





CCI Brest – Silos

DIAGNOSTIC MATERIAUX ET STRUCTUREL

M. PAPIN – N. SANCHEZ



Sommaire

	I. Introduction Contexte et objet de l'étude	p3
	II. Evaluation de l'état Inspection / Diagnostic du béton armé / Auscultation de la précontrainte / Mesures de déformation sous charge	p7
	III. Evaluation structurale Modélisation de la batterie de silos / Evaluation de la capacité résistante	p16
	IV. Conclusions et recommandations En vue de pérenniser les silos	p32

Introduction

Contexte et objet de l'étude



I. Introduction

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

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 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 :	
<ul style="list-style-type: none"> - Réalisation de ceintures en béton précontraint en parties basses de silos - Mise en place de cerces de précontrainte sur toute la hauteur des jupes 	



Ceintures en béton précontraint en partie basse des silos et 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

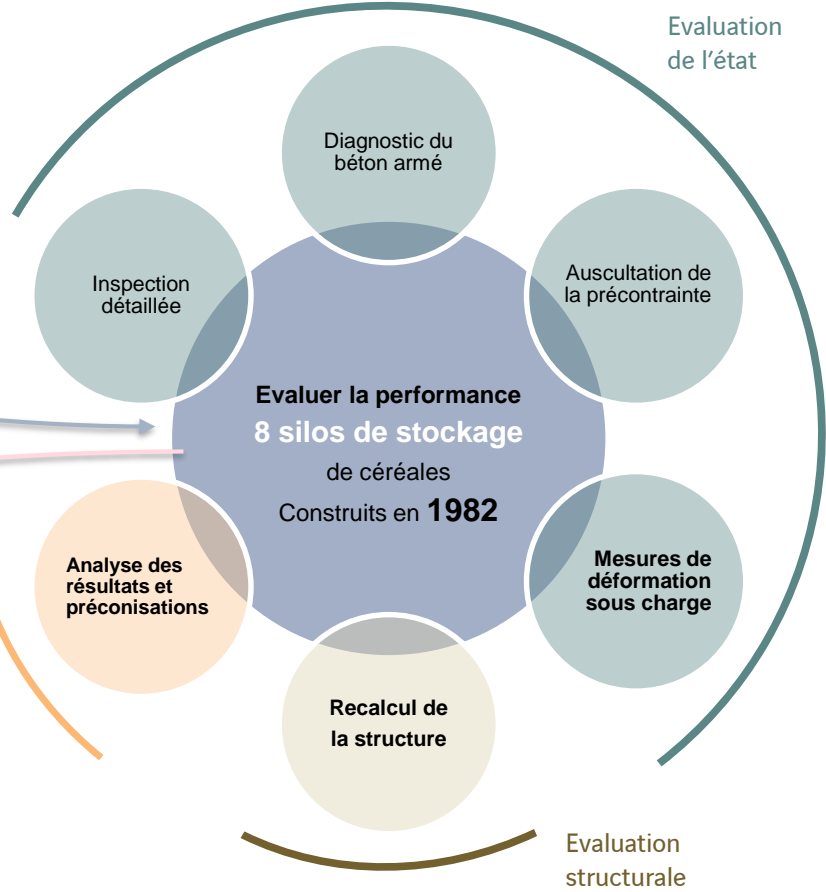
Besoin

Etude

Réponses

Exploitation pendant
encore 20 à 30 ans

Conclusions et
recommandations



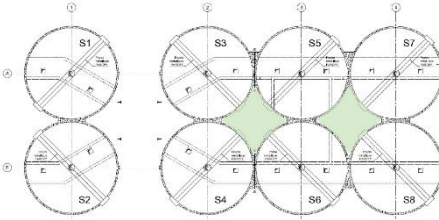
I. Introduction

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

Principales caractéristiques



Vue générale des 8 silos



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

Photos de l'ouvrage



Tapis convoyeurs dans les galeries techniques



Poutre Parcey et vis sans fin



Coiture haute
ture basse

Evaluation de l'état

Inspection détaillée

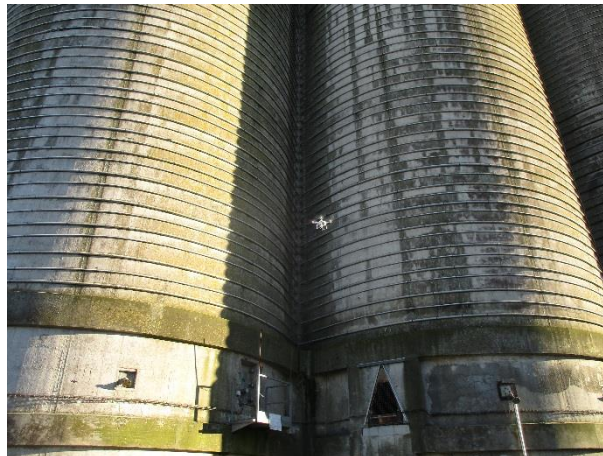
Diagnostic Matériaux

Examen et étude de la précontrainte

Mesures de déformations sous charges

Inspection détaillée

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



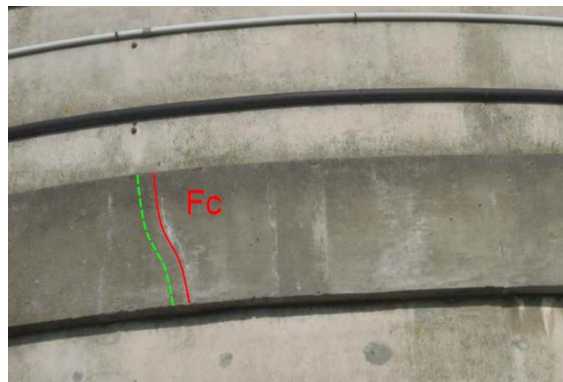
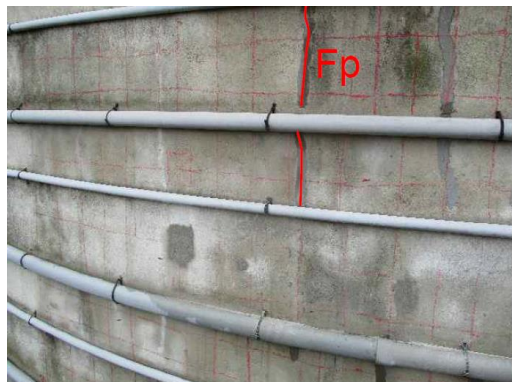
Inspection détaillée

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



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

Inspection détaillée



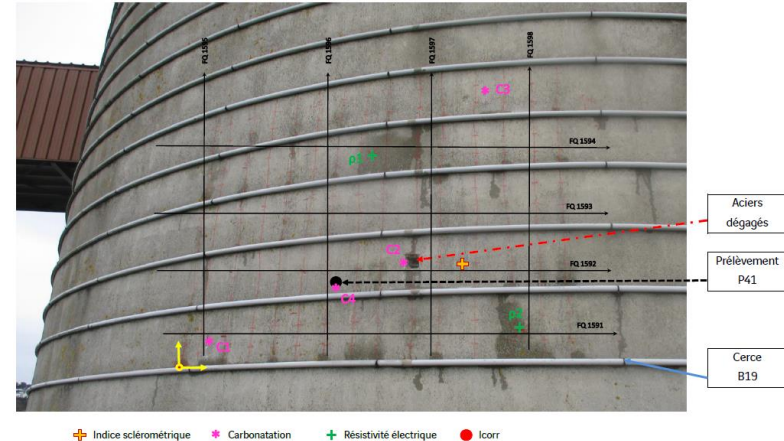
I.	Introduction
II.	Evaluation de l'état
III.	Evaluation structurale
IV.	Conclusions et recommandations

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 superficielle 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



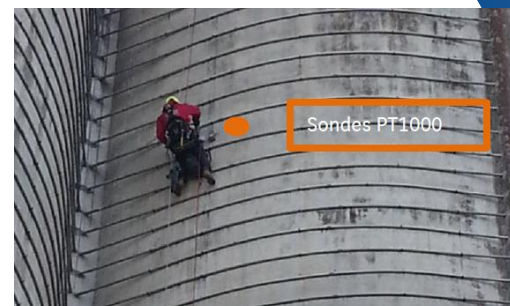
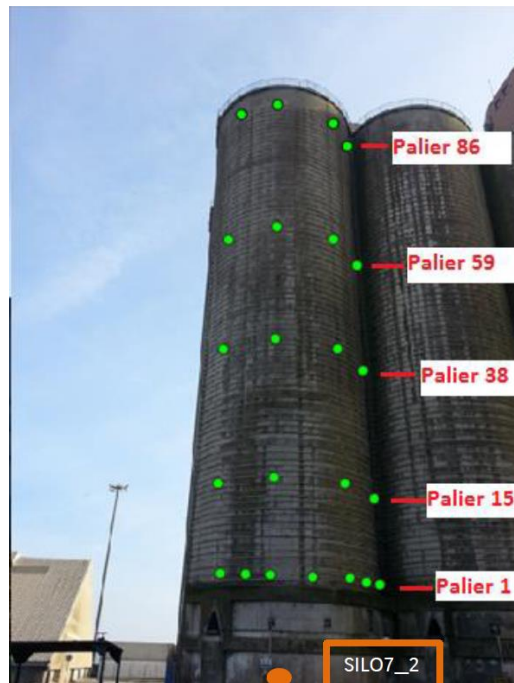
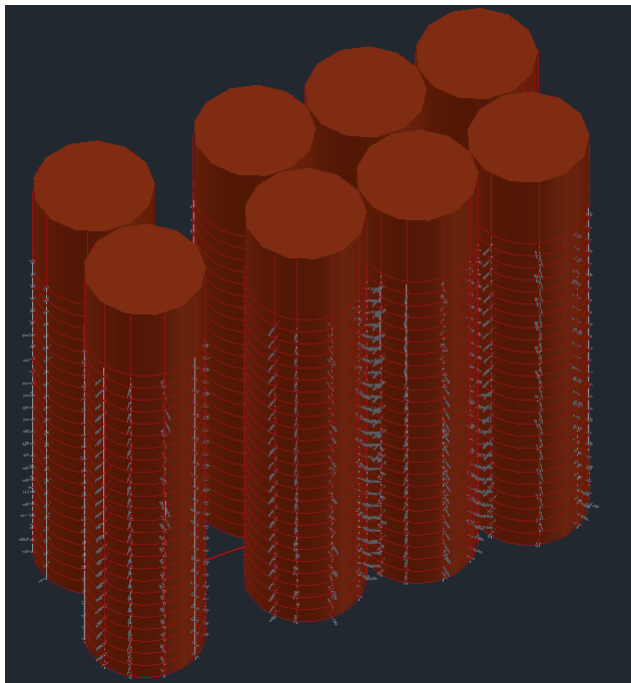
Cerces de renfort en partie basse

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

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

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) :

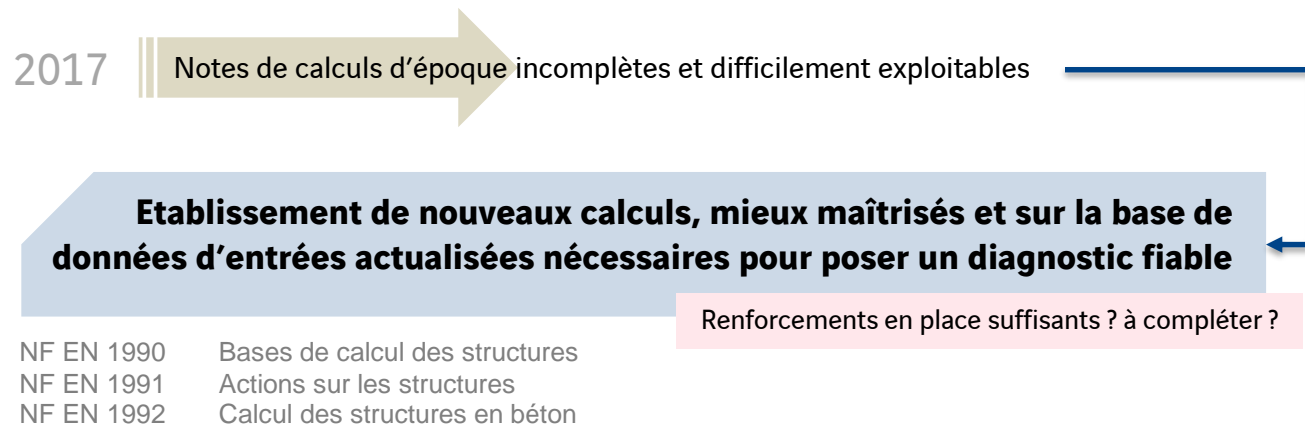
- **Inspection détaillée** : la fissuration historique n'a pas évolué depuis le renforcement de 1992 et on note peu de désordres liés à la corrosion sous-jacente des armatures.
- **Béton armé** :
 - enrobage des armatures convenable / qualité moyenne des bétons (porosité élevée)
 - bétons non pollués 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 $\approx -8\%$)

Evaluation structurale

Recalcul de l'ouvrage aux Eurocodes



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



Définition des hypothèses

Matériaux
 Chargements
 Combinaisons
 Durabilité

Modélisation 3D des 8 silos sous
 Graitec Advance Design 2016

Validation de la fiabilité
 du modèle

- > 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

Vérification des jupes

BA

$$A_{s,calculées} < A_{s,réel}$$

Vérification des ceintures

BP

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

$$\sigma_{traction,adm} = 0 \text{ MPa en classe XS}$$

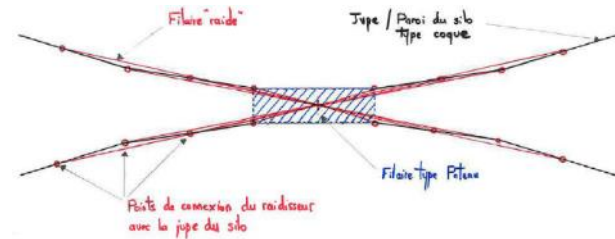
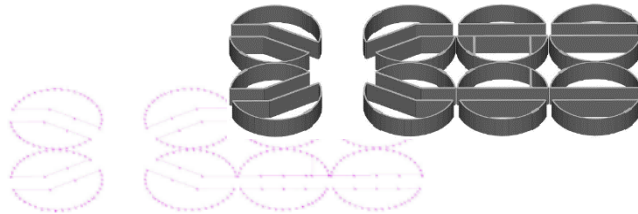
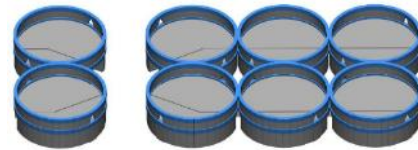
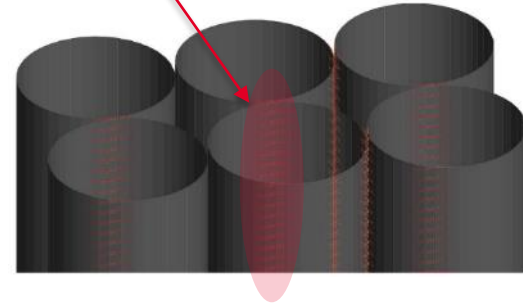
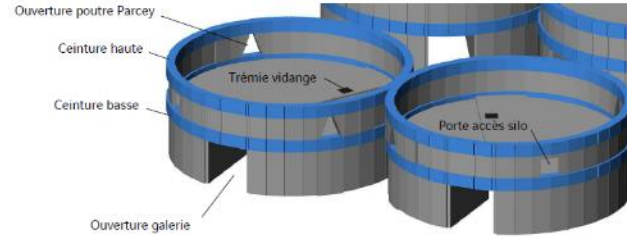
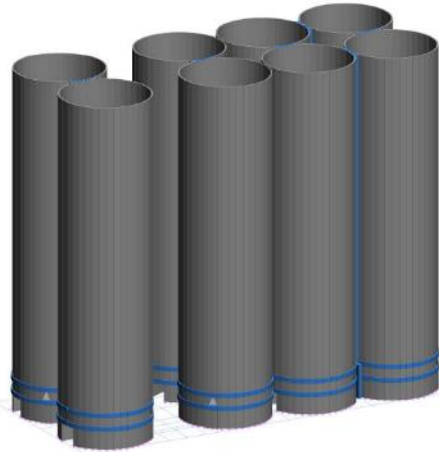
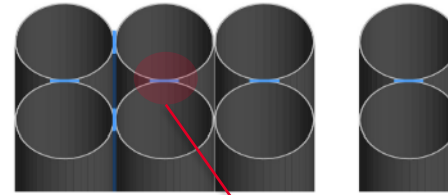
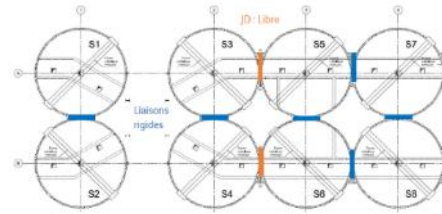
en zone d'enrobage

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



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

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

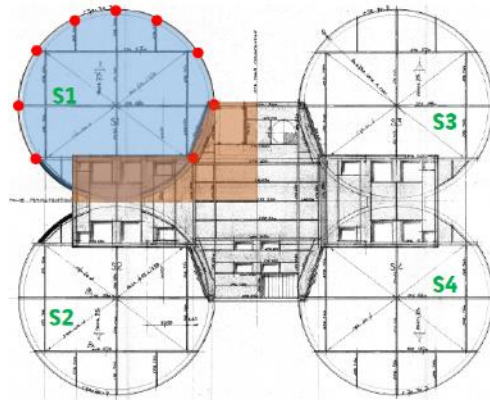
Chargements considérés

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

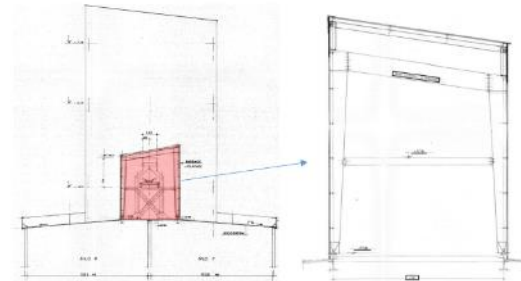
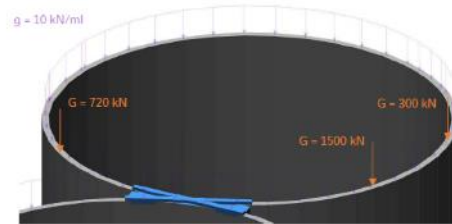
- I. Introduction
 II. Evaluation de l'état
III. Evaluation structurale
 IV. Conclusions et recommandations

Chargements considérés

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



- Points d'appuis des structures en tête de silo
- Surface de plancher de la tour de manutention reposant en tête de silo
- Surface de couverture de silo



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

Chargements considérés

Poids propre

Poids des équipements

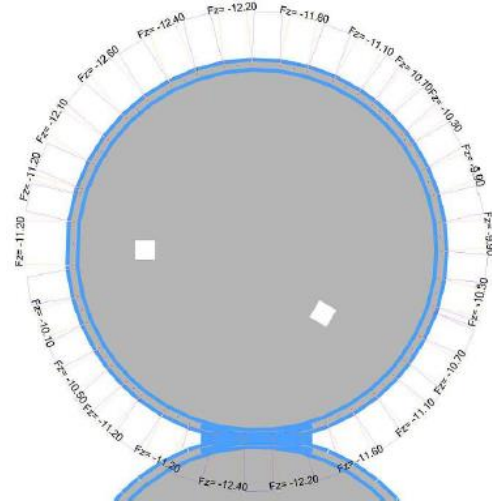
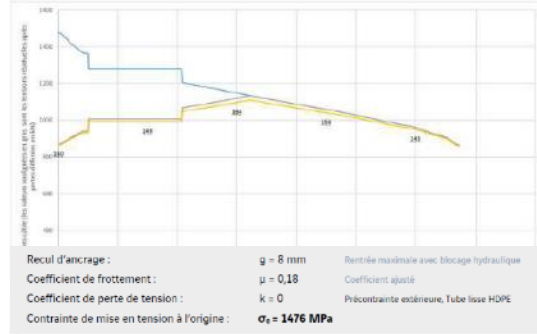
Précontrainte

Actions des matériaux enfilés

Actions de la température

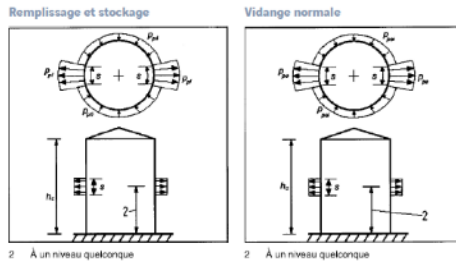
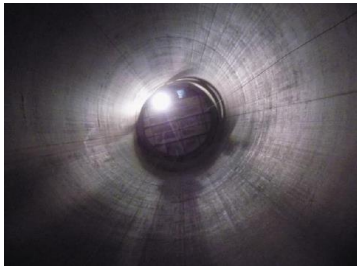
Charges de vent

Actions des poutres Parcey

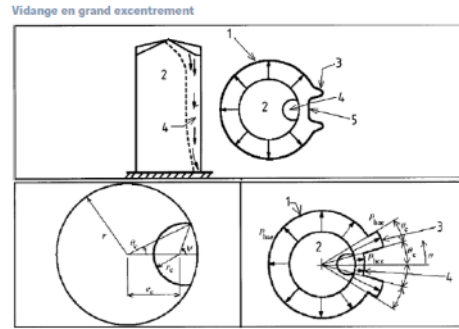


Chargements considérés

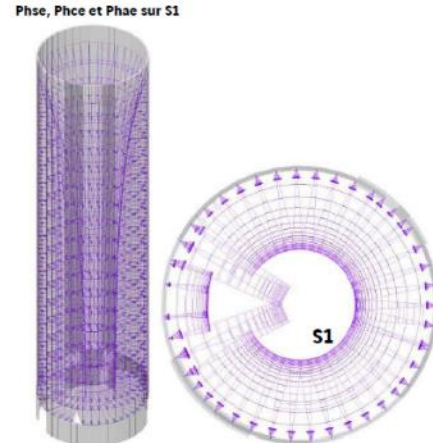
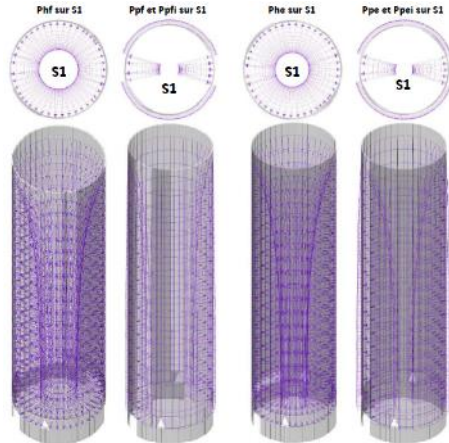
- Poids propre
- Poids des équipements
- Précontrainte
- Actions des matériaux enfilés
- Actions de la température
- Charges de vent
- Actions des poutres Parcey



Situation	Charges	NF EN1991-4	
Remplissage Stockage	$p_{r1}(z)$	Contrainte horizontale symétrique	§5.2.1
	$p_{r2}(z)$	Contrainte due à la charge de correction locale	
	$p_{r3}(z)$	Contrainte due à la charge de correction locale complémentaire opposée	
	$p_{r4}(z)$	Contrainte de frottement sur la paroi verticale	
Vidange Normale	$p_{t1}(z)$	Contrainte horizontale symétrique	§5.2.2
	$p_{t2}(z)$	Contrainte due à la charge de correction locale	
	$p_{t3}(z)$	Contrainte due à la charge de correction locale complémentaire opposée	
	$p_{t4}(z)$	Contrainte de frottement sur la paroi verticale	



Situation	Charges	NF EN1991-4	
Vidange Grand excentrement	$p_{t1}(z)$	Contrainte horizontale au niveau du canal d'écoulement en tuyau situé au-dessus de l'orifice	§5.2.4
	$p_{t2}(z)$	Contrainte complémentaire opposée	
	$p_{t3}(z)$	Contraintes de frottement sur la paroi verticale associées à chaque zone distinguée : canal d'écoulement en tuyau, complémentaire	
	$p_{t4}(z)$		

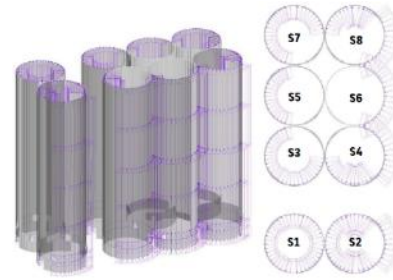
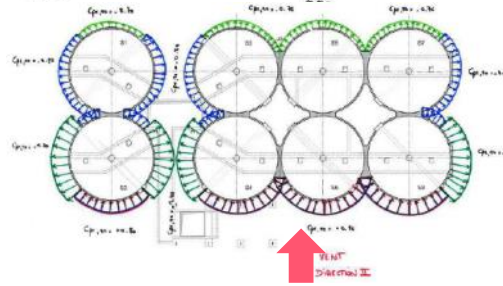


- I. Introduction
 II. Evaluation de l'état
III. Evaluation structurale
 IV. Conclusions et recommandations

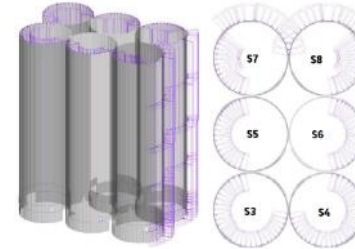
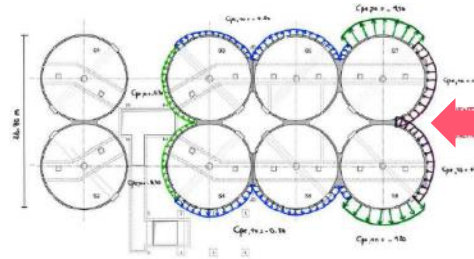
Chargements considérés

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

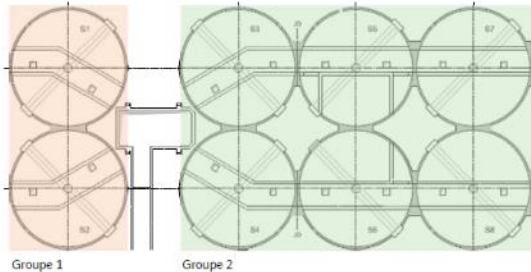
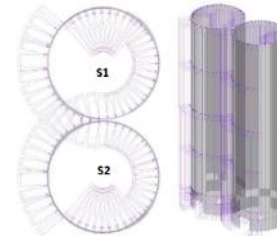
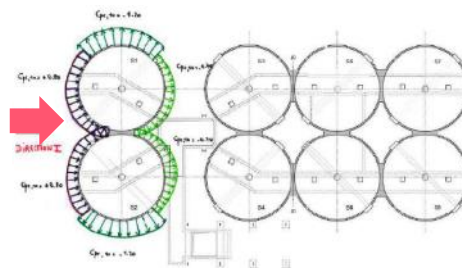
Vent de Direction II soufflant sur S2, S4, S6 et S8



Vent de Direction I soufflant sur S7 et S8



Vent de Direction I soufflant sur S1 et S2



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

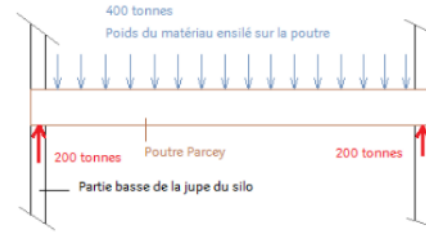
Chargements considérés

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



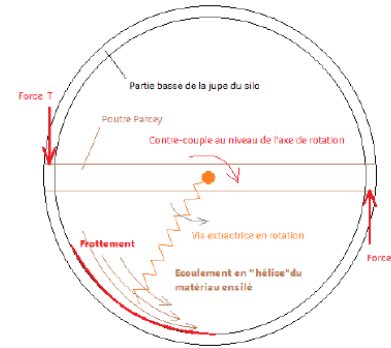
Charges verticales

au niveau des appuis
 (descente de charges)



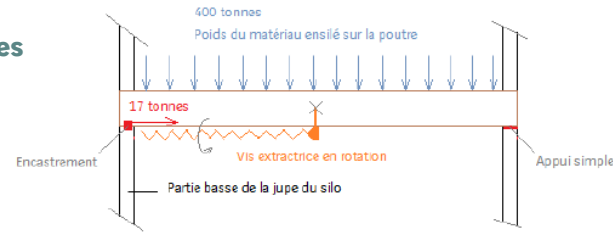
Charges radiales et tangentielles

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



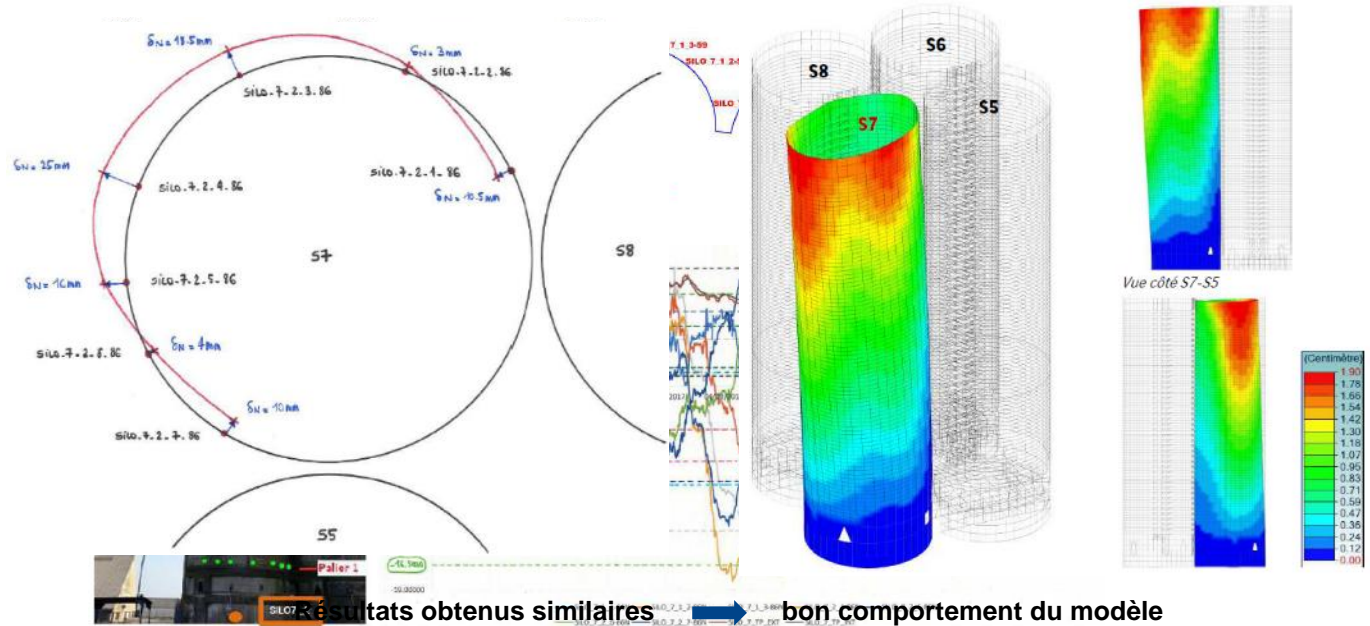
Charges tangentielles

aux appuis des poutres



Données prises pour test : Déplacement du silo S7

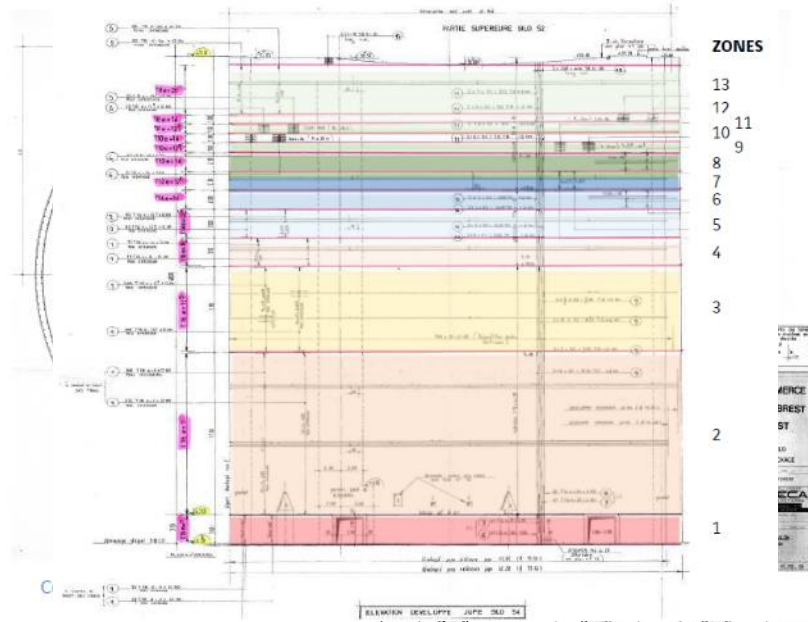
Test : comparaison déplacements calculés / mesurés sur journée test remplissage et vidange de S7



- 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	Zbas	Zhaut	Diamètre	Espacement [cm]	Sections [cm ² /m]
	1	+0.00	+3.00	T16 x2	11	36.56
	2	+3.00	+20.00	T16 x2	11	36.56
Détail	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
Détail	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 ferrillage d'origine
Validés par investigations réalisées

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

Vérification de la structure

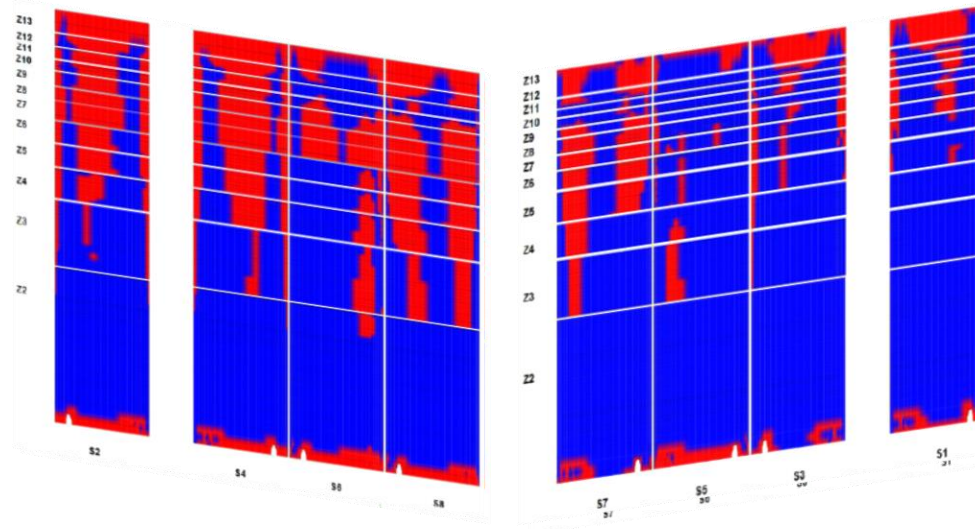
Jupes de silos en BA

Ceintures de renforcement
haute et basse en BP

Dalles de couverture des
galeries en BA

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

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



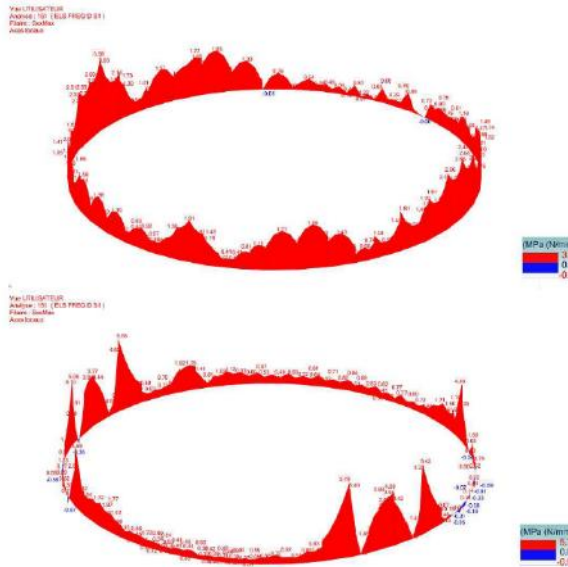
- I. Introduction
 II. Evaluation de l'état
III. Evaluation structurale
 IV. Conclusions et recommandations

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

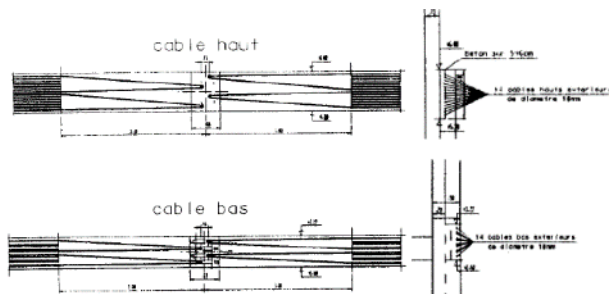
Justifiées

ELS

Non justifiées aux ELS C, FREQ et QP

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

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 $Wk=0.1\text{mm}$

Reste inférieure à la limite $Wk_{\text{max}}=0.2\text{mm}$

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

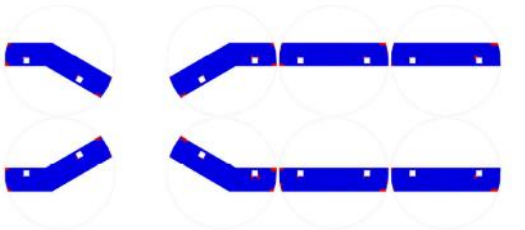
Vérification de la structure

Jupes de silos en BA

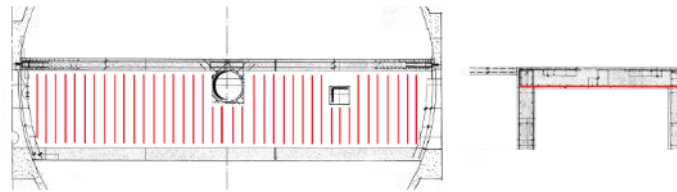
Ceintures de renforcement
 haute et basse en BP

Dalles de couverture des
 galeries en BA

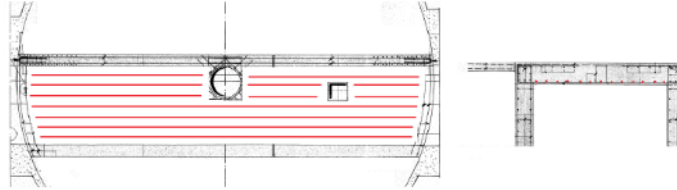
Vue de DREBES
 Année
 De l'ouvrage : (Maison, Ann.) (Niveau (s))



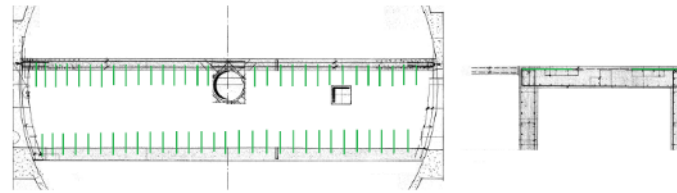
Centimètre / m
 15.39
 6.01



> 2. Le ferrailage transversal (inférieur)



> 3. Le ferrailage aux encastrement (supérieur)



Zone	Diamètre	Espacement [cm]	Sections [cm ² /m]
1. Ferrailage longitudinal inférieur Tous les silos	T14	10	15.39
2. Ferrailage transversal inférieur S1 à S4 S5 à S8	T12	18	6.28
	T10	20	3.98
3. Ferrailage supérieur encastrement Tous les silos	T14	10	15.39

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

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

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 Insuffisances persistent en partie supérieure
Ceintures de renforcement haute et basse en BP	Justifiées	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
Dalles de couverture des galeries en BA	Justifiées	Justifiées

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

Conclusions et recommandations

En vue de pérenniser les 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

- 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 CO₂)

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 CO₂)

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 réglementation 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 Surtensions et ouverture de fissures maîtrisées

Merci pour votre attention

M. PAPIN – N. SANCHEZ

