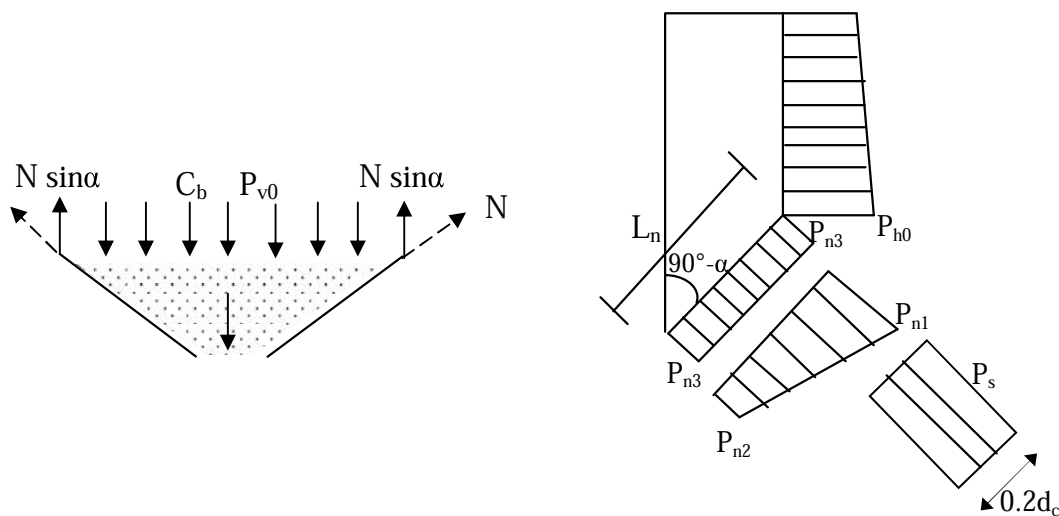
$P_{n3}$  est la pression correspondant au remplissage de la trémie ;

$c_b$  : est un coefficient d'amplification de la pression sur le fond tenant compte d'une répartition non uniforme de l'action calculée  $c_b=1.2$ .

$P_{v0}$  : est la pression verticale agissant à la transition

La valeur de la contrainte de frottement sur la paroi,  $P_t$  est indiquée par

$$P_t = P_n \mu \dots \dots \dots (24)$$



**Fig.IV.4.** Actions sur la trémie et forces de traction au sommet. [37]

**IV.2.2.2. Action due à la vidange**

**A. Partie cylindre**

Les actions dues à la vidange sont composées d'une partie fixe et d'une partie libre, appelées actions localisées.

Les pressions fixes doivent être calculées comme suit :

$$P_{we} = c_w P_{wf} \dots \dots \dots (25)$$

$$P_{he} = c_h P_{hf} \dots \dots \dots (26)$$

$P_{we}$ : Contrainte de frottement sur la paroi verticale lors de la vidange

$P_{he}$  : Pression horizontale lors de la vidange

Où dans les silos élancés, les coefficients d'amplification de contraintes de frottement et de la pression horizontale sur la paroi sont :

$$C_w=1.1 \text{ et } C_h=C_0 \text{ (silo non déchargé par le haut)}$$

La grandeur de la pression de vidange localisée,  $P_p$

$$P_p = 0.2 \beta P_{hs} \dots \dots \dots (27)$$

Où :

$\beta$  : Coefficient d'amplification de la pression localisée, dépend de l'excentricité la plus importante, entre celles au remplissage et à la vidange :

$$\beta = 1 + e/dc \dots \dots \dots (28) [37]$$

### B. Actions sur la trémie

Pour le calcul des actions sur les parois de la trémie du silo, on suppose que la matière pulvérulente ensilée transmet aux parois la pression verticale qu'elle exerce au niveau de la naissance des parois verticales, c'est-à-dire au niveau de la jonction des parois des cellules aux parois à ces trémies.

On considère alors les charges suivantes :

La pression verticale exercée par la matière ensilée, au niveau inférieur des parois verticales.

Le poids de la matière ensilée remplissant la mamelle.

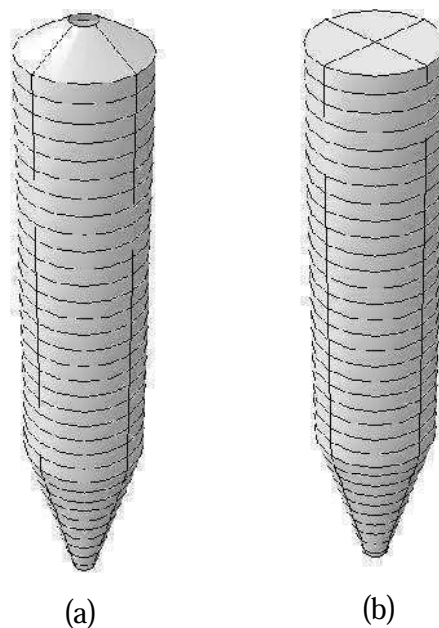
Le poids des parois des trémies.

Pour le calcul des efforts statiques, qui s'exercent sur les parois des trémies, on utilise les formules (20, 21, 22 et 23). [37]

### IV.3. Méthode des éléments finis

#### IV.3.1 Introduction

La solution que nous proposons dans ce travail est de présenter une alternative numérique aux méthodes analytiques citées ci-avant dans l'évaluation des actions de la matière ensilée, consistant à modéliser en plus de la structure elle-même du silo, la matière ensilée en tant que matière continue. (**Fig.IV.5 (b)**)



**Fig.IV.5.**Modélisation de la coque du silo (a) et de la matière granulaire (b)

Il est important dans cette méthode de choisir la loi de comportement convenable à la matière utilisée. Il existe plusieurs codes de calcul par éléments finis qui permettent la réalisation de ce genre d'analyse et qui ont montré leur efficacité. Parmi ces codes, on peut citer :

ABAQUS, ANSYS, NASTRAN,..... Le choix d'utiliser l'un ou l'autre est guidé par les possibilités et les capacités qu'offre chacun dans la modélisation de ce genre de problème. Pour notre part, la souplesse d'utilisation d'ABAQUS, son orientation recherche et académique nous a poussé à l'adopter.

### IV.3.2. Présentation du code de calcul utilisé « ABAQUS »

Le code de calcul ABAQUS est un code commercial généraliste. Il se distingue par son grand champ d'action qui varie de la thermomécanique à l'acoustique en passant par la mécanique des fluides. Dans ce travail la version 6.10 a été utilisée.

Ce code est composé de trois modules différents :

- **ABAQUS STANDARD** généralement utilisé pour le calcul statique et représente le code de calcul implicite ;

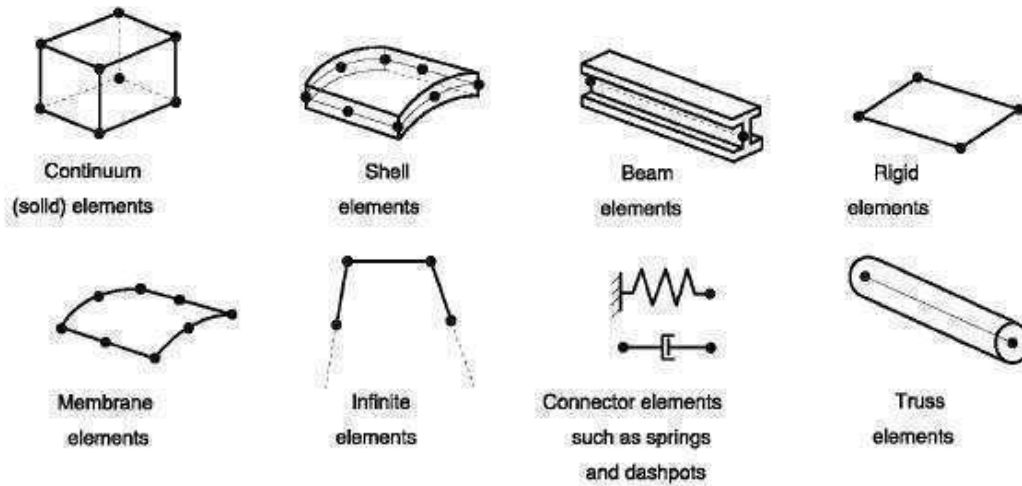
- **ABAQUS EXPLICITE** : utilisé pour le calcul dynamique et représente le code de calcul explicite ;

- et, finalement, le module **ABAQUS CAE** : ce module permet de visualiser les différentes simulations. Premièrement la structure où le problème à traiter est défini par ses caractéristiques géométriques, dont les propriétés physiques seront appliquées à ses entités. Ensuite, nous devons choisir le type d'analyse, appliquer le chargement à la structure, appliquer les conditions aux limites ainsi que le maillage.

Finalement, pour la réalisation des calculs, la synthèse d'un fichier d'analyse est nécessaire, ce dernier sera appelé par l'un des deux modules de calcul (STANDARD ou EXPLICIT) qui dépendent elles-mêmes du type de l'analyse choisie comme il a été déjà signalé. [38,39]

### IV.3.3. Présentation des différents types d'éléments dans ABAQUS

Comme tout code de calcul, ABAQUS dispose d'une multitude de types d'éléments qui diffèrent par leurs propriétés d'interpolation, de symétrie, et leurs propriétés physiques. Ainsi, le code propose des éléments à 3 dimensions (3D), à 2 dimensions (2D), des éléments linéaires (1D) et les connecteurs (**Fig.IV.6**). Le choix entre ces différentes dimensionnalités dépend de la maîtrise du problème à simuler. Ce qui permet de tenir compte des symétries de géométrie, des chargements, des conditions aux limites et des propriétés des matériaux.



**Fig.IV.6.** Différents types d'éléments disponibles dans la bibliothèque d'ABAQUS. [38,39]

#### IV.3.4. Interactions de contact

Lorsque le problème est constitué de deux ou plusieurs éléments qui sont en contact, (*ce qui est le cas dans notre travail*), il est nécessaire de définir l'interaction entre eux.

Il existe deux méthodes pour réaliser l'interaction sur ABAQUS :

- Soit par la modélisation du contact basée sur l'interaction des surfaces ;
- Soit par la modélisation basée sur l'utilisation d'éléments de contact.

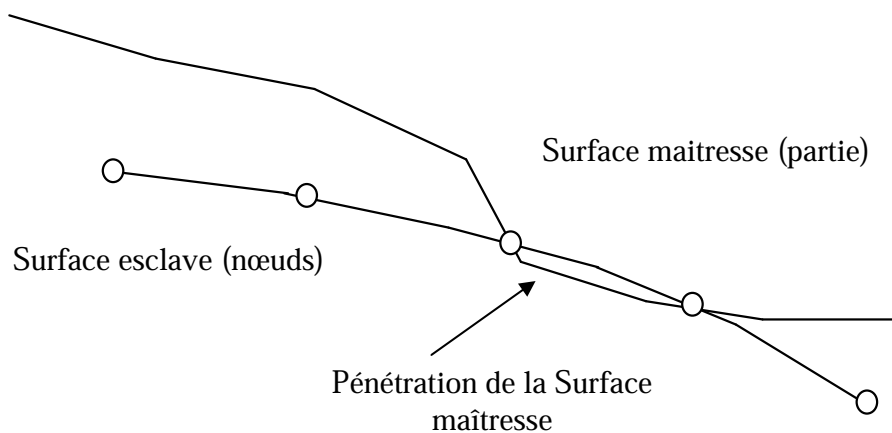
La modélisation du contact basée sur l'interaction des surfaces est généralement la plus utilisée, elle permet de décrire le contact aussi finement que possible.

Cette méthode a été utilisée dans ce travail, elle se résume en trois étapes :

- Définir toutes les surfaces qui seront potentiellement en contact ;
- Définir parmi celles-ci quelle surface interagit avec quelle autre ;
- Définir les modèles mécaniques et thermiques qui régissent le comportement des surfaces lorsqu'elles sont en contact.

Par défaut l'interaction de contact se fait par l'algorithme « Maître-esclave », ou les nœuds sur la surface esclave ne peuvent pas pénétrer la surface maîtresse. Cet algorithme ne pose aucune restriction sur les nœuds de la surface maîtresse : elles peuvent pénétrer la surface esclave comme il est présenté sur la figure (**Fig.IV.7**). [38]

Pour la formulation de cet algorithme, il faut choisir la surface maîtresse ou esclave correctement, pour réaliser la meilleure simulation possible du contact.



**Fig.IV.7.** Pénétration de la surface maîtresse. [38]

On peut suivre les règles suivantes :

- La surface esclave est toujours la surface déformable dans le cas d'une paire incluant des surfaces rigides ;
- Si les rigidités sont équivalentes, la surface esclave est celle finement maillée.

L'interaction entre deux surfaces en contact consiste en deux composantes, l'une est normale à la surface, et l'autre est tangentielle.

#### **IV.3.4.1. Interactions normales à la surface de contact**

On dit que les surfaces sont en contact si leurs séparations (distance entre les plans tangents) deviennent nulles, les pressions peuvent être transmises de la surface esclave à celle maîtresse, si ces pressions sont égales à zéro, elles se séparent.

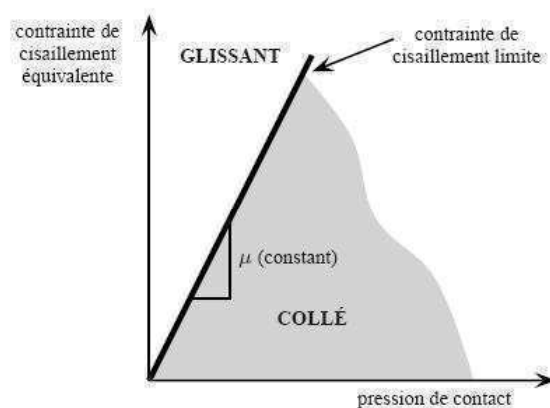
#### **IV.3.4.2. Interactions tangentielles à la surface de contact**

Le modèle Coulomb est utilisé pour définir l'interaction tangentielle, dont le coefficient de frottement sera utilisé.

Ce modèle constitue la base de l'interaction tangentielle, où la force de cisaillement est transmise entre les surfaces en contact, jusqu'à une certaine amplitude limite à partir de laquelle elles commencent à glisser l'une par rapport à l'autre. En deçà de cette limite, le régime est dit collé. [38,40]

La contrainte de cisaillement critique  $\tau_{crit}$  est linéaire et dépend de la pression de contact ( $\tau_{crit} = \mu p$ ) et le coefficient de frottement  $\mu$ , ( $\mu$  est le même dans toutes les directions (modèle isotrope)).

le calcul du régime collé/glissant (**Fig.IV.8**) se fait avec la contrainte de cisaillement équivalente  $\tau_{eq} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2}$ ,  $\tau_1$  et  $\tau_2$  sont les composantes orthogonales de cisaillement. De même pour le calcul des vitesses de glissement équivalentes, on utilise la formule :  $\gamma_{eq} = \sqrt{\gamma_1^2 + \gamma_2^2}$ .



**Fig.IV.8.** Modèle de Coulomb pour le frottement. [40]

### Remarque

Lorsque le modèle a une seule direction de glissement (1D), la contrainte de cisaillement et la vitesse équivalente sont :  $\tau_{eq} = \tau$  et  $\gamma_{eq} = \gamma$  parce que la frontière de glissement définit une ligne. [38,40]

### IV.3.4.3. Gestion des contacts sous ABAQUS

Sur ABAQUS, il existe plusieurs algorithmes pour la gestion de contact. Dans notre travail l'algorithme type « penalty » a été utilisé.

Cet algorithme évalue la force de pénétration des nœuds esclaves et lui oppose une force résistante. De même la surface maîtresse subit la même force de sorte qu'elle ne puisse pas pénétrer la surface esclave. [38]



### IV.3.5. Lois de comportement de la matière entreposée

#### IV.3.5.1. Introduction

Les grains ou les céréales en général que l'on stocke habituellement en silos, constituent un milieu pulvérulent ou pseudo-solide sans cohésion. Leurs lois d'équilibre sont encore mal définies et pour lesquelles on cherche une solution basée sur la théorie de l'équilibre d'un milieu élastique, homogène, isotrope et indéfini, malheureusement, aucune de ces hypothèses ne concerne le milieu pulvérulent. Il apparaît en effet que, pour l'équilibre d'une masse pulvérulente ensilée, le facteur temps, la vitesse de remplissage, la façon dont les grains sont entassés, la hauteur de chute des grains pour le remplissage des silos, et la compressibilité de la matière ont une grande importance, car ils influent sur les caractéristiques principales du milieu pulvérulent : densité, angle de frottement interne, coefficient de frottement sur les parois. [24]

Le problème posé par l'équilibre d'une masse pulvérulente ensilée est donc des plus complexes : il échappe à la théorie de l'élasticité et n'a jamais été complètement résolu. [41]

#### IV.3.5.2. Lois de comportement utilisées dans les anciens travaux

Pour avoir de bons résultats des contraintes et des pressions sur les parois du silo, beaucoup de travaux ont été réalisés en analysant la variation : soit les conditions aux limites, soit l'épaisseur des parois, soit la loi de comportement de la matière ensilée....

- Cinq lois de comportement de la matière ensilée ont été utilisées dans le travail de R.J Goodey, C.J Brown, J .M Rotter [29]:

- Linéaire élastique.

- Poreux élastique -non linéaire.

- Linéaire élastique avec le critère de plasticité de Mohr Coulomb.

- Linéaire élastique avec le critère de plasticité de Drucker-Prager.

- Poreux élastique avec le critère de plasticité de Drucker-Prager.

Il est montré dans [29], que les courbes des pressions réalisées par la loi de comportement linéaire élastique avec le critère Drucker-Prager pour la partie plastique et celles de poreux élastique avec la même loi pour la partie plastique ont donné des résultats proches de ceux calculer par la méthode analytique de Janssen.

Pour cette raison le modèle constitutif poreux élastique avec le critère de plasticité Drucker-Prager était choisi parce qu'il est simple et demande moins de paramètres.

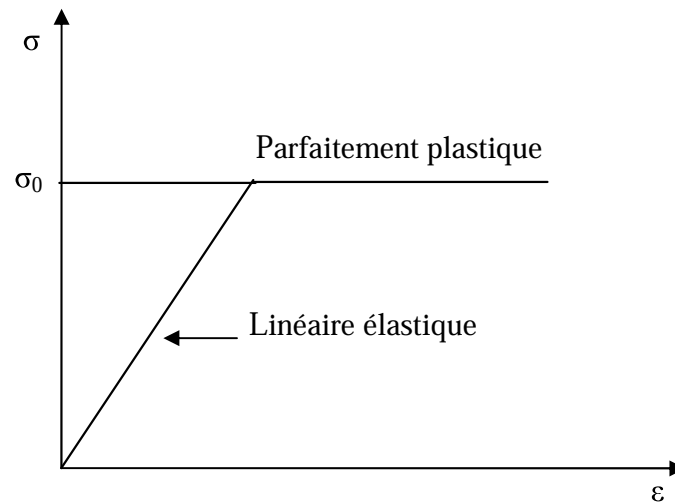
- Ayuga et Guaita, [41] ont utilisé un comportement de la matière basé sur le critère de plasticité Drucker-Prager, ce dernier est utilisé lorsqu'on considère l'effet de l'expansion volumique de la matière (Drucker-Prager 1952) [41].
- Dans d'autres travaux [29,31], les pressions de remplissage dans un solide en vrac ont été modélisées en utilisant une loi de comportement couplée de modèle poreux élastique avec celui de plasticité «Drucker-Prager». Cette loi a été appliquée avec succès aux problèmes des silos.
- Dans le travail de Guaita, Couto et Ayuga [32], le critère de plasticité de Drucker-Prager avec celui élastique a permis de modéliser les grains avec plus d'adaptation à la réalité que celui d'un comportement élastique seul.
- Bien qu'il existe des modèles complexes, P Vidala, E Gallego, M Guaita, F Ayuga [33], ont conclu de leur travail que le modèle Drucker-Prager est *suffisamment précis* pour le calcul pratique des silos, comme il a été vérifié par les tests empiriques et les résultats numériques.....

Le modèle de plasticité de Mohr Coulomb définit le comportement plastique (critère plastique et loi d'écoulement), ainsi le critère Drucker-Prager diffère de celui de Mohr Coulomb par la définition de la surface de plasticité comme un cône circulaire [41,29] dans l'espace de contrainte déviatorique, ce qui augmente la performance numérique. [29]

- ✓ *Il apparaît que le comportement élastique linéaire avec le critère de plasticité de Drucker-Prager est le plus utilisé pour la modélisation des matières entreposées dans les silos, du fait qu'il est simple, et ses résultats sont proches de celles analytiques. Par conséquent, nous nous proposons pour notre travail de l'utiliser pour la modélisation de la partie plastique du comportement des grains solides.*

#### IV.3.5.3. Loi élastique -plastique

Le modèle du comportement des grains élastique-plastique est de la forme d'une région élastique et une région plastique comme il est représenté sur la figure (**Fig.IV.9**) (diagramme contrainte-déformation). La région élastique, dont le comportement classique utilisé est le linéaire isotrope, pour cette raison, nous avons besoin seulement de deux paramètres pour définir cette région: le module d'élasticité,  $E$ , et le coefficient de Poisson,  $\nu$ .



**Fig.IV.9** .Modèles de comportement élastoplastique.

À propos du domaine plastique, deux paramètres seulement de la matière sont exigés pour la formulation du modèle de Drucker-Prager: l'angle de frottement interne  $\varphi$ , et la cohésion  $c$ . cette formulation est rendue plus effective, sur la majorité des logiciels de calcul, du fait qu'elle permet la considération des règles d'écoulement non associée (qui tient compte du changement dans la direction du frottement des grains), dans ce cas un troisième paramètre est exigé qui est: l'angle de dilatation,  $\psi$ . [28]

#### IV.3.5.4. Le modèle Drucker-Prager

La fonction d'écoulement pour le modèle Drucker-Prager est donnée par la relation suivante :

$$f = \sqrt{J_2} + \alpha \cdot I_1 - k = 0 \dots \dots \dots (26)$$

$\alpha$  et  $k$  : constante du modèle dépendant respectivement de l'angle de frottement et la cohésion.

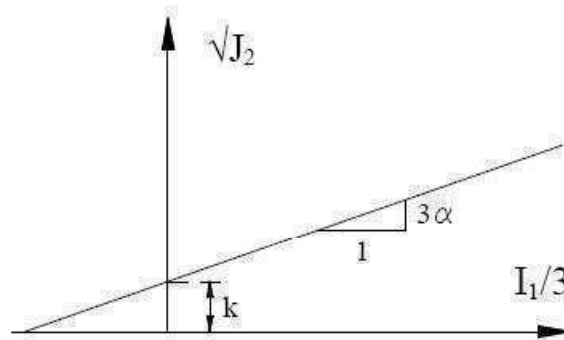
$J_2$  : 2<sup>em</sup> invariant du tenseur déviateur des contraintes;

$I_1$  : 1<sup>er</sup> invariant du tenseur des contraintes.

Les paramètres de la matière peuvent être déterminés à partir des paramètres de celles de Mohr-Coulomb obtenues de l'essai triaxial.

Pour comparer le critère de plasticité 2D de Mohr Coulomb et le modèle du sol 3D du Drucker Prager ce dernier est exprimé dans les termes invariants.

Le modèle Drucker Prager est linéaire dans l'espace invariant  $\sqrt{J_2}$ ,  $I_1/3$  comme il est présenté sur (Fig.IV.10). [38,42,43]



**Fig.IV.10.** Surface d'écoulement de Drucker-Prager. [38,42]

Quand l'équation (26) est inférieure à zéro, le matériau subit seulement des déformations élastiques, et quand  $f$  est égale à zéro, le matériau s'écoulera plastiquement et subira les deux déformations élastique et plastique.

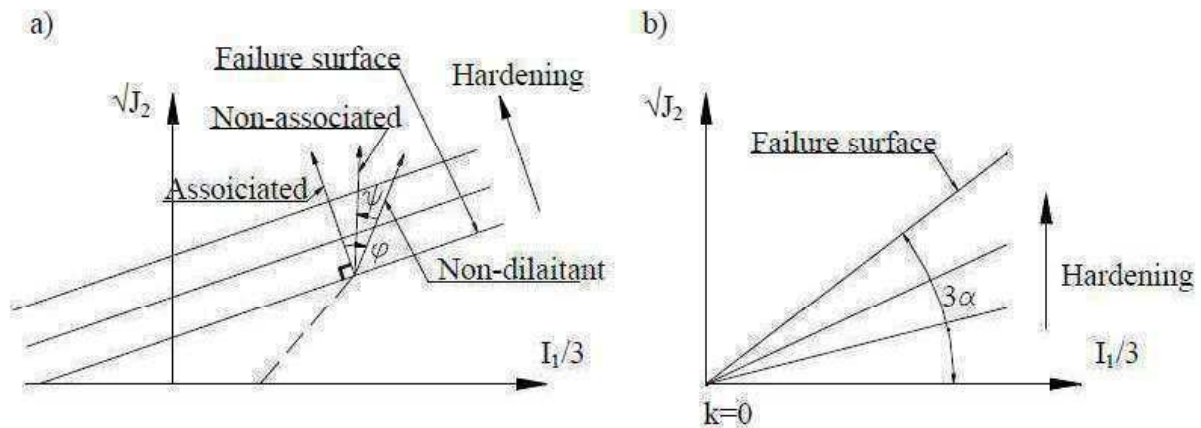
$f < 0$  comportement élastique idéal.

$f = 0$  comportement élasto- plastique.

Lorsque le comportement élasto-plastique est considéré, il est contrôlé par les règles d'écoulement plastique (Fig.IV.11(a)) qui est contrôlé par l'écrouissage du matériau. Une déformation plastique accompagne l'expansion volumique du matériau de Drucker-Prager qui représente une dilatation uniforme, alors le critère utilise l'écrouissage isotropique (Fig.IV.11 (a)).

Le matériau frictionnel est non cohésif de nature, ce qui n'est pas une bonne description pour un comportement d'écrouissage. Lorsque le comportement est élasto-plastique, le critère Drucker-Prager a besoin de la cohésion pour définir les contraintes plastiques.

Dans la nature le comportement élasto-plastique existe dans toutes les périodes de chargement, cela implique que l'écrouissage doit être défini comme il est représenté sur (Fig.IV.11. (b)). En définissant l'écrouissage comme il est représenté sur la figure (Fig.IV.11. (b)), l'influence de la cohésion sur les surfaces d'écoulement est exclut. [38,42]



**Fig.IV.11.** Ecrouissage: a) par Drucker-Prager et b) Prager [38,42]

#### IV.3.5.5. Modèle Drucker-Prager dans ABAQUS

Cette section contient la description du modèle Drucker-Prager sur ABAQUS. La terminologie et les signes de définition utilisés dans la section suivante sont identiques à ceux qui sont donnés par le manuel ABAQUS. Dans ce travail le modèle linéaire a été utilisé. [38,42]

##### ✓ Modèle linéaire de Drucker-Prager

Sur ABAQUS, le critère linéaire de Drucker-Prager est présenté sur la figure (Fig.IV.12) et s'écrit par l'équation :

$$f = t - p \cdot \text{tg}(\beta) - d = 0$$

$p$  : est la contrainte équivalente (moyenne) ;  $\beta$  et  $d$  représentent les facteurs de frottement et de cohésion,  $t$  défini par la formule :

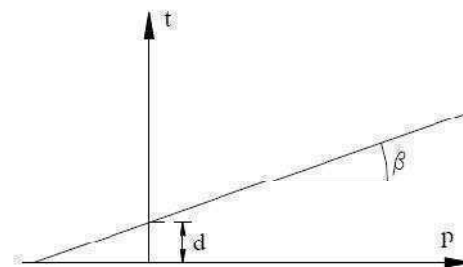
$$t = \frac{1}{2} \cdot q \cdot \left[ 1 + \frac{1}{k} - \left( 1 - \frac{1}{k} \right) \cdot \left( \frac{r}{q} \right)^3 \right]$$

D'où  $q$  : est la contrainte équivalente de Von Mises ;

$r$  : le troisième invariant de la contrainte déviatrice ;

$k$  : coefficient qui définit le rapport entre la contrainte plastique dans la compression triaxiale et la traction.

Le facteur de cohésion «  $d$  » est défini comme suit :



**Fig.IV.12.** Modèle Drucker-Prager linéaire

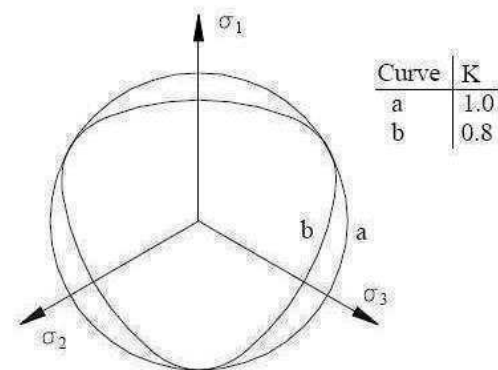
$d = \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \text{tg}(\beta)\right) \cdot \sigma_c$ , si l'écoulement est défini par la contrainte plastique de compression uniaxiale,  $\sigma_c$ .

$d = \left(1 - \frac{1}{3} \cdot \text{tg}(\beta)\right) \cdot \sigma_t$  Si l'écoulement est défini par la contrainte plastique de traction uniaxiale,  $\sigma_t$ .

$d = \frac{\sqrt{3}}{2} \tau \left(1 + \frac{1}{K}\right)$  Si l'écoulement est défini par la contrainte plastique de cisaillement,  $\tau$ .

Le coefficient  $k$  définit le rapport entre la contrainte plastique triaxiale de compression et de traction. Quand la traction triaxiale est égale à la compression triaxiale, alors  $k=1$  et  $t=q$  et la surface plastique est égale au cercle de Von Mises dans le plan principal déviateur.

Il est exigé que  $0.778 < k < 1$  pour s'assurer que la surface est convexe.



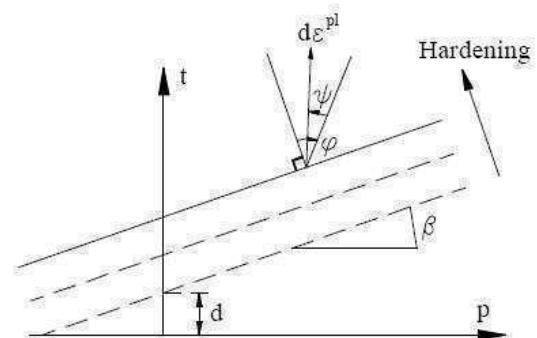
**Fig.IV.13.** La surface limite par Drucker Prager dans le plan déviatorique.

Pour les matériaux granulaires, le modèle linéaire est utilisé normalement avec l'écoulement non associé  $\psi \neq \phi$ , cela implique que l'écoulement n'est pas normal à la surface plastique dans le plan  $p-t$  (**Fig.IV.14**)

### Remarque

Si les données expérimentales ne sont pas disponibles et les seuls paramètres sont l'angle de frottement et la cohésion, le modèle de Mohr Coulomb peut être utilisé pour calculer les paramètres nécessaires du modèle linéaire de Drucker-Prager.

Les paramètres dont on a besoin pour définir le modèle linéaire de Drucker-Prager sur ABAQUS sont donnés par les équations suivantes :



**Fig.IV.14.** La surface limite et la direction d'écoulement plastique dans le plan  $p-t$

$$tg(\beta) = \frac{6 \cdot \sin(\varphi)}{3 - \sin(\varphi)}$$

$$k = \frac{3 - \sin(\varphi)}{3 + \sin(\varphi)}$$

$$\sigma_c^0 = 2 \cdot c \cdot \frac{\cos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}$$

Où  $\beta$  est l'angle de frottement,  $k$  rapport d'écoulement et  $\sigma_c^0$  est la contrainte plastique. [38, 42,44]

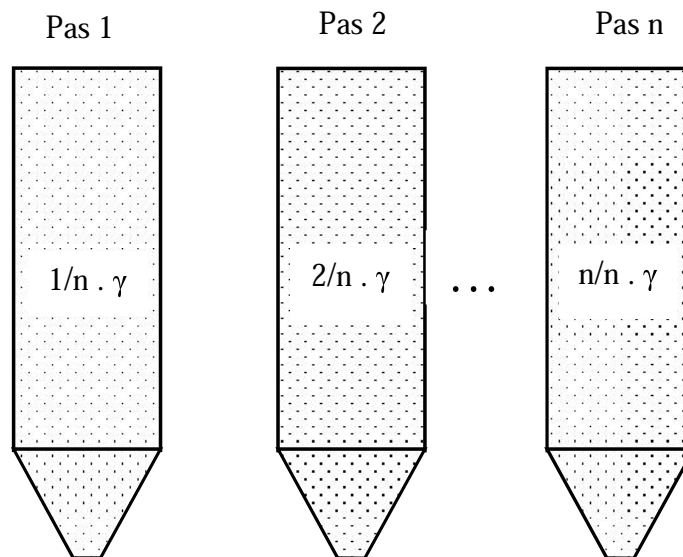
### IV.3.6. Modélisation du remplissage et de la vidange sur ABAQUS

Il existe deux méthodes de modélisation du remplissage ou de la vidange du silo :

1-La méthode de l'augmentation/diminution de la charge gravitationnelle ;

2-La méthode de remplissage par couches (augmentation de la matière) « layered fill method ». [29,30, 31, 33,45]

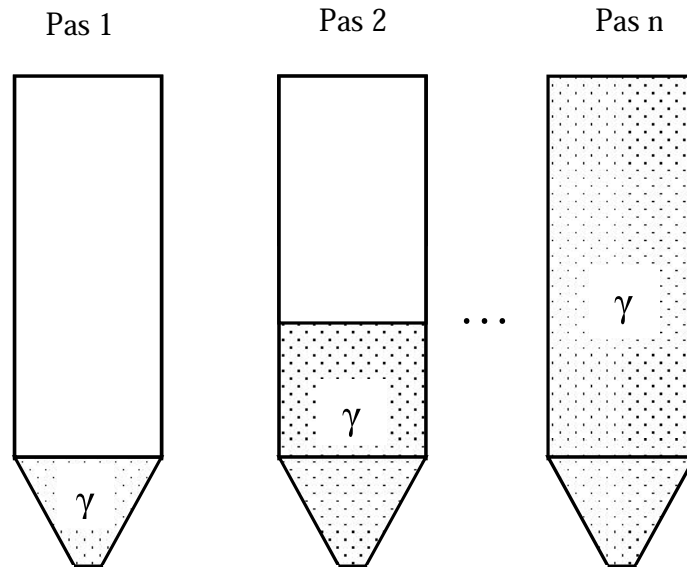
Dans le premier cas (**Fig.IV.15**) la matière est supposée active dès le commencement de la simulation. L'inconvénient de cette méthode est qu'elle ne considère pas les effets de consolidation de la matière dus à la disposition des couches supérieures.



**Fig.IV.15.** Remplissage progressif avec une augmentation graduelle de la charge gravitationnelle

Dans la deuxième méthode (**Fig.IV.16**) le silo est rempli en ajoutant des couches de la matière de poids spécifique ( $\gamma$ ) qui correspond à la couche, c'est une méthode plus proche de la réalité.

L'inconvénient de cette méthode est que, lorsqu'on obtient pour le premier pas (pas 1) une solution, il est difficile de remailler la matière déjà calculée pour aller au pas 2 de charge, ce qui implique de créer un nouveau maillage et de raffiner le maillage existant. Ce processus est applicable dans certains programmes commerciaux (comme ABAQUS ou ANSYS).

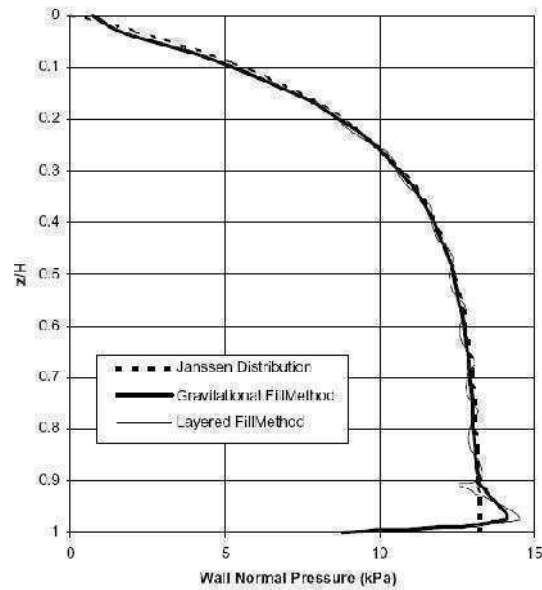


**Fig.IV.16.** Remplissage progressif avec une augmentation graduelle de la matière entreposée.

Cependant, l'application de cette deuxième méthode pose quelques difficultés (désactiver l'action de certains éléments modélisant des couches non encore actives et ensuite les réactiver impliquent un grand niveau de difficulté), par ailleurs, il est souvent difficile selon [28] d'obtenir une solution convergente à cause de l'apparition des problèmes numériques.

- Néanmoins, Goodey et Brown (2003) [31] ont réalisé une courbe de la pression normale à la paroi, afin de faire une comparaison entre les deux méthodes de remplissage.





**Fig.IV.17.** Courbe de la pression normale à la paroi avec les différentes méthodes de remplissage. [31]

Finalement, il apparaît que globalement, les résultats obtenus par la méthode de remplissage par couches sont très proches de celles de l'augmentation de la charge gravitationnelle. Par conséquent, nous nous proposons d'utiliser celle qui nous semble d'un point de vue implémentation plus simple tout en restant fiable et qui est la méthode de l'augmentation (cas du remplissage) ou bien de la diminution (cas de la vidange) de la charge gravitationnelle.

## *Chapitre V*

### *Analyses et résultats*

## V. Analyses et résultats

### V.1. Introduction

La présentation des analyses est divisée en deux parties. La première partie concerne l'utilisation d'une modélisation numérique par la méthode des éléments finis (MEF) pour le renforcement d'un silo métallique. Cette analyse est basée sur une approche paramétrique consistant à étudier le nombre ainsi que la disposition de couches de composites TFC amenant à un renfort optimal d'un silo et à une réduction conséquente des contraintes développées.

La deuxième partie de ce travail concerne l'application de l'approche précédente en vue de la réparation d'un silo réel dont les parois ont été altérées et affaiblies suite à une réduction de leurs épaisseurs par corrosion.

Les deux analyses seront menées sous les deux actions critiques du remplissage et de la vidange des silos. Le silo utilisé pour les tests est un modèle de silo académique déjà étudié par d'autres auteurs et il nous servira d'exemple de comparaison.

Concernant le modèle réel à réparer, il s'agit d'un silo d'une capacité de 1500 tonnes servant à entreposer du ciment actuellement en service dans le port de Djendjen dans la wilaya de Jijel.

Pour valider l'approche numérique, une première série de tests est effectuée sur le silo avant tout renforcement et réparation en comparant le calcul des contraintes obtenues par l'approche de l'Eurocode et l'approche d'évaluation des sollicitations obtenues par la MEF.

Par la suite, l'analyse du renforcement est menée seulement par l'approche numérique de la MEF dans l'évaluation des sollicitations et elle est comparée avec la même analyse avant renforcement. Cette comparaison est présentée en termes de pourcentages de réduction des contraintes circonférentielles et méridionales, et aussi selon, le nombre de couches de TFC utilisées pour le renforcement et enfin selon leur disposition sur les zones critiques du silo (zone à forte concentration de contrainte).

Les résultats trouvés concernant le nombre moyen de couche convenable ainsi que leur disposition dans les zones critiques serviront comme application à la réparation d'un cas de silo réel endommagé suite à une réduction par corrosion de l'épaisseur de sa coque.

## V.2 Résultats dans obtenues le cas du renforcement

Dans cette partie, nous allons présenter les résultats obtenus pour les contraintes circonférentielles et méridionales en renforçant un silo métallique à trémie centrée par le TFC. Les résultats seront présentés en termes de pourcentage de réduction des contraintes selon le nombre de couches de TFC et selon les différentes localisations de renforcement :

### V.2.1. Modélisation

#### V.2.1.1. Géométrie et caractéristiques du modèle analysé

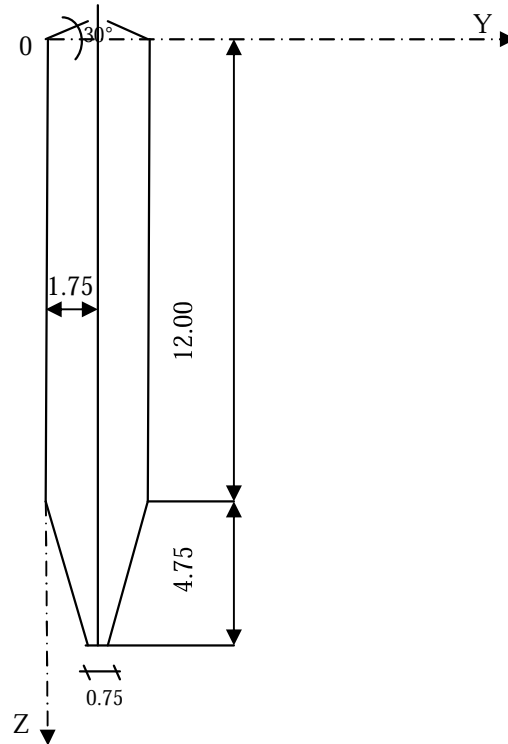
Pour effectuer nos tests numériques, et dans le but d'avoir à disposition des résultats de comparaison, nous avons pris l'exemple d'un silo métallique de forme cylindrique à trémie centrée (**Fig.V.1**) déjà traité par d'autres auteurs [33]. Il s'agit d'un silo utilisé pour entreposer du blé. Les caractéristiques géométriques et physiques de ce silo sont présentées dans les tableaux suivants :

**Tab. V.1.** Les dimensions du silo.

Paramètres	Valeurs(m)
Hauteur total	16.75
Hauteur de la trémie	4.75
Rayon du silo	1.75
Rayon de la trappe du silo	0.375
capacité dépassant 100 tonnes	Silo de classe "2" suivant l'Eurocode

**Tab.V.2.** Caractéristiques de l'acier utilisé

Caractéristique d'acier	Valeurs
Épaisseur des parois	$2.5 \cdot 10^{-3}$ m
Module de Young	$210 \cdot 10^6$ kPa
Coefficient de poisson	0.3
Masse volumique	$7.85 \text{ kN/m}^3$



**Fig.V.1.**Dimensions du silo analysé

L'analyse sera menée en utilisant pour la modélisation, des éléments coques à quatre nœuds pour la paroi et des éléments solides à huit nœuds pour la matière granulaire. Une attention particulière est donnée à la gestion des contacts et l'interaction entre ces deux éléments et au choix d'une loi de comportement pour la matière granulaire en raison de sa nature non linéaire. Comme l'analyse ne concerne que la stabilité de la coque du silo, les règles de dimensionnement de l'Eurocode stipulent (dans un premier temps) de ne pas tenir compte dans cette analyse des supports (poteaux) et d'imposer des conditions d'appuis au niveau de la ceinture sur laquelle s'appuient les poteaux et placés au niveau de la zone de transition. Ainsi, il s'agit de considérer l'appui dans cette zone et d'y bloquer verticalement les déplacements. Il faut préciser que pour compléter le dimensionnement du silo, les règles de l'Eurocode exigent dans un deuxième temps une analyse de la stabilité des supports de l'ensemble en y incluant la coque du silo et ses supports (ceinture et poteaux). Ce dernier aspect n'entre pas dans le cadre de ce travail.

**V.2.1.2. Paramètres du modèle numérique d'analyse :** Avant de mener les analyses numériques proprement dites sur le renforcement des parois du silo, il est nécessaire de préciser les paramètres et les conditions utilisés dans notre modèle d'analyse.

Il s'agit :

- A. choix de la loi de comportement nécessaire pour modéliser la matière granulaire ;
- B. choix de la densité du maillage utilisé en vue d'une solution stable ;
- C. choix des caractéristiques de la matière ensilée : angle de dilatation et module d'élasticité utilisé pour la modélisation du blé ;
- D. choix des méthodes numériques de simulation du remplissage et de la vidange ;
- E. modèle de l'élément multicouche utilisé pour modéliser les parois renforcées par les couches de TFC.

#### *A. Lois de comportement de la matière granulaire (blé)*

La méthode des éléments finis est une méthode utilisée pour la modélisation d'un milieu continu. Cela n'est pas le cas pour une matière pulvérulente ou granulaire. Il est nécessaire dans ce cas de disposer d'un modèle avec une loi de comportement qui doit être adoptée pour approximer les propriétés de la matière ensilée.

Beaucoup de lois de comportement ont été proposées par plusieurs chercheurs [26] et toutes prennent une forme non linéaire élastique plastique.

Parmi toutes celles-ci, celle utilisant la loi de comportement de Drucker Prager avec l'écoulement non associé semble donner des résultats intéressants [33] et a été utilisée pour définir le comportement de la matière granulaire.

Ce modèle est basé sur la surface d'écoulement :

$$F = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \quad (27)$$

$\alpha$  et  $k$  sont des constantes qui dépendent de l'angle de frottement interne et de la cohésion de la matière granulaire.  $I_1$  est le premier invariant de tenseur de contrainte et  $J_2$  est le deuxième invariant déviatorique.

Bien qu'il y ait plusieurs modèles plus complexes pour décrire le comportement de la matière granulaire, celle de Drucker Prager est suffisante pour le calcul pratique des silos à grains

comme cela a été vérifié par les tests expérimentaux et les résultats numériques présentés par d'autres auteurs. [33]

L'interaction entre la paroi du silo et la matière ensilée est un point critique dans le développement d'un modèle numérique d'analyse du silo. Comme la matière granulaire est considérée comme ayant un comportement similaire à un sol, nous nous proposons d'utiliser le modèle de frottement de Coulomb pour décrire l'interaction entre la paroi rigide et la matière granulaire.

La contrainte de cisaillement équivalente  $\tau$  est linéaire et dépend de la pression normale à la paroi  $p_h$ , et le coefficient de frottement  $\mu$  :

$$\tau = \mu p_h \quad (28)$$

### ***B. Densité de maillage pour une solution stable***

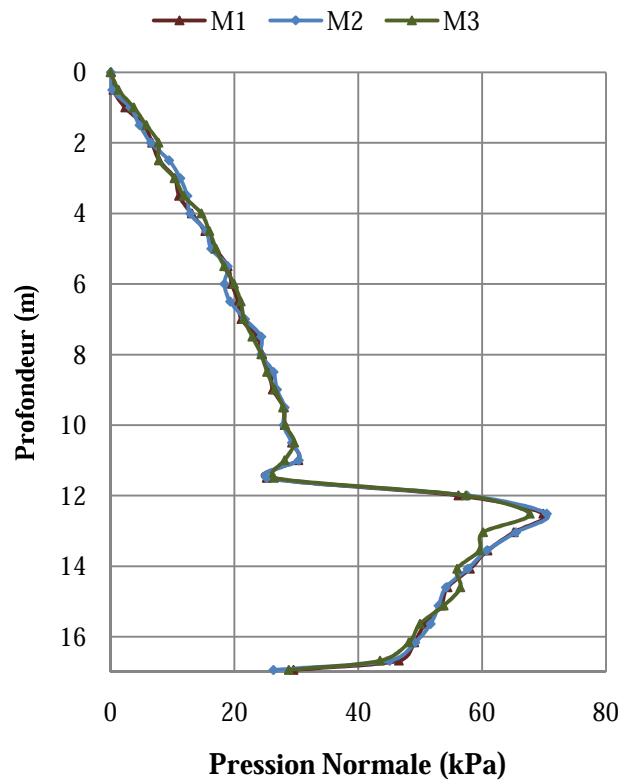
Avant toute analyse, une étude préliminaire doit être réalisée pour trouver le nombre d'éléments coques et d'éléments solides nécessaires pour obtenir un modèle numérique avec des résultats stables. À cet effet, plusieurs tests ont été menés pour analyser l'effet de la densité de maillage sur la stabilité des résultats. Ces tests ont été faits dans l'analyse de l'évaluation de la pression normale à la paroi. Nous présentons sur le tableau (**Tab.V.3**) les trois derniers tests significatifs concernant le nombre d'éléments coques et solides et à partir desquels la solution devient stable.

**Tab.V.3** Nombre des éléments coque et cubique

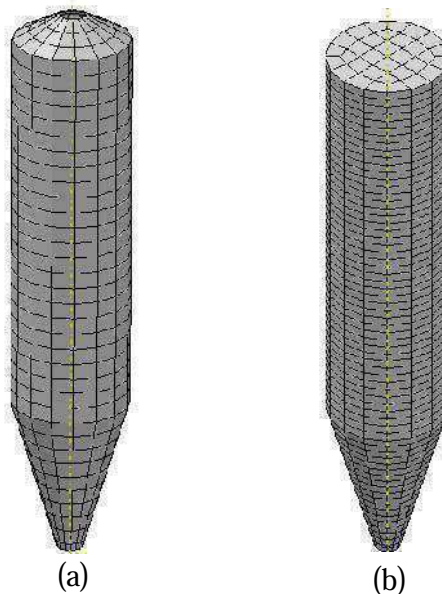
Maillage	Nombre des éléments	
	Paroi du silo (élément coque)	Matière Granulaire (élément solide)
M1	592	2176
M2	760	2992
M3	1728	5712

On peut observer sur la courbe de la figure (**Fig.V.2**) de la pression normale à la paroi qu'à partir du maillage M1 et en l'augmentant jusqu'au M3 la taille du maillage n'a pas effet significatif sur les résultats qui restent à partir de M1 assez stable.

Ainsi, le maillage M1 a été choisi pour mener toutes les analyses dans la suite de ce travail. Les parois du silo sont donc modélisées en utilisant 592 éléments coques avec quatre nœuds (homogène ou multicouche sur les parois à renforcer), et la matière granulaire par 2176 éléments solides à huit nœuds (**Fig.V.3**).



**Fig.V.2.** Effet de maillage sur les pressions normales à la paroi



**Fig.V.3.** Maillage (M1) utilisé du silo (a) et de la matière granulaire (b)



### C. Caractéristiques de la matière (blé), Angle de dilatation et Module d'élasticité

**C.1 Angle de dilatation :** L'angle de dilatation  $\psi$  est l'un des paramètres nécessaires pour pouvoir utiliser le modèle elasto-plastique de Drucker Prager et définir la loi d'écoulement [46].

Pour l'angle de frottement interne  $\beta$ , le calcul se fait par la relation présentée sur la formule (30), avec  $\Phi$  est l'angle de frottement tiré des essais expérimentaux. [44]

Par analogie à cette relation, et comme il est présenté sur la courbe de la figure (**Fig.IV.14**) du chapitre précédent, l'angle de dilatation dans le plan p-t peut être exprimé par la relation (31):

$$\tan\beta^* = \frac{6 \sin\Phi}{3 - \sin\Phi} \dots\dots\dots(30)$$

$$\tan\psi^* = \frac{6 \sin\psi}{3 - \sin\psi} \dots\dots\dots(31)$$

Avec  $\psi^*$  est l'angle de dilatation dans le plan p-t, et  $\psi$  est l'angle de dilatation tiré des essais.

❖ Une étude paramétrique réalisée en considérant des valeurs obtenues d'essais expérimentaux [46,50] de l'angle de dilatation  $\psi$  qui sont présentées sur le tableau (**Tab.V.4**), pour étudier l'influence de ce paramètre sur la pression normale à la paroi (**Fig.V.4**).

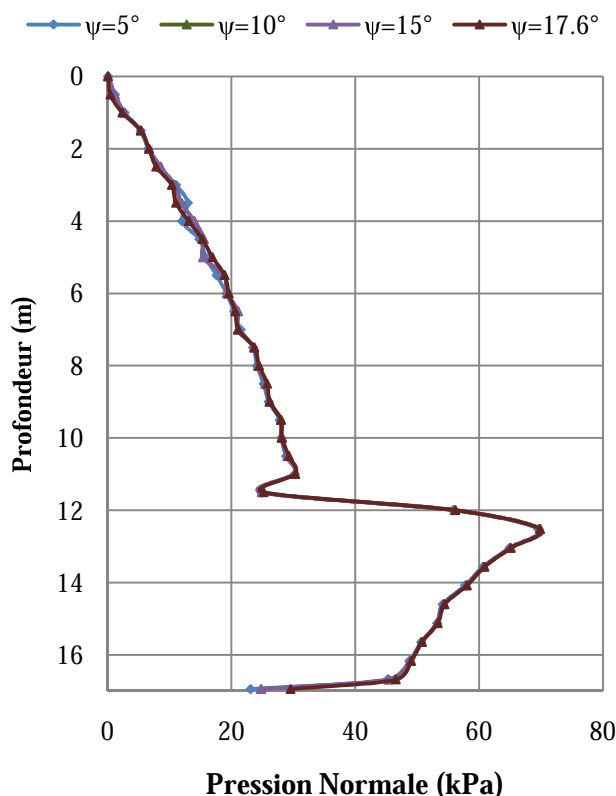
Cette première analyse a été faite en variant la valeur de l'angle de dilatation et en gardant une valeur constante du module d'élasticité égale à  $E=5.129$  Mpa, et (**Fig.V.4**).

**Tab.V.4** Valeurs de l'angle de dilatation

Angle de dilatation ( $\psi^\circ$ )
5°
10°
15°
17.6°

**Tab.V.5** Valeurs du module de Young

Module de Young (MPa)
5.129
10
20
29



**Fig.V.4.** Effet de variation de l'angle de dilatation sur les pressions normales à la paroi

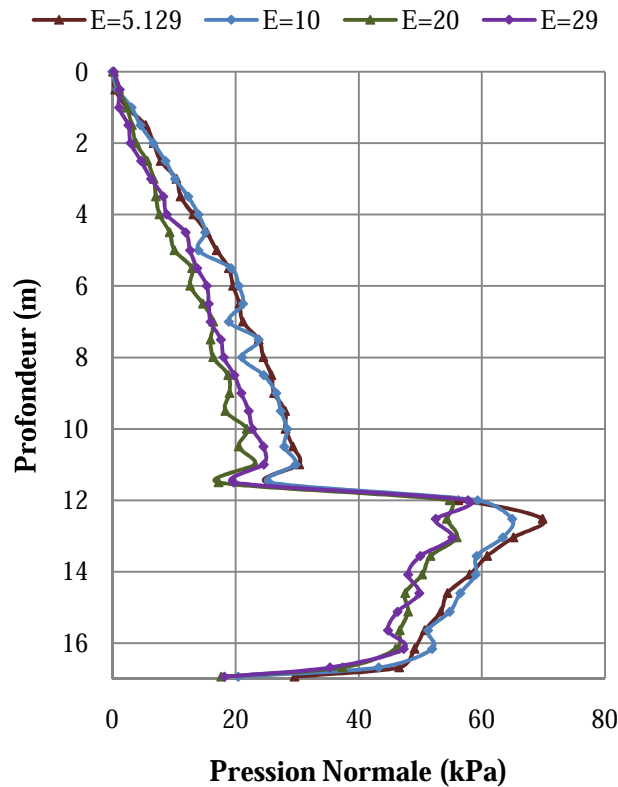
En utilisant ces quatre valeurs de l'angle de dilatation, les courbes des pressions normales à la paroi sont confondues (**Fig.V.4**). Comme l'analyse est statique, on peut conclure que l'angle de dilatation n'a aucune influence. Cela confirme ce qui a été déjà montré par d'autres auteurs [32].

**Remarque :** La même analyse a été menée par les autres valeurs du module d'élasticité  $E$  en variant l'angle de dilatation et le même constat a été observé.

*C.2 le Module d'élasticité :* Comme le comportement de la matière granulaire est complexe, il est clair que la pression exercée par la matière granulaire sur la paroi du silo dépend de la rigidité relative des grains [30]. Ainsi, la rigidité des grains solides a été analysée en variant le module d'élasticité des grains en adoptant les valeurs données sur le tableau (**Tab.V.5**), ces valeurs sont aussi tirées des essais expérimentaux [46,50].

**Remarque :** comme la variation de l'angle de dilatation sur les pressions n'a aucune influence, nous avons choisi une valeur constante égale à  $\psi = 17.6^\circ$  pour voir l'influence de la variation du module d'élasticité sur les pressions.

Il est clair sur la figure (**Fig.V.5**) que l'augmentation du module d'élasticité (augmentation de la rigidité relative des grains solides) provoque une diminution de la pression exercée par la matière granulaire sur la paroi du silo. Puisqu'il s'agit d'une action de renforcement, la valeur maximale des pressions normales à la paroi est recherchée. Ainsi, le cas le plus défavorable du module d'élasticité minimal  $E=5.129$  MPa a été adopté pour le reste de ce travail.



**Fig.V.5.** Effet de variation du module d'élasticité sur les pressions normales à la paroi

Finalement, en plus des valeurs choisies précédemment, les autres propriétés mécaniques du blé utilisées pour définir le comportement de la matière granulaire dans ce travail sont présentées sur le tableau (**Tab. V.6**) et ont été prises des travaux d'autres auteurs [33].

**Tab.V.6.** Caractéristiques mécaniques du blé ensilé

Propriété	Valeurs
Poids volumique (kN/m <sup>3</sup> )	$\delta=8.4$
Module de Young (MPa)	$E=5.129$
Coefficient de poisson	$\nu=0.32$
Coefficient de frottement des grains sur les parois	$\mu=0.2$
Angle de frottement interne	$\rho=25^\circ$
Cohésion (MPa)	$C=0.003$
Angle de dilatation	$\psi=17.6^\circ$

#### *D. Type d'analyse utilisé et méthode de simulation du remplissage et de la vidange du silo*

Dans notre cas (renforcement du silo) deux analyses seront utilisées. La première est une analyse statique générale (remplissage du silo) et la deuxième est une analyse dynamique (vidange du silo).

Les seules charges entrantes en jeu sont le poids du silo et le poids de la matière ensilée.

Le remplissage du silo est simulé par la méthode de *l'augmentation de la charge gravitationnelle*, cette méthode donne des résultats proches de celles expérimentales [29,33], elle est aussi utilisée dans plusieurs travaux citons par exemple: les travaux de Goodey et Brown [29,31], Vidal, Gallego, Guaita et Ayuga [33], Brown et Rotter [30], Vidal, Guaita et Ayuga [32].

Dans la simulation du remplissage par la méthode de *l'augmentation de la charge gravitationnelle*, la totalité de la matière est activée dès le commencement du processus. Ce qui change à chaque fois, c'est la valeur de la masse volumique, ce qui permet de simuler une portion de la charge. Dans ce cas la charge totale est divisée en « n » état correspondant à n fois  $(\frac{\gamma}{n})$ .

1- Le modèle est créé, en prenant en compte tous les éléments modélisant la matière et tous ceux modélisant les parois du silo.

2- À la première étape ( $p=1$ ) on applique une charge gravitationnelle égale à  $p^* \frac{\gamma}{n}$  du poids spécifique de la matière.

3-À la deuxième étape ( $p=2$ ), on applique une charge  $\frac{2\gamma}{n}$  ;

Et ainsi de suite jusqu'à ( $p= n$ ) état où on arrive au poids total de la matière entreposée. [28]

Dans la modélisation de la vidange, la même méthode est appliquée, sauf que dans ce cas la valeur de la masse volumique diminue jusqu'à la vidange complète du silo.

### *E .Modélisation du matériau composite TFC*

La modélisation utilisée analyse la coque du silo qui sera renforcée par le TFC dans un comportement de contrainte plane, il est alors nécessaire de définir pour le TFC ses caractéristiques (le module d'élasticité, le module de cisaillement, le coefficient de poisson) selon deux directions orthogonales.

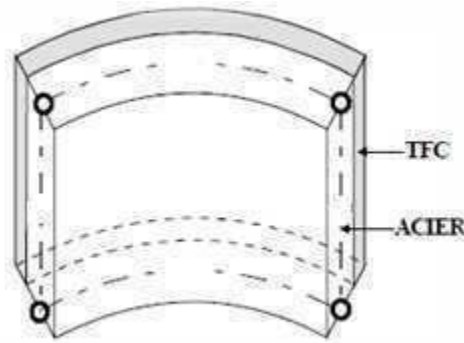
Ce composite tissu de fibres de carbone est un tissu orthotrope avec 70% de fibre dans le sens horizontal et 30% dans le sens vertical avec des fibres orientées à  $90^\circ$  (suivant la norme ISO 7211) [3].

Les données du matériau qui seront introduites dans le modèle numérique sont tirées des essais expérimentaux qui ont été effectués à l'INSA de Lyon sur le TFC [3]. Il s'agit d'un TFC orthotrope de comportement élastique dont les caractéristiques mécaniques sont présentées sur le tableau suivant :

**Tab.V.7.** Caractéristiques mécaniques de TFC [3]

Module dans la direction circonférentielle (E1)  MPa	Module axial(E2)  MPa	Module de cisaillement plan(Glt) MPa	Coefficient de Poisson (vlt)	Epaisseur  (sans la résine)  (mm)
105 000	15 000	5 800	0.3	0.43

Pour simplifier la modélisation du TFC collé sur les parois du silo, nous avons utilisé un élément coque ou section composite (multicouche) à 4 nœuds (**Fig.V.6**) en se basant sur l'hypothèse d'adhérence parfaite.



**Fig.V.6.** Modèle coque multicouche.

Par ailleurs, L'analyse d'un silo montre que sous les cas de chargement du remplissage ou de la vidange, la paroi est plus sollicitée selon sa direction circonférentielle. Cela nous amène à considérer cette direction comme direction privilégiée de renforcement : le TFC est placé de telle sorte que la direction principale des fibres (70%) soit selon la direction circonférentielle du silo

### V.2.2. Analyse du renforcement du silo

Nous présentons dans cette partie les résultats obtenus concernant le renforcement du silo par le TFC dans le but de réduire le taux des contraintes qui s'y développent. Les premiers tests concernent les résultats du renforcement de tout le silo. Nous présentons ensuite une investigation sur l'optimisation du nombre et la disposition des couches du TFC sur les parois du silo donnant le meilleur apport de renforcement.

L'étape essentielle dans cette analyse est évidemment la simulation du remplissage ou de la vidange.

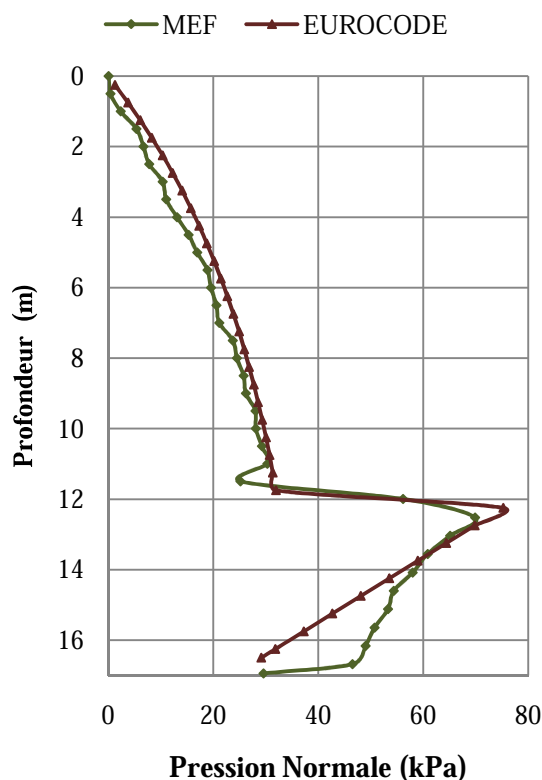
Le comportement du silo étant différent sous ces deux cas de chargement, l'analyse se fera pour les deux cas.

### V.2.2.1. Phase de remplissage du silo

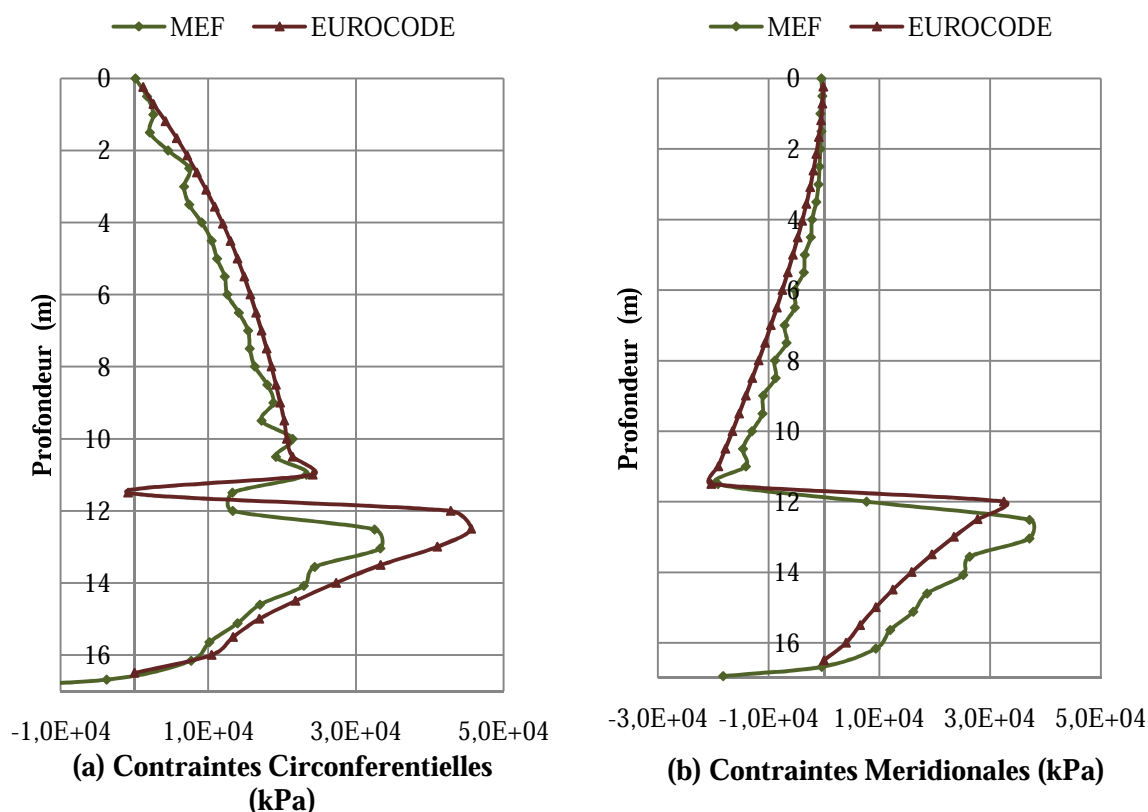
#### A. Renforcement de tout le silo

Plusieurs analyses ont été effectuées en considérant le renforcement de tout le silo dans le but d'analyser son effet sur les différentes parties de la paroi.

Les premières analyses ont concerné l'évaluation de la pression normale à la paroi (**Fig.V.7**) et ensuite les contraintes circonférentielles et méridionales (**Fig.V.8**) qui ont été obtenues le long de la paroi du silo, mais avant tout renforcement. Cette analyse a été menée juste pour comparer l'approche de l'évaluation des sollicitations de la matière ensilée par la méthode de modélisation par éléments finis avec l'évaluation des sollicitations obtenues par les règles de l'Eurocode.



**Fig.V.7.** Comparaison des pressions normales à la paroi obtenues par la méthode des éléments finis et celles calculées par l'Eurocode avant le renforcement du silo.



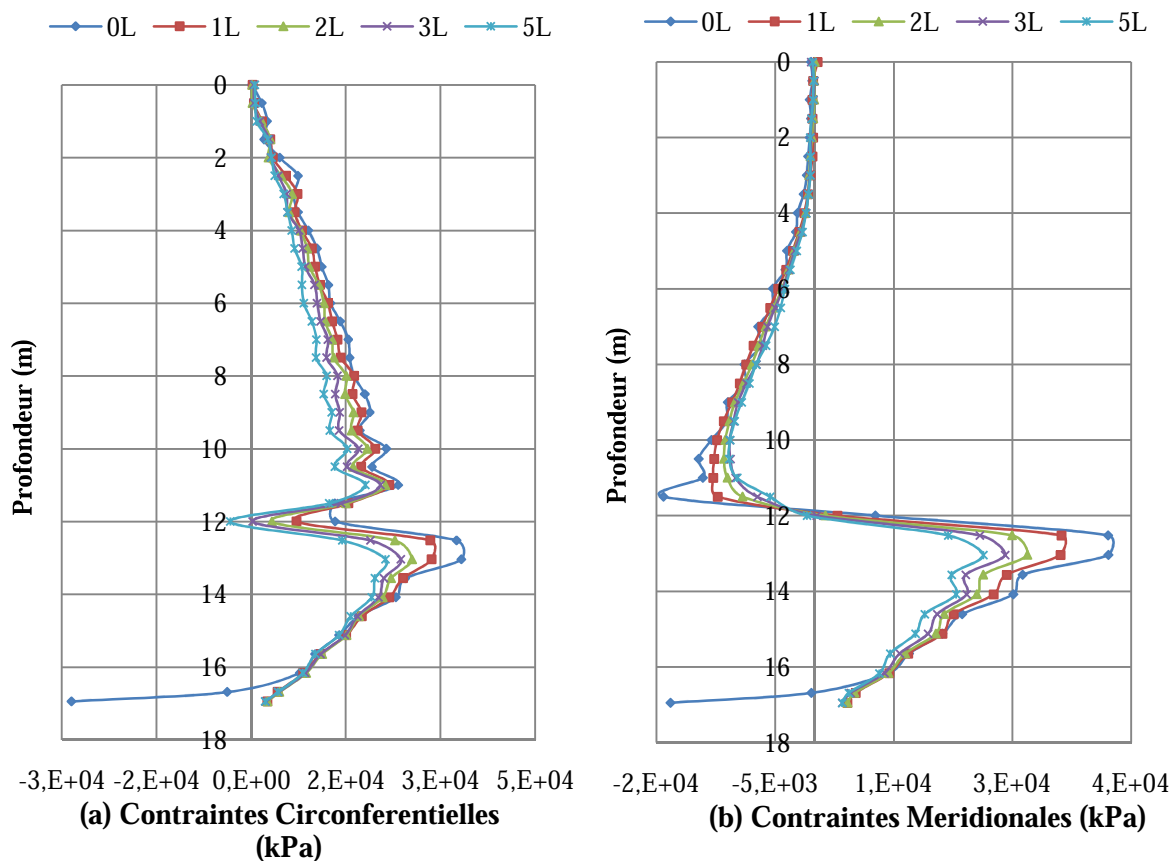
**Fig.V.8.** Comparaison des contraintes obtenues par la méthode des éléments finis et celles calculées par l’Eurocode avant le renforcement du silo.

On peut observer sur les courbes des pressions normales à la paroi, et des contraintes circonférentielles et méridionales que les résultats par la méthode des éléments finis sont proches de celles de l’Eurocode spécialement dans la partie verticale de la paroi du silo. Cependant, pour les contraintes circonférentielles, une augmentation des contraintes est observée à la transition entre la paroi verticale et la trémie du silo pour les courbes de l’Eurocode, alors que cette augmentation est limitée pour l’analyse par la méthode des éléments finis. Ce phénomène peut être expliqué par le fait que par la méthode des éléments finis la paroi du silo ainsi que la matière granulaire sont modélisées, dans ce cas la matière granulaire bloque les déplacements, qui limitent l’augmentation des contraintes.

Dans la suite de l’analyse, seule l’approche de l’évaluation des sollicitations par éléments finis est utilisée. Les tests suivants concernent d’abord le renforcement du silos entier avec différents nombres de couches du TFC en utilisant une analyse statique.

Les résultats sont présentés sur la figure (**Fig.V.9**).





**Fig.V.9.** Renforcement de tout le silo

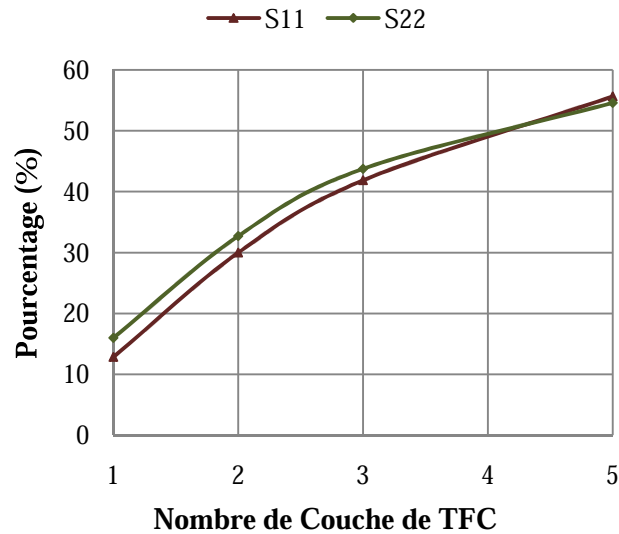
0L ,1L; 2L; 3L; et 5L sont le nombre de couche de TFC appliqué

On peut observer logiquement que les valeurs des contraintes circonférentielles (S11) et méridionales (S22) diminuent en augmentant le nombre de couches du TFC pour toute la profondeur du silo, particulièrement dans la partie de la transition, là où d'habitude les contraintes maximales apparaissent.

On peut noter sur la figure (**Fig.V.9(a)**) que pour 5 couches de TFC, les contraintes circonférentielles à la transition deviennent négatives (compression de la paroi). Ce fait peut être expliqué comme suit : plus la contrainte dans la paroi verticale est importante, moins l'influence se fait ressentir par l'effet d'encastrement du cône au niveau de la ceinture (conditions d'appuis) de la paroi verticale. De ce fait lorsque la robe est renforcée l'influence de la rotation de la jonction sera importante et une réduction de la contrainte circonférentielle est constatée conduisant à une compression de la robe au niveau de la jonction.

Par ailleurs, et en raison des valeurs élevées des contraintes dans la zone de transition, la profondeur à  $Z=12.5\text{m}$  définissant la zone de transition a été choisie pour analyser le

pourcentage de réduction des contraintes en fonction du nombre de couches du TFC. Ces résultats sont présentés sur la figure suivante (**Fig.V.10**).



**Fig.V.10.** Pourcentage de réduction des contraintes pour le renforcement de tout le silo à  $Z=12.5m$ .

Le taux de réduction des contraintes circonférentielles (S11) en appliquant une couche de composite est de 12.82% par rapport au cas non renforcé et augmente jusqu'à 55.61% lorsqu'on applique 5 couches de TFC. De même que pour les contraintes méridionales (S22) le pourcentage de réduction de la contrainte atteint la valeur de 15.96% pour une seule couche de composite et la valeur maximale est de 54.6% lorsqu'on applique 5 couches de composite. Cependant, en analysant de plus près la courbe de la figure (**Fig.V.10**), on remarque que la réduction importante et significative des contraintes est obtenue après seulement un renforcement de trois couches de TFC, (30 %), et le gain supplémentaire obtenu en rajoutant deux couches n'est que de 15%. Cela nous montre qu'une optimisation du coût /nombre de couches se situe vers une moyenne de 3 couches.

Par ailleurs, on peut remarquer aussi que les plus grandes valeurs des contraintes circonférentielles et méridionales se situent dans les régions de (11-12m) du cylindre, et de (12-14 m) de la trémie du silo.

Sachant que le coût du TFC est élevé, nous avons mené plusieurs simulations dans le but d'opter pour un renforcement optimisé consistant à ne renforcer que les parties les plus sollicitées.

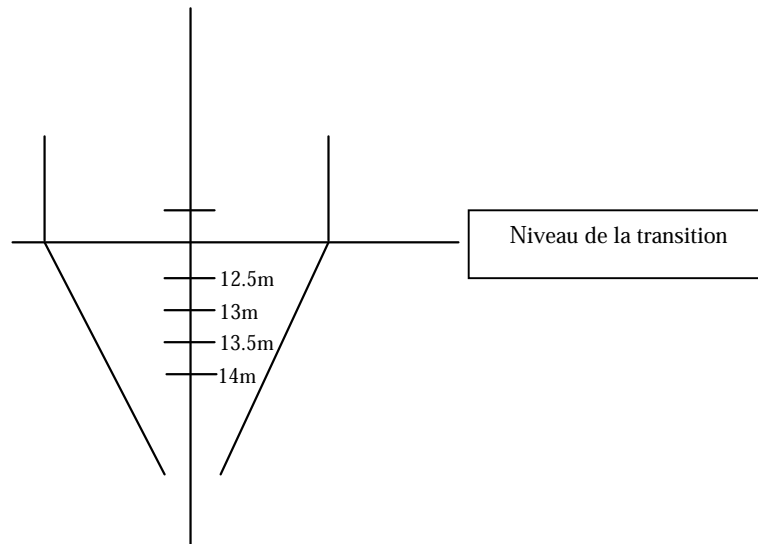
## B. Recherche de la zone optimale à renforcée

En vue d'optimiser les zones à renforcer et décider du nombre de couches de TFC nécessaires pour arriver au rapport optimal coût/réduction des contraintes, une analyse paramétrée a été menée dans laquelle plusieurs zones ont été prédéterminées pour recevoir un nombre variable de couches de TFC de renforcement. Ainsi, et sachant qu'au vu des résultats obtenus généralement pour les silos, les zones les plus sensibles, où se développent les contraintes élevées, sont les zones autour de la zone de transition, on peut évaluer cette zone à peu près entre le quart inférieur du cylindre et le quart supérieur de la trémie.

Pour situer au mieux cette zone, nous proposons de tester plusieurs zones de renforcement en plaçant les couches de TFC autour de la zone de transition sur des hauteurs variant graduellement d'une valeur de 0.5 m et (englobant le point à  $Z=12.5\text{m}$  où sont relevées les contraintes)

Ainsi, nous présentons les résultats du pourcentage de réduction des contraintes en renforçant plusieurs localisations prédéfinies comme suit :

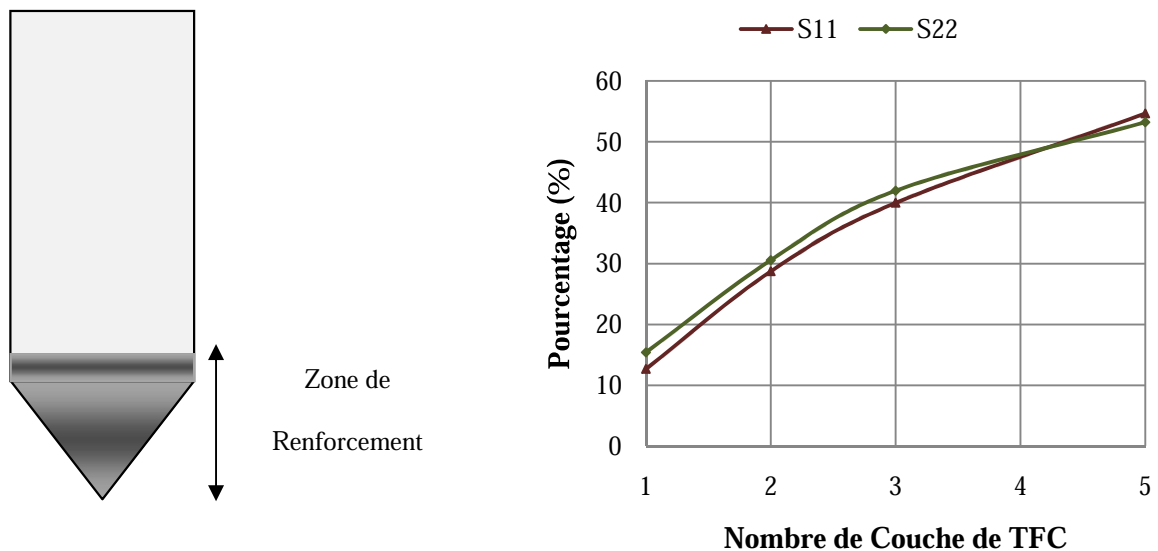
- Localisation N°1** : couche de composite sur 0,5 m du bas du cylindre et sur toute la trémie ;
- Localisation N°2** : couche de composite sur 0,5 m du bas du cylindre et sur 1,0 m sur la partie supérieure de la trémie ;
- Localisation N°3** : couche de composite sur 0,5 m de cylindre et sur 1,5m sur la partie supérieure de la trémie ;
- Localisation N°4**: couche de composite sur 0,5 m de cylindre et sur 2 m sur la partie supérieure de la trémie.



**Fig .V.11.** Les différentes localisations du renforcement

### *B.1. Renforcement de la localisation N°1*

Dans cette analyse, le renforcement pour la localisation N°1 concerne donc la zone à 0.5 m au bas du cylindre et toute la trémie du silo. Les résultats du pourcentage de réduction des contraintes circonférentielles et méridionales à la profondeur  $Z=12.5m$  sont présentés sur la figure (**Fig.V.12**) :



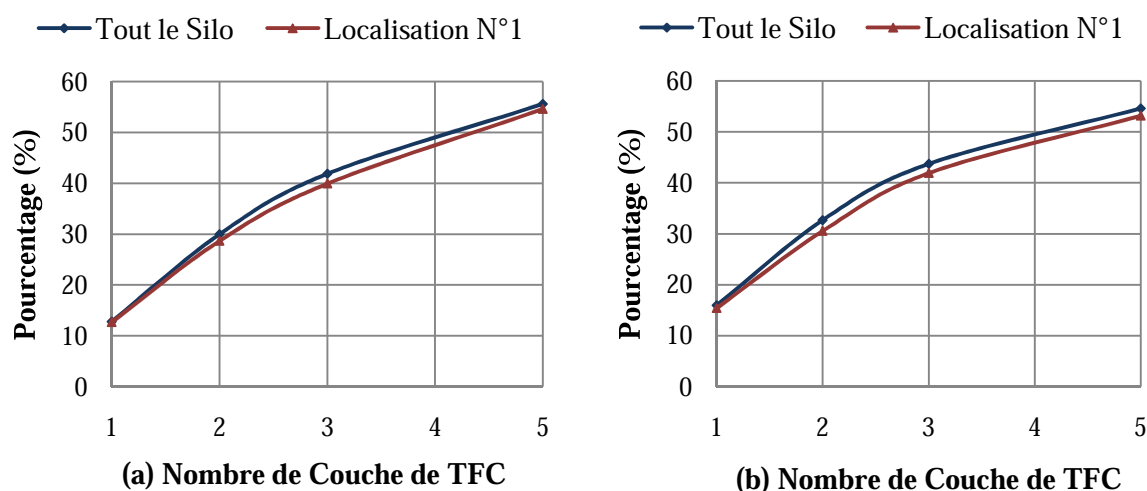
**Fig.V.12.** Pourcentage de réduction des contraintes à  $Z=12.5m$  - localisation N°1-

En appliquant une seule couche de TFC, le pourcentage de réduction de S11 (contrainte circonférentielle) à une valeur de 12.65% et atteint la valeur de 54.61% en appliquant cinq couches de TFC.

Pour S22 (contrainte méridionale), le pourcentage obtenu en appliquant une seule couche de composite est de 15.40% et atteint la valeur de 53.19% en appliquant cinq couches.

- *Comparaison du renforcement de tout le silo et de la localisation N°1*

Nous présentons sur la figure (**Fig.V.13**) les résultats de comparaison des réductions des contraintes circonférentielles et méridionales à la profondeur  $Z=12.5\text{m}$  pour les cas du renforcement de tout le silo et de la localisation N°1.

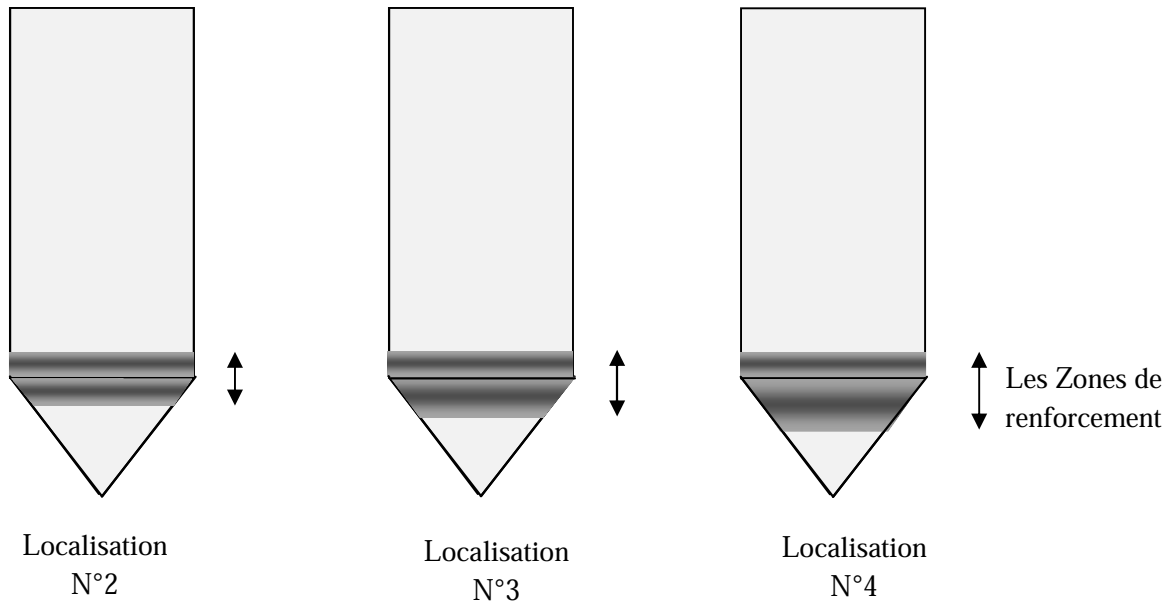


**Fig.V.13.** Comparaison des pourcentages de réduction des contraintes circonférentielles (a) et méridionales (b) pour le renforcement de tout le silo et la localisation N°1 à  $Z=12.5\text{m}$

Sur la figure (**Fig.V.13**) on peut remarquer que le renforcement de tout le silo et l'utilisation de la localisation N°1 donnent sensiblement le même pourcentage de réduction des deux contraintes circonférentielles et méridionales. On peut logiquement constater que le renforcement de tout le silo n'est pas nécessaire et que l'efficacité du renforcement paraît plus utile si seulement une partie de la trémie est renforcée. Pour définir cette zone, sur la trémie, différentes localisations du renforcement ont été analysées.

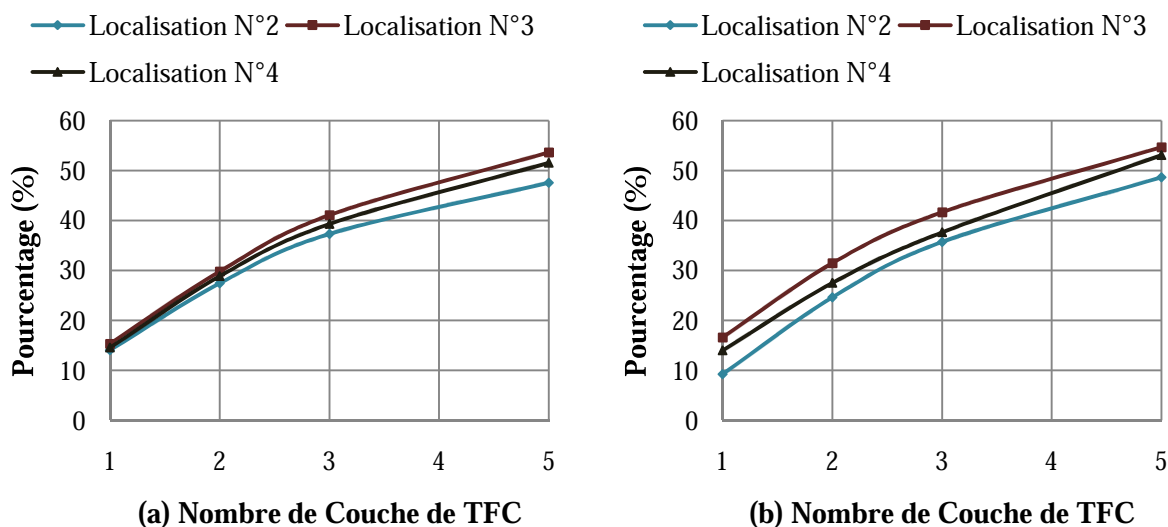
### B.2. Résultats obtenus pour les localisations N° 2,3 et 4

Dans cette partie le silo est renforcé en utilisant les localisations (2, 3 et 4) présentées sur la figure (**Fig.V.14**). Comme il a été déjà signalé, la première localisation (localisation N°2) désigne le renforcement de 1m de la trémie du silo, la deuxième (localisation N°3) un renforcement de 1.5m de la trémie et pour la dernière (localisation N°4) 2m de la trémie ont été renforcés.



**Fig.V.14.** Les localisations (2,3 et 4) utilisées pour tester le renforcement

Nous présentons sur la figure (**Fig.V.15**) les résultats de réduction des contraintes circonférentielles (S11) et méridionales (S22) de ces localisations à la profondeur  $Z=12.5\text{m}$



**Fig.V.15.** Pourcentages de réduction des contraintes circonférentielles(a) et méridionales (b) pour les localisations de renforcement 2,3 et 4 a  $Z=12.5m$

On peut remarquer que les valeurs les plus faibles du pourcentage de réduction des contraintes sont celles qui sont obtenues par la localisation N°2 indépendamment du type des contraintes (circonférentielles ou méridionales) et au nombre de couches de renforcement.

Il est aussi intéressant de remarquer qu'à partir de la localisation N°3 les valeurs de pourcentage de réduction des contraintes restent sensiblement constantes (**Fig.V.16**, **Fig.V.17**). Cela est à notre sens normal puisque à partir de la localisation N° 4, plus on s'éloigne du point de mesure de la contrainte ( $Z=12.5m$ ), le renforcement aura de moins en moins d'effet.

Les valeurs du pourcentage de réduction des contraintes circonférentielles et méridionales pour cette localisation (localisation N°3) sont 54.68% et 53.65% respectivement lorsque 5 couches de TFC sont appliquées. On peut remarquer que le gain de réduction des contraintes obtenu en renforçant le silo par trois couches de TFC (40%) est plus significatif que le gain supplémentaire obtenu en rajoutant deux autres couches pour obtenir les cinq couches. En effet, ce gain n'est que de 15%.

### C. Comparaison globale des rapports des contraintes

Pour avoir une meilleure analyse, le nombre de couches de renforcement et sa localisation peuvent être déduits des figures (**Fig.V.16**, **Fig.V.17**) qui présentent le rapport des contraintes

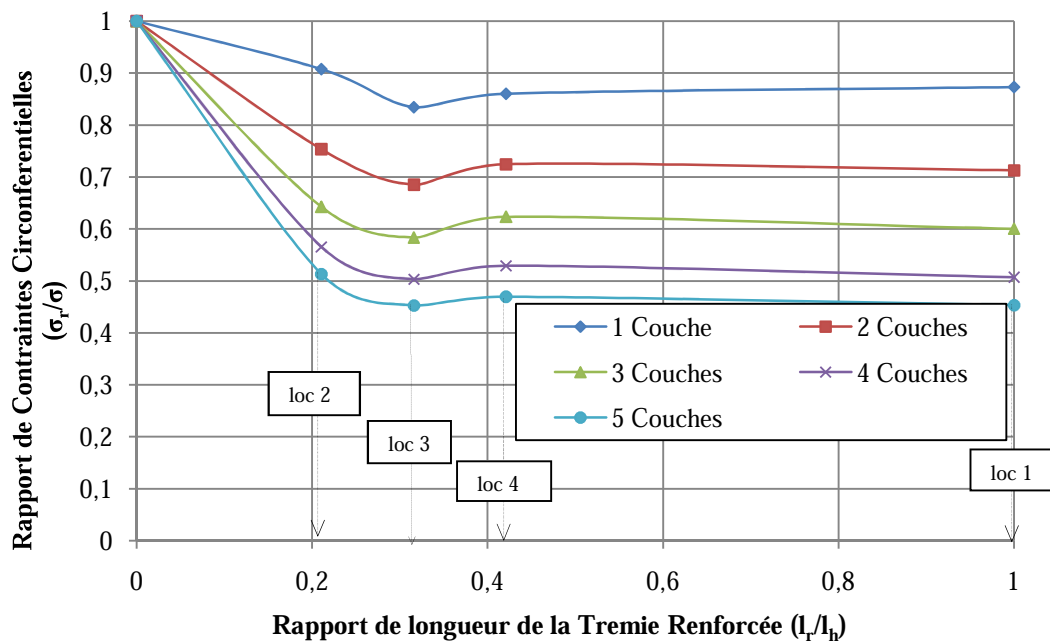
(circonférentielles ou méridionales) après renforcement sur les contraintes avant renforcement calculées au point  $Z=12.5\text{m}$ , et en fonction des différents rapports de longueur de renforcement de la trémie ( $l_r/l_h$ ).

$l_r$  est la longueur renforcée (m),

$l_h$  est la hauteur de la trémie (m),

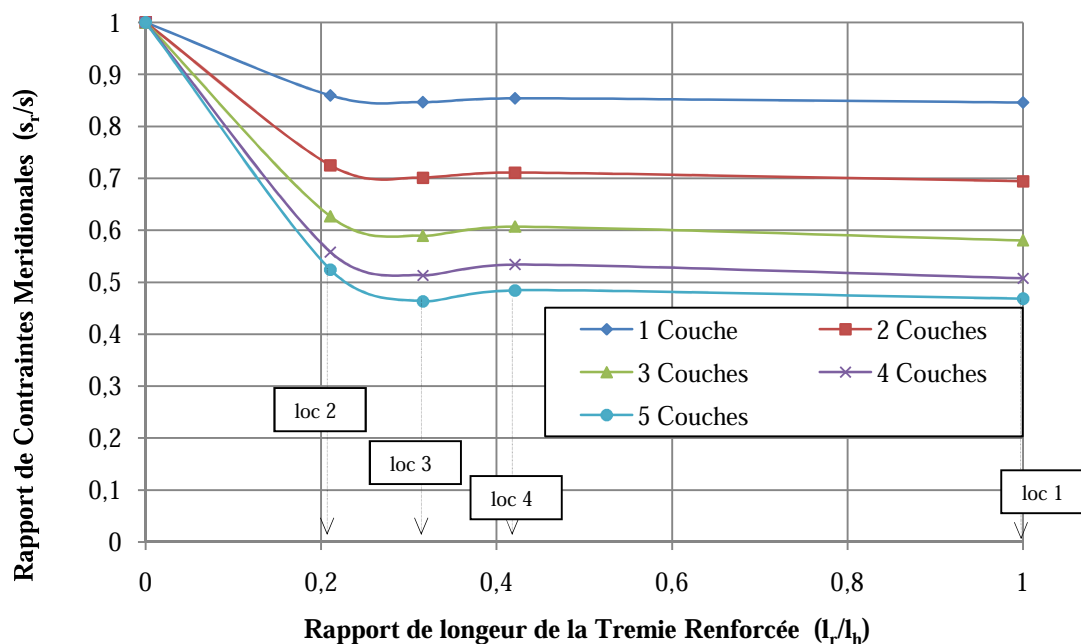
$\sigma_r$  est la contrainte obtenue après renforcement (kPa),

$\sigma$  la contrainte obtenue sans renforcement (kPa).



**Fig.V.16.** Rapport des contraintes circonférentielles par rapport à la longueur renforcée de la trémie





**Fig.V.17.** Rapport des contraintes méridionales par rapport à la longueur renforcée de la trémie

On peut remarquer que les rapports pour les deux contraintes diminuent en augmentant le nombre de couches de TFC, ce qui est normal car cela fait augmenter la résistance des parois du silo. On constate aussi que cette diminution du rapport des contraintes est obtenue aussi pour les valeurs de rapport de hauteur correspondant à la localisation N°3 et cela quel que soit le nombre de couches utilisé et reste sensiblement constante pour des surfaces de renforcement plus important (localisation 4 et 1). En effet en s'éloignant du point de mesure des contraintes, le renforcement n'a plus d'effets significatifs.

Considérant cette dernière localisation, on peut aussi confirmer que la diminution du rapport de contrainte est plus importante en passant de 1 couche à 3 (environ 0,3) que de celui qui est entre 3 et 5 (environ 0,15). Ces valeurs sont sensiblement les mêmes pour les deux types de contraintes.

Finalement, comme le but est de proposer un nombre de couches et une localisation optimale alliant réduction de contrainte et réduction du coût, nous proposons comme conclusion, que le rapport des contraintes d'optimisation du renforcement peut être obtenu en utilisant trois couches de TFC avec la localisation N°3.

### V.2.2.2. Phase de la vidange du silo

#### A. Surpression due à la vidange des silos

Il est connu que le problème structurel principal des silos est l'augmentation des pressions horizontales ou début de leur vidange en raison de l'effet dynamique que celles-ci engendrent. Les premiers dimensionnements des silos ne tenaient pas compte de ces surpressions en raison probablement de la difficulté de les évaluer et bien qu'elles soient reconnues dès 1950 (Caquot & Kerisel, 1956). Par la suite, cette surpression a pu être mesurée aussi bien sur les modèles réduits que sur les modèles réels. Néanmoins, le désaccord existe encore entre la magnitude et les causes de ces surpressions.

Traditionnellement, l'augmentation de la pression lors de la vidange a été attribuée à un changement de l'état d'équilibre de la matière granulaire. On pensait alors que le silo rempli dans une position statique répondrait d'après l'état d'équilibre actif de Rankine et une fois que les grains commencent à bouger, il passerait à un état d'équilibre passif (Jenike & Johanson, 1968). D'autres auteurs ont modifié cette simplification et ont pris en considération le frottement des grains avec la paroi du silo et le type d'écoulement pendant la vidange (Rotter et al, 1997; Aguado et al, 1997).

Plus récemment, cette surpression a été attribuée au phénomène de dilatation, à cause des déplacements non parallèles des grains par rapport à ligne de rupture. Cela provoque une augmentation dans le volume et a comme conséquence une augmentation dans les pressions latérales (Zhang et al, 1994). [41]

La rupture de l'état d'équilibre statique obtenue au remplissage engendre, dès le début de la vidange, des surpressions qui sont en fonction des caractéristiques physiques et mécaniques de la matière ensilée, de l'élanement du silo, de la disposition de l'orifice de la vidange, et de la forme des cellules des silos (circulaires carrées, etc...)

Des expériences ont montré que la vidange des silos constitue incontestablement la phase la plus critique de leur utilisation, car elle provoque des réactions de la masse ensilée, qui peuvent mettre en cause leurs stabilités

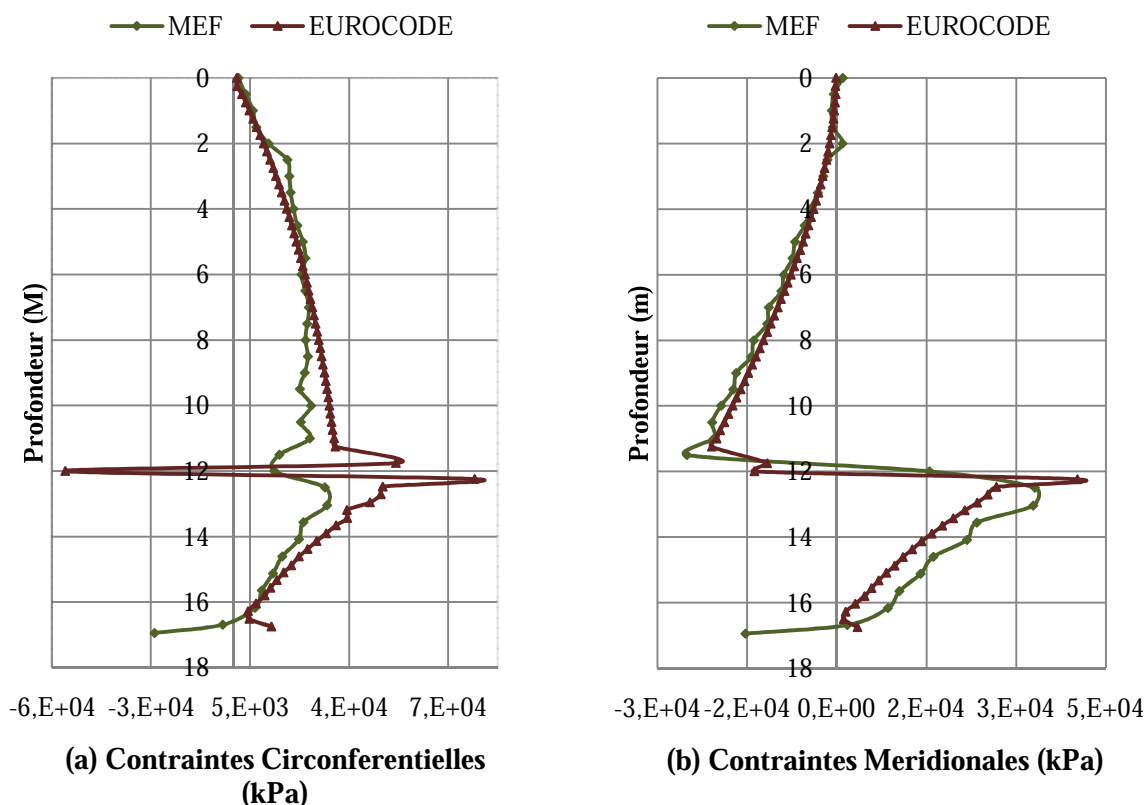
En effet, les nombreux et les plus spectaculaires accidents qui se sont produits et se produisent dans les silos sont dus aux effets imprévisibles de cette vidange. [24]

## B. Renforcement de tout le silo

Comme il a été déjà signalé, la vidange du silo est modélisée par la diminution de la masse volumique de la matière granulaire jusqu'à la vidange complète. Dans cette partie, nous présentons donc les résultats obtenus lors du renforcement du silo par le TFC sous l'action de la vidange.

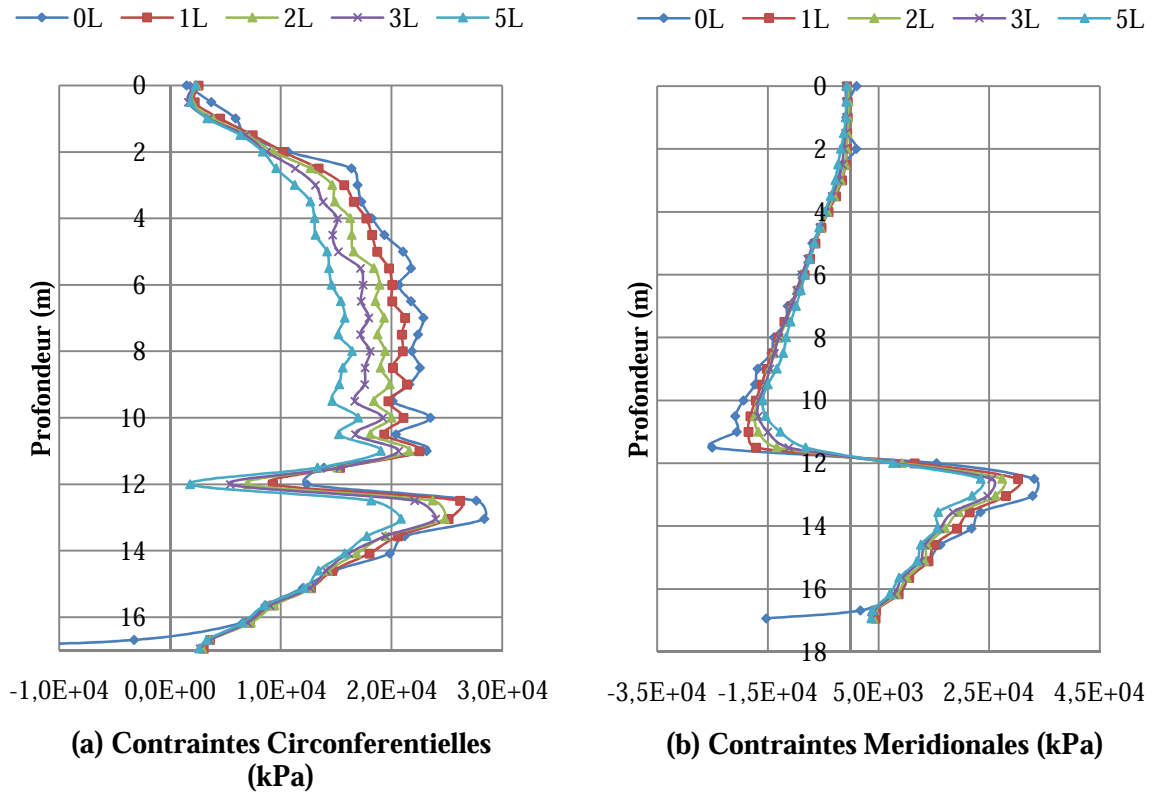
Nous présentons d'abord les résultats de comparaison des contraintes circonférentielles et celles méridionales par la méthode des éléments finis avec celles obtenues par le calcul de la méthode classique de l'Eurocode. *Pour rappel, dans l'approche par éléments finis, il est pris en compte l'effet dynamique du mouvement de la matière ensilée.*

Sur la courbe de la figure (Fig.V.18) on peut remarquer que les courbes ont la même allure, et sont presque confondues, sauf au niveau de la transition où les contraintes obtenues par l'Eurocode sont supérieures à celles de la méthode des éléments finis surtout pour celles circonférentielles. Mais comme il a été déjà expliqué précédemment, la matière modélisée par la méthode des éléments finis limite les déplacements de la paroi et donc limite ces contraintes.

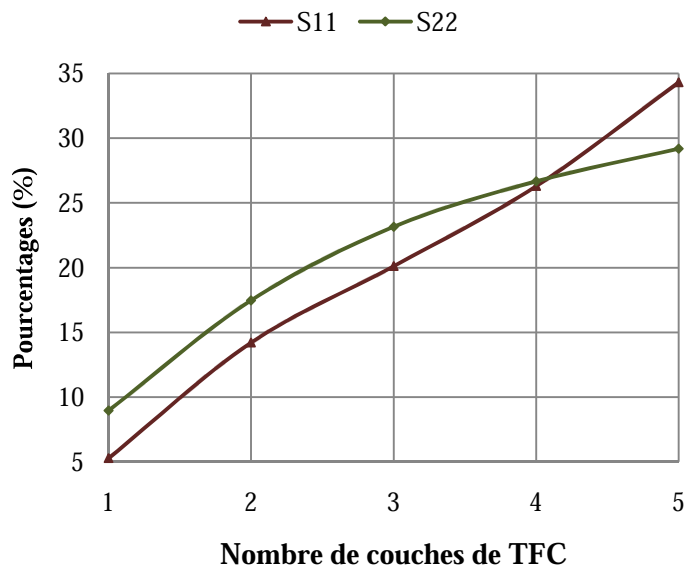


**Fig.V.18.** Comparaison des contraintes circonférentielles (a) et méridionales (b) obtenues par la méthode des éléments finis et celles calculées par l'Eurocode (cas de la vidange du silo)

La deuxième analyse concerne le renforcement de tout le silo sous la même action (vidange du silo). L'étude concerne l'analyse des contraintes en ajoutant les couches de TFC (Fig.V.19) et l'analyse de réduction de ces dernières à la profondeur  $Z=12.5\text{m}$  (Fig.V.20)



**Fig.V.19.** Renforcement de tout le silo (cas de la vidange du silo)  
0L ,1L; 2L; 3L; et 5L sont le nombre de couches de TFC appliqué

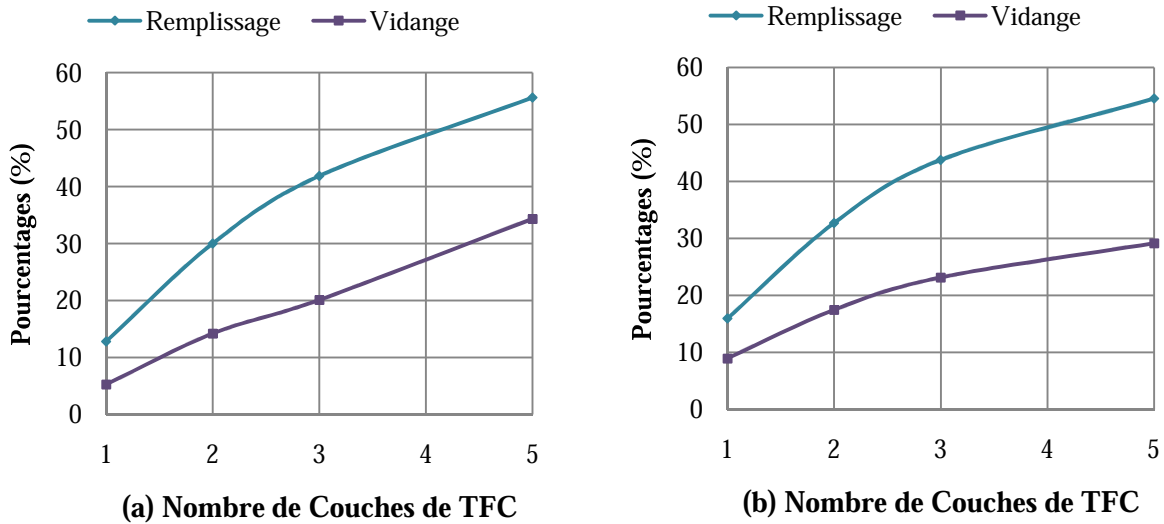


**Fig.V.20.** Pourcentage de réduction des contraintes pour le renforcement de tout le silo à  $Z=12.5\text{m}$  (cas de vidange du silo)

Logiquement en augmentant le nombre de couches de TFC, les deux contraintes (circonférentielles et méridionales) diminuent (**Fig.V.20**). En analysant la courbe de la figure (**Fig.V.20**) des pourcentages des réductions des contraintes, on peut remarquer qu'au maximum avec cinq couches de TFC, ces valeurs de réduction sont limitées respectivement à 34 et 29% comparé au cas du remplissage où ces valeurs vont jusqu'à 55 et 54%.

Dans le cas considéré comme valeur moyenne (application de 3 couches de TFC) à partir duquel nous avons constaté dans l'analyse du remplissage que les réductions deviennent moins significatives, cette réduction dans ce cas n'est respectivement que de 20 et 23%.

Ce phénomène peut être expliqué par le fait que les sollicitations des grains de blé (frottement et pression normale à la paroi) qui s'exercent sur la paroi du silo sont plus importantes en appliquant une analyse dynamique pour la simulation de la vidange. La diminution des contraintes par le TFC dans ce cas est inférieure à celle sous l'action du remplissage. Cela est montré sur la courbe de la figure (**Fig.V.21**)



**Fig.V.21.** Comparaison des pourcentages de réduction des contraintes circonférentielles (a) et méridionales (b) dans le cas de renforcement de tout le silo à  $Z=12.5\text{m}$  (remplissage et vidange du silo)

### C. Comparaison globale des rapports des contraintes

En résumé, nous pouvons regrouper nos résultats en présentant finalement sur les courbes (**Fig.V.22**, et **V.23**) le rapport des contraintes circonférentielles (**Fig.V.22**) et méridionales (**Fig.V.23**) après renforcement sur celles mesurées sans renforcement à la profondeur  $Z=12.5\text{m}$  en fonction du rapport de profondeur de la trémie du silo.

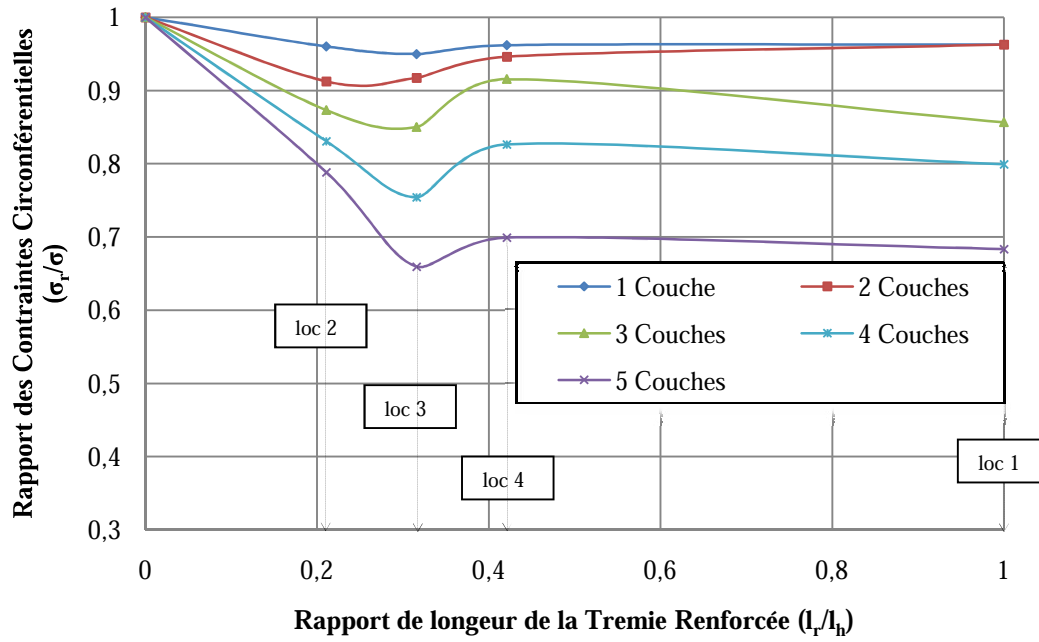


Fig.V.22. Rapport des contraintes circonférentielles par rapport à la longueur renforcée de la trémie

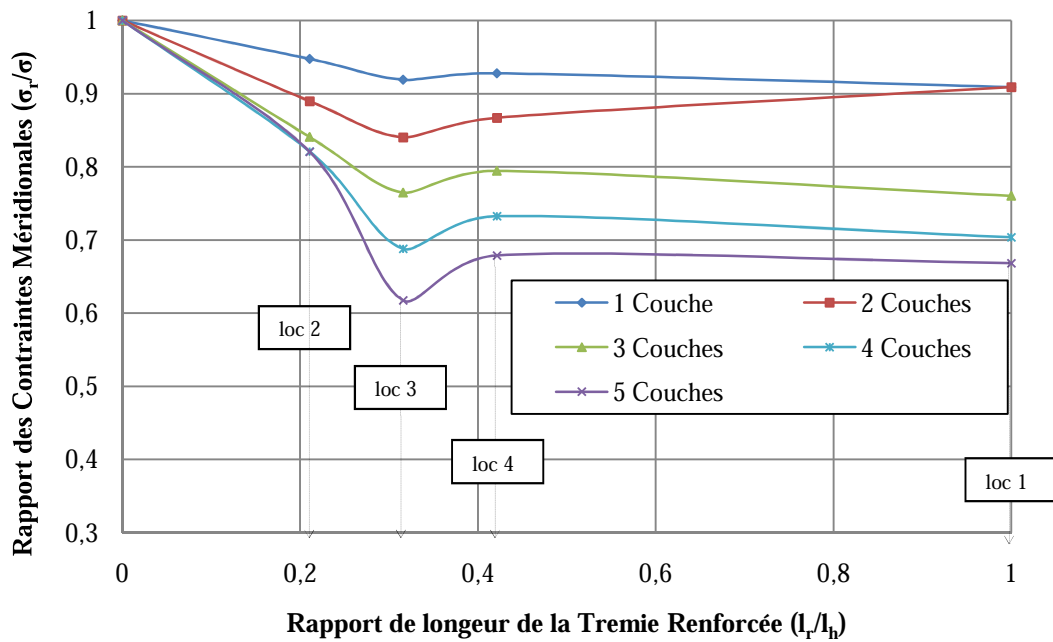


Fig.V.23. Rapport des contraintes méridionales par rapport à la longueur renforcée de la trémie

On peut remarquer sur les courbes que le rapport diminue en augmentant le nombre de couches de TFC pour les deux types de contraintes. Ces grandes valeurs sont aussi obtenues avec la localisation N°3.

En renforçant le silo par cette dernière localisation (N°3) en utilisant trois couches de TFC, le gain obtenu est de 0.19% au maximum pour les deux types de contraintes. Cette valeur est inférieure à celle obtenue pour le cas de remplissage par la même localisation et le même nombre de couches du renforcement (0.3%) ce qui est logique pour une action de vidange. Ainsi, de la même manière que pour le cas du remplissage, nous pouvons en déduire qu'une optimisation de renforcement du silo sous la sollicitation de vidange est obtenue avec la localisation N°3 avec trois couches de TFC.

**Conclusion :** nous avons présenté dans cette partie les résultats d'une analyse de renforcement sur un silo en utilisant un composite TFC. Cette analyse concerne une recherche de réduction de contraintes après un renforcement des parois par des couches de TFC. Une analyse paramétrique a consisté à faire varier autant le nombre de couches de TFC que leurs emplacements.

Les différentes analyses nous ont montrés que logiquement en augmentant le nombre de couches de TFC utilisées pour le renforcement, les contraintes (circonférentielles et méridionales) diminuent. Cependant, nous constatons que cette diminution n'est pas linéaire. Elle est plus importante entre 1 et 3 couches et devient de plus en plus faible au-delà (4 et 5 couches).

Par ailleurs, L'utilisation des différentes localisations de renforcement nous a montré que la localisation N°3 (renforcement du tiers de la trémie à partir de la zone de transition) est celle qui donne les pourcentages les plus intéressants d'un point de vue rapport coût/réduction des contraintes et cela que ce soit dans le cas de remplissage du silo ou de la vidange.

Comme conclusion de cette partie, nous proposons l'utilisation de la localisation N°3 avec trois couches de TFC pour un renforcement optimisé des silos. Plus généralement cela consiste donc à renforcer le tiers supérieur de la trémie du silo et en arrivant à un rapport de contraintes entre 0.80 et 0.60% en utilisant 3 couches de TFC.



## V.3. Réparation des silos par les matériaux composites (TFC)

### V.3.1. Introduction

La réparation d'une structure ou construction qui était endommagée ou détériorée est une opération qui consiste en une remise en bon état par des travaux appropriés, et requièrent avant tout, une évaluation, par un diagnostic approprié.

Dans cette partie, nous nous proposons de mener une analyse en vue de vérifier le dimensionnement d'un silo réel qui a subi une forte dégradation. Il s'agit d'un silo réel et qui est actuellement fonctionnel au port de Djendjen (Jijel) (**Fig.V.24**). Une forte dégradation a été constatée par l'utilisateur. Cette dégradation a pour origine probable une usure normale due à une forte utilisation (ces silos stockent du ciment qui est un produit très demandé). Elle est causée aussi par l'agressivité du milieu environnant (milieu marin) qui est à l'origine de la forte corrosion constatée. Suite à cette corrosion ce silo à vu l'épaisseur de sa coque réduite. Cette situation rend évidemment la stabilité de la coque incertaine. Le but de cette analyse est donc de reprendre le dimensionnement du silo avec les nouvelles épaisseurs, afin de vérifier la résistance de ce silo et dans le cas d'un risque de ruine, de proposer une réparation en renforçant les parties fragilisées par la solution du TFC.

Le silo en question fait partie d'une batterie de 12 silos. Cette batterie est constituée de deux types : des silos de 10 m de diamètre et de 20 m de hauteur totale sur des appuis en profilé HEB et des silos de 08 m de diamètre et de hauteur totale de 28 m sur des appuis en profilés tubulaires. Les deux types de silos sont dans un état sérieux d'altération du à la corrosion apparente (**Fig.V.24**). Nous nous proposons dans le cadre de cette étude de reprendre le dimensionnement, la vérification et éventuellement la réparation d'un des deux types de silos. Parmi les deux silos celui de 8m de diamètre se prête bien à cette réparation, car il n'a pas encore subi de dégât irréversible comme celui de diamètre 10 ou certaines parties de coques sont déjà fissurées.



**Fig.V.24.** Photographie de la batterie des 12 silos

### **V.3.2.Géométrie et caractéristiques du silo à réparer**

Le silo analysé dans cette partie est donc le silo type 08 m de diamètre. Il est constitué d'une partie cylindrique composée d'une série de 12 anneaux eux-mêmes composée de 6 viroles chacune de hauteur de 1.523m assemblée les unes aux autres par boulons et d'une trémie composée de 4 anneaux coniques composés de viroles boulonnées. L'ensemble s'appuie au niveau de la jonction cylindre –trémie sur une série de 6 poteaux cylindriques.

Le changement des caractéristiques mécaniques à cause de la réduction de l'épaisseur des parois, conduit à la diminution de la capacité portante de cette dernière. En effet, les contraintes qui se développent particulièrement en zone de transition peuvent être préjudiciables voir même dangereuses pour la stabilité de la coque.

Les caractéristiques géométriques et physiques de ce silo sont présentés sur les tableaux (**Tab.V.8**, et **V.9**)

**Tab.V.8.** Les dimensions du silo.

Paramètres	Valeurs(m)
Hauteur total	25.36
Hauteur de la trémie	5 .896
Rayon du silo	4.00
Rayon de la trappe inférieure du silo	1.33

**Tab.V.9.** Caractéristiques de l'acier utilisé

Caractéristique d'acier	Valeurs
Module de Young	210 10 <sup>6</sup> kPa
Coefficient de poisson	0.3
Masse volumique	7,85 kN/m <sup>3</sup>

Les épaisseurs adoptées sont celles relevées réellement sur le silo. Il s'agit de valeurs adoptées en prenant une moyenne des différentes valeurs relevées sur site aux différents points du silo selon la hauteur et la circonférence. Ces valeurs sont présentées sur les tableaux **Tab.V.10** et **Tab.V.11**

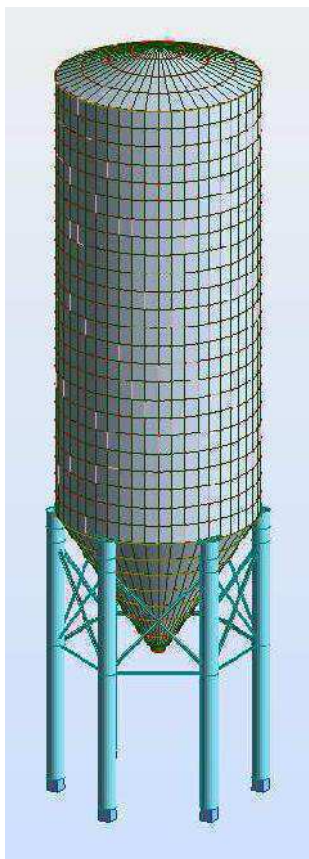
**Tab.V.10.** Les épaisseurs adoptées pour la partie « cylindre » du silo.

Hauteur totale	Epaisseur moyenne (mm)	Epaisseur adoptée (mm)
18.270m	<b>Sur 10 viroles du cylindre</b>	
	5.5	5.5
	<b>Sur 5 viroles du cylindre</b>	
	6,02	6
	<b>Sur 3 viroles du cylindre</b>	
	9.98	10

**Tab.V.11.** Les épaisseurs adoptées pour la partie « trémie et couverture » du silo.

Zone	Epaisseur moyenne (mm)	Epaisseur adoptée (mm)
Trémie	9.60	9.60
Couverture	4.14	4.00

L'idée donc est de reprendre le dimensionnement réel de ce silo dans cet état de corrosion et de vérifier si le dimensionnement est toujours conforme à la réglementation ou non et proposer dans ce dernier cas une réparation par le matériau TFC.



**Fig.V.25.**Géométrie du silo à traiter (8m de diamètre)

### V.3.3.Analyse de dimensionnement du silo

Cette analyse de dimensionnement avec les données réelles (épaisseur de la coque cylindrique et de la trémie) du silo sera menée sous les sollicitations suivantes :

1. Sous le poids propre : Il s'agit du poids propre de la structure métallique composée de la robe (cylindre) et de la trémie.
2. Sous surcharge de la vidange : la matière ensilée est introduite soit sous la forme de chargement (selon l'Eurocode) ou modélisée pour engendrer automatiquement son chargement. Ainsi, deux analyses sont menées, la 1<sup>ère</sup> concerne une comparaison du calcul classique par l'Eurocode avec celle de la MEF avant la réparation du silo en vue de valider l'approche permettant d'évaluer l'action de la matière par la MEF. La deuxième analyse concerne l'utilisation uniquement de l'approche MEF pour mener les tests de réparation ;

3. Sous la charge climatique (le vent) : D'après la réglementation Algérienne (RNV99 DTR C.2-4.7), Les silos sont classés comme des ouvrages de catégories 1. Les charges de vent sur la robe du silo ont été calculées selon l'Eurocode et appliquées sur les parois du silo.
4. Sous la charge Ultime de Séisme : Réglementairement, deux effets doivent être considérés, celui local (pour le calcul de la robe du silo) défini par l'Eurocode 1 (Bases de calcul et actions sur les structures Partie 4), et celui de renversement et l'effet sur les appuis qui sont définis par le RPA99 Version2003. Dans notre cas d'analyse, seule l'action sur la coque du cylindre est considérée.

Une fois les actions des cas de charge évaluées, un calcul est mené en appliquant les différentes combinaisons de charge réglementaire (poids propre, surcharge, vent et séisme) par les actions de la matière calculées par la méthode classique de l'Eurocode. Il s'agit de comparer les résultats des contraintes obtenu avec la contrainte limite de rupture. Cette contrainte est pour notre cas de 288 MPa, calculée en considérant la contrainte de rupture égale à 360 MPa avec un coefficient de sécurité de 1.25.

Un premier calcul est effectué en utilisant le logiciel Robobat en vue de vérifier le dimensionnement du silo. Il s'avère après ce calcul que la combinaison la plus défavorable (donnant les contraintes les plus élevées) est celle faisant intervenir le poids propre (G), la surcharge de vidange ( $Q_v$ ) et le vent (V) :

$$1.35 G + 1.5 Q_v + V$$

Ainsi, nous présenterons les courbes des contraintes avant et après l'application du TFC avec le pourcentage de réduction des contraintes en appliquant cette dernière combinaison par la méthode des éléments finis.

#### V.3.4. Modélisation

Comme il a été déjà fait pour le modèle précédent, l'analyse comporte la modélisation de la paroi du silo ainsi que la matière entreposée. Dans cette partie, on a considéré que l'écoulement de la matière granulaire est non dilatant ( $\psi=0$ ), et comme la modélisation numérique par la MEF ne permet pas l'utilisation de la valeur zéro, parce qu'elle provoque une singularité dans le calcul numérique, donc, une valeur basse a été attribuée. D'un autre côté, un module d'élasticité est nécessaire pour définir la partie élastique du comportement du matériau entreposé qu'est le ciment. Ce dernier peut être évalué par une méthode utilisant le

module oedométrique. Ceci est donné par l'équation (32), ainsi le module oedométrique est le rapport entre la variation de la pression et la déformation verticale de l'échantillon (équation (33)). Pour cette raison, un essai oedométrique a été réalisé au niveau de LTP Est Annaba (**Fig V.26**) pour la détermination de ce dernier.

$$E = E_e \frac{1-\nu-2\nu^2}{1-\nu} ; \dots\dots\dots (32).$$

$$E_e = \frac{\Delta p}{-\Delta h/h} ; \dots\dots\dots (33).$$

Avec :

$E_e$  : Module oedométrique ;

$E$  : Module d'élasticité

$\nu$  : Coefficient de poisson

$\Delta p$  : La variation de la pression appliquée à l'échantillon ;

$\Delta h$  : La variation de la hauteur durant l'essai oedométrique ;

$h$  : La hauteur initiale de l'échantillon.

Dans cet essai l'échantillon de ciment est sollicité à un cycle chargement déchargement dont les valeurs des pressions sont : 0.062 ,0.125 ,0.5, 1, 2, 4, et 8 kg/cm<sup>2</sup> (l'échantillon reste sollicité sous la charge au moins pendant 24 heures), en supposant que le matériau est consolidé après cette période.



**Fig.V.26.**Essai oedométrique sur les échantillons du ciment (laboratoire de travaux publics- Est-Annaba).

Cette procédure a été utilisée dans plusieurs travaux [46,47,48] pour la détermination de module d'élasticité de plusieurs matériaux granulaires et des poudres (blé, sucre, farine et poudre de blé, ...) qui peuvent être entreposées dans les silos.

Pendant l'essai le module d'élasticité augmente en augmentant la valeur de la pression. Au début, les grains sont en état dispersé, et au fur et à mesure de l'essai, ces derniers commencent à s'arranger pour avoir une compacité plus grande jusqu'à un état de stabilité. Les essais ne donnent pas une valeur fixe mais une série de valeurs qui se situe dans une plage variant entre 2 et 7 MPa.

Sachant que pour avoir une valeur générale significative du module d'élasticité, cet essai doit être repris pour les différentes nuances du ciment. Mais pour la suite de notre analyse, nous avons choisi une valeur moyenne de module d'élasticité  $E = 4.5$  MPa évaluée pour le ciment CPJ-CEM II/A 42.5 dont nous disposons

Par conséquent, les caractéristiques finales du ciment utilisé pour le modèle numérique sont présentées sur le tableau suivant :

**Tab.V.12** Caractéristiques mécaniques du ciment ensilé [31, 37]

Propriété	Valeurs
Poids volumique ( $\text{kN/m}^3$ )	$\delta=16$
Module d'élasticité (MPa)	$E=4.5$
Angle de dilatation	$\psi=0$
Coefficient de poisson	$\nu=0.244$
Coefficient de frottement des grains sur les parois	$\mu=0.4$
Angle de frottement interne	$\rho=45^\circ$

#### ❖ Densité du maillage

Pour décider de la densité du maillage à utiliser, la même approche utilisée lors du développements du modèle (test de différentes densités de maillage) nous a permis d'arriver à un modèle donnant une solution stable. Ainsi, la paroi du silo est modélisée par 1638 éléments

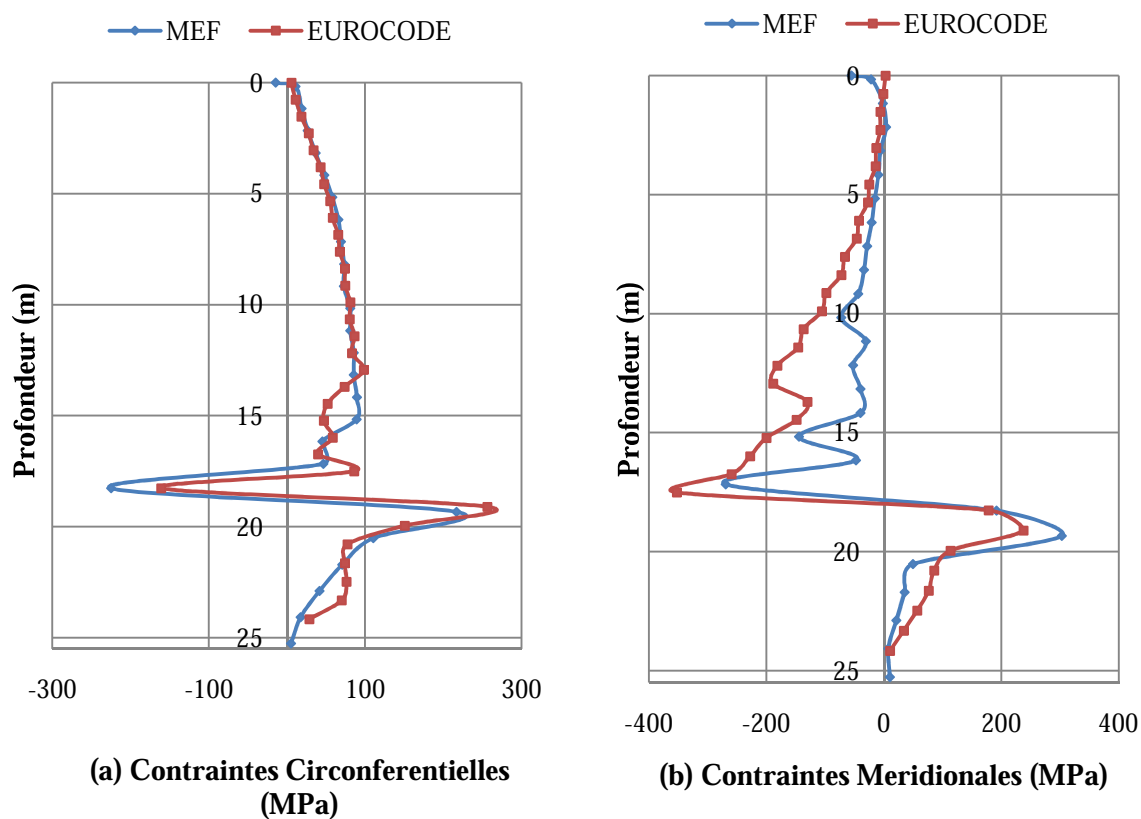
coques et la matière granulaire par 6132 éléments solides. Les caractéristiques de TFC utilisé sont présentées sur le tableau (Tab.V.7)

### V.3.5. Résultats des contraintes circonférentielles et méridionales par les deux méthodes de calcul (MEF et Eurocode)

Pour le calcul et le dimensionnement des silos, il est connu que la vidange est la phase la plus critique car les surpressions résultantes peuvent être importantes.

L'analyse de la vidange du silo a été effectuée sur ABAQUS sous la combinaison ELU :  $1.35G+1.5Q_v+V$

Les courbes de la figure (Fig.V.27) présentent les contraintes circonférentielles et méridionales par les deux méthodes de calcul avant l'application du TFC.



**Fig.V.27.** Courbes des contraintes avant réparation du silo obtenues par la méthode des éléments finis et celles calculées par l'Eurocode

On peut remarquer que les courbes ont la même allure et sont presque confondues, surtout pour les contraintes circonférentielles. Ces dernières ne posent aucun problème, leurs valeurs maximales se trouvent au niveau de la transition égale à 255MPa selon les règles de l'Eurocode et 216MPa par la méthode des éléments finis. Cependant, au niveau de la



transition, le pic des contraintes méridionales obtenu par les deux méthodes dépasse la contrainte limite égale à 288 MPa avec une valeur de 352 MPa par l'Eurocode, et 303 MPa par la méthode des éléments finis.

Considérons ces résultats, on peut conclure que ce silo a besoin au moins d'un renforcement.

### V.3.6. Réparation du silo par le tissu de fibre de carbone

Dans la partie précédente concernant le renforcement du silo par le TFC, il a été conclu que la localisation N°3 (renforcement de 1/3 de la trémie du silo) par l'utilisation de 3 couches de TFC représentait le bon choix. Nous nous proposons d'appliquer cette solution dans notre cas réel pour présenter le pourcentage de réduction des contraintes méridionales et circonférentielles. L'idée étant d'arriver à proposer un renforcement afin de définir plus précisément la localisation et surtout le nombre de couches qui permettrait de réduire les contraintes au dessous des contraintes admissibles.

Les courbes de la figure (Fig.V.28) présentent une comparaison des contraintes circonférentielles et méridionales avant et après le renforcement en utilisant la localisation N°3 et par la méthode des éléments finis :

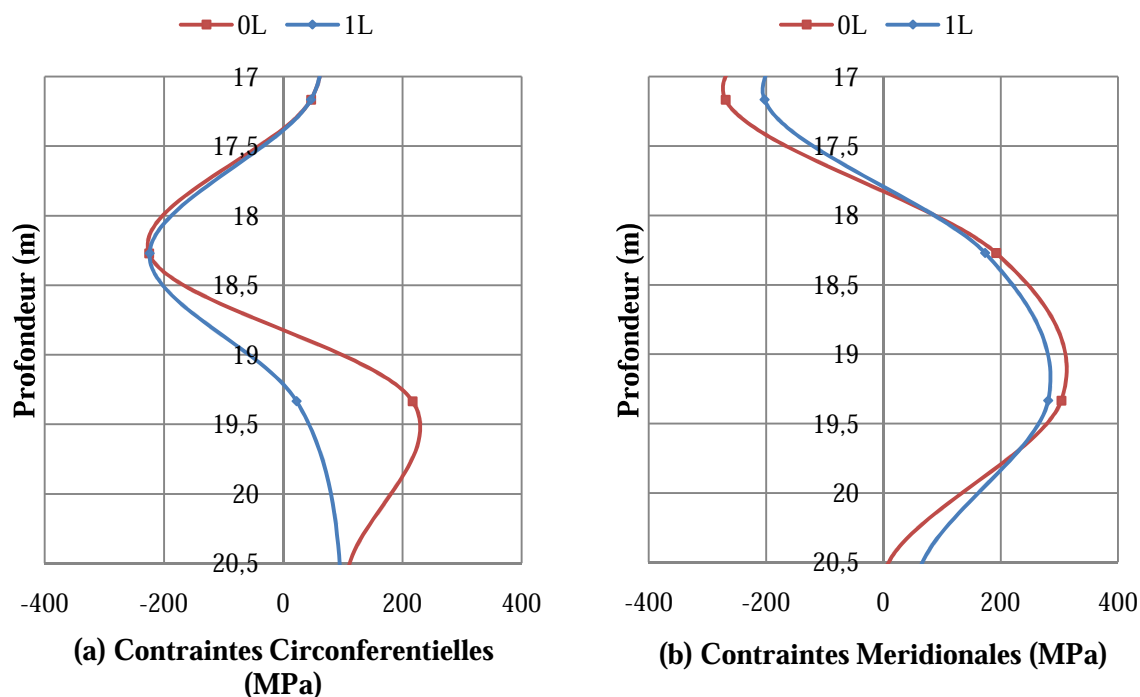


Fig.V.28. Contraintes circonférentielles (a) et méridionales (b) avant et après réparation (1 couche) pour la localisation N°3

Nous constatons que dans ce cas qu'avec une seule couche de TFC, nous obtenons déjà une réduction significative des contraintes.

En effet, la contrainte circonférentielle maximale qui se trouve à la transition à la profondeur  $Z=19.33\text{m}$  passe d'une valeur de 216 MPa à une valeur de 22 MPa et donc avec un pourcentage de réduction de 89%.

Pour la contrainte méridionale, qui nous intéresse le plus, car elle dépasse la contrainte limite, la valeur de cette dernière passe de 303MPa à 281 MPa et donc au dessous de la valeur limite de 288 MPa le pourcentage de réduction dans ce cas est égal à 7%. La valeur inférieure de celui-ci par rapport à celui des contraintes circonférentielles peut être expliquée du fait que le TFC utilisé est unidirectionnel avec 70% des fibres dans le sens de la circonférence.

*En conclusion :* Le problème de la corrosion des parois du silo (diminution des épaisseurs à la zone corrodée) ainsi que les contraintes élevées peuvent être résolues en réparant le silo par l'application de TFC sur le 1/3 de la trémie, il s'avère que pour arriver à une réduction répondant aux critères limites de contrainte, une seule couche de TFC suffit dans notre cas.

#### **IV.3.7. Conclusion**

Une solution simple à permis de renforcer un silo endommagé par corrosion. Les résultats trouvés dans le cas d'analyse sur le modèle académique ont été testés et confirmés sur un cas réel. Les zones probables de faiblesse ont été renforcées et cette solution peut constituer une solution simple et efficace de renforcement ne nécessitant pas un arrêt de l'exploitation du silo.

Cependant, cette solution n'est pas opérante si le problème concerne une corrosion de la tôle de la virole uniquement. En effet, un autre point faible du silo peut concerner l'assemblage des tôles de viroles et particulièrement le risque de corrosion des boulons d'assemblage. Dans ce cas, la solution à envisager en plus du renforcement de la tôle par le TFC est le changement probable des boulons.

## *Conclusions et perspectives*

## Conclusions et perspectives

Ce travail propose une analyse par la méthode des éléments finis du renforcement et de la réparation des silos métalliques à trémie centrée. La difficulté de l'évaluation précise des actions de la matière ensilée sur la coque du silo nous a amené à opter pour une approche totalement numérique. En effet cela a consisté à modéliser non seulement la paroi du silo mais aussi la matière granulaire en le considérant continu. Le comportement non linéaire de la matière granulaire est géré par une loi de comportement élasto-plastique dont la partie plastique est définie par le critère de Drucker-Prager. Il est tenu compte dans la simulation de l'interaction entre les deux matières en considérant une gestion adéquate du contact. Un autre aspect important proposé dans cette analyse est la possibilité de simuler effectivement les phases du remplissage et de la vidange en utilisant la méthode de l'augmentation de la charge gravitationnelle.

Ce travail comporte globalement deux parties. Une partie principale consistant à proposer une approche numérique pour l'analyse du renforcement d'un silo métallique à trémie centrée. Un silo dont les dimensions ont été tirées à partir d'un modèle académique utilisé dans d'autres travaux a été utilisé comme silo test. Il s'agit essentiellement de mener une analyse paramétrique testant l'ajout de nombre de couches de TFC dans différentes localisations. Le but étant évidemment d'arriver à situer les zones critiques de concentration des contraintes et de proposer un nombre de couches permettant à une réduction satisfaisante de ces contraintes par rapport au silo sans renforcement.

Dans la deuxième partie, une application des résultats de l'approche proposée a été utilisée pour une simulation numérique de la réparation d'un silo réel fortement endommagé par corrosion.

Concernant la 1<sup>er</sup> partie, une première analyse a concerné une comparaison des courbes des pressions, des contraintes circonférentielles et des contraintes méridionales obtenues avant le renforcement par les règles de l'Eurocode (ou les actions de la matière granulaire sont calculées analytiquement), avec celles obtenues par un calcul numérique par éléments finis où l'action de la matière est obtenue en modélisant cette dernière par des éléments finis volumiques.

Dans les deux cas l'évaluation des contraintes est obtenue par une modélisation de la paroi du silo par éléments finis de coques.

Ces méthodes analytiques, qui restent des méthodes approchées tendent naturellement (car utilisées dans le cadre de règles de calcul) à surestimer les contraintes et donc à surdimensionner les silos comparé à la méthode numérique dans l'évaluation des actions de la matière ou les résultats semblent plus précis. Cependant, et à cause parfois de l'impossibilité de prendre en compte certains phénomènes comme pourrait le faire l'approche numérique (comme, par exemple, tenir compte correctement de l'humidification de la matière conduisant lors de la vidange à la rupture de l'équilibre), cela pourrait amener à des situations de mauvais dimensionnement et par la même à l'instabilité qui est finalement la cause la plus fréquente dans les accidents des silos.

Par ailleurs notre étude nous a permis de valider numériquement le concept de renforcement et de réparation des silos à trémie centrée par l'ajout de couches de TFC. L'application d'un certain nombre de couches de TFC sur une longueur précise a permis de réduire les contraintes dans la paroi du silo et par conséquent à améliorer sa capacité portante.

Sachant que le pic des valeurs contraintes se trouve autour de la zone de transition, une étude de différentes localisations autour de cette zone a été effectuée afin d'arriver à proposer un nombre de couches de TFC et surtout une localisation optimum.

*En résumé, nous pouvons tirer les conclusions générales suivantes :*

- L'efficacité de la méthode des éléments finis pour la modélisation des silos, notamment en modélisant aussi la matière, elle-même a permis d'étudier plus précisément l'effet des différents paramètres comme, par exemple : la variation de l'angle de dilatation, le module d'élasticité, la taille de maillage, ce qui est très difficile à effectuer par d'autres méthodes.
- L'efficacité de l'utilisation d'un renfort par TFC car il est simple à appliquer, le nombre des couches de TFC ainsi que leurs dispositions sont faciles à étudier par un outil numérique.
- Dans la pratique, cette méthode (l'utilisation de TFC) de renforcement ne nécessite pas forcément un arrêt prolongé de l'exploitation des silos.
- Un nombre réduit de couche de TFC permet une réduction importante des contraintes localisées dans les zones fragiles.

- L'étude du renforcement d'un silo (modèle test académique) nous a permis de conclure que l'utilisation de la localisation N°3 (globalement un renforcement optimum est retenu en renforçant le quart inférieur du cylindre et le tiers supérieur de la trémie) avec trois couches de TFC permet de réduire les contraintes circonférentielles et méridionales de 41% (pour les deux contraintes) dans le cas de remplissage et 15 et 24% respectivement dans le cas de la vidange.
- L'application de notre étude à la réparation d'un modèle réel nous a montré qu'il suffit d'utiliser une seule couche de TFC et l'appliquer sur un tiers de la trémie du silo pour réduire les contraintes au dessous des valeurs limites exigées par le dimensionnement.
- Les pourcentages de réductions obtenus dans le cas du remplissage du silo sont généralement supérieurs à ceux obtenus dans le cas de la vidange, ce qui nous confirme que l'action de la vidange est plus importante que celle du remplissage, donc dans le cas de dimensionnement des silos les deux actions doivent être prises en compte et vérifier.
- Dans le cas du renforcement ou de la réparation des silos les pourcentages de réductions des contraintes méridionales sont inférieurs à ceux des contraintes circonférentielles pour le fait que le TFC utilisé est unidirectionnel avec 70% des fibres dans le sens circonférentiel et seulement 30% dans le sens méridional.

### **Perspectives**

Nous proposons pour les prochains travaux dans ce sujet :

- Une étude expérimentale sur des silos modèles réduits ou modèles réels dans les deux cas (renforcement et réparation) par le TFC
- Une étude des différents types d'écoulement (écoulement en masse et en écoulement en cheminée) par la méthode des éléments finis dans le cas de renforcement ou de réparation ainsi que la variation des différents paramètres de la matière ensilée (angle de frottement, dilatation .....
- Une étude de délaminage de TFC par la même méthode utilisée dans ce travail (méthode des éléments finis)
- Chercher dans ce dernier cas la limite pour arriver au délaminage ainsi que la bonne localisation de TFC.
- Des essais dans le laboratoire, pour trouver toutes les caractéristiques mécaniques du ciment ou même d'autres matières ensilables afin de proposer une généralisation de cette approche pour différentes matières.

## Références bibliographiques

- [1] **C Desprez, J Mazars, P Kotronis, P Paultre, N Roy, M.B Trudeau.** (aout, 2009). Modèle cyclique de béton confiné par TFC pour poteaux circulaires en béton armé. présenter au 19<sup>ème</sup> Congrès Français de Mécanique (CFM'09) Marseille, France.
- [2] **D. T Nguyen, A Limam, J. F Georgin, J. M Reynouard, D Dauffer.** (2005). Characterization and qualification of reinforcement by composite of the RC slabs (Vol. 1, pp. 211–218). Troisième Conférence Internationale Composites dans la Construction, Lyon, France.
- [3] **Z Draid.** (2005). Renforcement et réparation des coques métalliques par matériaux composites (TFC) étude du comportement au flambage-approche expérimentale et numérique. Thèse de Doctorat. Université INSA de Lyon, France.
- [4] **A Batikha, J.F Chen, J.M Rotter, J.G Teng.** (2009). Strengthening metallic cylindrical shells against elephant's foot buckling with FRP. *Thin-Walled Structures*, 47, 1078–1091.
- [5] **J.G Teng, T Yu, D Fernando.** (2012). Strengthening of steel structures with fiber-reinforced polymer composites. *Journal of Constructional Steel Research*, 78, 131–143.
- [6] [https://fra.sika.com/content/dam/dms/frcon/d/fr\\_reparation\\_protection\\_beton\\_arme\\_av ec\\_sika.pdf](https://fra.sika.com/content/dam/dms/frcon/d/fr_reparation_protection_beton_arme_av ec_sika.pdf).
- [7] **O Kheira.** (2015). Réhabilitation des structures. Thèse de Doctorat. Université des sciences et de la technologie d'Oran MOHAMED BOUDIAF, U.S.T.O.
- [8] **Norme française NF P95-101.** (Novembre 1993). Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie- reprise du béton dégradé superficiellement.
- [9] <http://www.univ-sba.dz/lmh/downloads/renfor.pdf>
- [10] **M Boukhezar.** (2009). Réhabilitation et renforcement des poutres au moyen des matériaux composites. Mémoire de Magister. Université Mentouri, Constantine.
- [11] **M Bendifallah.** (2012). Travail de recherché sur les matériaux à mémoire viscoélastiques parfaitement élastiques pour une nouvelle Prothèse Totale de Hanche. Mémoire de Magistère. Université de Batna.
- [12] <http://www.mack-kayak.com/108-tissus-techniques-carbone-kevlar>
- [13] <http://www.carbone-concept.net/fibre-de-verre>
- [14] <http://www.nauticexpo.fr/tab/tissu-composite-fibre-aramide.html>
- [15] <http://www.si.ens-cachan.fr/ressource/r80/r80.xml>
- [16] <http://lmafsrv1.epfl.ch/CompositeForms/CuringMonitoringForm.docx>

- [18] **A Bounceur, MD.L Mammasse.** Gestion optimale des silos au niveau de l'entreprise Cevital. Rapport de stage. Université A.Mira. Bidjaia.
- [19] <http://inormac.free.fr/propo.htm>
- [20] **J.M Rotter.** (2008). structures, stability, silos and granular solids: a personal adventure. Structure and granular solids. Edit par: J.F Chen, J.Y Ooi, J.G Teng. Edition Taylor and Francis. London. P1-17
- [21] **C Degouet.** (2005). Caractérisation de matériaux granulaires et de leurs écoulements dans les silos verticaux. Thèse de Doctorat. Université de Bretagne.
- [22] **Z Zhong, J.Y Ooi, J.M Rotter.**( 2001). The sensitivity of silo flow and wall stresses to filling method. Engineering Structures, 23,756–767.
- [23] **J Tejchman, M Klisinski.** (2001). FE-studies on rapid flow of bulk solids in silos. Granular Matter, 3, 215–229.
- [24] **M Reimbert, A Reimbert.** (1982). Silos, Théorie et pratique. Edition Eyrolles. Paris.
- [25] **C.Y Song, J.G Teng.** (2003). Buckling of circular steel silos subject to code-specified eccentric discharge pressures. Engineering Structures, 25, 1397–1417.
- [26] **M.A Martinez, I Alfaro, M Doblare.** (2002). Simulation of axisymmetric discharging in metallic silos. Analysis of the induced pressure distribution and comparison with different standards. Engineering Structures, 24, 1561–1574.
- [27] **M.T Abdel-Fattah, Ian D Moore, T.T Abdel-Fattah.** (2006). A numerical investigation into the behavior of ground-supported concrete silos filled with saturated solids. Solids and structures, 43, 3723–3738.
- [28] **E Gallego.** (2006). Numerical simulation of loads exerted by stored materials in silos with non-elastic material. Thèse de Doctorat. Université de Madrid.
- [29] **R.J Goodey, C.J Brown, J.M Rotter.** (2003). Verification of a 3-dimensional model for filling pressures in square thin-walled silos. Engineering Structures, 25, 1773–1783.
- [30] **R.J Goodey, C.J Brown, J.M Rotter.** (2006). Predicted patterns of filling pressures in thin-walled square silos. Engineering Structures, 28, 109–119.
- [31] **R.J Goodey, C.J Brown.** (2004). The influence of the base boundary condition in modeling filling of a metal silo. Computers and Structures, 82, 567–579.



- [32] **M Guaita, A Couto, F Ayuga.** (2003). Numerical Simulation of Wall Pressure during Discharge of Granular Material from Cylindrical Silos with Eccentric Hoppers. *Biosystems Engineering*, 85 (1), 101–109.
- [33] **P Vidal, E Gallego, M Guaita, F Ayuga.** (2008). Finite element analysis under different boundary conditions of the filling of cylindrical steel silos having an eccentric hopper. *Journal of Constructional Steel Research*, 64, 480–492.
- [34] **Norme européenne, Norme française NF EN 1991-1-1.** (2003). action sur les structures.
- [35] **J Morraeu, J.A Cargaro.**( 2005). Les Eurocodes conception des bâtiments et des ouvrages de génie civil. Edition: Le Moniteur.
- [36] **Norme européenne BS 1991-4.** (2006). Action sur les structures, partie 4, silos et réservoir.
- [37] **Normalisation française FD ENV 1991-4.** (octobre 1997). base de calcul et Actions sur les structures, partie 4, actions dans les silos et les réservoirs.
- [38] ABAQUS. (2010). (Version 6.10). User’s manual. Hibbitt, Karlsson and Sorensen Inc., Pawtucket, Rhode Island, USA.
- [39] **I Chaib.** (2004). Analyse et simulation des contraintes résiduelles induites par des traitements mécaniques de précontrainte en grenailage et choc laser. Thèse de Doctorat. Université de Reims Champagne-Ardenne.
- [40] **H Proudhon.** (2005). Identification des mécanismes de fissuration dans un alliage d'aluminium sollicité en fretting et en fatigue. Thèse de Doctorat. Ecole centrale de Lyon.
- [41] **F Ayuga, M Guaita, P Aguado.** (2001). Static and Dynamic Silo Loads using Finite Element Models. *J. agric. Engng Res*, 78 (3), 299-308.
- [42] <http://www.ce.edu.tr/~ce564/dos>
- [43] **E Davalle.** Propriétés élasto-plastiques des matériaux. Cours de bachelor. Laboratoire de simulation en mécanique des solides .Ecole polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [44] **E Susila, R.D Hryciw.** (2003). Large displacement FEM modeling of the cone penetration test (CPT) in normally consolidated sand. *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech*, 27,585–602.

- [45] **G.A Rombach, F Ayuga, F Neumann, E Gallego.** (2005). Modeling of granular flow in silos based on finite element method "Ansys, SILO". Powder and Grains, 18-12, 469-473.
- [46] **M Moya, M Guaita, P Aguado, F Ayuga.** (2006). Mechanical properties of granular agricultural materials, part2. Transactions of the ASABE, 49 (2), 479 – 489.
- [47] **M Moya, F Ayuga, M Guaita, P Aguado.** (2002). Mechanical properties of granular agricultural materials. Transactions of the ASAE 45 (5), 1569 – 1577.
- [48] **J.M Rotter.** (2001). Guide for economic design of circular metal silos. London, Spon Press.