
Comportement mécanique sous chargement statique des silos en béton armé fissurés et renforcés par un matériau composite

S. Kermiche¹, O. boussaid², b.Redjel³

¹ Laboratoire Génie Civil, Université de Souk-Ahras, Route d'Annaba, BP 1553, Souk-Ahras, 41000, Algérie. kersihe18@yahoo.fr;

² Laboratoire de Recherche en Mécanique des Matériaux, Université Badji Mokhtar, 23000 Annaba, Algérie. ouzine.boussaid@univ-annaba.dz

³ Laboratoire Génie Civil, Département Génie Civil, Université Badji Mokhtar, 23000, Annaba Algérie. bredjel@yahoo.fr

RÉSUMÉ. L'objectif de ce travail consiste à améliorer la durabilité des silos en utilisant la technique du renforcement externe des silos par des matériaux composites. Le comportement mécanique des silos en béton armé renforcés et non renforcés est analysé pendant le remplissage en utilisant la méthode des éléments finis. Des simulations numériques sont présentées pour quatre modes de renforcements. Les silos en béton armé sont modélisés par des éléments coques et le blé par des éléments solides à 8 nœuds. L'interaction entre la paroi de silo et le matériau entreposé été prise en compte. L'analyse des résultats montre que l'utilisation du CFRP (Polymère à Renfort Fibre de Carbone) offre un avantage important sur la durée de vie de la structure et sur la résistance à l'endommagement du béton tout en considérant le processus du remplissage des silos

ABSTRACT. The objective of this work is to improve the durability of silos using external wrapping technique of damaged sections by composite materials. The mechanical behavior of concrete silos reinforced and unreinforced is analyzed during filling using finite element method. Numerical simulations are presented for four modes of reinforcements. The reinforced concrete silo is modeled by shell elements and wheat by solid elements with 8 nodes. The interaction between silo wall and stored material was taken into account. Numerical results show that the use of CFRP (carbon fiber reinforced polymer) offers a substantial benefit over the damage resistance and lifetime during filling silos.

MOTS-CLÉS: Silos, Béton armé, Endommagement, Composite, Renforcement.

KEY WORDS: Silos, Reinforced Concrete, Damage, Composite, Renforcement.

1. Introduction

Les silos en béton armé sont utilisés pour le stockage de matières granuleuses ou poudreuses (céréales, ciment,...). Ce sont des structures complexes, constamment exposées à des variations de température et à de fortes contraintes survenant pendant les opérations de vidange et de remplissage. Ces contraintes induisent des fissures verticales ou horizontales, généralisées ou localisées dans les parois, ce qui affecte leur durée de vie [ARA 01] [HEA 04]. Les fissures peuvent être à l'origine de la pénétration d'eau, engendrant une corrosion des armatures. Les principales causes qui ont été également relevées par la dégradation de ces structures sont :

- une défaillance de la portance au sol
- les malfaçons (manque d'armatures dans le béton armé ou sous dimensionnement).

Plusieurs techniques de réparation existent. Leur but principal est d'arrêter une évolution dommageable, de reconstituer l'intégrité du béton et de réaliser une protection efficace de la structure. La nature de la dégradation et de la durée de vie désirée pour l'ouvrage après sa réparation, conditionne le choix de la solution. Les principaux procédés de réparation ou de renforcement sont :

- Renforcement structurel (réalisation d'une nouvelle paroi en béton armé),
- Projection de béton,
- Chemisage,
- Collage de tôle métallique,
- Renforcement composite
- Injection de mortier ou de résine dans les fissures.

En Algérie, des techniques de réparation, datant des années 60, sont appliquées sur des silos qui nécessitent une réhabilitation par l'injection de résine ou de mortier. Malheureusement ces techniques souvent coûteuses, n'arrivent pas à stopper la dégradation de ces structures. L'optimisation des coûts doit s'inspirer des nouvelles méthodes de renforcement ponctuellement utilisées dans le domaine du bâtiment.

Cette étude porte sur l'analyse numérique du comportement des silos utilisés pour le stockage de blé en béton armé dégradés et renforcés par des matériaux composites. Ce travail est composé de 2 parties : Une 1^{ère} partie, où les actions exercées par les matériaux entreposés sur les parois à la fin de la phase de remplissage seront déterminées selon la théorie de Reimbert et la méthode donnée par l'Eurocode 1 partie 4 [A GU 79] [FLO 14] [EUR 97]. Une seconde partie, où l'on entreprend des simulations numériques en utilisant le code de calcul ABAQUS. Le processus de remplissage est modélisé par la méthode de l'augmentation de la charge gravitaire qui semble être la plus proche de la réalité [DIN 03] [YUN 11] [YIN 14]. Cette étude numérique permet de comprendre le fonctionnement structurel de l'ouvrage et donc son mécanisme de ruine. Les mécanismes de ruine étant connus, une détermination des zones de renforcement pourra alors être établie. Dans la dernière partie du de notre travail, l'étude numérique des zones renforcées par tissu de carbone a été effectuée. Les résultats de cette seconde modélisation permettent d'une part d'obtenir le gain de résistance et d'autre part d'observer si une redistribution des contraintes est présente. Enfin, une optimisation du procédé de collage est proposée.

2. Théorie et norme de calcul des silos

2.1. Théorie de Reimbert

Pour les silos à grande profondeur, la pression latérale atteint un maximum. Dans ce cas, le poids d'une couche horizontale de matière ensilée est entièrement équilibré par le frottement en paroi, puisqu'il y a égalité des pressions en dessus et en dessous de la couche horizontale. Elles tendent en effet, vers la même limite asymptotique (fig.1). L'expression d'après Marecl et A. Reimbert de la poussée horizontales P_z pour un silo de section circulaire est :

$$P_z = P_{\max} \left[1 - \left(\frac{z}{A} + 1 \right)^{-2} \right]$$

P_{\max} étant la poussée latérale maximale.

P_z : la poussée latérale.

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

Z: la profondeur

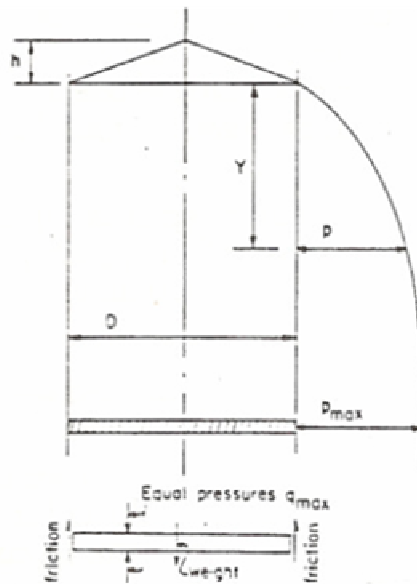


Figure 1. méthode de Reimbert

2.2. La méthode de l'eurocode 1 partie 4

À la fin du remplissage, la poussée horizontale P_{hz} à toute profondeur, pour les silos élancés doit être égale à :

$$Phf(z) = \frac{\gamma A}{\mu U} cz(Z)$$

$$Cz(z) = 1 - e^{-\left(\frac{z}{z_0}\right)}$$

$$z_0 = \frac{A}{Ks\mu U}$$

Où :

γ : est le poids volumique ;

μ : est le coefficient de frottement sur la paroi

Ks : est le rapport de pression horizontale/pression verticale

z : est la profondeur considérée

U : est le périmètre intérieur

3. Modèle géométrique et méthode numérique

Cette étude s'intéresse aux silos en béton armé cylindrique à trémie conique centrale. Ces silos sont composés de deux parties distinctes (Fig.1). La partie supérieure de forme cylindrique et la partie inférieure invisible de géométrie conique.

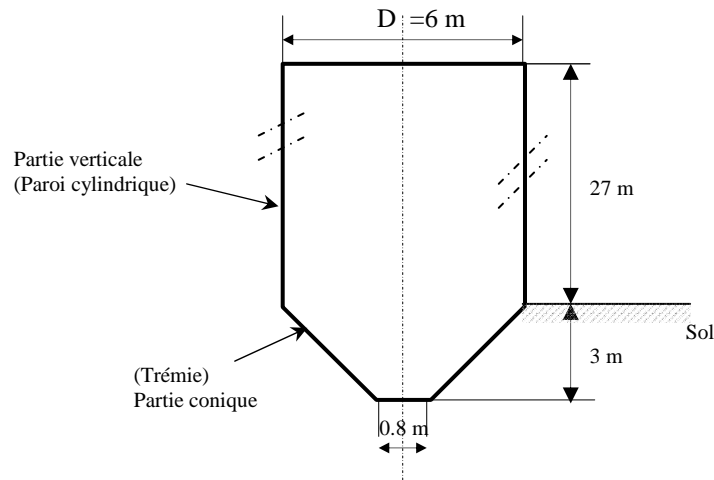


Figure 1. Géométrie du silo

Les ferrailages méridional et circonférentiel sont définis comme étant une couche de renforcement uniaxial dans l'élément coque. Les caractéristiques des aciers sont données dans le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques de l'acier

Propriétés	Valeurs
Module de Young	200000 MPa
Coefficient de poisson	0.3
Masse volumique	7850 kg/m ²
Contrainte limite à la rupture	620 MPa

Le ferrailage de ces silos et les caractéristiques du béton sont donnés dans les tableaux 2 et 3.

Tableau 2. Ferrailage des silos

Ferrailage	Valeurs
méridional	paroi 2 nappes ϕ 10
	trémie 2 nappes ϕ 10
circonférentiel	paroi 2 nappes ϕ 14
	trémie 2 nappes ϕ 16

Tableau 3. Caractéristique du béton

Propriétés	Valeurs
Module de Young	20800 MPa
Coefficient de poisson	0.175
Masse volumique	2500 kg/m ³
Résistance à la compression	25 MPa

Le comportement du béton est élasto-plastique présenté par le modèle couplé plasticité endommagement (concrete damage plasticity) proposé dans le code de calcul. Le modèle combine entre la plasticité et

l'endommagement (représentation des fissures) pour présenter le comportement inélastique du béton, il suppose que les causes majeures de rupture du béton sont la fissuration en traction et l'écrasement en compression. Le modèle a pour but de caractériser les effets de rupture se produisant dans le béton sous des pressions de confinement relativement faibles. La dégradation de la rigidité élastique est caractérisée par deux variables d'endommagement indépendantes, l'une sous traction (dt) et une autre sous compression (dc) qui peuvent prendre la valeur 0 à 1

Compte tenu de la symétrie des actions et de la géométrie des silos, et pour un gain de temps de calcul, seul la moitié de la structure est prise en compte dans l'étude. Les parois sont modélisées en éléments coques S4R. La matière granulaire à l'intérieur du silo est modélisée par des éléments volumiques à 8 nœuds de type C3D8R. Le poids de ces éléments et leurs actions sur les parois des silos créent des pressions horizontales qui vont dépendre de la hauteur de l'ouvrage. Les pressions sont donc plus importantes à la base du silo. Les propriétés du blé [Eurocode 1] sont données dans le tableau 4.

Tableau 4. Propriétés mécaniques du blé utilisé.

Propriété	Valeurs
Angle de dilatation	17°
Angle de frottement de blé sur les parois	18°
Angle de frottement interne	25°
Coefficient de poisson	0.32
Coefficient de frottement des grains sur les parois	0.4
Module de Young	5.1MPa
Masse volumique	900 kg/m ³

Les matériaux composites (CFRP)

Les renforts composites se présentent sous forme de tissus de carbone unidirectionnels combinés avec de la résine époxy bi composante, l'épaisseur du tissu et de la colle est de 1 mm.

Les tissus sont collés de part et d'autre de la jonction trémie paroi. Plusieurs cas sont étudiés afin d'optimiser le procédé de renforcement :

- collage du tissu à 10 cm d'espacement,
- collage du tissu à 20 cm d'espacement.
- collage du tissu à 30 cm d'espacement
- collage du tissu à 40 cm d'espacement

Les principales caractéristiques du composite tissu/colle sont : le module de Young qui est de 50 000 MPa, le coefficient de Poisson 0.3, la masse volumique 0.3 Kg/m³.

4. Résultats et discussion.

4.1. Silos non renforcés

Calcul de la poussée maximale :

Les résultats du calcul numérique de la distribution de la poussée horizontale sur les parois du silo à la fin de remplissage sont donnés dans la figure 3. Ces résultats ont été comparés avec les valeurs des poussées obtenues par la méthode de Reimbert et par la méthode de calcul donnée par l'Eurocode 1.

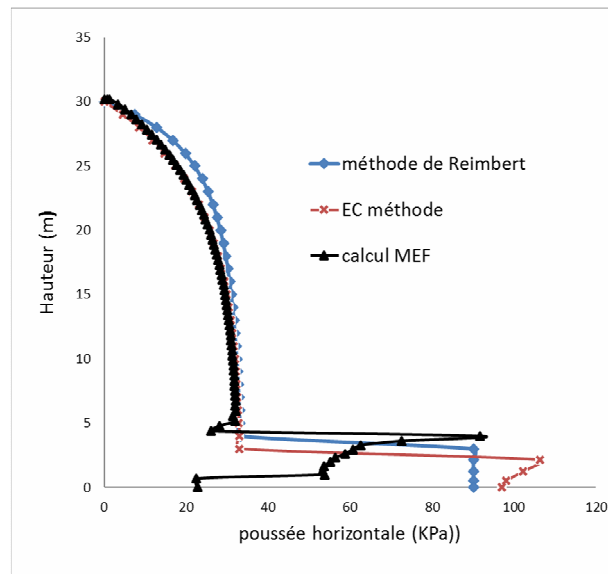


Figure 3. *Distribution Poussée horizontale.*

On remarque que les trois méthodes de calcul donnent des courbes très proches que ce soit au niveau de la trémie ou dans la partie cylindrique. A partir d'une hauteur de 10 m, la courbe est asymptotique à l'axe vertical du silo. Ce résultat est retrouvé par Reimbert lors de son étude sur les silos de grande hauteur. On remarque également, que la méthode de Reimbert surestime la valeur de la poussée horizontale dans la partie cylindrique.

Endommagement du silo

Les facteurs d'endommagement du béton renseignent sur l'apparition des fissures. L'initiation de l'endommagement du béton sous la pression exercée par les grains de blé est donnée au haut de la trémie à la jonction avec la partie cylindrique (Fig.4)

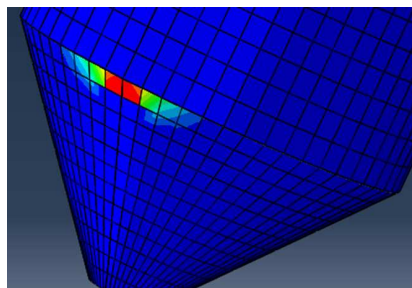


Figure 4. *Initiation de l'endommagement du béton.*

4.2. Silos renforcés

La figure 5 montre les résultats de la pression horizontale sur la paroi du silo avec et sans renforcement par CFRP. On observe que, sans le renforcement, la valeur maximale de la pression horizontale est de 94 kPa. Cette pression diminue d'environ 34% pour atteindre une valeur de 62 kPa en renforçant le silo par CFRP. Cela signifie que le CFRP a un effet significatif sur les performances du silo en béton armé et un impact réel sur la durée de vie.

La variation de la valeur de l'endommagement en fonction du rapport - volume du blé sur le volume total du silo - avec et sans CFRP est présenté dans la figure 6. L'initiation et la propagation de l'endommagement augmentent de manière significative avec l'augmentation du volume du grain. Dans le cas du silo sans CFRP, on note que, à partir de 35% du taux de remplissage, la valeur de l'endommagement augmente de manière exceptionnelle. Dans le second cas, il convient de noter que, la présence de CFRP retarde considérablement l'initiation de l'endommagement qui est observée qu'à partir de 60% du remplissage du matériau granulaire

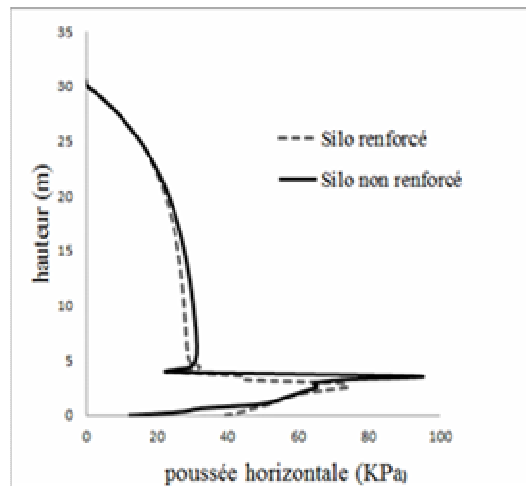


Figure 5. Poussée horizontale de silo non renforcé et silo renforcé

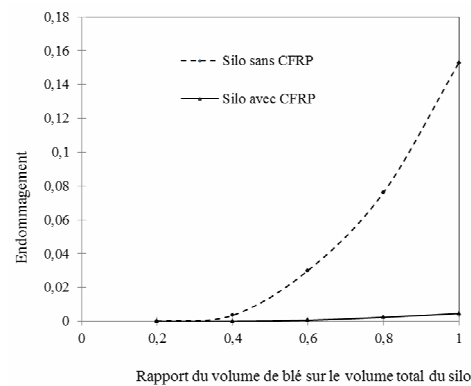


Figure 6. Prédiction de l'initiation de l'endommagement

4.2. Optimisation de composite

La figure 7 montre que l'endommagement diminue avec la diminution de l'espacement de renforcement. De la valeur 0.205 du mode 4 de renforcement, il passe à la valeur de 0.163 du mode 3 de renforcement, puis atteint une valeur minimale de 0.16 avec le mode 2. Au delà de l'espacement de 20 cm on constate que l'endommagement augmente à nouveau pour atteindre la valeur de 0.21 cm avec l'espacement de 10 cm

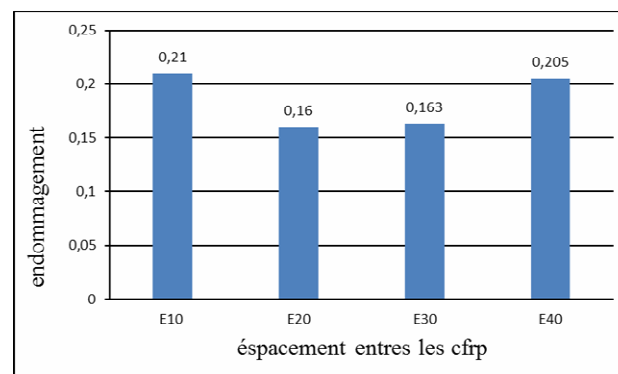


Figure 7. Influence de l'espacement des bandes de cfrp sur l'endommagement

Le gain de résistance est quantifié à partir de la diminution des contraintes sur les parois de silo comme représenté dans les figures (8) et (9), des contraintes circonférentielles sur la trémie et la partie cylindrique du silo selon les quatre modes de renforcement

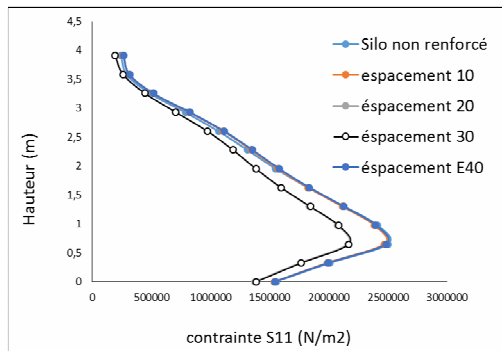


Figure 8. Distribution des contraintes S11 sur la hauteur de la trémie

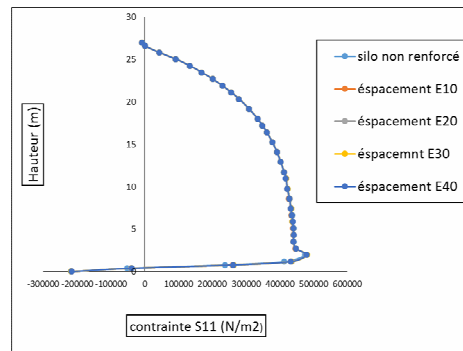


Figure 9. Distribution des contraintes S11 sur la hauteur de la paroi cylindrique

Sur la partie cylindrique on constate que les courbes des quatre modes de renforcement coïncident avec la courbe de silo non renforcé, Par contre au niveau de la trémie, on constate une importante diminuation des contraintes S11 marquée par l'application d'espacement 20 et 30 cm des cfrp qui donne un gain de résistance de 40% . Cela nous permet de conclure que l'espacement entre les CFRP a un effet significatif sur le comportement du silo en béton armé.

4. Conclusion

Dans ce travail, l'effet du renforcement par des matériaux composites (CFRP) sur la résistance et la durabilité du silo a été étudié par simulation en utilisant la méthode des éléments finis, en vue d'évaluer les pressions horizontales avec et sans renforcement, et ce pour prédire l'initiation et l'évolution de l'endommagement pendant le processus du remplissage. L'étude a montré que la pression horizontale augmente jusqu'à ce qu'elle atteigne une valeur maximale à la l'interface paroi cylindrique-trémie. Les résultats numériques ont montré que l'utilisation des CFRP comme une alternative de réparation du silo permet d'augmenter le volume du matériau granulaire du silo, de retarder l'apparition de l'endommagement et d'atteindre 40% de gain de résistance. Cependant, l'initiation de l'endommagement est situé à proximité de l'interface paroi cylindrique/trémie. Un résultat similaire a été observé par Nateghi et Yakhchalian (2012) sous chargement sismique. Le silo en béton armé et le composite (CFRP) conjointement peuvent diminuer la valeur de la pression horizontale maximale à cette interface et augmenter la durée de vie du silo en béton armé.

Référence bibliographique

- [ARA01] ARADHANA. OJHA, *the execution of carbon fibre reinforced polymer strentheninig work*, master thesis, department of civil and mining engineering, Lulea University of technology, Sweden, 2001.
- [EUR97] Eurocode 1 : *Bases de calcul et actions sur les structures Partie 4 : Actions dans les silos et réservoirs*, Association Française de Normalisation (AFNOR) 1997, Tour Europe 92049 Paris La Défense Cedex
- [FLO 14] Florent VARIN, *Construction d'un silo de stockage de grains, techniques de l'ingénieur*, Document délivré le : 23/06/2014 Pour le compte : 7200100403 – université d'Artois
- [GUE 79] A. GUERRIN, *traité de béton armé construction divers*, tome XI, Bordas, Paris 1979
- [HEA 04] Head AG Leumattstrasse, *Renforcement d'ouvrage innovant avec les bandes précontraintes PRFC*, documentation technique, Stress, Aout 2004
- [S. DIN 03] S. Ding and G. G. Enstad, *Stress Distribution in the Material and Development of Loads on the Wall*, TASK QUARTERLY 7 No 4 (2003), 513–524
- [YUN 11] YUNMING YANG ,N, JINOOI , MICHAELROTTER , YINWANGB, *Numerical analysis of silo behavior using non-coaxial models*, Elsevier, Chemical Engineering Science 66 (2011) 1715–1727
- [YIN 14] YIN WANG , YONG LU, JIN Y. OOI, *Finite element modelling of wall pressures in a cylindrical silo with conical hopper using an Arbitrary Lagrangian–Eulerian formulation*, Powder Technology 257 (2014)
- [NAT 12] NATEGHI F., YAKHCHALIAN M, *Seismic behaviour of silos with different height to diameter ratios considering granular material structure interaction*”, IJE Transactions B: Applications Vol. 25, No. 1, pp.27-37, (2012).