

Zeitschrift: IABSE reports = Rapports AIPC = IVBH Berichte

Band: 57/1/57/2 (1989)

Artikel: Renforcement du silo à céréales du port de Safi

Autor: Jartoux, Pierre / Laffray, Michel / El Khyari, Mostapha

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-44325>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 21.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Renforcement du silo à céréales du port de Safi

Instandstellung der Getreidesiloanlage im Hafen von Safi, Marokko

Reinforcement of Grain Silo at the Port of Safi, Morocco

Pierre JARTOUX
Ingénieur Arts et Métiers
Freyssinet
Boulogne-Billancourt, France



Né en 1937, Ingénieur A. M. et diplômé du CHEBAP, Pierre Jartoux est Directeur Recherche et Développement de FREYSSINET où il a occupé différentes fonctions depuis 1964.

Michel LAFFRAY
Ingénieur EIM
Europe Etudes GECTI
Villeurbanne, France



Né en 1936, Ecole d'Ingénieur de Marseille, Michel Laffray est Ingénieur d'Etudes de structures, bâtiments et ouvrages d'art chez Europe Etudes GECTI depuis 1961.

Mostapha EL KHYARI
Ingénieur SUPELEC
Techni-Contrôle
Casablanca, Maroc

Ingénieur de l'Ecole Supérieure d'Electricité, chargé de mission chez SO. SI. PO, Mostapha El Khyari est maintenant Directeur de Techni-Contrôle et Expert près les Tribunaux.

RÉSUMÉ

Dès 1964 les premières fissures sont apparues dans la structure du silo de Safi, construit en 1957. A la suite d'un concours international, une opération de renforcement a été entreprise en 1987. Elle comporte un traitement local des fissures pour redonner au silo son étanchéité, une mise en précontrainte pour permettre aux fissures de rester fermées sous l'effet des sollicitations en service, une peinture de la surface externe du silo pour parfaire l'étanchéité des microfissures, protéger les aciers dénudés et redonner à l'ensemble l'aspect d'une structure fonctionnelle parfaitement adaptée à sa fonction.

ZUSAMMENFASSUNG

1964 erschienen die ersten Risse in der 1957 gebauten Getreidesiloanlage von Safi (Marokko). Nach einer internationalen Ausschreibungen wurden 1987 die Verstärkungsarbeiten durchgeführt. Diese bestehen aus einer lokalen Rissbehandlung für die Dichtigkeit, einer Vorspannung, damit die Risse unter Gebrauchslasten geschlossen bleiben, eines Aussenanstrichs zur Verbesserung der Dichtigkeit der Mikrorisse zum Schutze der Stahleinlagen und um dem gesamten Bauwerk wieder ein ansprechendes Aussehen zu geben.

SUMMARY

In 1964 the first cracks appeared in the structure of the grain silo built at Safi, Morocco, 1957. Further to an international competition, a reinforcement operation was undertaken in 1987. It consists of local treatment of cracks to restore the silo water-tightness, prestressing so that the cracks remain closed during service, painting the external surface of the silo to improve the water-tightness in microscopic cracks, to protect the steel reinforcing bars and give to the whole structure an impression of being perfectly adapted to its function.



0. INTRODUCTION

L'activité du port de Safi, premier port de pêche du Maroc, est aussi pour une grande part consacrée à l'importation et à l'exportation de céréales. Le silo à céréales de Safi, ouvrage important construit en 1957 présentait de graves dégradations dans la structure en béton armé : fissurations verticales et horizontales dues à une insuffisance du ferraillage et à l'importance du gradient thermique. A la suite d'un concours international, l'Office National Interprofessionnel des Céréales et des Légumineuses (O.N.I.C.L.) a passé un marché pour la réhabilitation de la structure qui comportait :

- traitement de la fissuration
- renforcement par précontrainte extérieure
- traitement de surface et revêtement étanche par peinture sur toute la surface extérieure du silo.

Participants aux travaux :

Maître d'Ouvrage	: Office National Interprofessionnel des Céréales et des Légumineuses (O.N.I.C.L.).
Maître d'Oeuvre	: Société des Silos Portuaires (S.O.S.I.P.O.).
Titulaire du Marché	: Campenon-Bernard.
Sous-traitants	: Freyssinet (précontrainte - étanchéité). Europe-Etudes (étude de la structure).
Bureau de Contrôle	: Socotec Maroc.
Laboratoire de Contrôle	: Laboratoire Public (L.P.E.E.).

Quelques chiffres indiquent l'importance du travail de réparation :

- 7.040 carottages biais
- 1.200 cercles de précontrainte
- 11.000 m de protection de gaine en micro-béton
- 12.500 m² de traitement de surface et de revêtement étanche.
- 800 m de traitement local de fissures.

1. PARTICULARITES D'UNE INTERVENTION SUR UN SILO A CEREALES

Un silo à céréales est un équipement industriel assujetti à un rythme annuel précis imposé par la date de la récolte qui doit y être stockée. Le stockage de la récolte est alors relativement rapide, le déstockage plus ou moins lent selon les besoins du marché. Indépendamment de ce rythme annuel, un silo en zone portuaire (c'est le cas de celui de SAFI) doit faire face à des mouvements de céréales liés aux chargements ou déchargements de bateaux céréaliers d'exportation ou d'importation.

Intervenir pour des travaux de renforcement dans une pareille structure, implique une adaptation des méthodes et des moyens d'intervention qui limite au maximum la gêne d'exploitation, en sachant que le produit stocké est à la fois périssable et alimentaire. Le Maître d'Ouvrage et le titulaire du marché de travaux doivent alors établir un plan de travail détaillé tenant compte des servitudes de l'exploitation et de celles des interventions de réparation. De plus dans le cas de SAFI, le traitement des fissures - préalable à la mise en précontrainte - imposait le remplissage de la cellule correspondante pour les ouvrir et la vidange immédiate pour effectuer le reste des opérations de renforcement. Dans ce cas, l'ensemble des travaux s'est étendu sur une période de 12 mois d'avril 1987 à mai 1988.

2. DESCRIPTION DU SILO

Il s'agit d'un équipement important, d'une capacité de stockage de 25.000 t environ. La structure comporte deux batteries comprenant chacune 3 rangées de 5 cellules tangentes entre elles, réparties de part et d'autre d'un bâtiment central de services comportant les élévateurs à céréales et les accès pour le personnel (ascenseur, escaliers). Le stockage est fait à la fois dans les cellules circulaires, et dans les espaces entre cellules tangentes (cellules en as de carreau au nombre de 16). Les cellules ont une hauteur de 34 m.

La structure de stockage est constituée par des parois en béton armé d'épaisseur courante 12 cm. La fissuration importante, à la fois verticale et horizontale, a des origines multiples liées à la fois aux hypothèses de calculs et à la qualité de la réalisation. L'étude du renforcement a pris en compte toutes les sollicitations de fonctionnement (statiques et dynamiques) liées aux opérations de stockage et déstockage, de même que les sollicitations climatiques (gradient thermique) particulièrement importantes dans un site maritime et chaud, tel que celui de SAFI; certaines parties peuvent être soumises, dans un laps de temps très court, au brouillard, au soleil intense et au vent.

3. ETUDE DU RENFORCEMENT

3.1. Textes réglementaires

- Béton armé : règles BAEL 83
- Béton précontraint : règles BPEL 83
- Calcul du silo : Annales ITBTP juillet-août 86

3.2. Hypothèses de calcul

- Caractéristiques retenues pour la matière ensilée (blé) : masse spécifique 850 kg/m³, angle de frottement interne 26°
- Coefficient de majoration dynamique appliqué aux efforts statiques (premier état d'équilibre) 1,3
- Gradient thermique retenu : 15° C pour les faces extérieures avec un module de béton de 30.000 MPa (ensoleillement) et 9°C pour les faces intérieures avec un module de béton de 20.000 MPa.

3.3. Matériaux

- Béton : pour une première série d'essais, la résistance atteignait 36,5 MPa en moyenne soit 33 MPa en nominal.
- Armatures existantes : compte-tenu de la corrosion des armatures au droit des fissures, et du très faible pourcentage d'armatures verticales, le Maître d'Ouvrage a exigé que les vérifications soient faites sans tenir compte des armatures existantes.
- Armatures de précontrainte : câbles monotoron gainé-graissé T15 super, très basse relaxation. Le coefficient de frottement de 0,05 et la valeur de la déviation parasite pris en compte (1 degré par mètre) se sont avérés pessimistes (allongements obtenus supérieurs à l'allongement de calcul).



3.4. Caractéristiques particulières au projet

La difficulté spécifique de la structure provient du fait que les cellules ne sont pas indépendantes mais accolées, retirant ainsi le caractère "de révolution" aux efforts appliqués. La faible épaisseur des parois (12 ou 13 centimètres) et le parti de négliger les armatures existantes ont conduit à effectuer des calculs de pression de précontrainte extrêmement précis sur chaque portion de barre modélisée dans le programme.

Les calculs ont été menés pour une batterie de cellules à différents niveaux et par cellule pour le calcul de flexion des parois dans la zone du fond du silo, dans la zone de couverture et en partie médiane (efforts dûs à la mise en tension des câbles). La force de précontrainte a été ajustée en fonction du niveau des câbles, de manière à ne pas solliciter le béton au-delà de sa possibilité compte-tenu des faibles épaisseurs et du ferraillage négligeable. Un calcul itératif en section fissuré a permis d'arriver à des cercles groupées en 4 séries de tension, afin d'éviter toute erreur sur le chantier, allant de 0,8 Rg à 0,2 Rg. Les vérifications ont été faites dans les différentes phases de construction de manière à permettre la mise en tension d'une cellule complète avant début de précontrainte de la cellule voisine et remplissage ou vidange de la cellule suivante.

4. REALISATION DU RENFORCEMENT

4.1. Installation du chantier :

Elle comporte les installations au sol pour la préfabrication, notamment des câbles de précontrainte et les installations permettant d'accéder sur toutes les faces du silo internes et externes y compris dans les cellules en as de carreau. Pour ces dernières, le choix s'est porté sur des passerelles légères, manœuvrées à la main par les opérateurs eux-mêmes (L.A.H.O.). Dans certaines zones d'activité internes (cellules as de carreau), on a parfois utilisé deux passerelles superposées pour la réalisation d'opérations successives (mise en place, puis mise en tension des câbles de précontrainte). Ce type de passerelle impose pour le déplacement vertical, la présence de deux hommes. Lors de certaines opérations (enfilage des gaines), il était parfois nécessaire de disposer 6 passerelles au même niveau, dans six cellules différentes, ce qui imposait la présence de douze personnes. Dans d'autres circonstances, l'utilisation de passerelles déplacées mécaniquement aurait permis de réduire l'importance de la main d'œuvre :

4.2. L'injection des fissures :

Les fissures d'une ouverture supérieure à 0,3 mm ont été traitées. Le principe du traitement était le suivant : création d'une saignée de 5 x 5 mm au droit de la fissure, puis remplissage de la saignée à l'aide d'un mastic souple type SIKAFLEx 15 LM.

4.3. Le forage de trous pour le passage des câbles :

Le forage a été exécuté par couronne diamentée (carottage); chaque forage avait une longueur de 0,60 m. La difficulté principale résidait dans l'implantation de l'axe de forage, en effet, celui-ci devait sortir tangentiellement au voile cylindrique du silo. L'utilisation d'un gabarit de positionnement a permis de résoudre ce problème de façon satisfaisante.

4.4. Le renforcement par précontrainte :

4.4.1. Le mode de précontrainte

Pour satisfaire aux exigences de ce renforcement, il était nécessaire d'une part de bénéficier d'un effort de précontrainte le plus constant possible sur la périphérie des cellules. Le choix des points d'ancrage dans un même plan vertical dans les cellules en as de carreau, pour des raisons à la fois pratiques d'exécution et d'esthétique, interdisait le déplacement des points d'ancrages pour uniformiser la précontrainte; il permettait d'autre part de mettre en place une précontrainte extérieure la mieux protégée possible. La technique adoptée est une solution originale développée par FREYSSINET, consistant à utiliser le toron gainé-graissé mis en place dans une gaine en polyéthylène haute densité (PEHD) 28 x 32 mm, injectée au coulis de ciment préalablement à la mise en tension. Cette disposition permet d'enrober le toron gainé-graissé dans une gaine de coulis rigide - exactement adaptée à sa forme - qui recrée l'environnement pour lequel ce produit a été créé, les dalles de béton précontraintes par post-tension. Les conditions mécaniques de fonctionnement de la précontrainte - coefficient de frottement en courbe inférieur à 0,05, absence de détérioration de la gaine PEHD du toron - sont parfaitement respectées et la protection contre les agressions extérieures - gaine externe en PEHD et coulis de ciment - est également excellente.

L'ancrage des deux extrémités d'une cerce est réalisé dans une pièce d'ancrage unique en forme de "X", le câble utilisé étant un toron gainé-graissé de diamètre 15,2 mm. Pour des raisons esthétiques, il a été décidé de disposer les câbles de renforcement de façon uniforme sur toute la hauteur (40 cerces); les sollicitations diminuant avec le niveau des câbles, les câbles ont été tendus avec des forces décroissantes du bas vers le haut du silo. Tous les ancrages sont regroupés dans les cellules en as de carreau. L'essentiel des opérations de précontrainte était donc réalisé à partir de ces zones exiguës de 2 x 2 m² environ.

4.4.2. La mise en oeuvre de la précontrainte

La cadence élevée de mise en place de la précontrainte, l'exiguïté de l'espace en haut du silo imposaient une préfabrication des câbles et des gaines. Les câbles ont été découpés au sol, dénudés localement, enfilés sur l'ancrage (une seule extrémité), enroulés et transportés par l'ascenseur à la partie haute du silo. Les gaines étaient préparées de la même façon. La mise en place des gaines des câbles était réalisée à partir des cellules en as de carreau; toutes les passerelles situées sur le trajet d'un câble - en général six - sont alors au même niveau. La gaine est d'abord descendue, déroulée depuis le haut avec une corde, puis enfilée au travers de chacun des trous de parois, par poussage manuel par le personnel présent sur les plates-formes. Le toron est alors descendu de la même façon et enfilé sur l'ancrage X 15, puis tous les raccordements sont alors faits pour permettre l'injection de l'espace entre gaine extérieure et toron.

L'injection du coulis de ciment est alors réalisée avec une pompe à main, sous une faible pression; rappelons que le coulis d'injection n'a pas ici de fonction de protection. Sa fonction essentielle est de réaliser une forme rigide enveloppant le toron gainé-graissé et permettant d'exécuter la mise en tension sans détérioration de sa gaine PEHD, par suppression des points de contact singuliers. La qualité du coulis et sa mise en oeuvre sont donc beaucoup moins importantes que lorsque le coulis doit assurer la protection de l'acier. Après injection, le câble est réglé en position définitive. Le premier câble, au bas du silo, est réglé à la lunette; les autres sont réglés par rapport à cette référence à l'aide de piges de longueur constante. Le résultat sur l'aspect



extérieur est tout à fait excellent. La mise en tension est alors effectuée simultanément par les deux extrémités du câble, afin d'éviter le déplacement de l'ancrage et de permettre d'avoir le maximum d'effort dans le câble.

Les finitions sont alors réalisées; elles comportent la coupe des torons, la mise en place d'un double capot de fermeture de l'ancrage pour éviter les fuites de graisse. On doit impérativement éviter toute fuite pour conserver l'ambiance "qualité alimentaire". L'ancrage est alors enrobé dans un cachetage en micro-béton, dessiné pour faciliter l'écoulement des céréales et éviter la constitution des voûtes de grains. De même la partie de câble interne aux cellules est revêtue d'un déflecteur en micro-béton ayant la même fonction. Toutes ces opérations demandent beaucoup de soins à la réalisation, pour que l'accrochage au béton de la structure soit d'excellente qualité afin de résister à l'abrasion des céréales et aux efforts de poussée.

5. ETANCHEITE EXTERIEURE

Le choix du complexe d'étanchéité a été motivé par la nécessité de répondre aux exigences suivantes :

- Grande souplesse pour reprendre les dilatations thermiques,
- Stabilité aux ultraviolets (U.V.).

Le complexe retenu est le suivant :

- 2 couches d'époxyane (époxy-uréthane) de 500 g/m² chacune par résine Freyssi 450,
- 1 couche de résine polyuréthane de 350 g/m² par résine Freyssi 620.

L'application était faite à la brosse et au rouleau.

6. CONCLUSION

Cette importante affaire de renforcement de silo est sans doute une première mondiale tant par son ampleur que par l'association de différentes techniques de renforcement (forage, injection de résine, précontrainte extérieure, peinture d'étanchéité, etc...) permettant de redonner à une structure quelconque, non seulement ses capacités initialement souhaitées, mais également de nouvelles possibilités tenant compte de l'évolution des technologies depuis l'époque de la construction. Cette remarquable réalisation a valeur d'exemple et invite les Maîtres d'Ouvrage à envisager sereinement les opérations de renforcement de structures - même très dégradées -, souvent préférables aux démolitions et reconstructions, à condition toutefois de s'adresser à des spécialistes capables de maîtriser simultanément tous les aspects de la question, depuis l'expertise jusqu'aux détails d'exécution.