# CCI Brest – Silos

## DIAGNOSTIC MATERIAUX ET STRUCTUREL

M. PAPIN – N. SANCHEZ





sixense

# Sommaire


**I. Introduction** p3
Contexte et objet de l'étude

**II. Evaluation de l'état** p7
Inspection / Diagnostic du béton armé / Auscultation de la précontrainte / Mesures de déformation sous charge

**III. Evaluation structurale** p16
Modélisation de la batterie de silos / Evaluation de la capacité résistante

**IV. Conclusions et recommandations** p32
En vue de pérenniser les silos

# Introduction

Contexte et objet de l'étude





Ceintures en béton précontraint en partie basse des silos et cerces de précontrainte sur toute la hauteur des jupes

## Historique

| | |
|---|---|
| 1980 | Concours |
| | Notification du marché au Groupement Campenon Bernard – SEMADA – STOLZ – SNEF |
| 1981 | Lettre de commande des études d'exécution de la CCI |
| | Lettre de commande des travaux le 31/07/1981 |
| **1982** | **Construction des 8 silos** |
| 1983 | Premiers essais d'ensilage le 01/03/1983 |
| 1985 | Premiers désordres<br>Fissures dans la zone de liaison entre les jupes et les poutres Parcey |
| 1987 | Campenon Bernard a procédé à des premiers travaux de réparation et de renforcement de ces zones d'appuis des poutres Parcey |
| 1988 | Expertise judiciaire est entamée à l'initiative de la CCI, contre le groupement d'entreprises |
| 1992 | Le 13 juillet 1992, la jupe du silo n°5 s'est ouverte sur une hauteur de 4,00m, avec une fissure « de 10 cm de profondeur », alors que le silo était rempli de tourteau de soja |
| | Renforcement provisoire sur S5 des parties basses par cerces de précontrainte |
| | **Renforcement définitif des 8 silos :**<br>- **Réalisation de ceintures en béton précontraint en parties basses de silos**<br>- **Mise en place de cerces de précontrainte sur toute la hauteur des jupes** |

# I. Introduction

II. Evaluation de l'état
III. Evaluation structurale
IV. Conclusions et recommandations

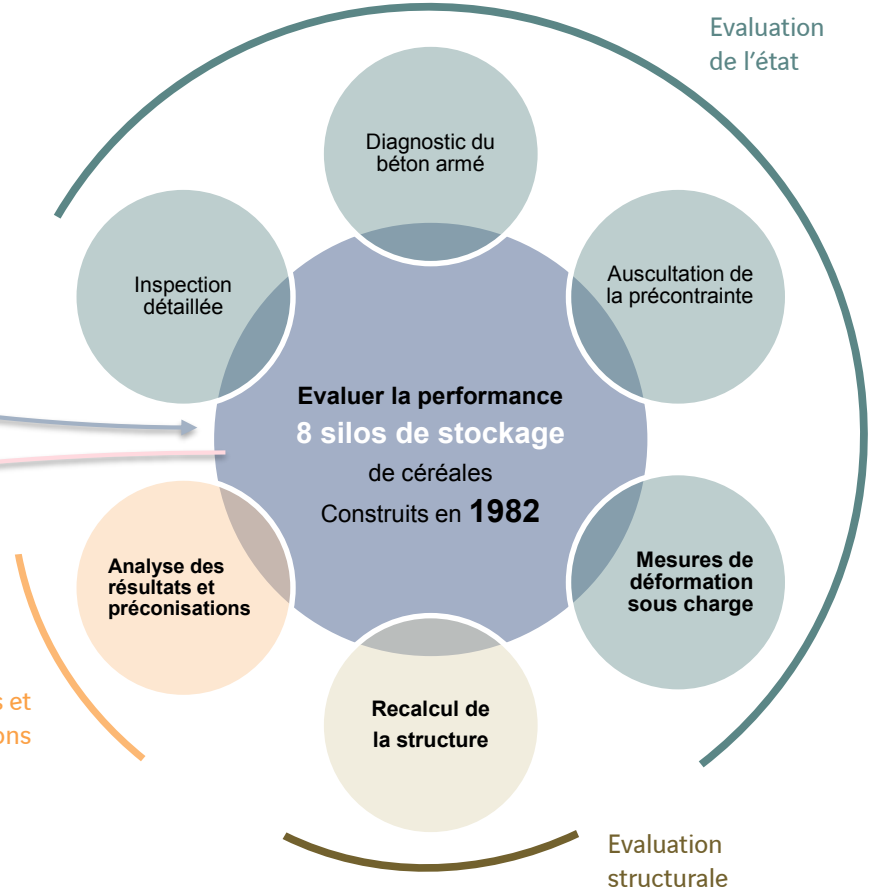
## CCI Brest
Maintenance du patrimoine

Besoin

Etude

Réponses

Exploitation pendant encore 20 à 30 ans






sixense

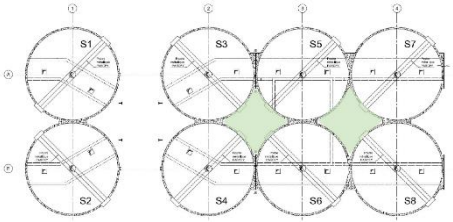
# I. Introduction

II. Evaluation de l'état
III. Evaluation structurale
IV. Conclusions et recommandations

## Principales caractéristiques de l'ouvrage

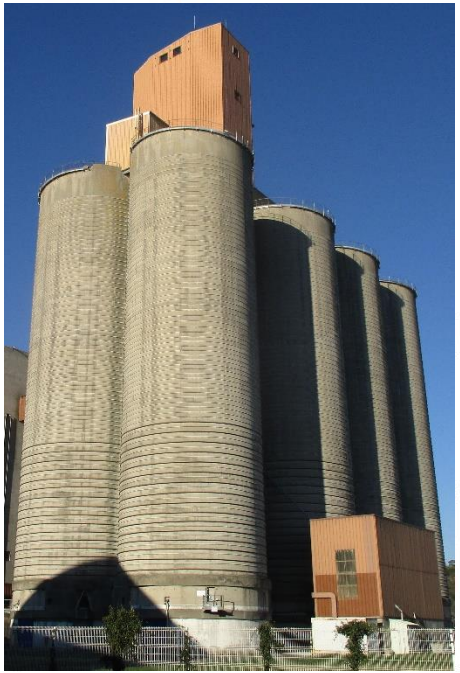
- Stockage de céréales
- Silos de section circulaire
- 4 paires dont 2 as de carrefour
- Hauteur : 51,00 m au dessus du TN
- Ø intérieur 13,00 m
- Voile silos cylindre circulaire : 23 cm
- 3 niveaux de structure

+0,00 à +3,00 m : Galeries techniques
+3,00 à +5,00 m : Fond de silo – Vis extractrice
+5,00 à +51,00 m : Jupe de silo – Partie courante




Haut : Tapis convoyeur au-dessus des silos 5 à 8
Bas : Intérieur d'un silo

## Photos de l'ouvrage



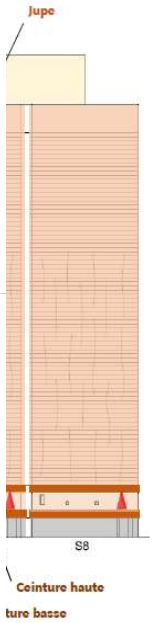
Vue générale des 8 silos



Tapis convoyeurs dans les galeries techniques



Poutre Parcey et vis sans fin






sixense

# Evaluation de l’état

Inspection détaillée

Diagnostic Matériaux

Examen et étude de la précontrainte

Mesures de déformations sous charges





sixense

## Inspection détaillée

**Télé-inspection (photogrammétrie par drone) couplée à une inspection visuelle rapprochée (nacelle élévatrice et cordistes)**







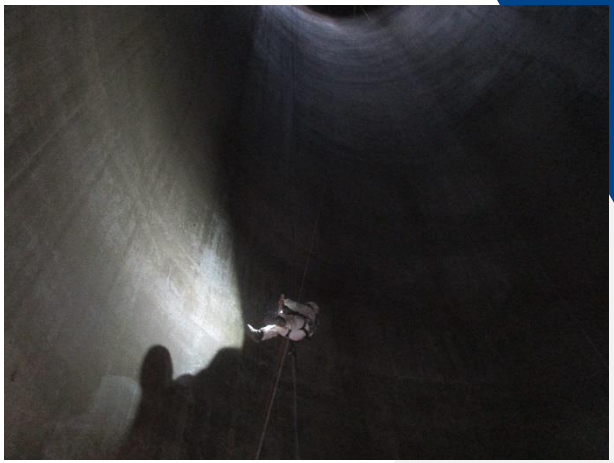

sixense

## Inspection détaillée

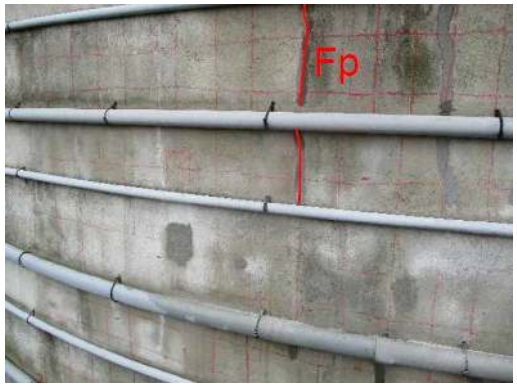
**Télé-inspection (photogrammétrie par drone) couplée à une inspection visuelle rapprochée (nacelle élévatrice et cordistes)**







## Inspection détaillée







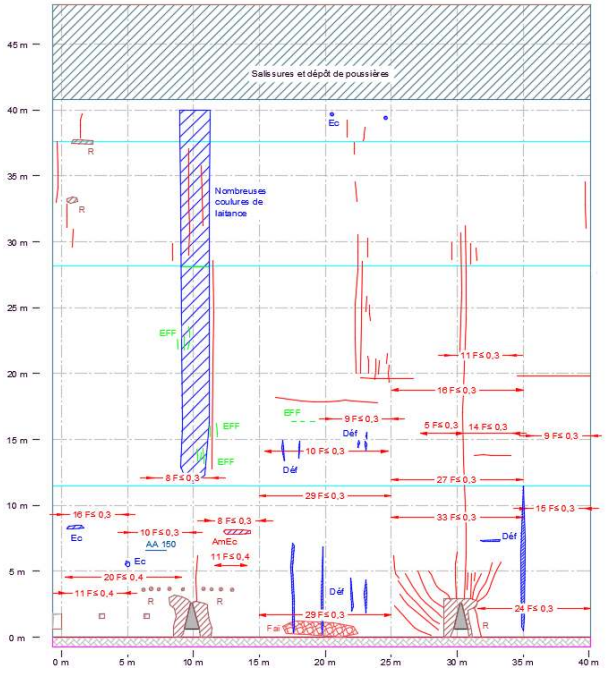


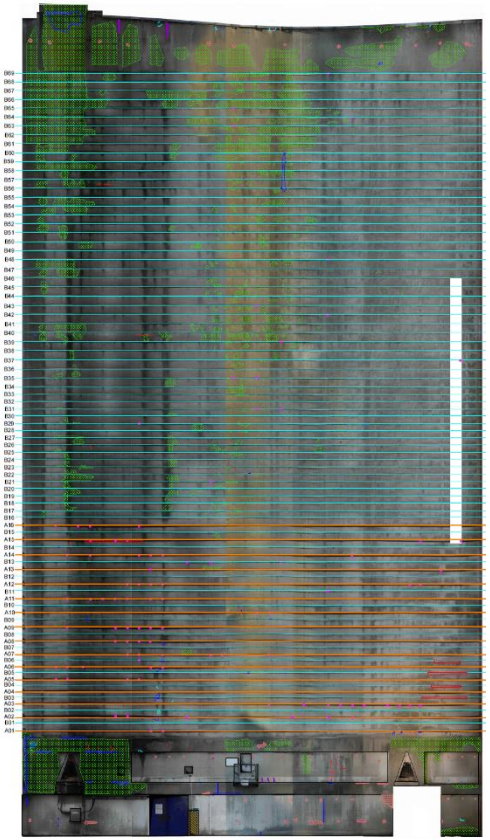


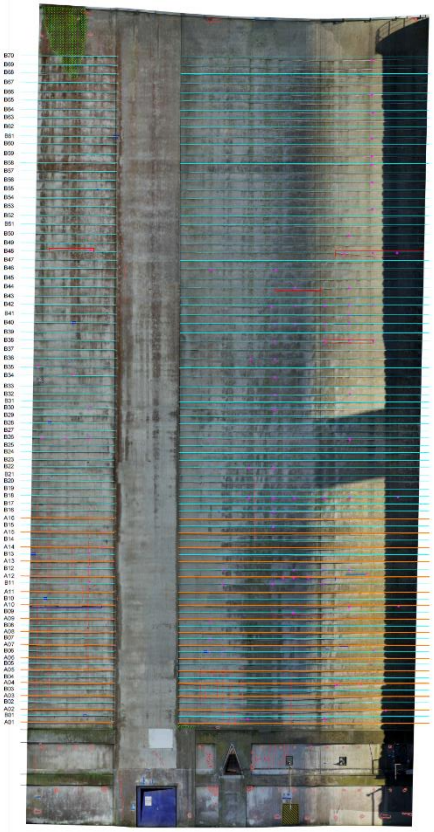




I. Introduction
**II. Evaluation de l'état**
III. Evaluation structurale
IV. Conclusions et recommandations







sixense

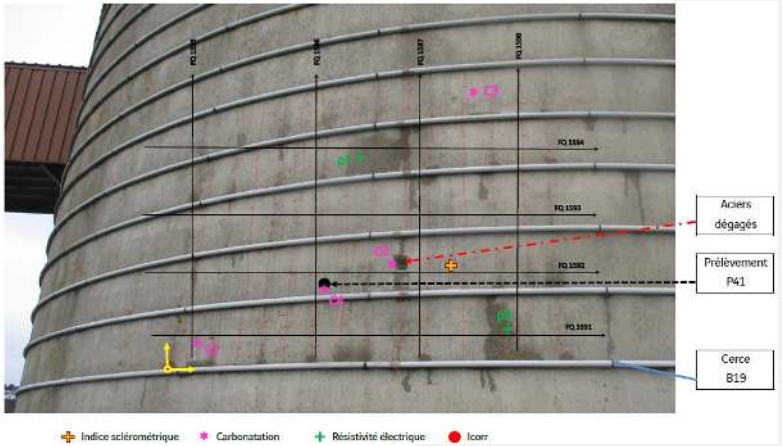
# Auscultation de la structure






**18 zones de diagnostic :**

- Mesures d'enrobage,
- Mesures de profondeur de carbonatation des bétons,
- Mesures de potentiels de corrosion des armatures, de la vitesse de corrosion des armatures et de la résistivité électrique du béton,
- Essais de dureté superficiel du béton,
- Prélèvements de béton pour analyses en laboratoire.



# Examen de la précontrainte



## Cerces de renfort en partie courante

Monotorons T15s gainés graissés enfilés dans une gaine PVC injectée au coulis de ciment

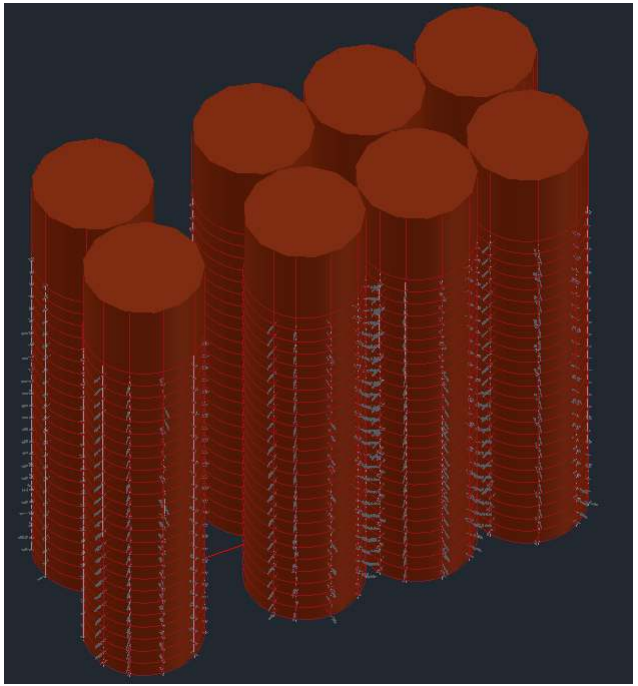


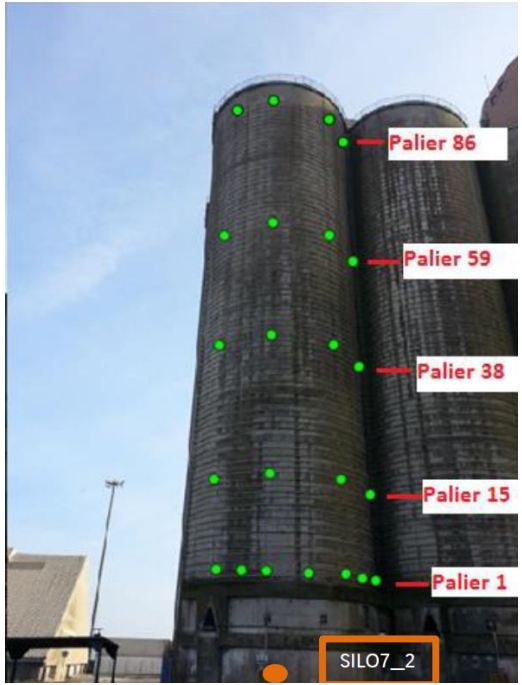

## Cerces de renfort en partie basse

Monotorons T15s gainés graissés noyés dans une ceinture béton

**Essais réalisés :** mesures de tensions résiduelles par essai à l'arbalète et examen visuel de l'état de conservation des torons

# Mesures de déformations sous charges











## Conclusions sur l'état de conservation

**L'état de conservation des silos peut être qualifié de correct compte-tenu de leur âge (35 ans) et du milieu environnant (embruns marins) :**

- **Inspection détaillée :** la fissuration historique n'a pas évolué depuis le renforcement de 1992 et on note peu de désordres liés à la corrosion sous-jacente des armatures.
- **Béton armé :**
  - enrobage des armatures convenable / qualité moyenne des bétons (porosité élevée)
  - bétons non pollués par les ions chlorures et non affectés par la carbonatation
  - absence de zones de corrosion active, faible activité de corrosion et risque de corrosion négligeable
  - bon état de conservation des armatures dégagées
- **Précontrainte additionnelle :**
  - Bon état de conservation des torons
  - Niveau de tension résiduelle légèrement inférieur à la tension théorique attendue (162 KN en moyenne pour 175 KN théorique, soit ≠ -8%)

# Evaluation structurale

Recalcul de l'ouvrage aux Eurocodes





sixense

**30** ans — Structures agricoles

**35** ans — 2017

**50** ans — Structures de bâtiments

**65** ans — $2047^{+}$

Se prononcer sur la solidité et la durabilité des silos, afin de les exploiter pour encore 20 à 30 ans

2017 — Notes de calculs d'époque incomplètes et difficilement exploitables

**Etablissement de nouveaux calculs, mieux maîtrisés et sur la base de données d'entrées actualisées nécessaires pour poser un diagnostic fiable**

Renforcements en place suffisants ? à compléter ?

| | |
|---|---|
| NF EN 1990 | Bases de calcul des structures |
| NF EN 1991 | Actions sur les structures |
| NF EN 1992 | Calcul des structures en béton |



sixense

Définition des hypothèses

Matériaux
Chargements
Combinaisons
Durabilité

## Modélisation 3D des 8 silos sous Graitec Advance Design 2016

> Etat de vieillissement actuel
  caractéristiques mécaniques vraies du béton
  efforts résiduels dans les monotorons de précontrainte
> Interaction entre silos via les raidissements locaux
> Effet des cerces de précontrainte en place
> Cas de charges particuliers dus a des vidanges anormales
> Effets du vent et du gradient thermique

## Validation de la fiabilité du modèle

### Vérification des jupes

BA

$A_{s,calculées} < A_{s,réel}$

### Vérification des ceintures

BP

$\sigma_{traction,calculées} < \sigma_{traction,adm}$

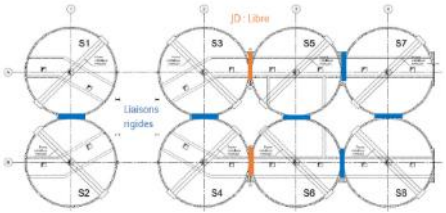
$\sigma_{traction,adm}$ = 0 MPa en classe XS
en zone d'enrobage

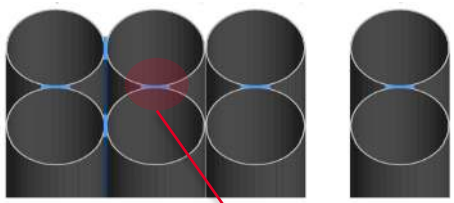
### Vérification des dalles de couverture des galeries

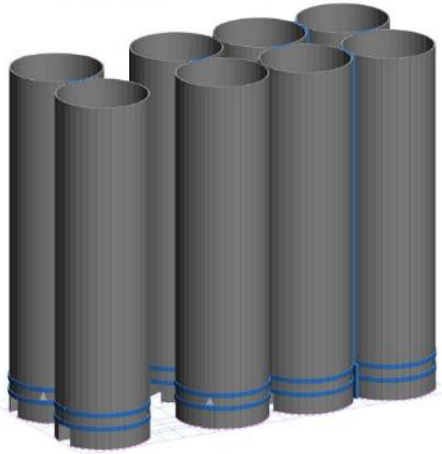
BA

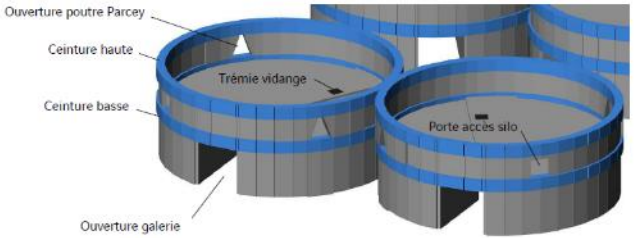
$A_{s,calculées} < A_{s,réel}$

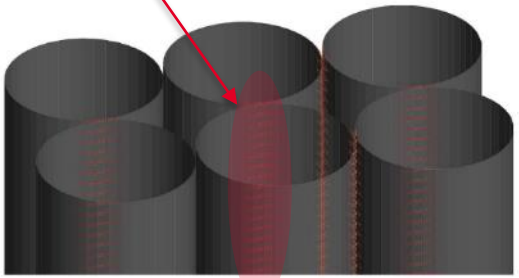
I. Introduction
II. Evaluation de l'état
**III. Evaluation structurale**
IV. Conclusions et recommandations



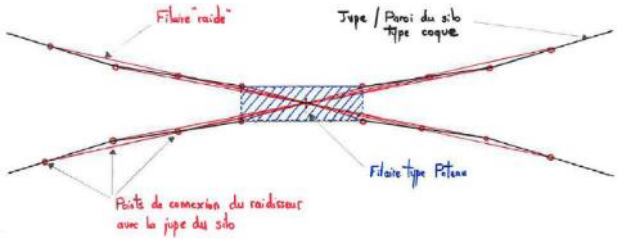



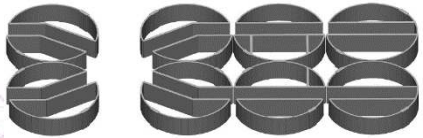


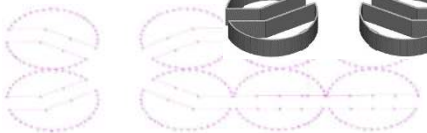








**Eléments maillés automatiquement (Delaunay)**
**Taille des mailles 1,00m**

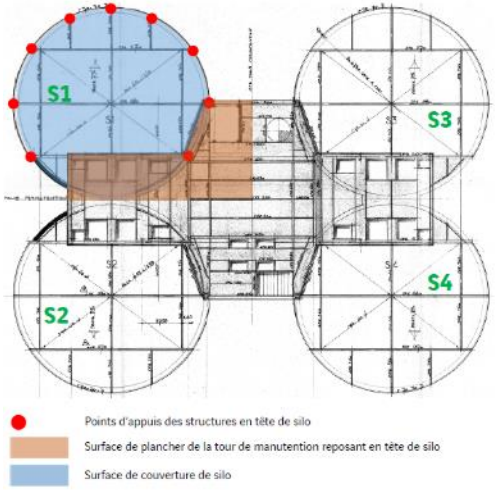
## Chargements considérés

- Poids propre
- Poids des équipements
- Précontrainte
- Actions des matériaux ensilés
- Actions de la température
- Charges de vent
- Actions des poutres Parcey

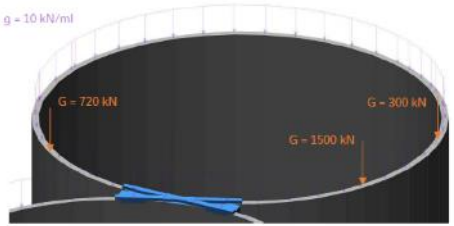
I. Introduction
II. Evaluation de l'état
III. Evaluation structurale
IV. Conclusions et recommandations

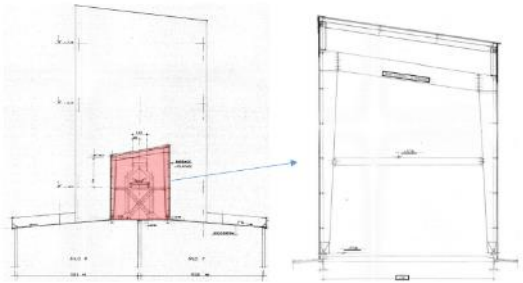
## Chargements considérés

- Poids propre
- Poids des équipements
- Précontrainte
- Actions des matériaux ensilés
- Actions de la température
- Charges de vent
- Actions des poutres Parcey







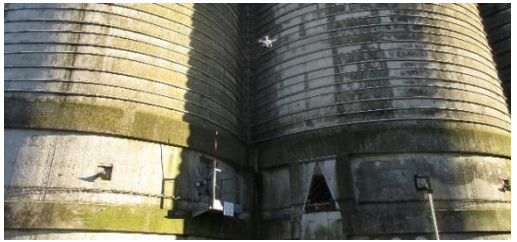
sixense

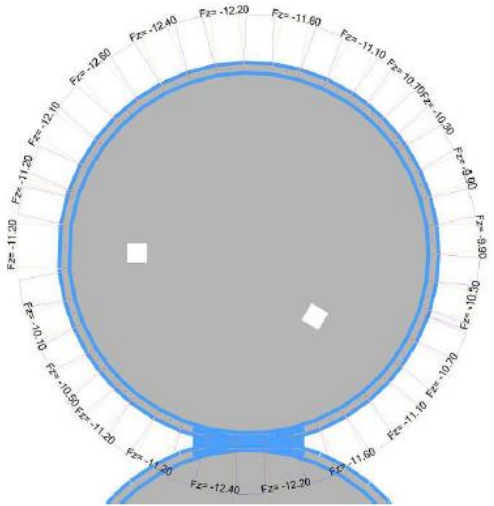
I. Introduction
II. Evaluation de l'état
**III. Evaluation structurale**
IV. Conclusions et recommandations

## Chargements considérés

- Poids propre
- Poids des équipements
- Précontrainte
- Actions des matériaux ensilés
- Actions de la température
- Charges de vent
- Actions des poutres Parcey







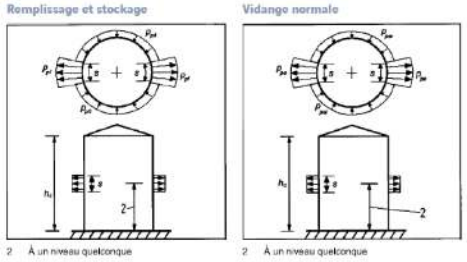



sixense

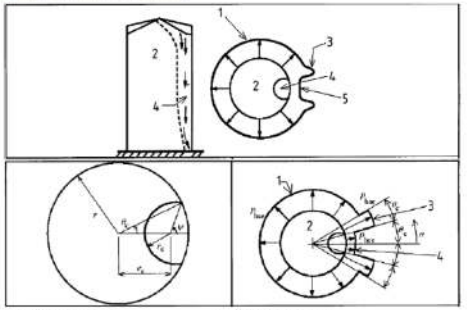
## Chargements considérés

- Poids propre
- Poids des équipements
- Précontrainte
- Actions des matériaux ensilés
- Actions de la température
- Charges de vent
- Actions des poutres Parcey

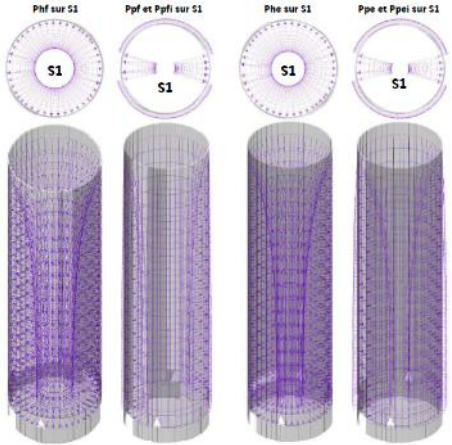


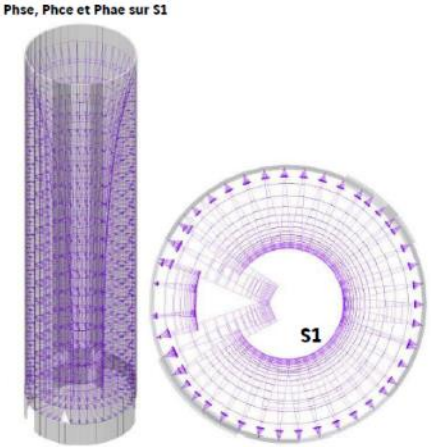



| Situation | Charges | | NF EN1991-4 |
|---|---|---|---|
| Remplissage Stockage | $p_{hf}(z)$ | Contrainte horizontale symétrique | §5.2.1 |
| | $p_{pf}(z)$ | Contrainte due à la charge de correction locale | |
| | $p_{pfi}(z)$ | Contrainte due à la charge de correction locale complémentaire opposée | |
| | $p_{wf}(z)$ | Contrainte de frottement sur la paroi verticale | |
| Vidange Normale | $p_{he}(z)$ | Contrainte horizontale symétrique | §5.2.2 |
| | $p_{pe}(z)$ | Contrainte due à la charge de correction locale | |
| | $p_{pei}(z)$ | Contrainte due à la charge de correction locale complémentaire opposée | |
| | $p_{we}(z)$ | Contrainte de frottement sur la paroi verticale | |




| Situation | Charges | | NF EN1991-4 |
|---|---|---|---|
| Vidange Grand excentrement | $p_{hce}(z)$ | Contrainte horizontale au niveau du canal d'écoulement en tuyau située au-dessus de l'orifice | §5.2.4 |
| | $p_{hse}(z)$ | Contrainte complémentaire opposée | |
| | $p_{wce}(z)$ | Contraintes de frottement sur la paroi verticale associées à chaque zone distinguée : canal d'écoulement en tuyau, complémentaire | |
| | $p_{wse}(z)$ | | |



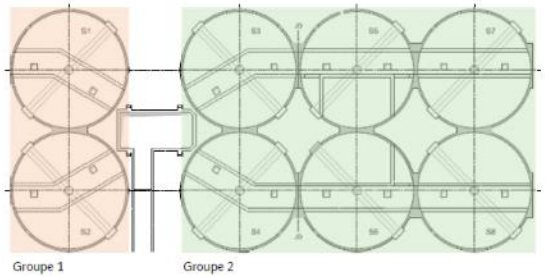





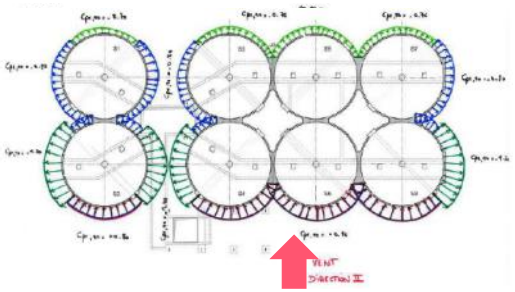

sixense

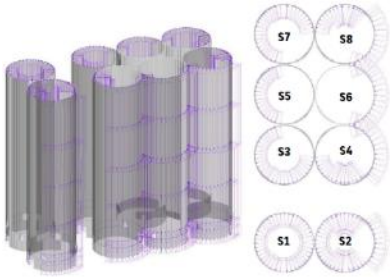
## Chargements considérés

- Poids propre
- Poids des équipements
- Précontrainte
- Actions des matériaux ensilés
- Actions de la température
- Charges de vent
- Actions des poutres Parcey

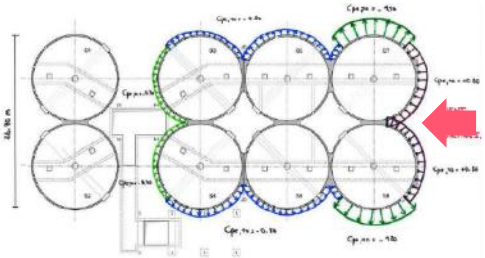


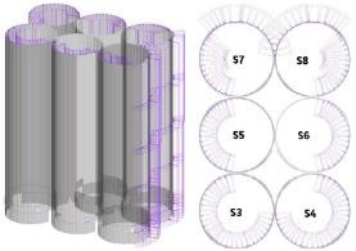

**Vent de Direction II soufflant sur S2, S4, S6 et S8**



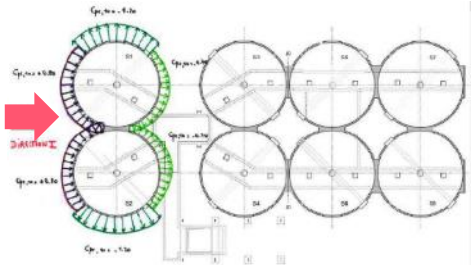


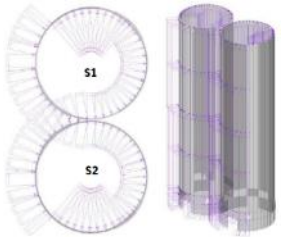

**Vent de Direction I soufflant sur S7 et S8**






**Vent de Direction I soufflant sur S1 et S2**








sixense

## Chargements considérés

- Poids propre
- Poids des équipements
- Précontrainte
- Actions des matériaux ensilés
- Actions de la température
- Charges de vent
- Actions des poutres Parcey



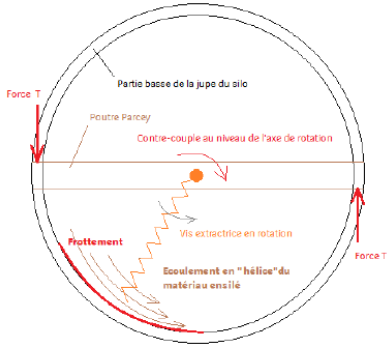
### Charges verticales

au niveau des appuis
(descente de charges)



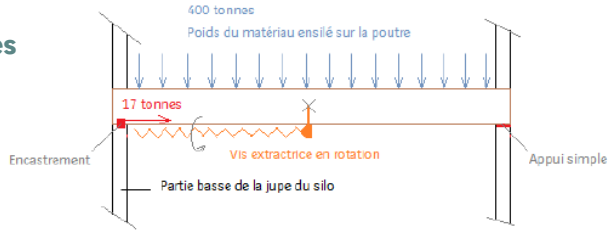

### Charges radiales et tangentielles

sur la jupe exercées par les poutres Parcey
au niveau des ouvertures triangulaires
lorsque la **vis extractrice est en rotation**




### Charges tangentielles

aux appuis des poutres

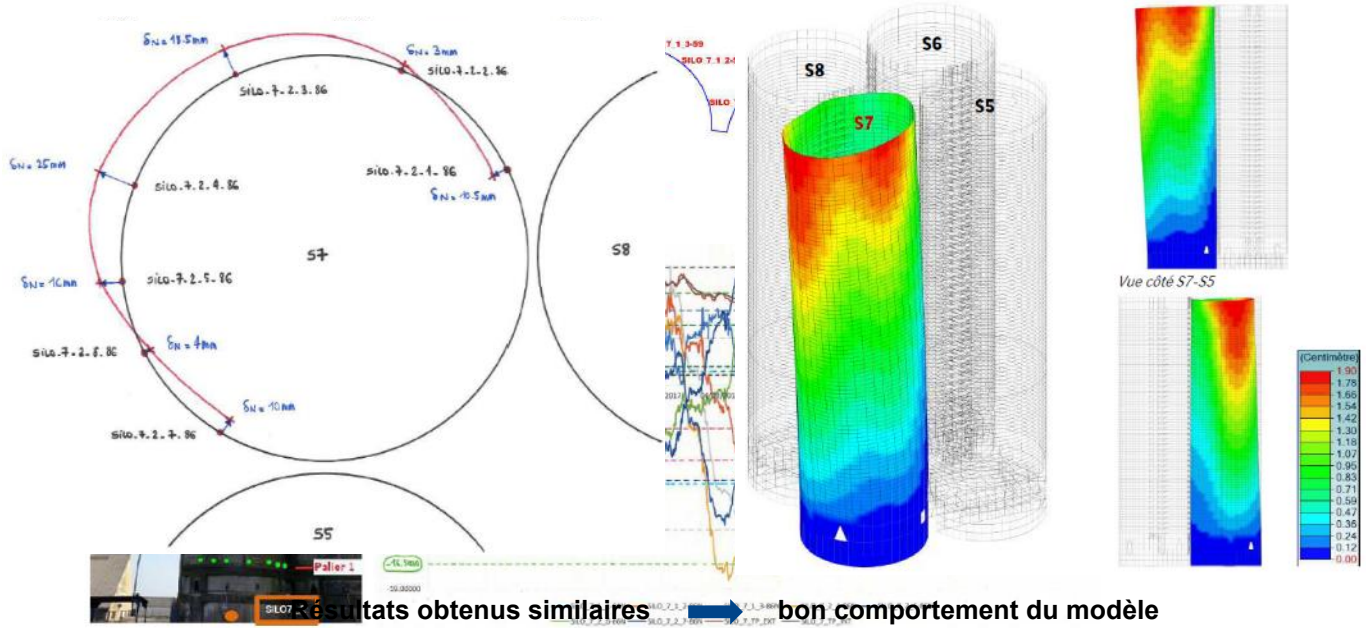





sixense

Données prises pour test : Déplacement du silo S7

Test : comparaison déplacements calculés / mesurés sur journée test remplissage et vidange de S7




**Résultats obtenus similaires → bon comportement du modèle**

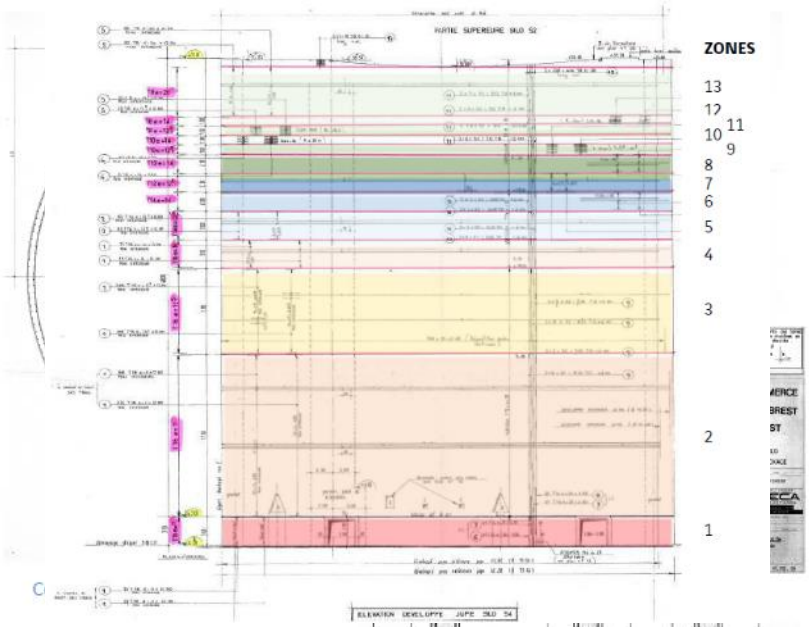


sixense

I. Introduction
II. Evaluation de l'état
**III. Evaluation structurale**
IV. Conclusions et recommandations

## Vérification de la structure

- Jupes de silos en BA
- Ceintures de renforcement haute et basse en BP
- Dalles de couverture des galeries en BA




| Zone | $Z_{bas}$ | $Z_{haut}$ | Diamètre | Espacement [cm] | Sections [cm²/m] |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | +0.00 | +3.00 | T16 x2 | 11 | **36.56** |
| 2 | +3.00 | +20.00 | T16 x2 | 11 | **36.56** |
| 3 | +20.00 | +29.00 | T16 x2 | 12.5 | **32.17** |
| 4 | +29.00 | +32.00 | T16 x2 | 14 | **28.72** |
| 5 | +32.00 | +35.00 | T14 x2 | 12.5 | **24.63** |
| 6 | +38.00 | +40.00 | T14 x2 | 14 | **21.99** |
| 7 | +40.00 | +42.00 | T12 x2 | 12.5 | **18.10** |
| 8 | +42.00 | +44.00 | T12 x2 | 14 | **16.16** |
| 9 | +44.00 | +45.00 | T10 x2 | 12.5 | **12.57** |
| 10 | +45.00 | +46.00 | T10 x2 | 14 | **11.22** |
| 11 | +46.00 | +47.00 | T8 x2 | 12.5 | **8.04** |
| 12 | +47.00 | +48.00 | T8 x2 | 14 | **7.18** |
| 13 | +48.00 | +51.00 | T8 x2 | 20 | **5.03** |

**Plans de ferraillage d'origine**

Validés par investigations réalisées

I. Introduction
II. Evaluation de l'état
III. Evaluation structurale
IV. Conclusions et recommandations

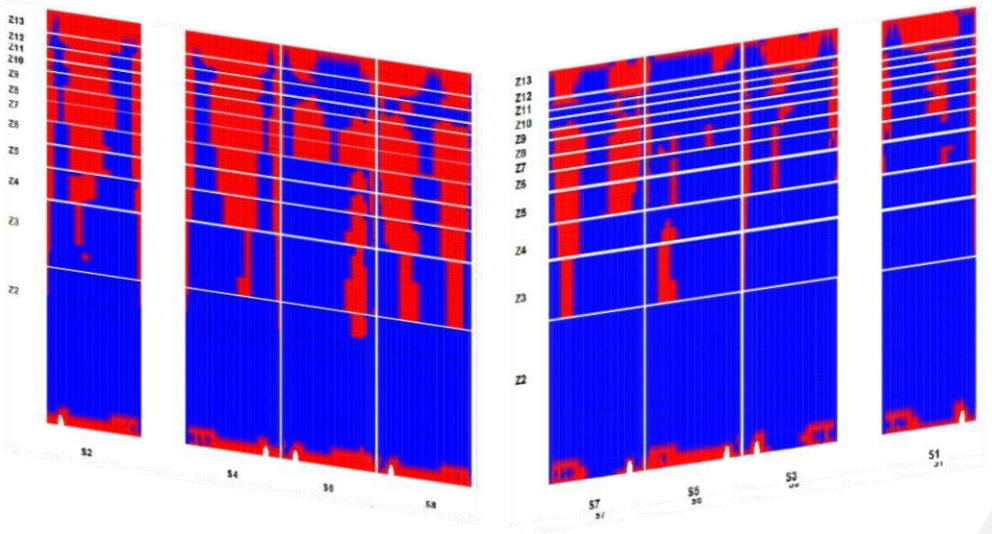
## Vérification de la structure

Jupes de silos en BA

Ceintures de renforcement haute et basse en BP

Dalles de couverture des galeries en BA

| | | |
|---|---|---|
| **ELU** | # Béton<br>NF EN 1992-1-1 §3.1 Figure 3.3<br><br># Acier<br>NF EN 1992-1-1 §3.2 Figure 3.8<br>(Diagramme a palier horizontal) | **Insuffisances d'armatures de manière localisées sur la demi-hauteur des jupes des silos** |
| **ELS** | $\sigma_{adm}$ = 120 MPa (Extérieure)<br>$\sigma_{adm}$ = 180 MPa (Intérieure)<br><br>NF EN 1992-1-1 7.3.1<br>Tableau 7.1NF de l'AN | Application stricte des Eurocodes<br><br>→ **Critère de limitation de la contrainte trop défavorable**<br>→ **insuffisances d'armatures passives significatives** |
| **ELS** | $\sigma_{adm}$ = 230 MPa (Extérieure)<br>$\sigma_{adm}$ = 230 MPa (Intérieure)<br><br>BAEL91 révisées 99<br>Fissuration « préjudiciable » | Augmentation de la limite de traction dans les armatures<br><br>→ **Armatures en partie inferieure des jupes suffisantes**<br>→ **Insuffisances persistent en partie supérieure** |



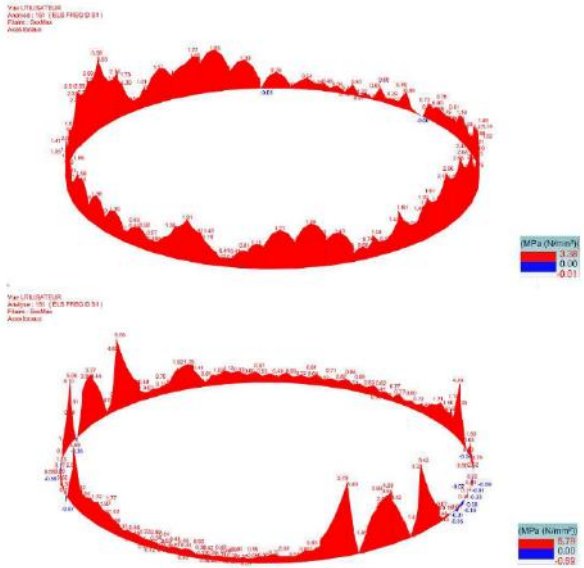

- **Insuffisances sont à nuancer**
- **Conséquence limitée car témoignent du non-respect des critères de maitrise de la fissuration**



sixense

## Vérification de la structure

- Jupes de silos en BA
- Ceintures de renforcement haute et basse en BP
- Dalles de couverture des galeries en BA



### ELU

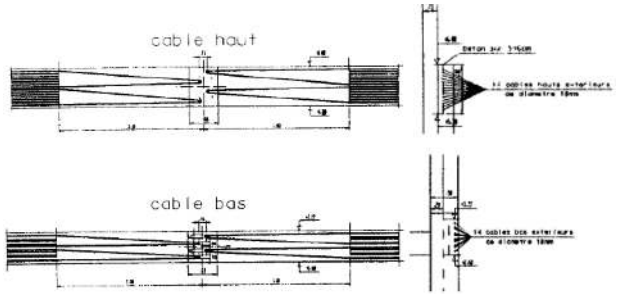
Justifiées

### ELS

Non justifiées aux ELS C, FREQ et QP

$\sigma_{calculées} < \sigma_{adm} = 0$

Ceintures entièrement tendues sous toutes les combinaisons alors que les Eurocodes exigent qu'elles restent entièrement comprimées sous combinaisons FREQ et QP




Calcul des surtensions dans les câbles de précontrainte et ouvertures de fissures

→ Mieux apprécier la sensibilité de la structure vis-à-vis des critères de durabilité, calcul :

- des surtensions dans les armatures de précontrainte sous combinaisons ELS C, F et QP
- de l'ouverture probable des fissures verticales qui pourraient se former le long des ceintures

**Surtensions de l'ordre 35 MPa**
**N'excèdent pas la contrainte de surtension admissible de 120 Mpa**

**Ouverture de fissures calculée Wk=0.1mm**
**Reste inferieure a la limite Wkmax=0.2 mm**



sixense

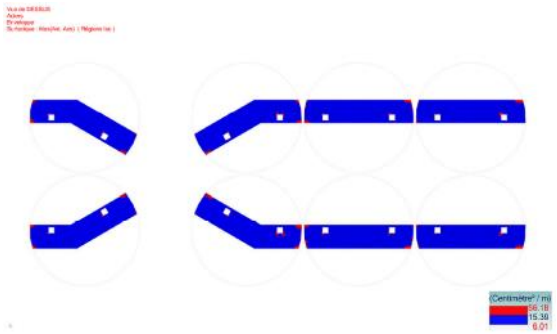
I. Introduction
II. Evaluation de l'état
III. Evaluation structurale
IV. Conclusions et recommandations

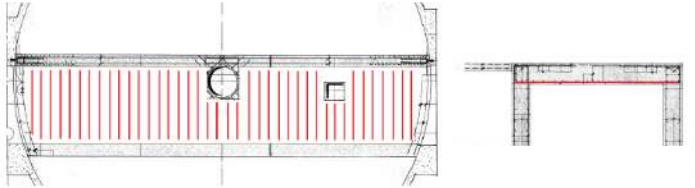
## Vérification de la structure

Jupes de silos en BA

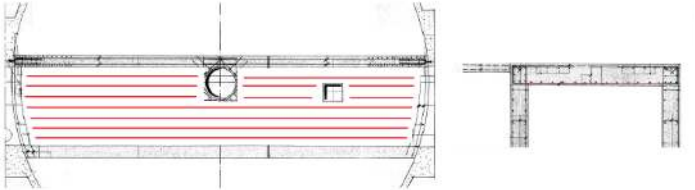
Ceintures de renforcement haute et basse en BP

Dalles de couverture des galeries en BA





› 2. Le ferraillage transversal (inférieur)



› 3. Le ferraillage aux encastrement (supérieur)



| Zone | Diamètre | Espacement [cm] | Sections [cm²/m] |
|---|---|---|---|
| 1. Ferraillage longitudinal inférieur<br>Tous les silos | T14 | 10 | **15.39** |
| 2. Ferraillage transversal inférieur<br>S1 à S4<br>S5 à S8 | T12<br>T10 | 18<br>20 | **6.28**<br>**3.93** |
| 3. Ferraillage supérieur encastrement<br>Tous le silos | T14 | 10 | **15.39** |

**Les vérifications effectuées par application stricte des Eurocodes montrent que le ferraillage en place dans les dalles de couverture des galeries est suffisant**



Nicolas SANCHEZ Mathieu PAPIN

sixense

## Ce qu'à mis en évidence le recalcul

| Recalcul de la structure | ELU | ELS |
|---|---|---|
| Jupes de silos en BA | Insuffisances d'armatures sur la moitié supérieure | Armatures en partie inferieure des jupes suffisantes<br>Insuffisances persistent en partie supérieure |
| Ceintures de renforcement haute et basse en BP | Justifiées | Non justifiées aux ELS C, FREQ et QP<br>$\sigma_{calculées} < \sigma_{adm} = 0$<br><br>Ceintures entièrement tendues sous toutes les combinaisons alors que les Eurocodes exigent qu'elles restent entièrement comprimées sous combinaisons FREQ et QP |
| Dalles de couverture des galeries en BA | Justifiées | Justifiées |

**Recalcul aux Eurocodes → Armatures passives en place insuffisantes → Précontrainte en place à compléter**



sixense

# Conclusions et recommandations



En vue de pérenniser les silos



sixense

I. Introduction
II. Evaluation de l'état
III. Evaluation structurale

# IV. Conclusions et recommandations

## Réponses apportées

Sur l'état de conservation de l'ouvrage

Sur les actions à entreprendre pour garantir la solidité et la durabilité des silos

I. Introduction
II. Evaluation de l'état
III. Evaluation structurale

# IV. Conclusions et recommandations

**Réponses apportées**

Sur l'état de conservation de l'ouvrage

Sur les actions à entreprendre pour garantir la solidité et la durabilité des silos

## Etat de dégradation des bétons et des aciers

- Etat de conservation **CORRECT** sans contamination particulière (chlorures et $CO_2$)

I. Introduction
II. Evaluation de l'état
III. Evaluation structurale

# IV. Conclusions et recommandations

## Réponses apportées

Sur l'état de conservation de l'ouvrage

Sur les actions à entreprendre pour garantir la solidité et la durabilité des silos

### Etat de dégradation des bétons et des aciers

- Etat de conservation **CORRECT** sans contamination particulière (chlorures et $CO_2$)

### Evaluation structurale

| | Résistance | Durabilité |
|---|---|---|
| Vis-à-vis des exigences au moment du renforcement en 1992 (Règles professionnelles de conception et de calcul des silos en béton, de 1986) | OK | Ok |
| Vis-à-vis de la règlementation actuelle (Eurocodes, de 2006) | Des insuffisances localisées sur la demi-hauteur supérieure des silos dues aux actions de vidanges excentrées combinées aux actions de vent | Décompression des ceintures de renforcement<br>Surtensions et ouverture de fissures maitrisées |



sixense

# Merci pour votre attention



M. PAPIN – N. SANCHEZ