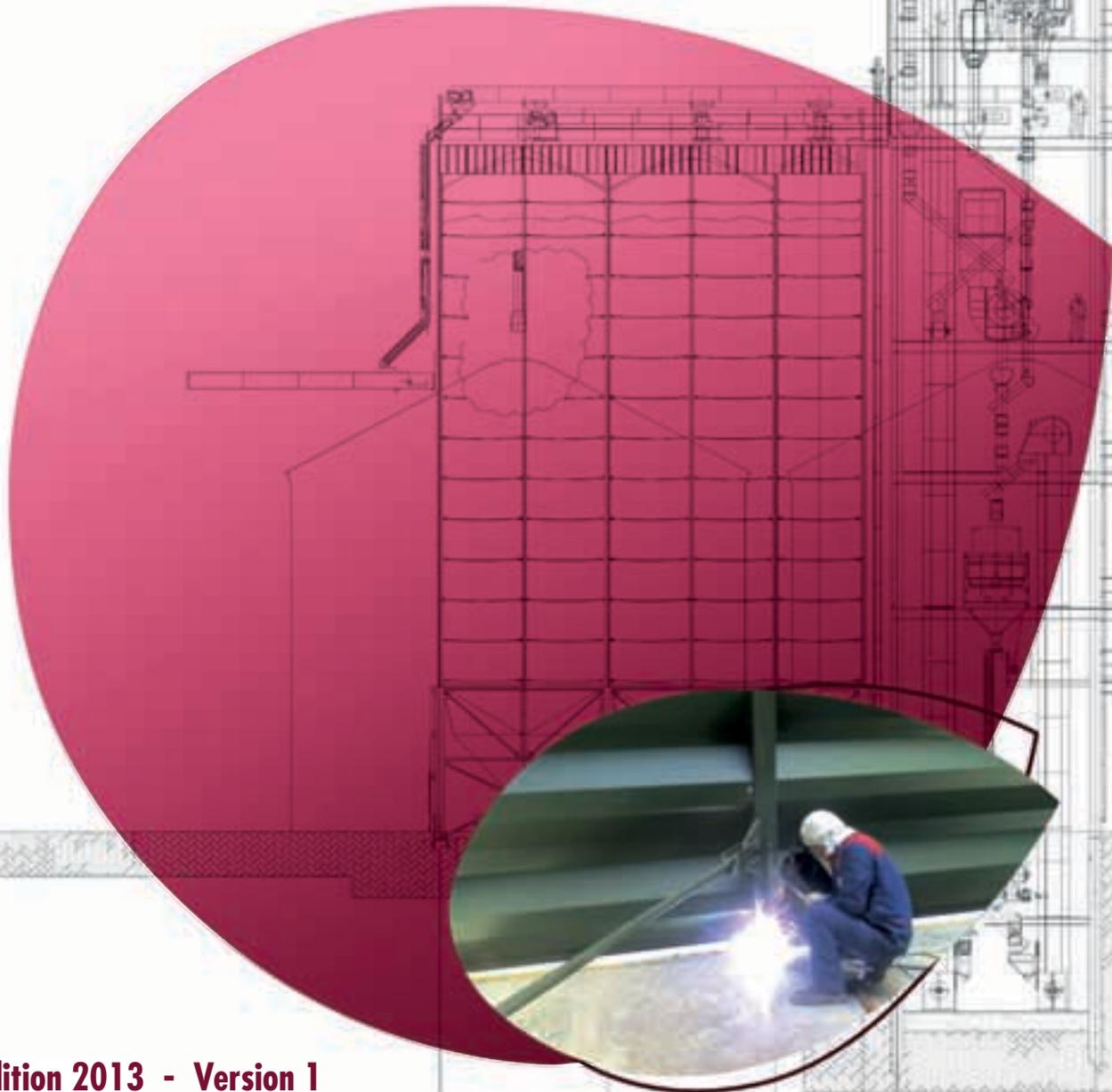


Guide

Guide Technique - Silo

Inspection et Maintenance

des installations de stockage de céréales





Ce guide a été élaboré dans le cadre d'un groupe de travail constitué de :

Pour Coop de France « Métiers du Grain » : Laurent Dupont

Pour les organismes stockeurs : Arnaud Barrois (Cap Seine), Olivier Chatriot (Axereal), Jérôme Coubertergue (InVivo), José Martins (Terre d'alliances), Raphaël Simon (Lorca); Pascal Vannier (Agrial), Lilian Dussuelle (Noriap), Alain Blaise (Vivescia) et Jean-Luc Rault (Corea Poitou-Charentes)

Pour l'ANMF : Flavie Souply et François Florin

Pour la Fédération du Négoce Agricole (FNA) : Fabien Vallaud et Olivier Erler

Pour SYNACOMEX : Valérie Chanal et David Fleurquin

Pour SNIA : Stéphane Radet et Morgan Balin

Pour GROUPAMA : François Poichotte

Pour INERIS : Mathieu Reimeringer et Gaetan Prod'homme

Pour CERES Solutions : Christophe Vaye

Pour A & B. Conseil : Jacques Garcin

Pour Services Coop de France : Aurélien Deydier et Sébastien Richomme

La rédaction a été assurée par Services Coop de France



Le Sommaire

I	Préambule	5
II	Installations concernées	7
III	Contexte réglementaire	9
IV	Retours d'expérience	11
V	Notions de mécanique	13
V.1	Unités	13
V.2	Principes globaux	14
V.2.1	Caractéristiques de la pression exercée par le grain.....	14
V.2.2	Les surcharges.....	16
V.2.3	Principe des fondations.....	17
V.3	Ordre de grandeur de chargement des structures	18
V.4	Mécanismes locaux	19
V.4.1	Compression, traction, flexion, cisaillement.....	19
V.4.2	Propriétés et comportement des matériaux.....	20
V.5	Règles de dimensionnement	23
V.5.1	Historique.....	23
V.5.2	Notions de dimensionnement.....	23
VI	Causes des défaillances	27
VI.1	Conception et réalisation	27
VI.1.1	Défaut de conception (épaisseur des parois, quantité d'armature, ...).....	27
VI.1.2	Défauts de réalisation.....	27
VI.2	Modifications des installations	28
VI.2.1	Augmentation des contraintes.....	28
VI.2.2	Affaiblissement de la structure.....	28
VI.3	Usage (vieillissement)	28
VI.3.1	Environnement.....	28
VI.3.2	Dégradation.....	28
VI.3.3	Incident, accident.....	29
VI.4	Ordre de grandeur de l'impact des modifications	30
VI.5	Synthèse	32
VII	Suivi des installations – Plan d'Inspection	35
VII.1	Visites	35
VII.1.1	Visite de niveau 1.....	35
VII.1.2	Visite de niveau 2.....	36
VII.1.3	Visite de niveau 3.....	36
VII.2	Dossier de suivi	37
VII.3	Hiérarchisation	37
VIII	Présentation des méthodes de contrôle	39
VIII.1	Stabilité globale	39
VIII.1.1	Nature du sols.....	39
VIII.1.2	Défauts de verticalité des structures.....	39
VIII.1.3	Les réseaux d'eaux.....	40
VIII.1.4	Comportement global.....	40



VIII.2	Les méthodes sur prélèvements	40
VIII.2.1	Structure en béton armé	40
VIII.2.2	Structure métallique	41
VIII.3	Les méthodes in situ	41
VIII.3.1	Structure en béton armé	41
VIII.3.2	Structure métallique	44
VIII.4	Suivi de l'installation	45
VIII.5	Synthèse.....	46
IX	Travaux et traitements.....	51
IX.1	Béton Armé	51
IX.1.1	Renforcement structurel.....	51
IX.1.2	Restauration du béton et traitements de surfaces	53
IX.2	Structures en acier	56
IX.2.1	Remplacement d'éléments endommagés (rivets, tirants...)	56
IX.2.2	Renforcement structurel.....	57
IX.2.3	Modifications structurelles : Eviter les zones de concentration de contraintes, améliorer le comportement à la fatigue.	57
IX.2.4	Protection anticorrosion : revêtements, modifications structurelles	58
IX.2.5	Cas particulier des soudures.....	58
X	Personnel en charge des inspections	61
XI	Glossaire	63
XII	Annexes.....	65
	Recueil de l'accidentologie.....	65
	Catalogue de désordres.....	69
	Visite de niveau 1	83

I - Préambule

Les installations de stockage de céréales en vrac présentent des risques d'effondrement liés à des problématiques de vieillissement des structures. L'accidentologie recense 1 à 2 accidents par an avec comme conséquences l'épandage de produits et des effets dominos éventuels.

Face à ces risques, les exploitants se sont lancés dans des démarches visant à auditer leurs installations impliquant des programmes d'investissement conséquents. Dans leurs démarches, ils ont pu rencontrer des difficultés d'identification de méthodologies ou de prestataires qualifiés pour ces installations.

Dans ce contexte, dès l'année 2008, un groupe de travail animé par Coop de France – Métiers du grain auquel ont participé des exploitants et différents experts a proposé une méthode d'audit des installations de stockage agro-alimentaire.

En parallèle à ces travaux professionnels, l'Administration a renforcé ses exigences sur ce thème et les actions à entreprendre par les exploitants sur les sites soumis à autorisation. Elles sont explicitées dans le guide état de l'art sur les silos¹ qui indique quant à la problématique du suivi des installations : *« En terme de prévention, une surveillance a minima visuelle des structures des silos (quel que soit le type : vertical, plat, en béton, métallique...) est à préconiser, à une fréquence adaptée à l'âge et à la configuration des silos. Un enregistrement de ces opérations de contrôle doit être réalisé par l'exploitant.*

Une attention particulière doit être portée aux silos verticaux : une surveillance a minima visuelle à une fréquence adaptée (annuelle dans le cas des silos les plus anciens) est nécessaire. Il peut également être possible, selon l'âge des silos, leur configuration, leur structure, ou selon leur environnement proche, etc., de réaliser à une fréquence inférieure (de quelques années à 10 ans) des contrôles techniques plus poussés (pachométrie pour obtenir la position des armatures du béton...). En cas de doute (détection de fissures), ces examens de structure sont nécessaires. ».

1. Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, 2008

2. Guide de conception des silos, Coop de France métiers du grain, 2012.

Il s'avère donc nécessaire de développer les outils et la méthodologie pour faire face aux risques présentés par le vieillissement des capacités de stockage en s'inspirant des travaux menés par des organisations professionnelles d'autres secteurs industriels dans le cadre du plan de modernisation lancé le 13 janvier 2010 par le Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de la Mer. Ce plan vise à identifier les équipements les plus sensibles du point de vue du risque technologique et du risque environnemental et à mettre en œuvre un suivi périodique adapté aux différents types d'équipements dans leurs conditions d'exploitation.

Les professionnels ont donc décidé de rédiger un guide méthodologique sur l'inspection et la maintenance des installations de stockage de céréales ou produits organiques en vrac afin de maîtriser les phénomènes mis en jeu et d'analyser les modes de dégradation des installations tout en proposant des solutions de traitement adaptées.

Ce guide s'inscrit dans une démarche interprofessionnelle menée par les organisations représentantes des organismes stockeurs, de la meunerie et de la nutrition animale qui vise à améliorer la sécurité des installations et à accompagner leurs adhérents face aux évolutions techniques et réglementaires.

Le groupe de travail est complété par Groupama, INERIS, CERES Solution et A B Conseil.

La démarche retenue dans ce guide est plus complète que la simple prise en compte des risques industriels ou environnementaux. Elle propose des outils de diagnostic pour prolonger la vie de l'installation, voire des « bonnes pratiques » de construction, en complément du « Guide de conception des silos »².

Ce guide présente, dans un premier temps, les notions de base de mécanique afin de, dans un deuxième temps, clarifier les principales causes de défaillances rencontrées sur les installations de stockage de céréales. Un plan de suivi et d'inspection est ensuite proposé pour faciliter l'identification de ces causes de défaillances. Enfin, des méthodes de contrôle et de traitements des désordres sont détaillées.



II - INSTALLATIONS CONCERNEES

La démarche initiée dans le plan de modernisation des installations s'attachait à retenir dans son périmètre d'étude les installations pouvant induire pour cause de vieillissement des risques sur son environnement.

Les installations visées par la démarche sont les suivantes :

- ▶ Stockage :
 - * Capacités de stockage de grain, farine, produits nutrition animale ;
 - * Parois de stockage mobiles ;
 - * Case d'engrais ;
 - * Cuve métallique ;
 - * Cuve en polyester.
- ▶ Cuvettes de rétention (stockage d'engrais liquide, produits phytosanitaires, eaux d'extinction, ...) ;
- ▶ Autres installations : Usine d'aliments, moulin, tour de manutention, fosse de réception, galerie de manutention ;
- ▶ Accessoires « importants pour la sécurité des personnes » :
 - * Passerelle ;
 - * Garde-corps ;
 - * Escalier ;
 - * Echelle, ...



III - CONTEXTE REGLEMENTAIRE

La section I de l'arrêté du 4 octobre 2010 applicable aux sites soumis à autorisation au sens du code de l'environnement est dévolue aux « Dispositions relatives à la prévention des risques liés au vieillissement de certains équipements ».

Néanmoins, les installations étudiées dans le présent guide sont peu concernées par ces dispositions. Seules les prescriptions afférentes à l'instrumentation de sécurité (article 7 de l'Arrêté du 04/10/10) peuvent, le cas échéant, s'appliquer à certains sites.



POUR ALLER PLUS LOIN

La liste des installations concernées se trouve dans la section I de l'Arrêté du 04/10/10 relatif à la prévention des risques accidentels au sein des installations classées pour la protection de l'environnement soumises à autorisation.

<http://www.ineris.fr/aida/>

Dans le guide état de l'art sur les silos, il est rappelé que les structures doivent faire l'objet d'une surveillance tenant compte de leurs caractéristiques.



POUR ALLER PLUS LOIN

Guide état de l'art silos version 3

<http://www.installationsclassées.developpement-durable.gouv.fr/Guide-de-l-Etat-de-l-Art-sur-les.html>

Enfin dans de nombreux arrêtés préfectoraux, l'Administration précise que le site doit faire l'objet d'« un plan de suivi du vieillissement des installations ».

Ce guide vise notamment à harmoniser les plans de suivi mis en place par les exploitants. Il leur permettra de pouvoir bénéficier d'une méthode commune et d'informations essentielles pour l'inspection et la maintenance de leurs installations.



IV - RETOURS D'EXPERIENCE

Le BARPI a réalisé, en 2004, une synthèse intitulée « Fissuration et effondrement de silos »³. Cette étude conclut que les conséquences de ces effondrements sont limitées à des dégâts matériels par la chute d'éléments de structure et au déversement de grains. Elle conclut également que la possibilité d'aggravation du risque d'explosion n'est pas négligeable par la mise en suspension d'un volume important de poussières et par endommagement ou destruction de matériels électriques ou d'équipements de sécurité.

Il apparait que les causes de ces ruptures de structures sont nombreuses et peuvent, dans certains cas, être cumulatives : défaut de conception (sous dimensionnement, ...), défaut de construction (mauvais ferrailage, ...), modifications et travaux sans étude suffisante, corrosion et vieillissement des matériaux.



POUR ALLER PLUS LOIN

<http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/Fissuration-et-effondrement-de-silos--2499.html>
Etude du BARPI

Dans le cadre de la réalisation du présent guide, le BARPI a établi un rapport intitulé « Effondrement ou rupture de cellules ou silos de grains (hors explosion) » (Base de données ARIA - Etat au 19/06/2012 -n° de requête : ed_12207) recensant ce type d'accident depuis 1988.

Sur la base de ce document, un tableau exhaustif et synthétique a été réalisé et est joint en annexe.

Cette étude de l'accidentologie, réalisée au moyen des données fournies par le BARPI, permet de tirer plusieurs enseignements.

Le nombre d'incidents est de 8 sur les structures en béton (exemples en figure 1) et de 9 sur les structures métalliques (exemple en figure 2).



Figure 1 :
Ouverture d'une cellule béton et d'un silo plat en béton

3. http://www.aria.developpement-durable.gouv.fr/ressources/liste_silo1.pdf



Figure 2 : Ouverture d'une cellule métallique

Ensuite, en cas d'ouverture partielle ou totale d'une cellule, l'épandage du grain reste circonscrit à l'environnement proche de l'installation (cf. Figure 3). Ainsi, sur la majorité des sinistres, les conséquences sont limitées à la perte d'exploitation de la cellule et aux réparations.

Il est à noter qu'au vu du retour d'expérience aucune victime n'est à dénombrer.



Figure 3 : Epandage de grains suite à l'ouverture partielle d'une cellule

Dans certaines configurations de l'environnement du site, le grain a pu impacter des voies de circulation (une route, une voie ferrée) ou des installations connexes telles qu'une cuve de fioul, une canalisation de GPL (cf. Figure 4).

L'accident de la Figure 1 a conduit à une pollution due à la rupture de la cuve de fuel. Sur la Figure 4, la cuve GPL a subi une fuite mais celle-ci ne s'est pas enflammée.



Figure 4 : Epandage de grains suite à l'ouverture totale d'un silo palplanche ayant impacté une canalisation GPL

Les principales causes relevées dans l'étude de l'accidentologie sont :

- * une défaillance de la portance au sol ;
- * des malfaçons : manque d'armatures dans le béton armé, sous dimensionnement ;
- * une modification : ouverture d'une vidange latérale ;
- * la corrosion du ferrailage du béton armé.

Ces éléments seront intégrés dans la démarche de suivi des installations exposée dans le présent guide.

V - NOTIONS DE MECANIQUE

Afin de faciliter la présentation des causes de défaillances présentées au chapitre suivant, quelques notions de base de mécanique sont rappelées ci-après.

V.1 UNITES

Les unités données dans le tableau suivant sont susceptibles d'être utilisées dans ce guide ou par des bureaux d'études spécialisés.

Grandeur	Unité du système international	Unité supplémentaire et combinaison d'unités	Relation entre les unités
Force	Newton (N) $1 \text{ N} = 1 \text{ kg.m.s}^{-2}$	Kiloforce (kgf)	$1 \text{ kgf} = 9.807 \text{ N}$
		Bar (bar)	$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$
Pression	Pascal (Pa)	Newton/mètre carré (N/m ²)	$1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$ $1 \text{ N/mm}^2 = 1 \text{ MPa} = 0.102 \text{ kg/mm}^2$
		Kilogramme/centimètre carré (kg/cm ²)	$1 \text{ kg/cm}^2 = 9.807 \cdot 10^4 \text{ Pa} = 0.9807 \text{ bar}$ $100 \text{ T/m}^2 \approx 10 \text{ mbar}$
		Torr (torr)	$1 \text{ torr} = 1.33 \cdot 10^2 \text{ Pa} = 1.33 \cdot 10^{-3} \text{ bar}$
Energie	Joule (J) $1 \text{ J} = 1 \text{ N.m} = 1 \text{ W.s}$	Kilowattheure (kWh)	$1 \text{ kWh} = 3.6 \text{ MJ}$
		Kilocalorie (kcal)	$1 \text{ kcal} = 4.19 \cdot 10^3 \text{ J} = 1.16 \cdot 10^{-3} \text{ kWh}$
Puissance	Watt (W)	Joule/seconde (J.s ⁻¹)	$1 \text{ J.s}^{-1} = 1 \text{ W} = 1 \text{ N.m.s}^{-1}$
		Kilocalorie/heure (kcal/h)	$1 \text{ kcal/h} = 1.16 \text{ W}$

Tableau 1 : Unités

Les multiples et sous-multiples d'une unité peuvent être formés au moyen des préfixes ou des symboles suivants.

	Facteur		Préfixe	Symbole
1 000 000 000	10 ⁹	milliard	giga	G
1 000 000	10 ⁶	million	méga	M
1 000	10 ³	millier	kilo	k
100	10 ²	centaine	hecto	h
10	10 ¹	dizaine	déca	da
0.1	10 ⁻¹	dixième	déci	d
0.01	10 ⁻²	centième	centi	c
0.001	10 ⁻³	millième	milli	m

Tableau 2 : Multiples et sous-multiples



V.2 PRINCIPES GLOBAUX

Les parois des cellules sont soumises à des sollicitations lors des phases de remplissage, de stockage et de vidange. Le grain stocké dans une capacité de stockage exerce une contrainte mécanique sur les parois de celle-ci (cf. Figure 5) :

- ▶ **en stock**, la colonne de grain, sous l'effet de la gravité, exerce une pression sur les parois correspondant à son propre poids ; la contrainte est donc plus importante en bas de cellule qu'en haut ;
- ▶ **lors de l'ensilage**, le grain chute et peut impacter les parois de la capacité de stockage, transférant son énergie cinétique à celles-ci ;
- ▶ **lors de la vidange de la cellule**, le mouvement du grain exerce une contrainte liée aux frottements et à l'énergie cinétique développée.

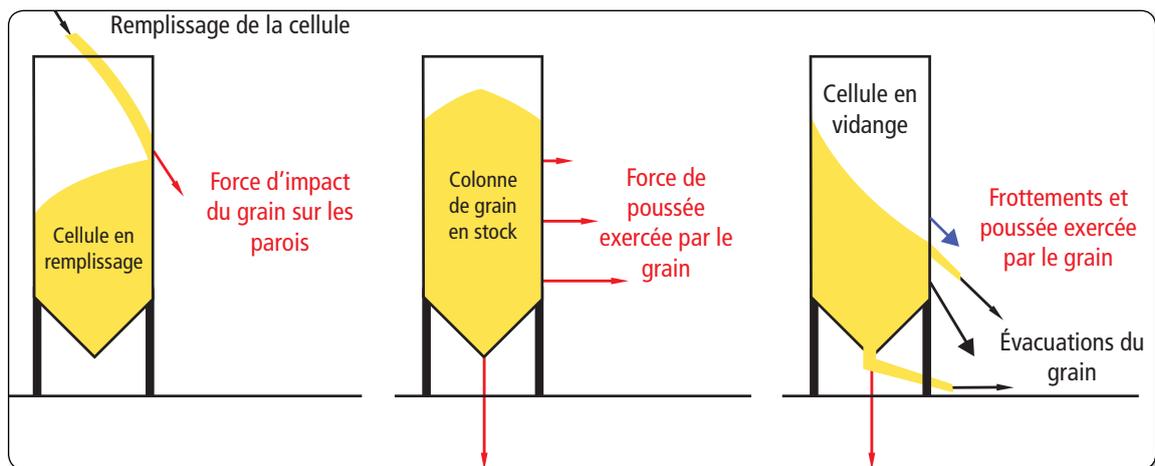


Figure 5 : Contraintes exercées par le grain sur une cellule lors des phases de remplissage, de stockage et de vidange.

Il est possible d'observer des pressions supplémentaires, en particulier pour les produits sujets à la formation de voutes (farine, blé humide, ...), dues à la rupture soudaine de ces voutes.

V.2.1 CARACTERISTIQUES DE LA PRESSION EXERCÉE PAR LE GRAIN

L'ensilage et la vidange d'une cellule de produits solides pulvérulents sont des phénomènes physiques particuliers qui doivent être intégrés à la fois pour le dimensionnement des ouvrages et pour leur exploitation.

V.2.1.1 Pression des grains au repos

Contrairement aux liquides exerçant sur les parois des pressions hydrostatiques horizontales, la matière pulvérulente, et notamment les grains, exercent une poussée oblique par rapport à la paroi du fait des frottements de la matière sur celle-ci.

Cette pression peut être décomposée en :

- ▶ une pression normale (ou «poussée latérale»), correspondant à l'effet exercé par la masse de la colonne de grain,
- ▶ une pression tangentielle ou pression verticale supportée par les parois sous l'effet de la friction.

Les parois d'une capacité de stockage (métallique ou béton) doivent pouvoir résister à ces deux types de pression. Sur la figure suivante, est présentée schématiquement l'action du grain sur les parois et sur le fond en fonction de la hauteur de stockage.

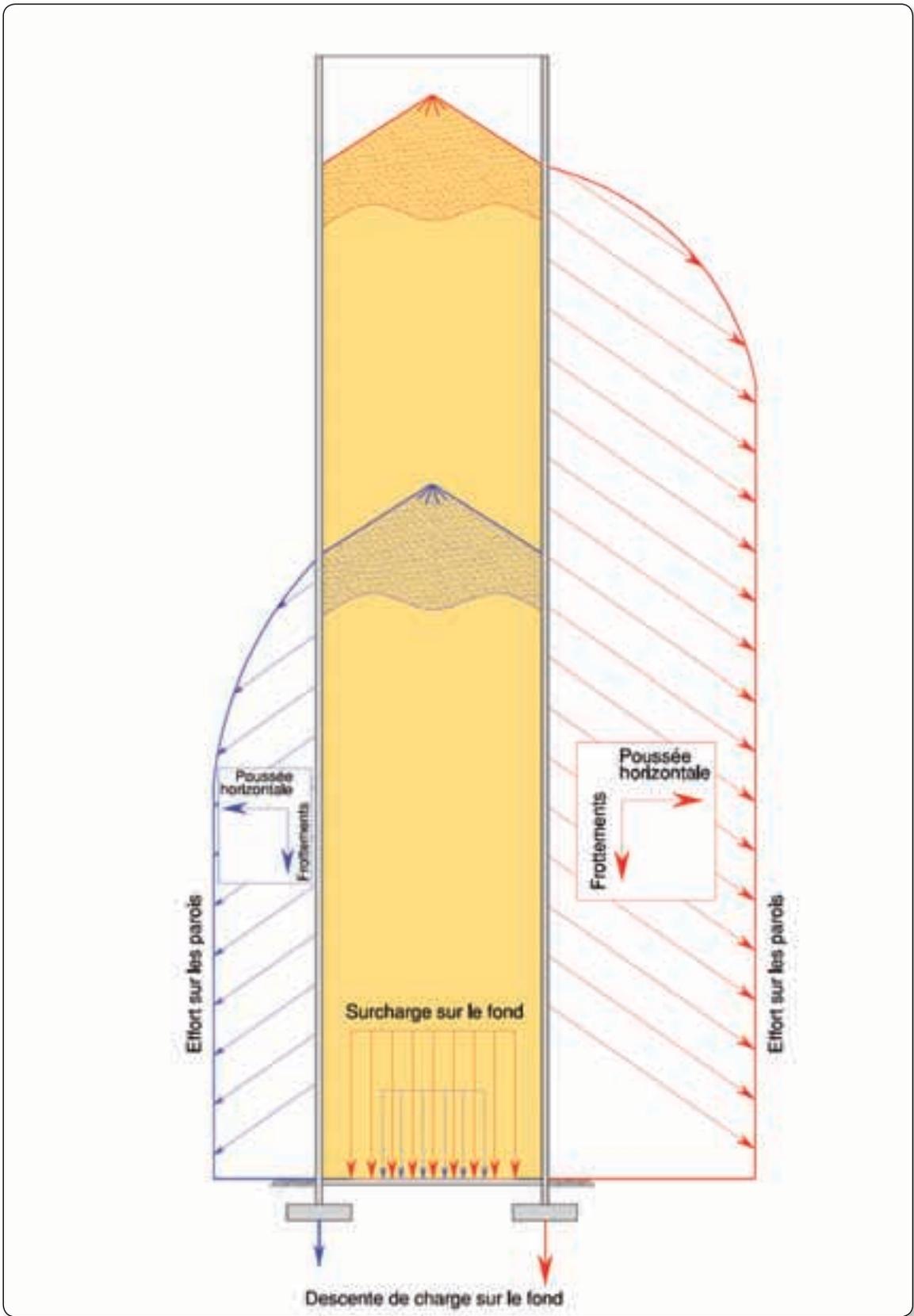


Figure 6 : Charges imposées à la paroi dans une cellule de grains



Comme cela est présenté sur la figure précédente, le poids du grain contenu dans le silo est intégralement transféré aux fondations. La proportion qui est transférée au sol par les parois est plus grande dans un silo haut et étroit que dans une structure courte et large. Les silos plats sont donc moins soumis aux efforts de frottement.

L'importance des pressions exercées par frottement est telle qu'elles tendent vers une limite à mesure que la profondeur augmente.

La courbe de poussée (horizontale ou verticale) n'est plus une droite mais une parabole (cf. Figure 7).

Ces pressions verticales et horizontales sont liées aux paramètres suivants :

- ▶ le poids spécifique de la matière ;
- ▶ le frottement (des grains entre eux et sur la paroi) ;
- ▶ la hauteur de la masse de grains ;
- ▶ les dimensions de la cellule (diamètre pour cellule circulaire).

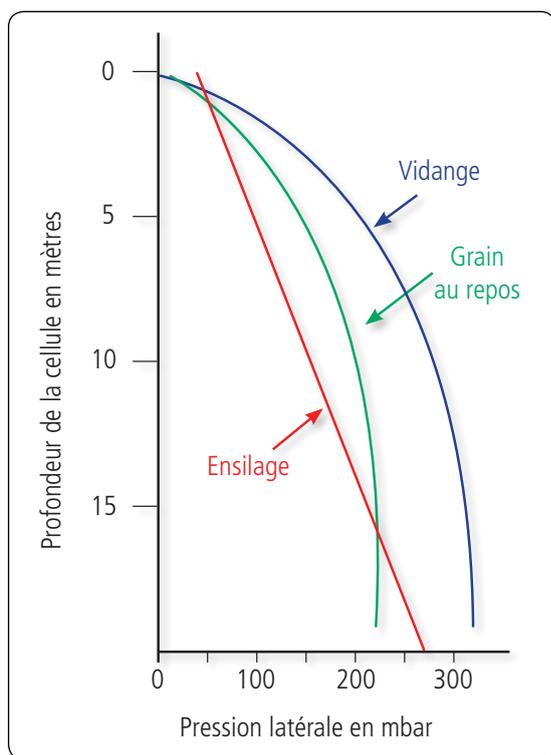


Figure 7 : Pression latérale exercée sur la paroi d'un silo de 16 pieds (5,3 m environ) de diamètre au cours de l'ensilage, durant la vidange et au repos avec du grain aux normes commerciales

(source : Ministère de l'agriculture de l'alimentation et des affaires rurales de l'Ontario, Fiche technique «Conversion des silos-tours béton pour le stockage de grain sec», décembre 1996)

V.2.1.2 Pression à l'ensilage

A l'ensilage, les frottements des grains sur la paroi créent également une surcharge verticale. (cf. Figure 7)

V.2.1.3 Pression à la vidange

La vidange gravitaire des cellules provoque la mise en mouvement de l'ensemble de la masse et rompt l'équilibre de celle-ci. Ainsi la pression horizontale créée durant la vidange est généralement supérieure à celle observée durant le remplissage et lorsque le grain est au repos (cf. Figure 7).

Si la vidange se fait par le côté, il se crée une pente à la surface du grain et il en résulte un déséquilibre des pressions exercées sur les parois. Or, toute structure de stockage cylindrique est conçue de manière à ce qu'une pression assez uniforme soit exercée sur toute sa périphérie. Les effets des efforts générés par vidange excentrée en fond de cellule métallique, type «tôles ondulées assemblées», ont pu être à l'origine de renversement de cellules.

Pour les silos à vidange centrale, il n'est pas recommandé de pratiquer un piquage sur la paroi latérale pour aménager une aire de vidange aérienne. Il pourrait être à l'origine de contraintes importantes complémentaires sur la jupe.

V.2.1.4 Vidange et remplissage simultanés

Une vidange et un remplissage simultanés accentuent encore les efforts sur les parois.

V.2.2 LES SURCHARGES

Les surcharges peuvent être dues à la nature du produit stocké, à la poussée d'air par ventilation, au tassement du grain lors de la ventilation et, bien entendu, à la conjugaison de ces éléments.

V.2.2.1 Surcharges dues à la nature du produit stocké

90 % des silos des organismes stockeurs ont été conçus pour stocker du **blé** avec une densité de **0,75** alors que, pour **les pois**, elle est de **0,85 à 0,90**, soit une densité de 12 à 20 % supérieure. Par la surface de contact entre les grains, l'angle de frottement peut être différent. Les pois agissent comme des billes avec un faible frottement alors que la forme oblongue des céréales à paille amoindrit l'effort de poussée sur les voiles (jupes).

Le tableau suivant donne quelques valeurs de densité.

Produit	Densité
Blé	0.75 – 0.78
Farine de blé	0.5
Orge	0.65 – 0.7
Maïs	0.72 – 0.76
Lin	0.7
Avoine	0.4 – 0.55
Seigle	0.7
Colza	0.6 - 0.7
Tournesol	0.4 – 0.5
Pois	0.8 - 0.9
Fèves	0.8

Tableau 3 : Ordre de grandeur de densité

V.2.2.2 Poussée d'air par ventilation

Nécessaire au refroidissement du grain, la ventilation donne naissance à des contraintes non négligeables sur les voiles ou parois. Pour accélérer les vidanges latérales, il est parfois fait usage de la ventilation, ce qui entraîne souvent le dépassement des contraintes admissibles.

V.2.2.3 Tassement du grain par ventilation

La ventilation a aussi pour effet de «placer le grain», elle le tasse et contribue ainsi à l'augmentation de la densité des produits stockés. **Ce phénomène est très sensible pour les pois, la densité pouvant atteindre 0,95. Pour un silo calculé pour du blé, la densité est alors de 25 % supérieure.** Après ventilation conduisant au tassement de la matière, compléter le remplissage du silo peut conduire à une surcharge.

V.2.3 PRINCIPE DES FONDATIONS

La fondation est l'élément qui assure la transmission et la répartition des charges de l'ouvrage dans le sol. Ces charges viennent du poids propre du bâtiment, des forces climatiques et des autres charges liées à son exploitation.

Les fondations varient selon la qualité du sol sur lequel le bâtiment doit être implanté et selon la nature et la taille du bâtiment. Il est fortement recommandé que ce sol soit de bonne portance et peu sujet au tassement.

Ainsi, l'étude de sol revêt une grande importance car elle analysera la nature et la portance du sol du terrain, ce qui déterminera directement le type et le dimensionnement des fondations.



POUR ALLER PLUS LOIN

NF P94-500 - Décembre 2006 Missions d'ingénierie géotechnique - Classification et spécifications



V.3 ORDRE DE GRANDEUR DE CHARGEMENT DES STRUCTURES

Les tableaux suivants rappellent des ordres de grandeur des charges que doivent reprendre les différents éléments de structures.

Pour les silos palplanches et béton, les ordres de grandeur usuellement rencontrés pour des « petites cellules » et des « grandes cellules » sont présentés dans les deux tableaux suivants.

Silos métalliques palplanches	« Petites » cellules	« Grandes » cellules
Capacité	1.100 Tonnes	3.400 Tonnes
Section au sol	9.00 x 9.00	14.00 x 14.00
Hauteur de stockage en rive	17.00 m	21.00 m
Hauteur maxi au centre	22.00 m	25.00 m
Descentes de charges en pieds de poteaux	35 à 140 T	130 à 520 T
Surcharges sur le fond	6 à 7 T/m ²	9 à 10 T/m ²
Effort dans les tirants courants	30 T	55 T
Effort dans les tirants inférieurs en bas de panneaux	50 T	80 T

Tableau 4 : Ordre de grandeurs des efforts dans un silo palplanche

Silos béton	« Petites » cellules	« Grandes » cellules
Capacité	800 Tonnes	5.000 Tonnes
Section au sol	Ø 6.00 m	Ø 16.00 m
Hauteur de stockage	38.00 m	33.00 m
Hauteur acrotère	40.00 m	40.00 m
Descentes de charges linéaires	65 T/ml	130 T/ml
Effort de traction dans les voiles	11 T/ml	65 T/ml

Tableau 5 : Ordre de grandeurs des efforts dans un silo béton

Dans les tableaux suivants sont exposés les efforts induits dans un silo plat sur les murs de soutènement, en fonction de leur hauteur, et sur le dallage, en fonction de la hauteur de stockage.

Murs de soutènement	Hauteur 4m	Hauteur 6m	Hauteur 8m
Pression normale maxi sur le mur à la base	2.7 T/m ²	4.00 T/m ²	5.4 T/m ²
Effort horizontal de poussée à la base	5.4 T/ml	12 T/ml	21.5 T/ml

Tableau 6 : Ordre de grandeurs des efforts sur un mur de soutènement d'un silo plat

Magasin de stockage	Hauteur de stockage		
	10m	15m	20m
Pression maxi sur le dallage	7.5 T/m ²	11 T/m ²	15 T/m ²

Tableau 7 : Ordre de grandeurs des efforts sur le dallage d'un silo plat

V.4 MECANISMES LOCAUX

Les efforts subis par un élément de structure peuvent être de plusieurs types. Ceux-ci sont présentés au chapitre suivant. Dans l'immense majorité des cas, les éléments de structure subissent une combinaison simultanée ou alternative de ces types d'efforts.

V.4.1 COMPRESSION, TRACTION, FLEXION, CISAILLEMENT

V.4.1.1 Traction compression

La **traction** est une contrainte appliquée pour étirer un objet.

La **compression** est une contrainte appliquée aux deux extrémités d'un objet et qui le comprime.

La traction-compression correspond à des forces s'exerçant perpendiculairement aux sections de ces pièces.

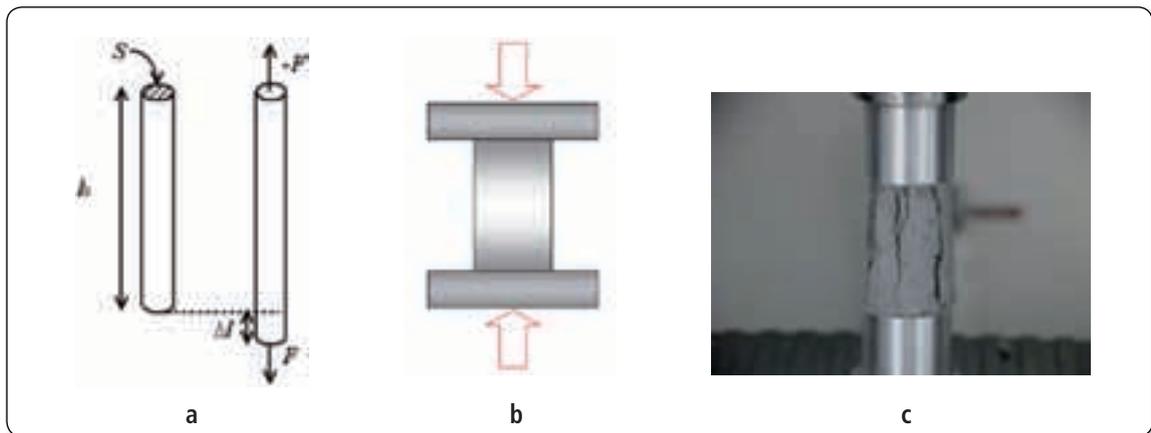


Figure 8 : a) sollicitation en traction - b) sollicitation en compression
c) résultat d'un essai de compression sur un élément de béton

Par exemple, un tirant intérieur maintenant deux parois de cellule travaille en traction alors qu'un poteau soutenant une poutre est soumis à un effort de compression.

V.4.1.2 Flexion

Lors d'une sollicitation de flexion, les fibres supérieures sont comprimées tandis que les fibres inférieures sont tendues. Il existe à mi-hauteur de l'éprouvette une zone sans déformation, c'est l'axe neutre.



Figure 9 : Représentation des efforts lors d'une sollicitation de flexion

Par exemple, la dalle d'un plancher ou une poutre appuyée sur des poteaux est soumise à des efforts de flexion.

V.4.1.3 Cisaillement

Les sollicitations de cisaillement sont appliquées de manière parallèle ou tangentielle à une face d'un élément, par opposition aux sollicitations normales qui sont appliquées de manière perpendiculaire.

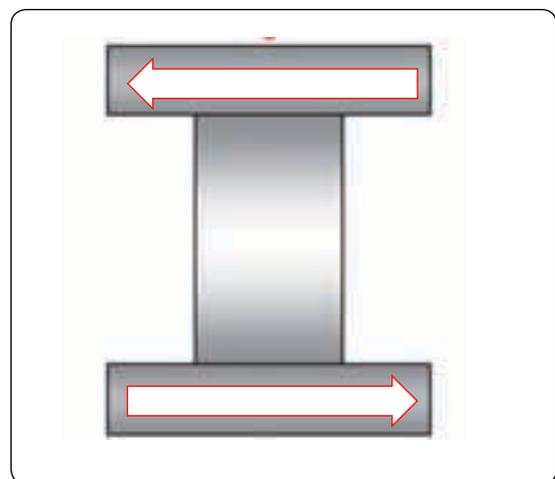


Figure 10 :
Représentation des efforts d'un cisaillement



V.4.1.4 Fatigue

La fatigue est un processus (succession de mécanismes) qui, sous l'action de contraintes ou déformations cycliques, répétées ou alternées, modifie les propriétés locales d'un matériau et peut entraîner la formation de fissures et, éventuellement, la rupture de la pièce. Il est important de remarquer que **la contrainte ou déformation maximale pour laquelle ce processus est activé est bien inférieure à la résistance** du matériau.

Le remplissage et la vidange régulier d'une cellule conduisent à un processus de fatigue.

V.4.1.5 Fluage

Le fluage est le phénomène physique qui provoque la déformation irréversible d'un matériau soumis à une contrainte constante **inférieure à la limite d'élasticité** du matériau, **pendant une durée suffisante**.

V.4.1.6 Flambage / Flambement

Le flambage est un phénomène d'instabilité d'une structure, qui, soumise à une force de compression longitudinale, fléchit et donc se déforme dans une direction perpendiculaire à l'axe de compression (passage d'un état de compression à un état de flexion).

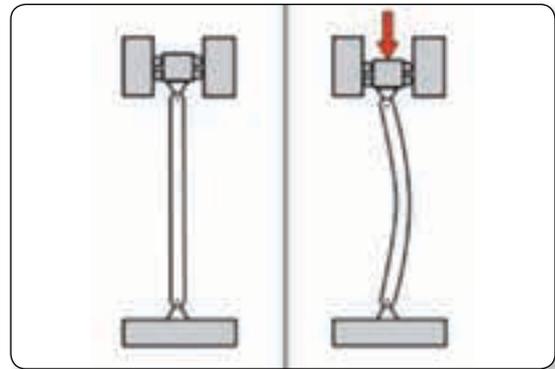


Figure 11 : Représentation de déplacement de l'élément dû au flambement

V.4.2 PROPRIETES ET COMPORTEMENT DES MATERIAUX

V.4.2.1 Préambule

Le comportement des matériaux est souvent décrit au moyen d'une courbe contrainte/déformation. Ce type de courbe présente l'évolution des contraintes dans le matériau lorsque les déformations de traction, de compression, ... lui sont imposées.

Comme cela est présenté sur la figure ci-dessous, on peut identifier 3 zones distinctes :

- * Le domaine de déformation **élastique**, domaine dans lequel la pièce se déforme mais, si l'on arrête la sollicitation, le matériau revient à sa forme initiale ;
- * Le domaine de déformation **plastique**, domaine dans lequel la pièce se déforme de manière plus importante. Dans cette zone, les déformations dites plastiques sont irrémédiables. Si l'on arrête la sollicitation, le matériau ne reviendra pas à sa forme initiale, il conservera des déformations ;
- * **La rupture**.

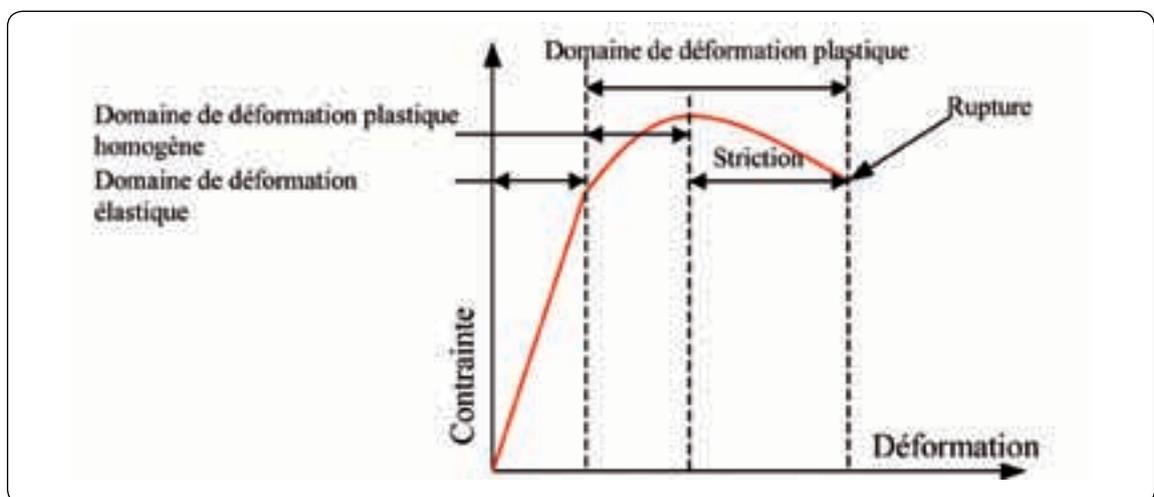


Figure 12 : Courbe contrainte-déformation

Les matériaux qui présentent un domaine élastique et un domaine plastique sont dénommés ductiles. La plupart des matériaux métalliques sont ductiles.

Certains matériaux ne présentent pas de zone de déformation plastique, ils sont qualifiés de matériaux fragiles. Le matériau se déforme de manière élastique jusqu'à atteindre sa limite à la rupture. La courbe contrainte – déformation se résume en une droite. Le béton, le verre, ... sont des matériaux fragiles.

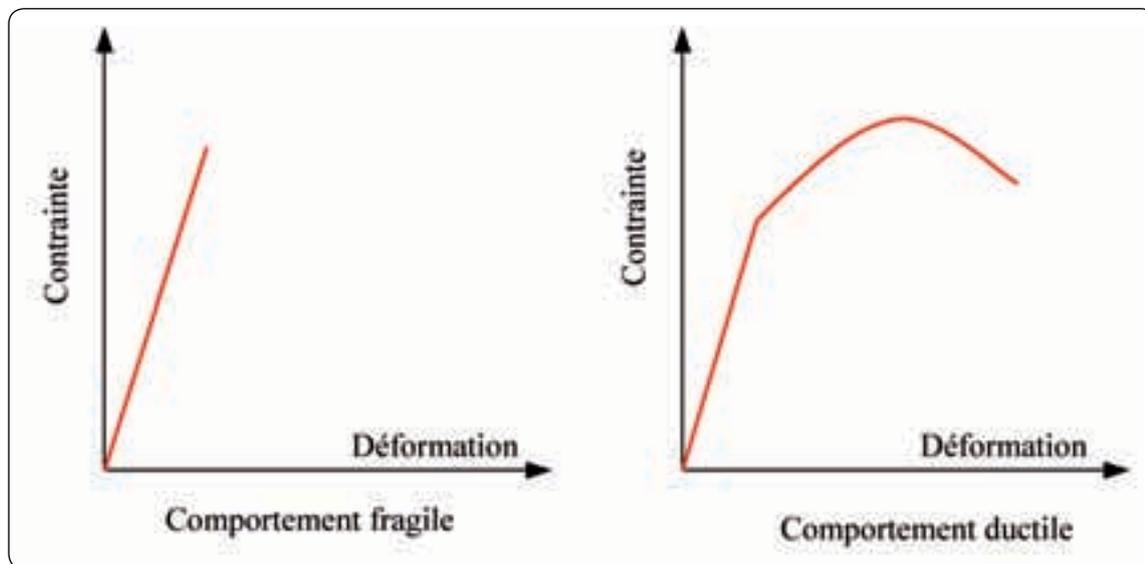


Figure 13 : Comparaison de deux courbes contrainte déformation

Les matériaux métalliques de type fragile sont la plupart du temps interdits d'usage dans la construction de structures ou d'appareils sous pression car leur comportement mécanique ne présente pas de domaine plastique qui est souvent utilisé comme un domaine de sécurité.

V.4.2.1 Cas des structures métalliques

Les matériaux métalliques sont des matériaux ductiles qui présentent des domaines d'élasticité et de plasticité importants.

Leur facilité de mise en œuvre et leur performance en font un des matériaux les plus utilisés en construction.

Les propriétés de ces matériaux peuvent être très variables selon les emplois prévus grâce aux différentes compositions chimiques possibles (ex : acier inoxydable,...) ainsi qu'aux traitements chimiques, mécaniques (galvanisation, trempage,...) qu'ils peuvent subir.

L'acier a une limite élastique en traction de l'ordre de 350 MPa.

V.4.2.2 Cas du béton – béton armé béton précontraint

Les bétons ont de très bonnes valeurs de résistance à la compression de l'ordre de 20 MPa à 40 MPa mais cela peut être multiplié par dix pour certains types de béton à usage bien spécialisé.

Le béton est d'autant plus résistant que les interstices (microfissuration) sont peu nombreux et de faibles dimensions.

Entre deux bétons de constitution normale, celui dont la masse volumique sera la plus grande sera a priori le plus résistant.

Le béton présente une résistance faible à la traction et donc à la flexion. C'est pour cette raison que le béton est souvent mis en œuvre avec de l'acier pour former du béton armé.



Les bétons ont une résistance à la traction de l'ordre de 2 MPa à 5 MPa.

De manière simplifiée, il est possible de dire que le principe du béton armé en flexion est le suivant :

- * le béton reprend les efforts de compression (face supérieure, cf. Figure 14) ;
- * les aciers reprennent les efforts de traction (face inférieure).

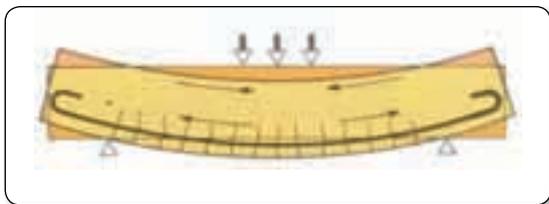


Figure 14 :
Poutre en béton armé sollicitée en flexion

Cette complémentarité est encore améliorée dans le principe du béton précontraint.

Le principe est de mettre l'armature de précontrainte en tension à l'aide de vérins avant que le béton n'ait fait prise. Lorsque la contrainte sur les armatures est relâchée, un effort de compression apparaît dans le béton. Il est dit « précontraint ».

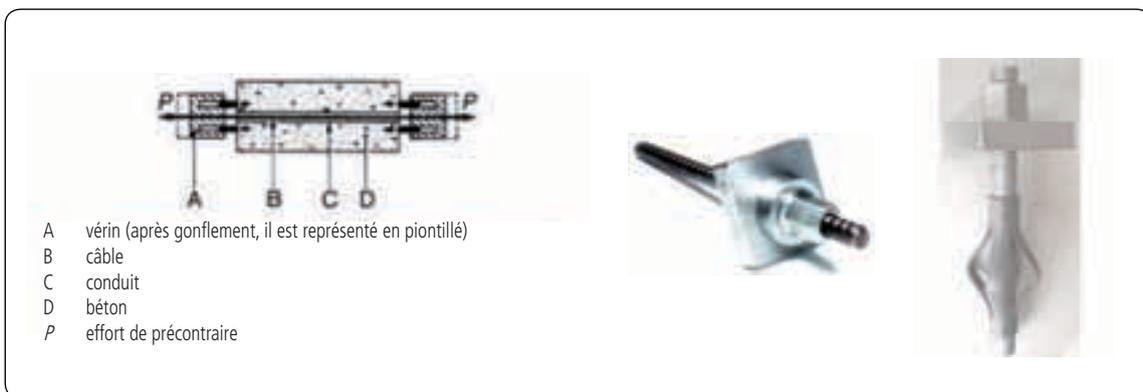


Figure 15 : Principe de la précontrainte et éléments de tension

La poutre est ensuite chargée. Le chargement a pour effet de décompresser la partie inférieure et donc de limiter la sollicitation en traction.

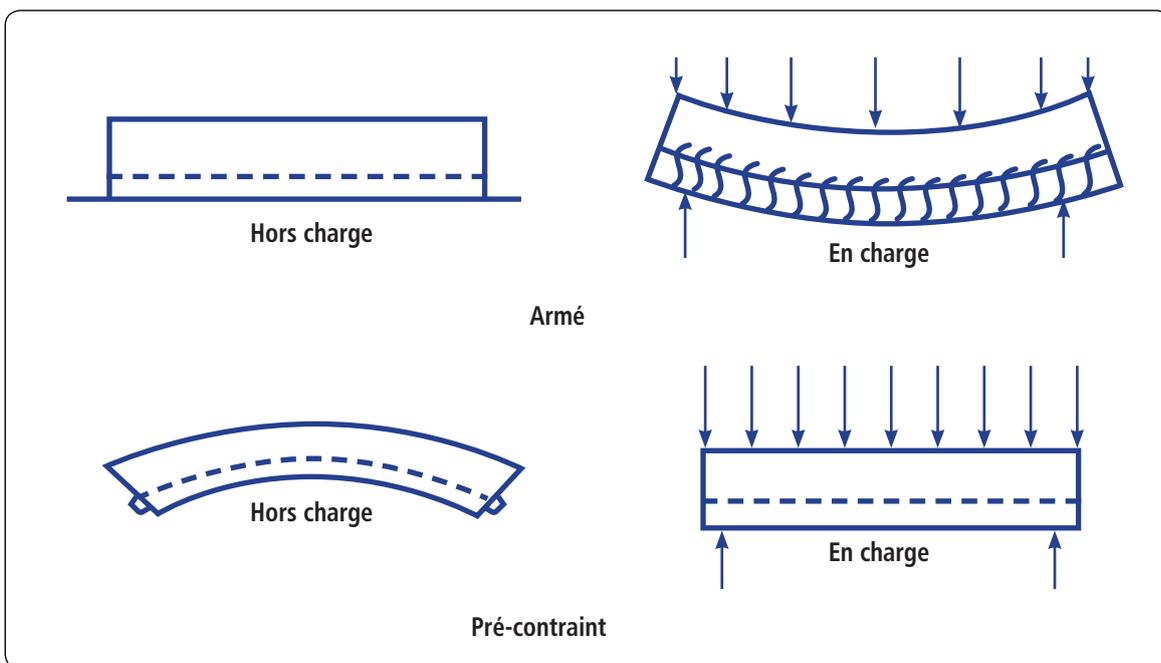


Figure 16 : Schématisation du principe du béton précontraint

Il est à noter que, dans le cas du béton précontraint, lorsque la capacité maximale est atteinte, la rupture observée est de type « fragile ».

V.5 REGLES DE DIMENSIONNEMENT

Le dimensionnement des stockages est réalisé selon des normes, des codes ou des référentiels. On retiendra par exemple :

- ▶ la norme P22-630 (Silos métalliques - Calcul des actions dans les cellules) pour les structures métalliques ;
- ▶ le SN Bati (règles de calculs pour les parois réalisées par coffrage glissant) pour les cellules en béton ;
- ▶ le BAEL (règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites) ;
- ▶ EUROCODE 2 (règles unifiées communes pour les structures en béton, § 1.4, 2.4, 3.2.4).

V.5.1 HISTORIQUE

Il convient de noter que le contenu de ces documents de référence a évolué au cours du temps. Ainsi les contraintes imposées sur une construction dans le passé ne sont plus les mêmes que celles imposées actuellement. Il est possible de dire que les prescriptions se sont renforcées au fil du temps.

A titre informatif, il convient de retenir les dates suivantes caractéristiques de modifications dans les règles de dimensionnements pouvant induire des changements notables dans la typologie des constructions.

- ▶ **Avant 1940** : la théorie de Janssen (1895) reposant sur un calcul en statique des chargements est utilisée.
- ▶ **Entre 1940 et 1975** : modèle de comportement linéaire des matériaux (loi de Hooke)
 - * 1940, Albert Caquot modifie la formule de Janssen en tenant compte de la surcharge due à la vidange ;
 - * Ouvrage de Reimbert : « Ouvrages de soutènement. Abaques de poussée et de butée » ;
 - * Norme allemande jusqu'à la fin des années 60 : DIN 1055 (1964) ;
 - * Etude de Lambroso : « Détermination numérique des sollicitations exercées par la matière ensilée dans les silos » ;
 - * Règles CCBA68 (Calcul des Constructions en Béton Armé de 1968) ;
- ▶ **Entre 1975 et 2010** : Introduction de la notion de non linéarité du comportement des matériaux
 - * Règles de conception et de calcul des silos en béton (publication du SNBATI dans les annales de l'ITBTP 1975) ;
 - * Règles de « **Calcul du béton armé aux états limites** » de 1980 (BAEL80) et leurs évolutions BAEL83, BAEL91 et BAEL91 révisées en 1999 ;

- * « **Conception des silos en béton armé et pré-contraint** » (Règles professionnelles, Annales de l'ITBTP n°446 juillet-Aout 1986) ;
- ▶ **Depuis 2010** : Intégration des notions probabilistes de sécurité et du comportement non linéaire des matériaux
 - * Entrée en vigueur des Eurocodes « Règles unifiées communes pour les structures en béton ».

Ainsi, par exemple, à l'heure actuelle, les calculs de dimensionnement sont réalisés pour stocker en sécurité l'ensemble des céréales pouvant être présentes dans les cellules. Pour toutes les céréales considérées, les couples « coefficient de frottement et poids spécifique » les plus défavorables sont retenus pour le calcul. Ceci n'a pas toujours été le cas par le passé.

V.5.2 NOTIONS DE DIMENSIONNEMENT

V.5.2.1 Etat limite de service ELS et état limite ultime ELU

Deux valeurs limites de tenue des structures sont traditionnellement retenues :

▶ L'état limite de service (ELS)

Ce sont les conditions qu'il faut respecter pour que l'exploitation normale et la durabilité de la construction soient assurées. Les états limites de service présentent deux domaines :

1. Un domaine qui nécessite des calculs : par exemple, vérifier que des contraintes ou des déformations sont admissibles ;
2. Un domaine qui ne nécessite aucun calcul : c'est l'ensemble des dispositions constructives qui doivent être assurées.



► **L'état limite ultime (ELU)**

Il fait référence aux conditions de rupture. Il s'agit de s'assurer que le risque de ruine est très faible en prenant divers coefficients de sécurité (sur les matériaux) et de pondération (sur les charges). En effet, les sources d'erreur sont les suivantes :

- * Les matériaux peuvent être moins résistants que prévus ;
- * Les charges appliquées peuvent être plus sévères que prévues ;
- * Les méthodes de calcul et les hypothèses peuvent ne pas correspondre exactement à la réalité.

V.5.2.2 Taux de fissuration dans les éléments en béton armé

Dans le cas des structures en béton, si la fissuration est donc un phénomène inévitable, il convient cependant de distinguer les fissures non préjudiciables, donc acceptables, de celles qui mettent en péril la durabilité de l'ouvrage, donc inacceptables. Il appartient au maître d'ouvrage de définir de façon claire dans son cahier des charges la qualité des parois en béton désirée.

La définition du degré de fissurabilité des parois dans le cas des silos peut résulter implicitement des critères suivants :

- La susceptibilité du produit stocké à l'humidité ;
- La situation en atmosphère agressive (notamment au bord de la mer) ;
- Le temps de séjour d'un stock donné à l'intérieur d'une cellule ;
- La présence éventuelle d'un revêtement intérieur ou extérieur ;
- L'éventuelle exigence d'une imperméabilité à l'air ;
- La position relative de la paroi : intérieure (cas des silos en batterie ou en « as » de carreau) ou extérieure ;
- L'injection des gaines des barres de grimpage des silos exécutée par coffrages glissants, qui présente un risque accru pour la fissuration.

Selon le BAEL, les fissures ou microfissures (par mise en traction du béton dans les zones tendues) sont définies selon trois niveaux d'ouverture des fissures en fonction de l'environnement extérieur et du risque de dégradation que cela peut entraîner (infiltrations, corrosion des aciers, ...) :

► **Paroi à Fissuration non préjudiciable :**

Ce niveau représente la majorité des cas. Il est caractéristique d'une ambiance « classique » d'environnement « peu » agressif. Dans les limites admissibles, les déformations et la fissuration sont autorisées sans que cela ne puisse porter préjudice à l'ouvrage.

► **Paroi à Fissuration très préjudiciable :**

Ce niveau caractérise une ambiance extérieure « très » agressive. Dans ce cas, la fissuration est extrêmement dommageable à l'ouvrage, ainsi les déformations autorisées sont très faibles. Ce niveau de fissuration peut concerner par exemple : les stockages d'engrais, les silos portuaires soumis aux embruns, des ouvrages d'étanchéité...

► **Paroi à Fissuration préjudiciable :**

Ce niveau caractérise une situation intermédiaire.

D'autre part, les règles SNBATI définissent de manière similaire des catégories de parois :

► **Parois de la 1^{re} catégorie :** Parois pour lesquelles il est requis que la probabilité d'apparition de fissures soit aussi faible que possible ;

► **Parois de la 2^e catégorie :** Ce sont les parois pour lesquelles il est requis que l'ouverture des fissures soit aussi faible que possible ;

► **Parois de la 3^e catégorie :** Il s'agit de parois dont la fissuration, tout en restant limitée, est considérée comme ne nuisant ni à l'exploitation, ni à la durabilité de l'ouvrage. La fissuration n'est ici pas préjudiciable.

La conséquence directe de ce choix est le dimensionnement des armatures lors du calcul des caractéristiques de l'élément en béton armé à réaliser. La section d'acier est bien évidemment plus importante dans le cas où il est souhaité de limiter les déformations et l'ouverture des fissures.

En ordre de grandeur, il est possible de considérer que :

- ▶ La section d'acier doit être augmentée de 30% lorsque « Paroi 2^e catégorie - fissuration préjudiciable » est retenue plutôt que « paroi 3^e catégorie - fissuration non préjudiciable » ;
- ▶ La section d'acier doit être augmentée de 75% lorsque « Paroi de 1^e catégorie - fissuration très préjudiciable » est retenue plutôt que « Paroi de 3^e - fissuration non préjudiciable ».

Cette estimation est réalisée sur la contrainte maximale dans la section acier.

Le choix entre les niveaux de fissuration retenus impacte également la distance d'enrobage. Les armatures doivent également être plus écartées des parois dans le cas de fissuration « préjudiciable » ou « très préjudiciable ».

L'ordre de grandeur de l'enrobage est de 3 cm en zone courante (règle minimale dans le cas de la fissuration non préjudiciable) et de 5 cm en présence d'un environnement agressif, près des côtes ou près d'un séchoir par exemple.

V.5.2.3 Typologie des fissures du béton

Pour faire suite au paragraphe précédent, rappelons qu'il n'existe pas actuellement de normes classant les fissures suivant leur ouverture.

Il convient cependant de distinguer les fissures structurelles de celles dues aux contraintes de mise en place du béton et à ses caractéristiques intrinsèques (faïençage, retrait, barres à vérin, ...)

Des fissures ou des microfissures apparaissent le plus souvent en raison du faïençage qui est un phénomène de microfissuration régulière et superficielle de la peau des enduits et bétons, dû à un retrait trop important ou trop rapide, ou à un phénomène d'alcali-réaction (définition au § VI.3.2.3).



Figure 17 : Fissuration superficielle (faïençage)

De plus, il est également fréquemment rencontré des fissures sur les structures en béton armé réalisées en coffrage glissant, au droit des emplacements des barres à vérins, nécessaires à l'élévation de la construction.

Ces types de fissures sont, dans la majorité des cas, non préjudiciables à la structure dans un avenir proche.

Ces fissures sont à distinguer des fissures structurelles synonymes de défaillance de la structure et de son incapacité à reprendre les efforts auxquels elle est soumise (rupture par flexion ou cisaillement), comme les exemples présentés ci-dessous.



Figure 18 : Cas de fissures structurelles



VI - CAUSES DES DEFAILLANCES

Ce paragraphe a pour but de synthétiser l'ensemble des causes pouvant conduire à la défaillance d'une structure ou d'un élément de structure.

Les causes identifiées sont regroupées en trois types :

- ▶ conception et réalisation ;
- ▶ modifications des installations ;
- ▶ usage (vieillesse).

VI.1 CONCEPTION ET RÉALISATION

Les premières causes de désordre sont à identifier au moment de la construction même des installations.

VI.1.1 DÉFAUT DE CONCEPTION (ÉPAISSEUR DES PAROIS, QUANTITÉ D'ARMATURE, ...)

Les fondations doivent être adaptées au type de sol. En cas d'insuffisance ou d'absence d'une étude de sol adéquate, les fondations peuvent être mal dimensionnées.

Lors de la conception, des erreurs sur les facteurs dimensionnant telles que la surcharge neige-vent, le poids spécifique du produit, le taux de rotation peuvent être à l'origine d'un sous dimensionnement de la structure.

Ces erreurs peuvent concerner les nuances d'acier ou la formulation de béton ainsi que le dimensionnement des éléments comme le choix d'une épaisseur d'acier pour une paroi.

Pour les structures en béton armé, ces erreurs peuvent prendre la forme d'un diamètre trop faible des aciers de renfort, d'un mauvais choix de nuance d'acier, d'un positionnement des renforts inadéquat ou d'une hypothèse du taux de fissuration erronée.

Pour les structures en acier, les tirants, panneaux, renforts et poteaux peuvent être sous-dimensionnés, mal placés ou d'une nuance ne présentant pas les caractéristiques nécessaires.

VI.1.2 DÉFAUTS DE RÉALISATION

Malgré une bonne conception, une structure peut être réalisée avec des défauts suite à des erreurs de réalisation. Les erreurs que l'on peut rencontrer sur les fondations, les structures en acier et les structures en béton armé sont présentées ci-après.

VI.1.2.1 Fondations

Les erreurs de réalisation portant sur les fondations peuvent être :

- ▶ Des fondations insuffisamment profondes ;
- ▶ Un tassement insuffisant du remblai ;
- ▶ Une purge de poche mal effectuée.

VI.1.2.2 Structure en béton armé

Les erreurs de réalisation portant sur les structures en béton armé peuvent être dues à un défaut de :

- ▶ Mise en œuvre des aciers :
 - * caractéristiques du matériau différentes des spécifications,
 - * positionnement dans la section,
 - * épaisseur d'enrobage insuffisante.
- ▶ Formulation et mise place des bétons :
 - * caractéristiques du matériau différentes des spécifications,
 - * défaut de reprise de bétonnage lors de la phase de glissant,
 - * mauvaise vibration,
 - * dessiccation (évaporation trop rapide de l'eau de gâchage).

VI.1.2.3 Structure en acier

Les erreurs de réalisation portant sur les structures en acier peuvent être dues :

- ▶ A des caractéristiques des éléments différentes des spécifications (nuance, résistance mécanique, propriétés...). Les aciers doivent disposer d'une carte d'identité et d'un certificat de coulée assurant leurs qualités et leur provenance ;
- ▶ A des défauts de soudure (manque de matière, métal d'apport incompatible avec le métal de base, cordon trop petit, trop de retrait durant ou après le soudage). Le sens de soudure (montante ou descendante) est également spécifié lors de la conception et doit être respecté. Ce point est détaillé dans le chapitre IX.2.5 ;
- ▶ A l'absence de protection extérieure (imperméabilisation) ou en toiture (étanchéité) ;
- ▶ A une inversion des tôles (épaisseur différente en haut et en bas) ;
- ▶ A un nombre de fixations insuffisant. Ce point est détaillé dans le chapitre IX.2.1.



VI.2 MODIFICATIONS DES INSTALLATIONS

Au regard du retour d'expérience, de nombreux désordres sont apparus après la réalisation de travaux sur les installations en vue d'en modifier les caractéristiques. Dans ce paragraphe, les modifications d'objet des stockages ont été également intégrées.

VI.2.1 AUGMENTATION DES CONTRAINTES

Des modifications augmentant les contraintes supportées par la structure sont parfois effectuées sur les installations. Parmi elles, il est possible de citer :

- ▶ L'installation de sondes de thermométrie ;
- ▶ L'augmentation des capacités d'aspiration et de ventilation ;
- ▶ L'augmentation des débits de vidange ;
- ▶ L'augmentation de charge dans la cellule :
 - * Variation de poids spécifiques. Les structures sont dimensionnées selon les caractéristiques d'un type de céréales ;
 - * Augmentation de la hauteur de stockage. La hauteur de stockage utile retenue peut différer de la hauteur de stockage maximum ;
 - * Augmentation de la hauteur de stockage par l'ajout de basting au-dessus des parois existantes.
- ▶ La création d'un nouvel orifice de vidange ;
- ▶ La modification de la surface intérieure de la cellule. Cela modifie la répartition des charges entre les éléments de la structure ;
- ▶ La modification de cellules superposées comme le retrait du musoir de la cellule supérieure ;
- ▶ La création de stockage extérieur appuyé sur une cellule.

VI.2.2 AFFAIBLISSEMENT DE LA STRUCTURE

Des modifications affaiblissant la structure sont parfois effectuées sur les installations. Parmi elles, il est possible de citer :

- ▶ La création d'évents ou de surfaces soufflables ;
- ▶ Le percement d'une paroi pour créer un passage pour un équipement, une trappe... ;
- ▶ L'enlèvement ou la dégradation de contreventements ;
- ▶ Le retrait de tirants ;
- ▶ L'excavation pour la construction d'une nouvelle fosse ou d'un réseau enterré.

VI.3 USAGE (VIEILLISSEMENT)

Au cours de la vie de l'installation, les structures subissent de nombreuses agressions ou modifications de leur environnement qui peuvent conduire à leur mise en péril.

VI.3.1 ENVIRONNEMENT

Les structures peuvent subir des tassements uniformes ou non uniformes suite à des mouvements de terrain dus à des raisons géologiques naturelles ou au ruissellement de l'eau.

Ce dernier est logiquement pris en compte lors de la conception mais l'endommagement de réseaux d'évacuation des eaux pluviales ou des défauts d'étanchéité peut entraîner des désordres importants sur la structure par action sur les fondations.

Ainsi les crues exceptionnelles, les zones d'accumulation d'eau (flaques, mares...) permanentes et la circulation d'eaux souterraines sont à observer.

VI.3.2 DEGRADATION

VI.3.2.1 Usure

Les éléments constamment contraints ou soumis à de nombreux cycles se fragilisent avec le temps. Il en est de même pour les pièces qui subissent des frottements répétés avec le grain ou d'autres pièces.

VI.3.2.2 Défauts de maintenance

Pour pallier l'usure, certaines pièces doivent être remplacées ou entretenues à intervalles de temps réguliers. Par exemple, certains bétons doivent être imperméabilisés régulièrement, les réseaux d'eau pluviale doivent être curés, les bavettes des palplanches et les protections de pied de poteau doivent être remplacées et certaines pièces métalliques doivent être recouvertes d'un traitement anticorrosion. Les défauts de ces opérations de maintenance conduisent à un vieillissement prématuré.

VI.3.2.3 Dégradation du béton

Les différentes dégradations du béton entraînent une perte d'épaisseur pouvant laisser apparaître les armatures. On en retiendra trois grandes familles :

- ▶ Les dégradations mécaniques dues à un choc, une surcharge, ...
- ▶ Les dégradations chimiques : **alcali-réaction** (réaction entre les agrégats et la pâte de ciment qui induit la création de fissures), **carbonatation** (réaction entre la chaux du béton et le gaz carbonique de l'air qui induit un dépôt blanchâtre et la corrosion des armatures), agents agressifs, activités biologiques.
- ▶ Les dégradations physiques : gel/dégel, conditions thermiques, érosion ;

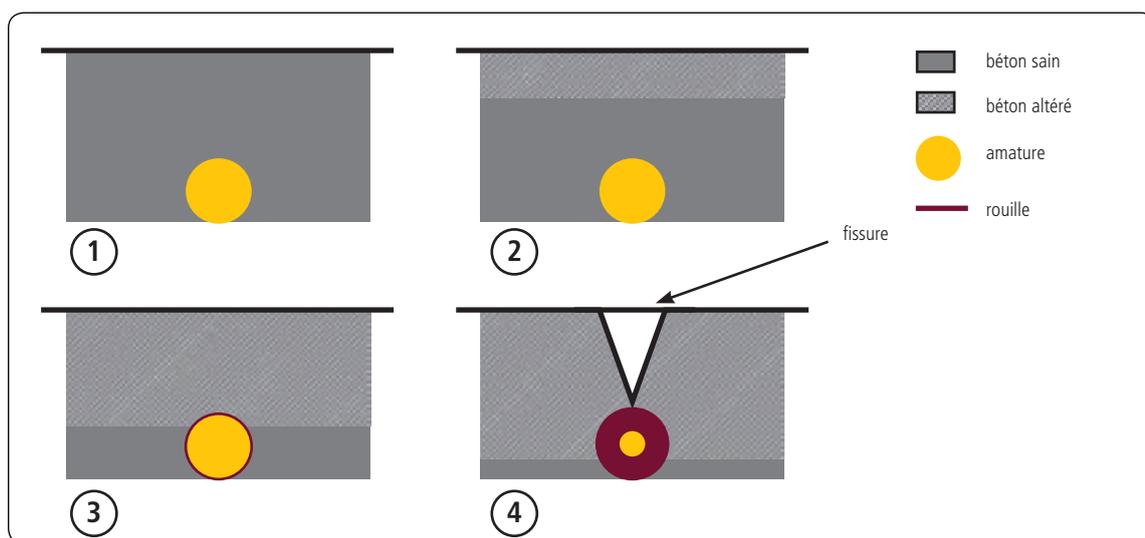


Figure 19 : Conséquence de l'alcali -réaction

Pour qualifier les dégradations du béton, les termes suivants sont employés :

- ▶ Faïençage : fissuration régulière et superficielle (cause : dessiccation ou alcali-réaction) ;
- ▶ Epaufrures : éclatement du béton ;
- ▶ Ecaillage : décollement du béton.

VI.3.2.4 Dégradation de l'acier

L'acier est l'objet de corrosion localisée ou généralisée entraînant une perte d'épaisseur.

La corrosion dite «aqueuse» est un phénomène électrochimique faisant intervenir des transferts de charges électriques élémentaires entre le métal et le milieu environnant. Ces transferts se produisent entre les différentes zones de métal constituant les deux pôles d'une pile électrochimique :

- ▶ l'anode où se produit une dissolution du métal par libération d'électrons ;
- ▶ la cathode où il y a consommation de ces électrons.

Ces piles de corrosion peuvent être générées par

- ▶ l'hétérogénéité des matériaux ;
- ▶ l'hétérogénéité du milieu environnant.

Il convient, par exemple, de prêter attention aux interactions avec le matériau de remblais ou à l'action des fumées de combustion de fioul lourd, riches en soufre.

Les aciers du béton armé sont attaqués lors de la perte d'enrobage (épaisseur de béton entre l'acier et l'extérieur) par carbonatation, par infiltration, par pénétration de chlorures ou par action de produits corrosifs (sels de déverglaçage, ...).

De la même manière, les éléments de structures peuvent faire l'objet de corrosion localisée ou non pouvant mettre en péril leur tenue.

VI.3.3 INCIDENT, ACCIDENT

Les accidents, comme le choc d'un camion ou d'un engin de manutention sur un poteau, peuvent fragiliser les structures.

Les impacts de foudre sur le béton peuvent également fragiliser celui-ci.

Des erreurs de manipulation, telle que l'ouverture d'une mauvaise vanne lors de la vidange, peuvent également être à l'origine de défaillance.



VI.4 ORDRE DE GRANDEUR DE L'IMPACT DES MODIFICATIONS

Comme cela a déjà été évoqué précédemment, toute modification de l'installation ou des modalités d'utilisation de celle-ci peut induire des augmentations notables de chargement de la structure.

1. Installation de sonde de thermométrie (elles sont entrainées lors de la vidange)

Dans les installations à vidange par le bas, la mise en place d'une sonde induit une surcharge de l'ordre d'une tonne sur la structure.

2. Modification de la nature de la paroi interne (peinture, doublage interne métallique, ...).

Pour définir le chargement, les codes de calcul distinguent trois types de parois :

- A) Les parois à cannelures horizontales : tôles ondulées ou plissées à ondes horizontales,
- B) Les parois moyennement lisses : panneaux métalliques soudés ou rivetés, béton non revêtu,
- C) Les parois lisses : béton revêtu d'une peinture (ou résine), tôles d'acier soudées.

Pour calculer l'angle de frottement sur les parois, on détermine un coefficient caractéristique du type de paroi et du produit stocké. Pour les produits traditionnellement présents chez les organismes stockeurs, cette valeur varie de **0,98** pour les **parois de type A**, à **0,45** pour les **parois les plus lisses de type C**, soit un rapport supérieur à 2.

Ainsi à titre d'exemple :

- ▶ sur une cellule ronde de 6 m de diamètre et de 30 m de hauteur, au remplissage, l'**augmentation de pression** sur le fond entre une cellule à paroi de type B ou de type C sera de l'ordre de **50%** (de 9,5 tonnes/m² à 14 tonnes/m²) et de l'ordre de 41% à la vidange.

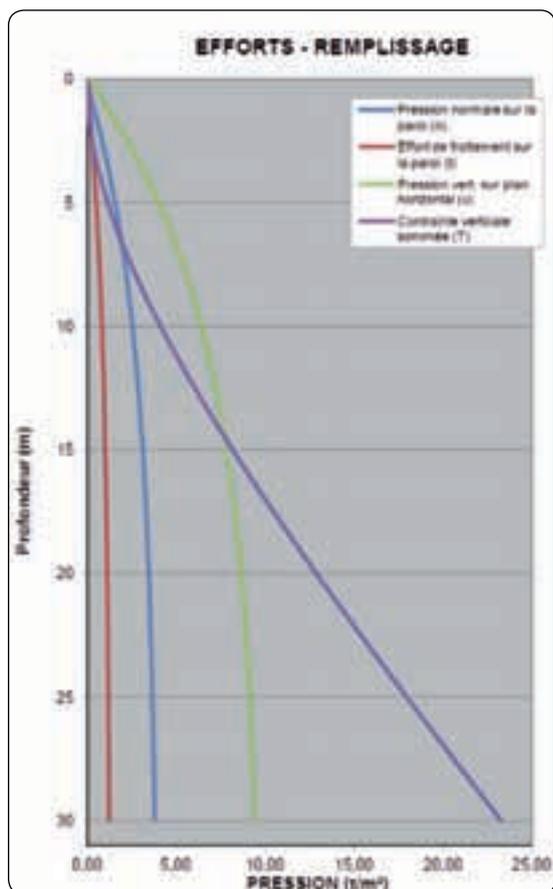


Figure 20 : Cellule ronde avec un coefficient de frottement de 0.7 (paroi type B : béton)

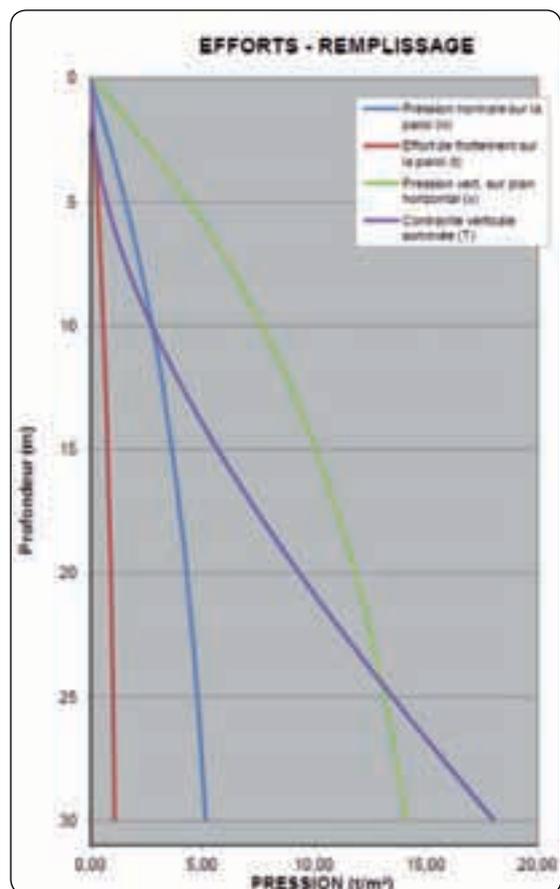


Figure 21 : Cellule ronde avec un coefficient de frottement de 0.45 (paroi type C : lisse)

- sur une cellule carrée de 6 m * 6 m et de 30 m de hauteur, au remplissage, **l'augmentation de pression** sur le fond entre une cellule à paroi de type B ou de type C sera de l'ordre de **45%** (de 7,2 tonnes/m² à 10,5 tonnes/m²) et de l'ordre de 40% à la vidange.

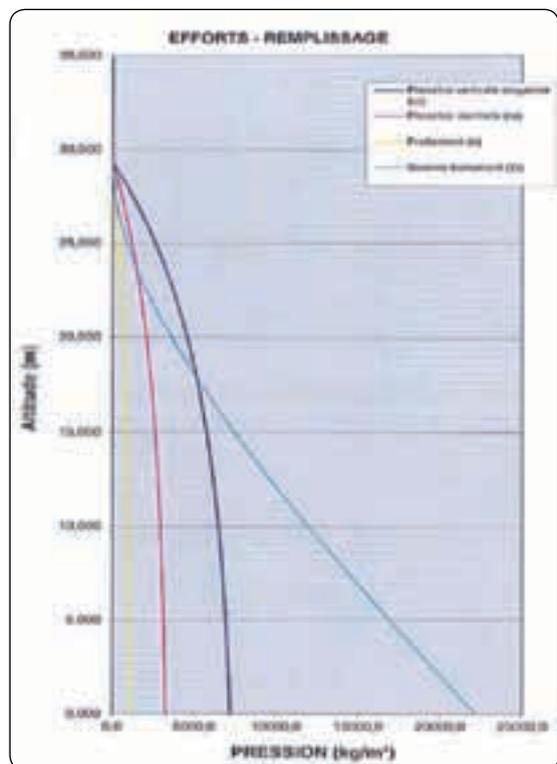


Figure 22 : Cellule carrée avec un coefficient de frottement de 0.7 (paroi type B : béton)

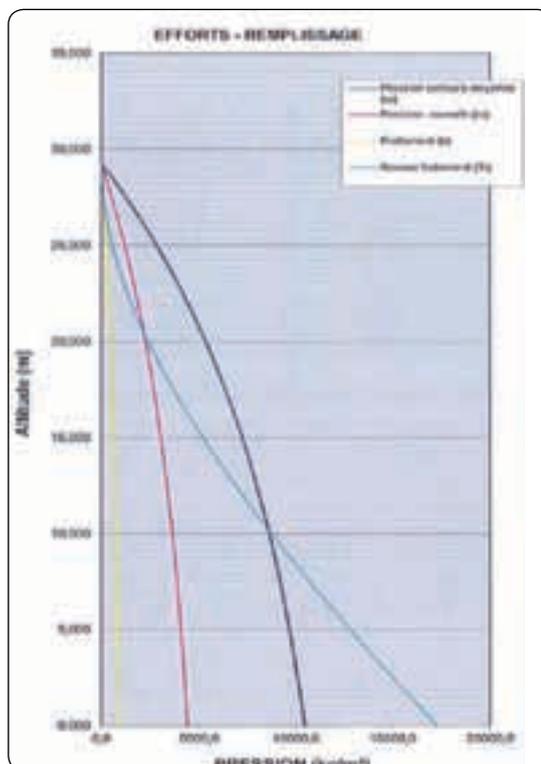


Figure 23 : Cellule carrée avec un coefficient de frottement de 0.45 (paroi type C : lisse)

3. Retrait ou endommagement d'un tirant

Si, dans une section courante d'une cellule, un tirant est retiré ou cassé, les efforts pour lesquels il était dimensionné sont répartis sur les tirants situés de part et d'autre. Ainsi, comme cela a été présenté au chapitre V.3, les tirants voisins devront reprendre ensemble un effort de l'ordre de 55 tonnes pour lesquels ils ne sont pas dimensionnés.

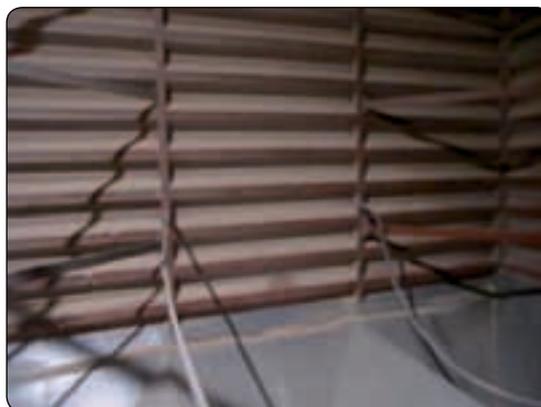


Figure 24 : Déformation de tirants suite au retrait d'un tirant voisin



VI.5 SYNTHÈSE

Défaillance	Cause	Moyen de prévention ou de protection
Déséquilibre de la structure - Défaillance des fondations	Pas d'étude de sol	-
	Profondeur insuffisante des fondations	-
	Tassement du remblai insuffisant	-
	Modification du terre-plein (nouveau fossé...)	Remblai du fossé
	Mauvaise évacuation des eaux pluviales	Inspection des réseaux d'évacuation des eaux pluviales
	Crues exceptionnelles	-
	Circulation d'eaux souterraines	Drainage,...
Affaiblissement d'une structure béton	Diamètre des renforts trop faible	Ajout d'un voile intérieur Chemisage Ajout de profilés métalliques Projection de béton
	Caractéristiques mécaniques de l'acier insuffisantes	Ajout d'un voile intérieur Chemisage Ajout de profilés métalliques Projection de béton
	Positionnement et nombre des renforts inadaptés	Ajout d'un voile intérieur Chemisage Ajout de profilés métalliques Projection de béton
	Corrosion des armatures	Traitement des fissures et reconstitution de l'enrobage Traitement des aciers
	Caractéristiques du béton insuffisantes	Ajout d'un voile intérieur Chemisage Ajout de profilés métalliques Projection de béton
	Épaisseurs insuffisantes	Ajout d'un voile intérieur Chemisage Ajout de profilés métalliques Projection de béton
	Hypothèse du taux de fissuration	Projection de béton Chemisage
	Fissures superficielles	Ajout d'un voile intérieur Chemisage Ajout de profilés métalliques Projection de béton Traitement des fissures

Défaillance	Cause	Moyen de prévention ou de protection
Affaiblissement d'une structure béton	Défaut d'enrobage des renforts (manque de vibration...)	Projection de béton
	Ajout de sondes thermométriques	Reprise de la structure (nouveau dimensionnement, ajout de renforts,...)
	Augmentation de la ventilation	
	Augmentation de la charge (changement de produit...)	
	Ajout d'ouverture de vidange	
	Modification de la surface interne	
Affaiblissement structure acier	Sous-dimensionnement des éléments structurels	Reprise de la structure (nouveau dimensionnement, ajout de renforts,...)
	Caractéristiques mécaniques insuffisantes	Reprise des soudures
	Défaut de soudure	Traitement anti-corrosion, peinture...
	Défaut de protection (pas de peinture...)	Reprise de la structure
	Inversion des tôles (tôles du bas mises en place en partie haute)	Ajout des fixations manquantes
	Points de fixation insuffisants	Reprise de la structure (nouveau dimensionnement, ajout de renforts,...)
	Ajout de sondes thermométriques	Reprise de la structure (nouveau dimensionnement, ajout de renforts,...)
	Augmentation de la ventilation	Reprise de la structure (nouveau dimensionnement, ajout de renforts,...)
	Augmentation de la charge (changement de produit...)	Reprise de la structure (nouveau dimensionnement, ajout de renforts,...)
	Ajout d'ouverture de vidange	Reprise de la structure (nouveau dimensionnement, ajout de renforts,...)
	Modification de la surface interne	Reprise de la structure (nouveau dimensionnement, ajout de renforts,...)
	Retrait ou défaillance d'un tirant	Remplacement des tirants manquants

Tableau 8 : Causes de défaillances et solutions associées



VII - SUIVI DES INSTALLATIONS

PLAN D'INSPECTION

Le suivi des installations peut être conduit selon le plan proposé ci-dessous. Il se décompose en plusieurs étapes détaillées dans le présent chapitre. De manière synthétique, le plan d'inspection comprend :

- ▶ La réalisation d'une visite de niveau 1 qui permet d'établir un premier état des lieux des désordres et de hiérarchiser/planifier les visites de niveau 2. Elle doit être réalisée régulièrement (avec une fréquence annuelle par exemple) ;
- ▶ La réalisation d'une visite de niveau 2, déclenchée suite à l'analyse des comptes-rendus des visites de niveau 1, qui permettra d'identifier plus précisément la nature des désordres et les actions correctives à effectuer ;
- ▶ La réalisation d'une visite de niveau 3 avec un bureau d'études spécialisé lorsque la visite de niveau 2 ne permet pas d'identifier, avec certitude, les désordres et les actions correctives à entreprendre ;
- ▶ La constitution d'un dossier de suivi.

En cas de sensibilité particulière de la structure, du site ou de l'environnement, les visites de niveau 2 et 3 pourront être effectuées sans visite de niveau 1 préalable.

Le logigramme suivant présente l'organisation des différentes visites.

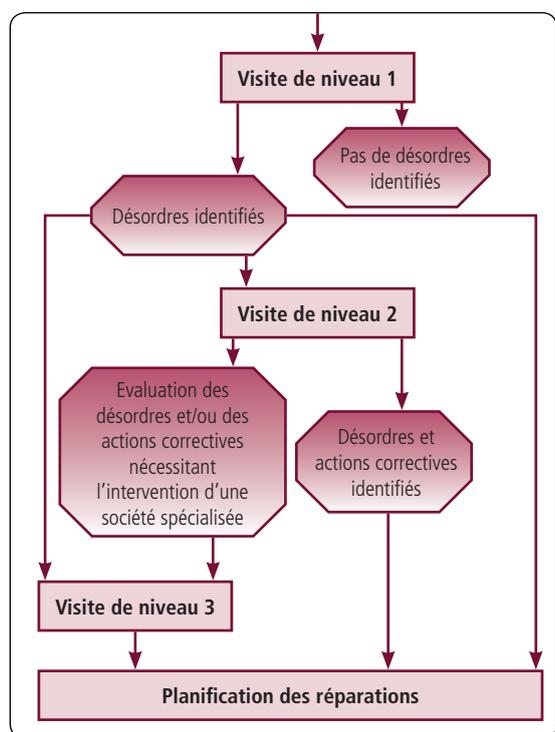


Figure 25 : Logigramme de suivi

VII.1 VISITES

VII.1.1 VISITE DE NIVEAU 1

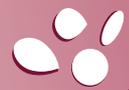
Les visites de niveau 1 répondent aux critères présentés dans le tableau ci-dessous :

QUI ?	Personnel sensibilisé (ex : chef de silo)
QUAND ?	Fréquence annuelle
OUTILS ?	Fiche de suivi basique : fiche de visite N1 - Fuite de grain, - Tirants déformés, cassés, ... - Morceaux de béton, - Fissures, - Suivi des témoins de fissures, - ...

Tableau 9 : Visite de niveau 1

La visite de niveau 1 a pour but d'identifier et de faire remonter les informations pertinentes quant aux désordres et aux différents événements précurseurs ainsi que de prioriser les visites de niveau 2. Les paramètres listés au paragraphe VII.3 peuvent également aider à cette hiérarchisation.

Le rapport d'inspection est transmis sans délai à la personne en charge des visites de niveau 2.



VII.1.2 VISITE DE NIVEAU 2

Les visites de niveau 2 répondent aux critères présentés dans le tableau ci-dessous :

QUI ?	Personnel formé (ex : service technique)
QUAND ?	Déclenchement sur analyse des conclusions de la visite N1
OUTILS ?	Catalogue des désordres ; Liste des causes de défaillance du chapitre VI ; Fiches de surveillance correspondant aux éléments d'ouvrage à contrôler, éditées préalablement et correctement référencées (l'utilisation d'un support électronique peut s'avérer pratique) ; Schéma de l'ouvrage sur lequel l'agent repère ses constatations ; Matériel classique de visite, comprenant par exemple : <ul style="list-style-type: none">- des équipements de protection individuelle de sécurité (EPI) ;- un appareil photographique adapté aux conditions de visite ;- des instruments de mesure (une réglette graduée, de la toile émeri, etc.) ;- si nécessaire, une autorisation de travailler et les permis spéciaux éventuels,- ...

La visite de niveau 2 a pour but de caractériser les défauts d'une structure, du bénin au grave, et d'identifier les actions correctives à mettre en place.

Suite à la visite de niveau 2, la personne en charge de l'inspection qualifie les désordres rencontrés d'une note allant de d1 à d3⁴ pour chaque élément du site contrôlé.

Les désordres sont caractérisés suivant les règles suivantes :

- ▶ **d1** : désordre pouvant être réparé par une action de maintenance classique ;
- ▶ **d2** : désordre pouvant être réparé par une action de maintenance spécialisée (possibilité de rajouter la notion d'évolutivité) ;
- ▶ **d3** : désordre remettant en cause la tenue de la structure (possibilité de rajouter la notion de priorité absolue).

Une fois les désordres désignés, il est possible de caractériser l'ouvrage avec les classes suivantes.

- ▶ Classe 1, état satisfaisant :
 - * Aucun désordre de niveaux d2 ou d3 n'a été détecté ;
 - * L'ouvrage ne présente pas de désordre ou seulement des désordres réparables par une maintenance courante.
- ▶ Classe 2, état passable :
 - * L'ouvrage présente des désordres de niveau d2 mais pas de désordre de niveau d3 ;
 - * Les désordres repérés sont réparables par une maintenance spécialisée.
- ▶ Classe 3, état dégradé :
 - * L'ouvrage présente des désordres de niveau d3.

Cette hiérarchisation a pour but de prioriser les actions à réaliser en termes d'inspection approfondie ou de réparations.

VII.1.3 VISITE DE NIVEAU 3

La visite de niveau 3 est réalisée lorsque la visite de niveau 2 n'a pas permis d'évaluer, avec certitude, la gravité des désordres et/ou les actions correctives.

Elle est réalisée par un bureau d'études qualifié.

4 : Cette méthode s'appuie sur celle développée dans le « Guide de surveillance des ouvrages de génie Civil et structures », DT 92, mai 2011.

VII.2 DOSSIER DE SUIVI

Il est important d'avoir une bonne connaissance d'une installation et de son historique. Elle peut permettre de détecter des incohérences entre le cahier des charges initial et l'utilisation actuelle. Elle peut également permettre d'identifier, au préalable, les points devant faire l'objet d'un examen prioritaire.

Ce dossier doit contenir toutes les informations permettant de caractériser au plus près les installations concernées, depuis leur conception jusqu'à l'heure actuelle.

Dans ce dossier, les informations en possession de l'exploitant sont collectées. Ainsi, il pourra contenir :

- ▶ Les fiches de suivi de niveau 1 et de niveau 2 ;
- ▶ les dimensions de l'installation ;
- ▶ la date de construction ;
- ▶ le code de construction utilisé et les hypothèses retenues (produit, taux de rotation, débit...);
- ▶ les plans de construction ;
- ▶ les matériaux de construction, y compris fondation ;
- ▶ l'étude de sol ;
- ▶ l'activité de l'installation (ex silo de report, de collecte, ...);
- ▶ les caractéristiques de l'usage actuel : taux de rotation, débit, ...
- ▶ les dates des différentes inspections déjà réalisées ;
- ▶ les modifications et réparations réalisées, si besoin avec leur validation (ouverture d'une goulotte) ;
- ▶ les dispositifs visant à réduire la corrosion (revêtement, protection active, ...);
- ▶ les incidents advenus sur l'installation ;
- ▶ les éléments « importants pour la sécurité du personnel » : passerelle, échelles, garde-corps, escaliers, ...
- ▶ les résultats d'analyse (pachométrie, suivi de fissures, d'épaisseurs, ...)

Cette liste n'est pas exhaustive.

Si certaines données ne sont pas disponibles, il peut être envisagé, selon la sensibilité du site, de compléter ce dossier de suivi par la réalisation de plans ou d'études.

VII.3 HIERARCHISATION

Sur la base des visites de niveau 1 et des données collectées dans le dossier de suivi, il est possible de réaliser une première hiérarchisation de la qualité des installations et du niveau d'information à disposition pour l'évaluer.

Plusieurs paramètres peuvent permettre d'établir cette hiérarchisation, comme par exemple :

- ▶ l'âge de l'installation.
Les structures pourront être classées en fonction des grandes étapes de modification des codes de calculs (cf. §VI.4 « Règles de dimensionnement ») ;
- ▶ Le retour d'expérience.
Il est notable que certaines typologies de construction présentent des faiblesses récurrentes. Il est donc opportun d'intégrer dans cette démarche le retour d'expérience interne et externe concernant les anomalies des structures.
- ▶ l'inadéquation entre les hypothèses retenues dans les codes de calculs pour la construction et la réalité de l'exploitation.
- ▶ la nature des matériaux employés : béton, métal, bois.
- ▶ le taux de rotation.
Le taux de rotation influe sur la sollicitation en fatigue de l'installation. La multiplication des phases d'ensilage et de vidange est particulièrement contraignante pour les structures.
- ▶ Les modifications intervenues depuis la construction : l'augmentation du débit de manutention, la création de vidange latérale, la mise en place de nouveaux équipements (passerelles, machines, ...), le changement de produit stocké (variation de densité, de coefficient de frottement...).

Toutes les modifications peuvent augmenter la charge sur la structure ou diminuer sa capacité portante.

- ▶ La sensibilité de l'environnement du site.
- ▶ L'environnement agressif.

Certains environnements (atmosphères salines, certaines fumées de combustion des séchoirs, ...) sont des facteurs prépondérants d'agression des structures.



VIII - PRESENTATION DES METHODES DE CONTROLE

Ce chapitre présente les méthodes de contrôle et de mesure les plus fréquemment utilisées pour le suivi des structures.

En fin de chapitre, les méthodes sont synthétisées au moyen d'un tableau intégrant plusieurs critères dont :

- ▶ le principe de fonctionnement ;
- ▶ les informations recherchées ;
- ▶ les limites d'utilisation.

VIII.1 STABILITE GLOBALE

VIII.1.1 NATURE DU SOL

La capacité portante d'un sol peut être estimée par un pénétromètre. Il existe des pénétromètres statiques et dynamiques.

Un pénétromètre dynamique est constitué d'une tige munie d'une enclume. Un « mouton », c'est-à-dire une masse, tombe sur l'enclume, ce qui permet d'enfoncer la tige dans le sol. En comptant le nombre de coups de mouton nécessaire pour que la tige s'enfonce dans le sol d'une profondeur donnée, il est possible de déduire la résistance du sol.

VIII.1.2 DEFAUTS DE VERTICALITE DES STRUCTURES

Les défauts de verticalité peuvent être déterminés au moyen d'outils divers, du plus simple, le fil à plomb, au plus évolué comme le tachéomètre ou le théodolite.

De manière simple, il est possible d'utiliser un niveau laser de bonne précision et une pige.

Autrement, il est possible d'utiliser un tachéomètre (appelé station totale s'il relève et enregistre automatiquement les mesures). C'est un instrument de mesure d'angles verticaux et horizontaux et de distances tandis que le théodolite mesure les angles verticaux et horizontaux mais pas les distances.

Ces instruments relèvent la position dans l'espace d'un point par rapport à d'autres points fixes. Ils permettent donc de suivre les mouvements d'une structure dans le temps ou de vérifier le positionnement d'un point par rapport à un autre. L'utilisation d'un tachéomètre ou d'un théodolite nécessite une formation car leur mise en place doit être précise et conditionne l'ensemble des mesures.



Figure 26 : Tachéomètre



VIII.1.3 LES RESEAUX D'EAUX

Les réseaux d'évacuation des eaux pluviales peuvent être contrôlés avec des caméras fixées à l'extrémité d'un câble que l'on fait passer dans les canalisations.

Les figures suivantes sont des photographies d'inspection.



Figure 27 : Conduit sans défaut



Figure 28 : Changement de section



Figure 29 : Conduit fissuré

VIII.1.4 COMPORTEMENT GLOBAL

Pour étudier le comportement global de la structure, des systèmes existent, composés d'accéléromètres placés sur la structure et d'une centrale d'acquisition enregistrant les vibrations de la structure soumise aux micro-vibrations ambiantes.

VIII.2 LES METHODES SUR PRÉLÈVEMENTS

Des prélèvements peuvent être réalisés dans les ouvrages afin de caractériser les matériaux.



Figure 30 : Carottage dans une paroi en béton

VIII.2.1 STRUCTURE EN BETON ARME

VIII.2.1.1 Caractérisation chimique et minéralogique

Une réparation doit être effectuée avec une formule de béton identique à la formule initiale. En l'absence d'information, celle-ci peut être déterminée par des analyses chimiques :

- ▶ Analyse chimique globale ;
- ▶ Dosage des chlorures ;
- ▶ Dosage des sulfates.

Elle peut également être déterminée par des analyses minéralogiques :

- ▶ Microscopie optique pour la détermination de la nature du ciment ;
- ▶ Diffraction des rayons X pour la recherche et la caractérisation des phases cristallines.

VIII.2.1.2 Caractérisation physique

Les caractéristiques physiques du béton sont liées à la porosité à l'eau, la perméabilité, la diffusion des corps tels que les chlorures, l'absorption capillaire, la résistance mécanique, ...

La résistance en flexion et en compression d'échantillons de béton peut être mesurée à l'aide de presses spécialisées. Cela nécessite le prélèvement d'échantillons dans des dimensions normalisées (souvent 4 cm * 4 cm * 16 cm). Ces échantillons doivent être confiés à un laboratoire équipé et compétent pour effectuer ces mesures. Les résultats de celles-ci permettent de vérifier la conformité du béton vis-à-vis du cahier des charges initial et des valeurs retenues lors de la conception.

VIII.2.2 STRUCTURE METALLIQUE

Les analyses en laboratoire peuvent permettre de caractériser une pièce qu'il est envisagé de remplacer mais pour laquelle aucune information n'est disponible.

VIII.2.2.1 Caractérisation chimique

L'analyse chimique des métaux permet d'identifier précisément l'ensemble des constituants d'un alliage (le manganèse, le chrome, le nickel, le molybdène, ...) et la présence d'autres éléments comme l'oxygène, l'hydrogène, le soufre,

VIII.2.2.2 Caractérisation métallographique

La métallographie est la technique consistant à déterminer la structure d'un métal en l'observant avec un microscope optique. Il est possible de déterminer ainsi, selon les cas :

- ▶ La taille et la forme des cristallites (ou grains) ;
- ▶ La répartition des phases ;
- ▶ La direction des lignes de glissement (intersection des plans de glissement avec la surface), dans le cas d'un échantillon déformé (voir les articles sur la déformation plastique et la dislocation).

Ces essais sont réalisés sur la base d'analyses d'images, d'analyses par microscopie optique et mesures de dureté, d'analyses par microscopie électronique à balayage (MEB), d'analyses microsonde, ...

VIII.2.2.3 Caractérisation physique

Différents essais peuvent être réalisés sur des éléments métalliques. Parmi les plus courants, il est possible de retenir :

- ▶ L'essai de traction, au cours duquel une éprouvette est étirée afin de déterminer ses caractéristiques en termes de résistance et d'allongement.
- ▶ L'essai de dureté (Brinell, Rockwell ou Vickers), durant lequel un pénétrateur, de forme variable selon le type d'essais, est appliqué sur la pièce à tester avec une force donnée.
- ▶ L'essai de résilience, au cours duquel une pièce pré-entaillée est soumise au choc d'un mouton pendule.
- ▶ L'essai de flexion, durant lequel un effort transversal est appliqué sur l'élément testé.

VIII.3 LES METHODES IN SITU

VIII.3.1 STRUCTURE EN BETON ARME

VIII.3.1.1 Caractérisation de la résistance du béton

a) Scléromètre

Le scléromètre est un outil de mesure de dureté donnant la résistance du béton.

Une bille d'acier est projetée sur la sonde en contact avec l'ouvrage en béton et, lors du rebond, cette bille entraîne un index qui coulisse sur la règle de mesure et donne l'indice sclérométrique. La résistance en compression de l'éprouvette ou du béton de l'ouvrage considéré est obtenue au moyen d'abaques.



Figure 31 : Scléromètre



POUR ALLER PLUS LOIN

NF EN 12504-2 (IDC P 18-445) - Fév. 2003
Essais pour béton dans les structures - Partie 2 : essais non-destructifs - Détermination de l'indice de rebondissement



b) Sondes Windsor

L'équipement comprend un pistolet à poudre, des sondes en alliage durci, des cartouches chargées, une jauge de profondeur pour mesurer la pénétration des sondes et d'autres accessoires connexes. Une sonde de 6.5 mm de diamètre et de 8.0 cm de longueur est enfoncée dans le béton au moyen d'une charge de poudre. La profondeur de la pénétration permet de déterminer la résistance à la compression du béton.



Figure 32 : Sonde Windsor

c) Méthode d'auscultation sonique

Il s'agit d'une méthode simple pour estimer la résistance du béton et son homogénéité dans l'ouvrage. Elle peut être effectuée en transparence (défauts d'homogénéité, module d'élasticité, résistance à la compression), en plaçant l'émetteur et le récepteur de part et d'autre de l'ouvrage ou en surface (présence de fissures de masse, couche superficielle de mauvaise qualité, ...), en plaçant l'émetteur et le récepteur côte à côte.

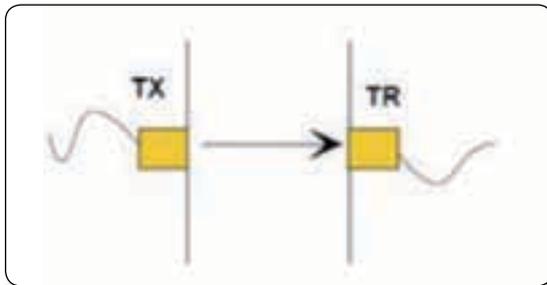


Figure 33 : Ultra-sons par transparence

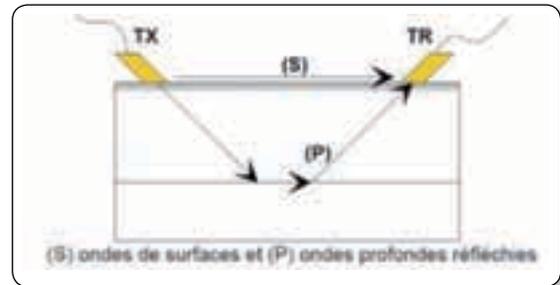


Figure 34 : Ultra-sons côte à côte

VIII.3.1.2 Mesures relatives au vieillissement

a) La mesure de la carbonatation

La technique la plus simple à mettre en œuvre pour mesurer la profondeur de carbonatation des bétons est le test à la phénolphthaléine réalisé sur des fractures fraîches de béton.

La phénolphthaléine est un indicateur de pH coloré dont le virage se situe aux alentours de 9. Cela permet de différencier la zone carbonatée (pH < 9) qui reste incolore, de la zone non carbonatée (pH > 9 et allant jusqu'à 13) colorée en violet.

Cet essai doit être effectué à l'échelle d'un ouvrage, sur un nombre de points de mesure représentatifs, en tenant compte des conditions

locales d'exposition et de l'hétérogénéité possible du matériau. Ce test permet une mesure fiable et rapide de la profondeur de carbonatation dans le cadre de diagnostic d'ouvrages.

b) Autres tests

* Mesure de résistivité :

La mesure de résistivité du béton donne une indication sur la corrosion des aciers et sur l'intensité du phénomène. Cette mesure est à coupler avec les mesures de potentiels présentées ci-après au § IX.3.3

* Mesure de perméabilité

Ce paramètre influence l'amorçage de la corrosion. Les perméabilités à l'air et à l'eau peuvent être étudiées.

VIII.3.1.3 Détermination des caractéristiques du ferrailage

a) Pachomètre

Plusieurs principes sont utilisés, tous sont basés sur la mesure des perturbations créées par la présence d'un objet ferromagnétique, placé dans un champ électromagnétique (courant alternatif sinusoïdal ou courant pulsé). Lorsque le capteur est situé à l'aplomb d'une armature, le pachomètre analyse le signal reçu et calcule, selon le type de matériel utilisé, l'enrobage et/ou le diamètre de l'acier.

On obtient ainsi **l'épaisseur du béton, la position et le diamètre des armatures.**

Les limites de la méthode :

- * la profondeur d'investigation est de 10 à 20 cm au maximum,
- * seul le premier réseau d'armatures est détecté,
- * la résolution (plus petit espacement mesurable entre les armatures) est sensiblement égale à l'enrobage,
- * le diamètre des armatures n'est mesurable avec précision que si les aciers sont suffisamment espacés.

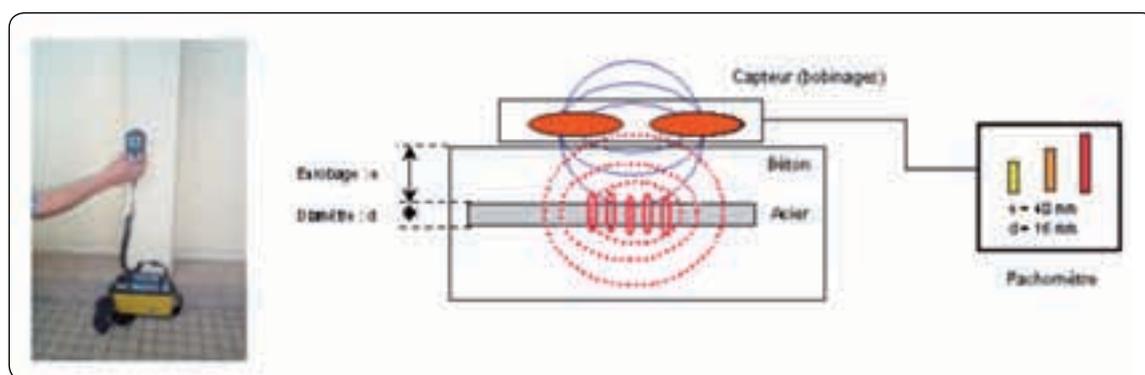


Figure 35 : Vue et principe du pachomètre

b) Radar Haute fréquence

Le radar est une technologie d'auscultation du sous-sol et des ouvrages (béton, maçonnerie...) qui utilise les principes de la réflectométrie d'impulsions électromagnétiques de fréquence radar (quelques MHz à quelques GHz). L'onde radar est émise et réceptionnée par un dispositif d'antennes qui est déplacé à la surface du sol ou de la structure de façon à balayer toute la zone à ausculter.

Les ondes radar réfléchies sur les différentes interfaces détectées dans le milieu sont enregistrées et visualisées en continu sur l'écran de contrôle. Une première interprétation peut ainsi être effectuée sur le site en attendant une interprétation approfondie en laboratoire.

La profondeur d'investigation dépend des antennes utilisées et peut varier de quelques centimètres, pour des applications structures ou chaussées, à quelques mètres, pour des applications géologiques. Les images obtenues permettent de mettre en évidence la structure interne du milieu ausculté, ses hétérogénéités, ses défauts, la présence d'éléments particuliers (aciers, réseaux souterrains, vides, etc.).

VIII.3.1.4 Détermination de la corrosion du ferrailage

a) Potentiel par électrodes (potentiel par demi-pile)

Cette méthode permet de détecter l'état de corrosion des armatures à travers le béton. **Elle nécessite l'accès à l'armature.**

La façon la plus simple d'évaluer le degré de corrosion de l'acier est de mesurer son potentiel de corrosion car celui-ci est, du point de vue qualitatif, étroitement lié au premier. Pour ce faire, on peut mesurer la différence de potentiel entre une demi-pile portable ordinaire, normalement constituée d'une électrode de référence cuivre-sulfate de cuivre (Cu/CuSO_4), placée à la surface du béton, et l'armature d'acier située en dessous. Les éléments de base de cette méthode de mesure, appelée « relevé de potentiel par demi-pile », sont illustrés sur la figure suivante. L'électrode de référence est branchée à la borne négative du voltmètre et l'acier d'armature, à la borne positive.

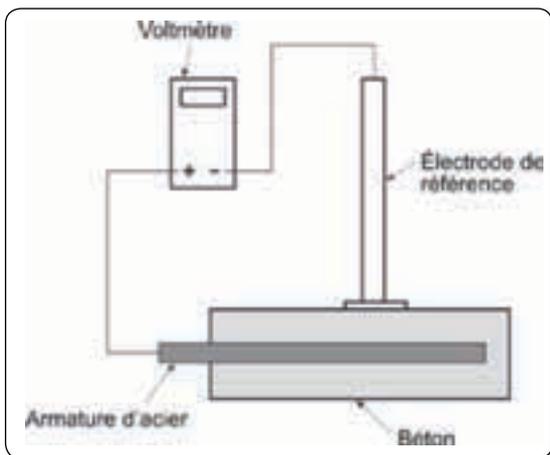


Figure 36 : Relevé de potentiel par demi-pile

Il peut être opportun de coupler ces mesures avec des mesures de résistivité du béton.

b) Mesure de la vitesse de corrosion

Elle fournit une grandeur quantitative de l'état instantané de corrosion d'une armature.

Le système mesure la réponse du système acier/béton à perturbation électrique de faible amplitude. Elle fait appel à trois électrodes :

- * une électrode de référence
- * une électrode reliée à l'armature
- * une électrode de mesure disposée en anneau autour de l'électrode de référence.

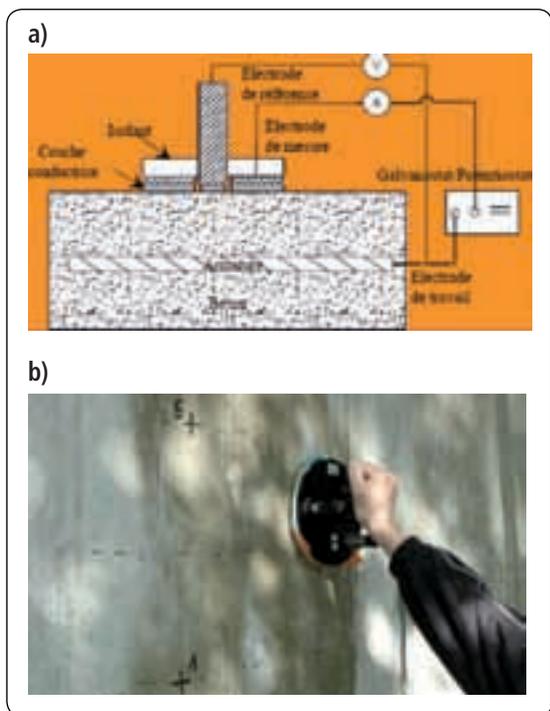


Figure 37 :

- a) Schéma de principe du potentiel par électrodes
b) Mesures in situ

VIII.3.2 STRUCTURE METALLIQUE

VIII.3.2.1 Mesures d'épaisseur

a) Mesure d'épaisseur par ultrasons

Ce contrôle permet la mesure d'épaisseur résiduelle sur toutes les structures métalliques soumises à la corrosion.

Le principe de la mesure numérique instantanée repose sur l'analyse du temps d'aller-retour d'une onde ultrasonore introduite d'un seul côté.

Le capteur peut être installé sur un chariot motorisé et aimanté pour atteindre des zones inaccessibles.



POUR ALLER PLUS LOIN

Norme NF EN 14127 Essais non destructifs - Mesurage de l'épaisseur par ultrasons

b) Contrôle par scanner

Ce contrôle permet la mesure d'épaisseur résiduelle sur toutes les structures métalliques soumises à la corrosion.

Le principe est différent selon les appareils. En effet, le scanner peut être à perte de flux magnétique (MFL / courants de Foucault), magnétique manuel, EMAT...

c) Contrôle d'épaisseur par onde guidée

Cette technique, basée sur celles des ultrasons, permet d'inspecter une tôle inaccessible à partir d'une tôle accessible.

VIII.3.2.2 Contrôle des soudures

a) Contrôle par magnétoscopie

Cette technique est basée sur la création d'un flux d'induction magnétique qui, au moyen de traceurs magnétiques déposés à la surface des matériaux, met en évidence les défauts.

b) Ressuage avec révélateur

Il s'agit d'appliquer un liquide coloré qui pénètre dans les défauts débouchants. Après un nettoyage de l'excédent, un révélateur met en évidence le liquide qui a pénétré et localise le défaut.

c) Contrôle par boîte à vide

Une ventouse applique une dépression sur une surface enduite d'eau savonneuse. La plaque transparente sur la ventouse permet de voir des bulles se former si un défaut traversant est détecté.

d) Contrôle par ACFM (Alternating current Field Measurement) ou contrôle de surface par perte de flux magnétique. La technique consiste à générer un champ magnétique, par l'intermédiaire d'un courant induit, et à mesurer la perturbation de ce champ lors du passage de la sonde au voisinage d'un défaut débouchant.

e) Gammagraphie et radiographie

Ce contrôle consiste à traverser le métal avec des rayons X ou gamma. Un film, placé derrière l'élément étudié, met en évidence les contrastes.

f) Contrôle par ultrasons

Le principe de cette méthode est explicité au § VIII.3.2.1.

VIII.3.2.3 Contrôles métallurgiques (in situ)

a) Spectrographie par étincelage

Sur une surface polie, un appareil génère un arc électrique qui permet l'analyse des atomes de l'acier et donc la détermination des composants de l'acier.

b) Positive material identification

De manière similaire à la spectrographie par étincelage, l'élément métallique est bombardé aux rayons X pour exciter les atomes présents dans l'acier. Suite à la réaction de ces atomes, l'analyse permet de qualifier les principaux composants de l'acier.

VIII.4 SUIVI DE L'INSTALLATION

Afin de suivre l'évolution d'une structure, il est possible de mettre en place sur la structure des éléments capables de mesurer l'évolution des fissures ou des déformations.

Les témoins de fissures permettent la surveillance de l'activité des fissures sur les ouvrages de maçonnerie.

Il existe des systèmes simples que l'on pourrait qualifier de tout ou rien, qui cassent dès que la fissure s'ouvre : élément de plâtre, lame de verre...

Des systèmes plus évolués permettant de quantifier l'ouverture de la fissure sont également disponibles : coulisse graduée, extensomètre à bille, déformètre à bille, déformètre électronique...

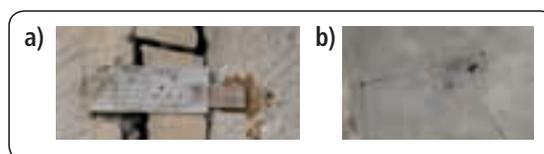


Figure 38 :

a) Coulisse graduée b) Déformètre électronique

D'autre part, **les jauges de déformation** (extensomètres) sont des dispositifs dont le but est de traduire la déformation d'une pièce en variation de résistance électrique (plus les extensomètres s'étirent, plus leurs résistances augmentent). Elles consistent en des spires rapprochées et sont généralement fabriquées à partir d'une mince feuille métallique (quelques μm d'épaisseur) et d'un isolant électrique.

La mesure ne peut s'effectuer directement car les variations de conductibilité de la jauge sont trop faibles pour être mesurées directement avec un ohmmètre. Il est nécessaire de faire un montage en pont de Wheatstone.

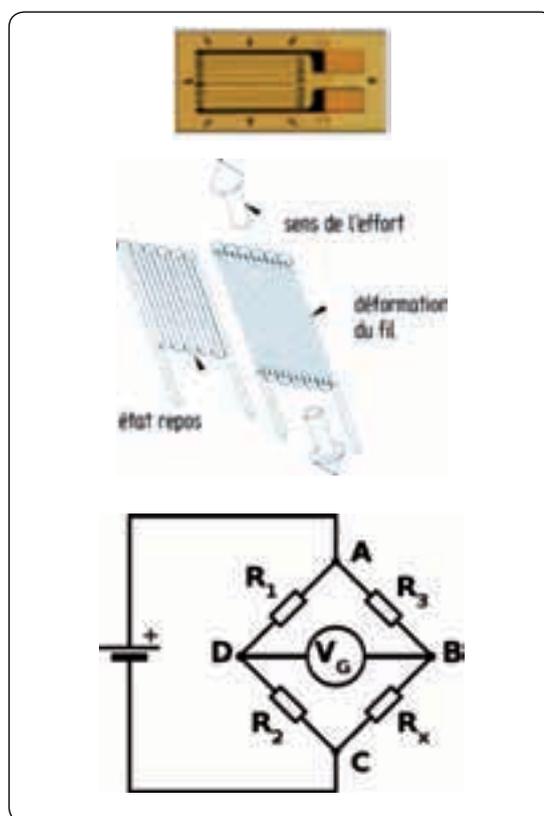


Figure 39 : Vue et principe d'une jauge et Schéma du pont de Wheatstone



VIII.5 SYNTHÈSE

Information recherchée	Nom	Grandeur mesurée	Principe de Fonctionnement	Limites d'utilisation	Prélèvement
Verticalité	Fil à plomb Niveau laser	Direction de l'apesanteur	Une masse laissée libre au bout d'un fil indique la verticalité	-	Non
Verticalité, horizontalité, évolution d'une position dans le temps...	Tachéomètre et théodolite	Position d'un point dans l'espace	La mesure de plusieurs angles entre la cible et des points fixes permet de déterminer la position de la cible	-	Non
Résistances en flexion et en compression du béton	Flexion compression	Résistances en flexion et en compression	Une presse contraint une éprouvette jusqu'à la rupture pour déterminer sa résistance	Plusieurs échantillons sont nécessaires pour que les valeurs soient représentatives	Oui
Résistance du béton	Sonde Windsor	Dureté	Une sonde de 6.5 mm de diamètre et de 8.0 cm de longueur est enfoncée dans le béton. La profondeur de la pénétration fournit une indication de la résistance du béton	Plusieurs mesures sont nécessaires pour que les valeurs soient représentatives	Non
Résistance du béton	Scléromètre	Dureté	Une bille d'acier est projetée sur la sonde en contact avec l'ouvrage en béton et, lors du rebond, entraîne un index qui coulisse sur la règle de mesure	Plusieurs mesures sont nécessaires pour que les valeurs soient représentatives	Non
Composition du béton	Analyse chimique	Teneur en chlorures, en sulfates...	Dissolution et dosage par diverses méthodes des éléments recherchés	-	Oui
Composition du béton	Analyse minéralogique	Structure atomique	La réflexion d'une onde électromagnétique projetée sur l'échantillon est analysée (Microscopie optique, diffraction des rayons X, MEB...)	-	Oui

Information recherchée	Nom	Grandeur mesurée	Principe de Fonctionnement	Limites d'utilisation	Prélèvement
Homogénéité du béton (poche d'air...)	Ultra-son	Variation de densité	Les ultra-sons émis sont réfléchis par les interfaces entre deux milieux différents	Les mesures doivent être effectuées sur un parcours d'au moins 30 cm pour être représentatives	Non
Carbonatation du béton	Analyse de la Carbonatation	pH	Le pH est mesuré par colorimétrie avec de la phénolphthaléine	-	Non
Position des armatures métalliques	Pachomètre	Présence et position de matériaux ferromagnétique	Le champ magnétique émis est perturbé par la présence de matériaux ferromagnétiques	la profondeur d'investigation est de 10 à 20 cm au maximum, seul le premier réseau d'armatures est détecté, la résolution (plus petit espacement mesurable entre les armatures) est sensiblement égale à l'enrobage, le diamètre des armatures n'est mesurable avec précision que si les aciers sont suffisamment espacés.	Non
Position des armatures métalliques, présence de poche d'air...	Radar haute fréquence	Variation de densité	Les ondes électromagnétiques émises sont réfléchies par les interfaces entre deux milieux différents	-	Non
Composition d'un élément métallique (tôle, ...)	Analyse métallographique	Structure atomique	La réflexion d'une onde électromagnétique projetée sur l'échantillon est analysée (Microscopie optique, diffraction des rayons X, MEB...)	-	Oui



Information recherchée	Nom	Grandeur mesurée	Principe de Fonctionnement	Limites d'utilisation	Prélèvement
Défauts sur un élément métallique (tôle, ...)	Magnétoscopie	-	L'élément est couvert de poudre ferromagnétique et placé dans un champ magnétique. Les défauts créent des perturbations qui déplacent la poudre	-	Non
Défauts sur un élément métallique (tôle, ...)	Ressuage	-	L'élément est couvert d'un liquide phosphorescent puis essuyé. Le produit toujours présent dans les fissures met en évidence leur présence	-	Non
Défauts sur un élément métallique (tôle, ...)	Contrôle par boîte à vide	-	Un produit moussant est aspiré à travers une pièce. Les bulles révèlent les fissures traversantes	-	Non
Etat de corrosion d'une armature métallique	Potentiel par électrode	Différence de potentiel électrochimique	Le courant induit par la différence de potentiel entre l'armature et l'électrode de référence est mesuré par un voltmètre. Il est fonction du potentiel de l'armature et donc de son niveau de corrosion.	Accès à l'armature nécessaire	Non
Vitesse de corrosion d'une armature métallique	Potentiel par électrode	Différence de potentiel électrochimique	Le courant induit par la différence de potentiel entre l'armature et l'électrode de référence est mesuré par un voltmètre. Il est fonction du potentiel de l'armature et donc de son niveau de corrosion.	Accès à l'armature nécessaire	Non

Information recherchée	Nom	Grandeur mesurée	Principe de Fonctionnement	Limites d'utilisation	Prélèvement
Dimensions d'un élément métallique (tôle, ...) : perte d'épaisseur	Ultra-son	Variation de densité	Les ultra-sons émis sont réfléchis par les interfaces entre deux milieux différents	-	Non
Dimensions d'un élément métallique (tôle, ...) : perte d'épaisseur	Scanner à perte de flux magnétique MFL Scanner magnétique Scanner ACFM	Courants de Foucault	Cette méthode consiste à créer des courants induits par un champ magnétique variable	Uniquement pour les matériaux ferromagnétiques	Non
Dimensions d'un élément métallique (tôle, ...) : perte d'épaisseur	Contrôle par onde guidée, Scanner EMAT	Variation de densité	Les ondes émises sont réfléchies par les interfaces entre deux milieux différents	-	Non
Fuite, bouchon dans les réseaux des eaux pluviales	Caméras d'inspection de réseaux	-	La caméra est fixée à l'extrémité d'un câble et les images transmises sont visionnées sur un écran	Longueur du câble Les canalisations doivent être suffisamment larges et dégagée pour laisser passer la caméra	Non
Stabilité et homogénéité de la structure	Résonance	Vibration	Des capteurs, posés temporairement en différents points d'un ouvrage, mesurent la réponse à des micro-vibrations	-	Non

Figure 40 : Méthodes de contrôle



IX - TRAVAUX ET TRAITEMENTS

Avant toute phase de travaux, il convient de prendre des précautions quant aux travaux envisagés et aux entreprises qui les prennent en charge.

Il convient, avant de lancer les travaux, d'avoir, a minima, un double avis sur l'importance des travaux envisagés et sur les méthodes employées par l'entreprise pour répondre à la problématique.

Pour des travaux d'ampleur significative, il peut être opportun de s'adjoindre les compétences d'un bureau d'ingénierie, en amont des travaux et celles d'un bureau de Contrôle, pour valider les travaux réalisés. Cela permet d'obtenir une indépendance des avis sur les travaux.

Il convient également de garder à l'esprit que les travaux réalisés permettent de réparer un désordre pour un temps donné. Le couple « coût économique des travaux / pérennité de la réparation » est donc à prendre en compte.

IX.1 BETON ARME

IX.1.1 RENFORCEMENT STRUCTUREL

Le renforcement d'une structure peut être envisagé par différentes méthodes parmi lesquelles on peut citer :

- **La réalisation d'une nouvelle paroi en béton armé** ; Le procédé classique consiste à réaliser, à l'intérieur d'une cellule (figure 41) ou à l'extérieur (figure 42), un nouveau voile de béton armé. Comme cela est présenté sur la figure suivante, un nouveau ferrailage est mis en place à l'intérieur de la cellule et le béton est ensuite coulé (coffrage à une face) ou projeté.



Figure 41 : Création d'une paroi interne dans une cellule (à g. : vue du ferrailage ; à d : vue de la paroi terminée)

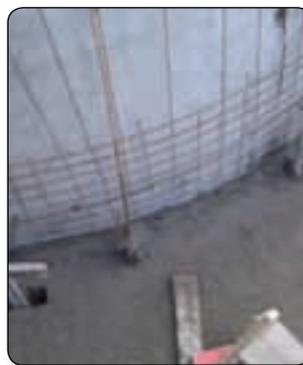


Figure 42 : Création d'une paroi externe dans une cellule

- **L'ajout de profilés métalliques** ; L'association des profilés métalliques aux structures en béton armé permet d'augmenter la capacité portante de la structure. Pour la réalisation d'une structure mixte acier-béton, il faut assurer la qualité de l'interface acier-béton pour bien transmettre les efforts internes. L'intérêt de cette méthode est la rapidité de réalisation in-situ, les pièces métalliques sont préfabriquées en atelier et leur montage s'effectue à l'aide de chevilles ou de tiges ancrées. L'assemblage sur site des éléments décomposés en tronçons facilite ainsi leur transport et leur mise en place.

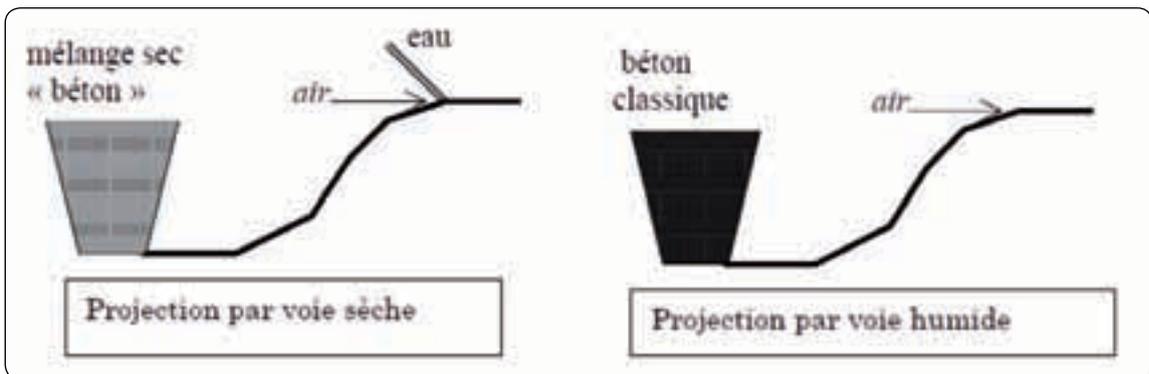


Figure 43 :

Renforcement par câbles de post-tension externe

Document FREYSSINET- Travaux d'Arcis sur Aube

- **La projection de béton** ; suivant la profondeur des dégradations, on procède d'abord au retrait par burinage, repiquage, jet d'eau, sablage... La qualité des matériaux d'adjonction ou de rajouts, doit être au moins égale à celle des matériaux d'origine des ouvrages. En faisant un nombre de passes aussi faible que possible, il faut chercher à réaliser un enrobage régulier et obtenir ainsi une couche compacte.



- **Le chemisage** ; Le procédé classique consiste à chemiser l'élément en augmentant sa section par mise en œuvre d'une épaisseur de béton sur tout le périmètre de l'élément primitif. L'utilisation d'un micro-béton auto compactable, pour remplir les interstices sans mode de vibration, peut s'avérer essentielle. S'il s'agit d'un renforcement avec armatures, il faudra mettre cette armature en place et réaliser le bétonnage par coulage ou pompage.
- **Le gainage métallique** ; Ce type de renforcement est utilisé généralement pour les poteaux ; l'union de la platine à la structure peut se faire par : collage, vissage, ou bien ancrage. Les tôles d'acier sont généralement de qualité courante, leur épaisseur est limitée à 3 mm de façon à leur permettre de suivre les courbures du support.
- **Le renforcement composite** : fibres de carbone...
Ces produits sont utilisés comme produit de renforcement au vieillissement ou à l'augmentation de charge.

Les deux composantes des matériaux composites utilisés dans le renforcement sont :

- * Le renfort, constitué d'un matériau à haute résistance, est le squelette supportant les efforts mécaniques. Il peut se présenter sous de nombreuses formes fibreuses : fibres courtes (mat) ou fibres continues (tissus ou textures multidirectionnelles).
- * La matrice constituée d'une matière généralement organique (Ex : époxy). La matrice donne la forme au composite et transmet les efforts aux renforts.

Il existe une variété très importante de composites et également une forte variabilité dans la composition de chaque ensemble. En particulier, le pourcentage et l'orientation des fibres sont deux paramètres variables qui jouent un rôle essentiel dans le comportement du matériau.

Les produits finis se présentent sous forme de barre ou de tissus composites intégrables au sein d'un matériau (par ex béton) ou pour le renforcement en surface des structures.

En tout état de cause, le choix et la mise en œuvre de la méthode dépendent de nombreux paramètres et doivent être effectués par une société spécialisée.

IX.1.2 RESTAURATION DU BÉTON ET TRAITEMENTS DE SURFACES

La restauration d'une surface bétonnée peut être envisagée par différentes méthodes parmi lesquelles on peut citer :

► **Le traitement des fissures :**

- * Injection de mortier dans les fissures ; le traitement des fissures par injection consiste à faire pénétrer dans des fissures un produit susceptible de créer une liaison mécanique et/ou une étanchéité. Il ne s'applique normalement qu'aux fissures injectables, c'est-à-dire dont l'ouverture est au moins supérieure à 0,1 mm.
- * Traitement des fissures par calfeutrement ; il consiste à colmater sur une certaine profondeur les fissures pour rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou pour empêcher la pénétration de matières solides (risque de blocage des mouvements des fissures). Il s'applique donc aux fissures qui ne mettent pas en jeu la résistance de la structure.
- * Traitement des fissures par pontage et protection localisée ; il consiste à recouvrir en surface des fissures, actives ou non, pour rétablir une étanchéité à l'air ou à l'eau ou pour empêcher la pénétration de matières solides (risque de blocage des mouvements des fissures), tout en les laissant libres de leurs mouvements. Il doit permettre, si nécessaire, la mise en œuvre d'un revêtement de finition. Il s'applique donc aux fissures qui ne mettent pas en jeu la résistance de la structure.

- * Traitement des fissures par protection généralisée ; il consiste à mettre en œuvre sur la surface de la structure fissurée un revêtement qui ferme les fissures et qui peut remplir d'autres rôles tels que l'imperméabilisation et l'aspect, l'étanchéité, la protection contre la pénétration de produits agressifs, etc.

► **La reconstitution de l'enrobage :**

L'objectif ici est de restaurer l'apparence du béton, tout en arrêtant le processus de corrosion des armatures.

- * Élimination des zones dégradées ; Les revêtements en place sont retirés par moyen mécanique ou chimique. Les armatures sont dégagées par burinage, repiquage, jet d'eau, sablage...

Selon la norme NFP 95 101, il convient de dégager un minimum de 2 cm derrière la première armature saine.

Il convient d'éliminer l'intégralité des zones corrodées et de nettoyer ensuite le béton des poussières subsistantes. En cas de nettoyage à l'eau, ces dernières doivent être éliminées par soufflage ou aspiration.



POUR ALLER PLUS LOIN

NFP 95 101 : Ouvrages d'art - Réparation et renforcement des ouvrages en béton et en maçonnerie - Reprise du béton dégradé superficiellement - Spécifications relatives à la technique et aux matériaux utilisés



- * Remplacement des armatures fortement corrodées ; Après contrôle du diamètre résiduel des armatures présentes, les armatures supplémentaires sont mises en place par scellement ou soudure afin de reconstituer une section adaptée. En cas de soudure, celles-ci sont effectuées selon les normes en vigueur.
- * Protection des armatures ; La protection des armatures par un revêtement anti-corrosion est possible mais pas obligatoire si l'enrobage final présente une épaisseur adaptée. Il est préférable de mettre en place la protection ou l'enrobage rapidement après le décapage afin d'éviter l'amorçage de la corrosion.



Figure 44 : Vue d'armatures dégagées et traitées

- * Réfection du béton ; Le mortier utilisé doit satisfaire plusieurs critères comme, par exemple, la tenue verticale sans coffrage, l'imperméabilité à l'eau et aux agents agressifs, un coefficient de dilatation thermique et de module d'élasticité proches de ceux du support, ... Lors de ces travaux, il convient d'apporter une attention particulière à l'apport de matériaux en surépaisseur pouvant modifier la section des éléments et donc les charges et à l'enlèvement du béton dégradé qui peut affaiblir la structure. Un étaieage peut être envisagé.

POUR ALLER PLUS LOIN

Guide technique « Choix et application des produits de réparation et de protection des ouvrages en béton LCPC SETRA
NFP 18-840 et « NF Produits spéciaux destinées aux constructions en béton hydrauliques »
Guides FABEM du Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et de renforcement des structures (STRRES)

- **Les hydrofuges de surface** ; les traitements hydrofuge de surface permettent de lutter contre l'humidité atmosphérique. Ces produits ne sont néanmoins pas des imperméabilisants. Les produits les plus répandus sont les silicones et leurs dérivés mais il existe également des hydrofuges acryliques, des résines fluorées... Ces traitements s'appliquent au rouleau, à la brosse ou encore par pulvérisation sur des surfaces saines, bien nettoyées, fissures importantes (0,3 mm) colmatées. Il faut les appliquer en plusieurs couches jusqu'à saturation de la surface. En effet, la surface poreuse va absorber une partie du traitement. En appliquant plusieurs couches, la surface est bien imprégnée, le traitement sera donc actif plus longtemps. Plus la surface est saturée, plus l'action de l'hydrofuge sera longue.

POUR ALLER PLUS LOIN

Norme P84-403 et EN 1504-2 « Produits et systèmes pour la protection et la réparation de structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité - Partie 2 : systèmes de protection de surface pour le béton »

- ▶ **Le traitement durcisseur** ; il provoque la transformation des carbonates de calcium tendres en fluorures de calcium plus durs et indécomposables. L'opération s'effectue en pulvérisant à refus une solution de fluosilicate de magnésium sur la surface nettoyée. Pour éviter les dépôts blancs, il faut protéger ou rincer pendant la projection. Ce traitement de durcissement est définitif.



POUR ALLER PLUS LOIN

Guide Technique du LCPC, « Protection des bétons par application de produits à la surface du parement », 2002.

guide d'application de l'AFNOR GA P 18-902 de mai 2004 (Recommandations pour la sélection des produits et systèmes de protection de surface des bétons destinés aux ouvrages de génie civil).

- ▶ **Les inhibiteurs de corrosion**. L'inhibiteur a pour but d'abaisser la vitesse de corrosion du métal. Il permet de protéger les aciers sans avoir à purger le béton. Il est mis en place à l'extérieur de la couche de béton, il pénètre à l'intérieur et recouvre (adsorption) la surface du métal. Ces inhibiteurs sont anodiques, cathodiques ou mixtes.

- ▶ **La ré-alkalinisation et extraction des chlorures**

L'objectif de cette méthode est de redonner au béton d'enrobage sa capacité à protéger les armatures. Il s'agit soit d'augmenter le pH du béton qui a été carbonaté, soit d'extraire les ions chlorures qui ont pénétré cet enrobage.

Le principe consiste à polariser l'armature la plus proche du parement à l'aide d'une anode placée sur ce parement et enrobée d'une pâte saturée d'un liquide (électrolyte). Le courant de polarisation circule de l'anode vers l'armature (cathode).

La durée du traitement est de l'ordre d'une à quelques semaines.

- ▶ **Le traitement de protection cathodique**

L'objectif est d'abaisser le potentiel électrochimique de l'armature afin de rendre la vitesse de corrosion négligeable.

Le principe consiste à polariser l'armature dans le béton, à l'aide d'une anode placée de façon permanente sur le parement ou dans l'enrobage. Le courant de polarisation qui circule de l'anode vers l'armature se situe entre 2 et 50 mA/m² de surface d'armature.

Il existe deux techniques :

- * Par courant imposé : un générateur est placé entre l'anode et l'armature ;
- * Par anode sacrificielle : l'anode est reliée directement à l'armature.



POUR ALLER PLUS LOIN

NF EN 12 696 « Protection cathodique de l'acier dans le béton ».

- ▶ **Les revêtements pour le génie civil**. Outre des considérations esthétiques, la mise en place de peinture peut apporter une aide quant à la tenue dans le temps des installations, dans la mesure où elle apporte de l'imperméabilité au support, limitant ainsi la pénétration de l'humidité.

Il y a lieu de retenir qu'en termes d'étanchéité à la pluie, les murs de façades sont classés en catégories, de I à IV (DTU 23 -1 [4.3]), selon qu'ils soient :

- * simples ou doubles ;
- * composés d'isolant hydrophile ou non ;
- * munis d'un dispositif destiné à recueillir les infiltrations et à les rejeter à l'extérieur ;
- * protégés par un revêtement extérieur étanche (bardage ou revêtement à liants plastiques).

Ensuite, selon l'environnement du bâtiment (grandes villes, villes moyennes, rase campagne, bord de mer), sa hauteur et son exposition au vent (façade exposée ou non, cf. figure suivante), il est préconisé de composer les parois avec des murs d'une catégorie I, IIa, IIb, III, ou IV.

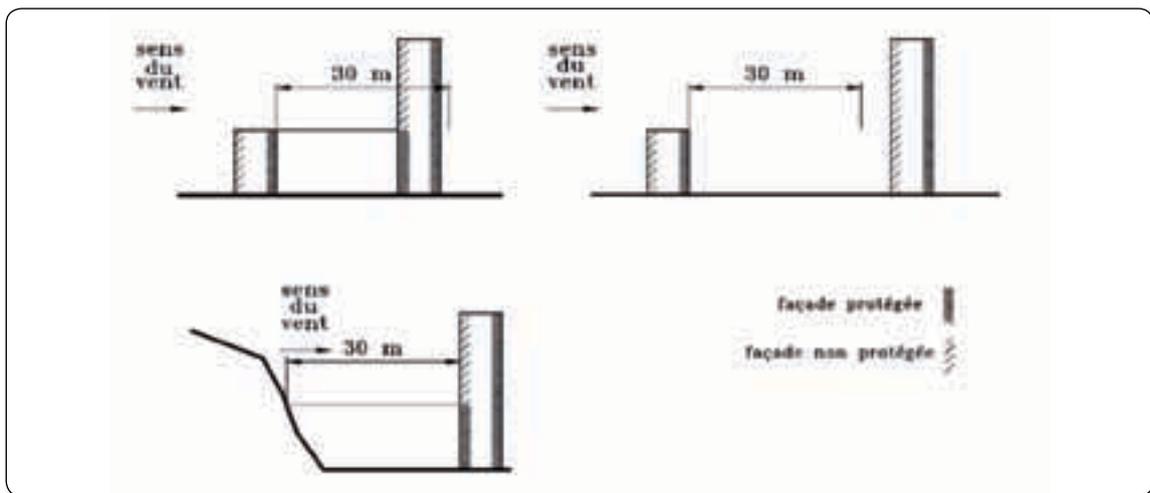


Figure 45 : Définition des critères de définition d'une paroi protégée



POUR ALLER PLUS LOIN

DTU 23-1 [4,3] intitulée «Guide pour le choix des types de murs de façade en fonction du site»

IX.2 STRUCTURES EN ACIER

IX.2.1 REMPLACEMENT D'ÉLÉMENTS ENDOMMAGÉS (RIVETS, TIRANTS...)

Lors du remplacement d'une pièce métallique, il convient de porter une attention particulière aux efforts auxquels elle était soumise.

Une pièce métallique doit être remplacée par une autre pièce présentant, a minima, les mêmes caractéristiques mécaniques. Celles-ci sont définies lors de la conception. Si un doute persiste quant aux caractéristiques mécaniques de la pièce à remplacer (Résistance élastique, allongement à la rupture, ...), il est envisageable de faire réaliser sur celle-ci des essais destructifs afin de les déterminer de manière précise.

Il peut être opportun de réclamer la « carte d'identité » de l'acier utilisé.

Il convient également de s'assurer que cette pièce va être mise en place de telle manière que les efforts initialement supportés par la pièce remplacée soient entièrement repris par la nouvelle pièce.

En effet, une modification de montage, pouvant être engendrée par des contraintes techniques ou par facilité, peut modifier la répartition des charges et ainsi aboutir à la surcharge d'un autre élément de la structure pouvant conduire à la ruine de cet élément.

Il est possible de citer à titre d'exemple le remplacement de boulons. Les boulons présentent des caractéristiques mécaniques encadrés faisant l'objet d'une désignation et d'un marquage.

Les consignes de montage peuvent également recommander des valeurs de serrage, il convient que ces valeurs soient respectées.

Les premiers travaux à envisager sont le remplacement des éléments comme les tirants ou les rivets qui peuvent être endommagés par des années d'exploitation. Le remplacement systématique des éléments endommagés par des éléments identiques est essentiel pour garantir le fonctionnement, conforme au cahier des charges initial, d'une installation dans le temps.

Dans les assemblages les plus sollicités, le desserrage d'un ou plusieurs rivets surcharge les rivets encadrants et le défaut peut s'aggraver rapidement. Il importe donc de remplacer au plus vite les rivets défectueux :

- ▶ soit par de nouveaux rivets au moins du diamètre immédiatement supérieur à ceux remplacés, posés avec soin,
- ▶ soit, si l'on est dans l'impossibilité de poser de nouveaux rivets, par des boulons HR, à condition de remplacer tous les rivets constituant l'assemblage,
- ▶ soit, dans le cas où le nombre de rivets à remplacer est faible, par des boulons calibrés,
- ▶ soit par des boulons injectés.

L'alésage définitif avant la pose du rivet ou du boulon de substitution doit avoir fait complètement disparaître l'ovalisation éventuelle du trou engendrée par l'ébranlement. Il arrive fréquemment que l'état des pièces se soit dégradé dans le temps en raison de l'ébranlement ou que les rivets soient mal posés. D'autre part, l'enlèvement des anciens rivets et la pose de nouveaux, si ces opérations ne sont pas réalisées dans les règles de l'art, fatiguent toujours quelque peu le métal des pièces à assembler (chocs, déformations). Si bien qu'un tablier métallique peut se trouver en plus mauvais état après réparation qu'avant. Ces travaux doivent donc être réalisés par des entreprises qualifiées et nécessitent une surveillance continue.

IX.2.2 RENFORCEMENT STRUCTUREL

En cas de modification de l'utilisation d'une structure ou d'erreur de conception ou de construction, un renforcement peut être effectué sans modification de la structure première. Ces ajouts (de poteaux, de poutres...) doivent être étudiés par une société spécialisée. En effet, il est facile de renforcer une

structure métallique en augmentant la section de ses éléments les plus faibles par ajout d'un profilé ou d'une tôle mais cette facilité ne doit pas faire oublier les précautions à prendre pour réaliser un tel renforcement. Si l'on excepte certains cas particuliers où les efforts dus au poids propre sont nuls ou très faibles (ponts suspendus et viaduc métalliques démontables par exemple), il convient de soulager les efforts dans la structure lors du renforcement, de sorte que ce dernier participe au moins partiellement à la résistance sous poids propre. L'augmentation des sections des membrures modifie la rigidité et la loi d'inertie de la structure et il convient d'en tenir compte dans le calcul. Il ne faut pas oublier de vérifier et éventuellement de renforcer les goussets d'attache.



POUR ALLER PLUS LOIN

Guide FAME1 du Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et de renforcement des structures (STRRES)

IX.2.3 MODIFICATIONS STRUCTURELLES : EVITER LES ZONES DE CONCENTRATION DE CONTRAINTES, AMELIORER LE COMPORTEMENT A LA FATIGUE.

Le bridage des soudures, les variations brutales de géométrie (...) constituent des zones de concentration de contraintes et peuvent générer des initiations de fissure sous effets de sollicitations répétées (fatigue). Il convient d'adopter des dispositions constructives adaptées pour épanouir les concentrations de contraintes, tout particulièrement sur les matériaux métalliques anciens de soudabilité médiocre.

Pour améliorer le comportement d'assemblages soudés, diverses techniques peuvent être mises en œuvre, par exemple :

- ▶ le meulage du bombé des soudures bout à bout,
- ▶ l'élimination de caniveaux par rechargement,
- ▶ la refusion TIG permet un raccordement adouci en pied de cordon d'angle ; il peut aussi être employé des électrodes à coulabilité améliorée,
- ▶ le shoot peening ou grenailage de précontrainte permet par écrouissage à froid l'inversion des contraintes résiduelles de traction dues au bridage.

Toutefois, ces techniques sont efficaces uniquement si elles sont appliquées au niveau de la zone d'initiation des fissures de fatigue.

La technique d'arrêt de fissure au moyen d'un trou peut être employée en phase provisoire ou définitive en accompagnement d'un renforcement par placage par exemple. Pour être efficace, le trou (environ 20 mm) doit être réalisé en pointe de fissure, ce qui nécessite généralement une localisation par ressouage. Le trou ne doit pas être rebouché, même si les lèvres de la fissure sont ressoudées.



IX.2.4 PROTECTION ANTICORROSION : REVÊTEMENTS, MODIFICATIONS STRUCTURELLES

Les structures métalliques doivent être régulièrement traitées avec une protection anticorrosion (peinture...). Cette étape récurrente est primordiale pour maintenir une installation en état de fonctionnement et prolonger sa durée de vie.

Néanmoins, certaines dispositions constructives anciennes génèrent des espaces entre pièces qui rendent impossible l'application d'une protection anticorrosion. L'étanchéité pourra être obtenue par rechargement et/ou par la pose d'une fourrure soudée sur les tôles ou les profilés en place. Cette technique présente des difficultés d'exécution et peut présenter certains risques de fissuration sur des aciers anciens non soudables. L'étanchéité peut aussi être obtenue par masticage mais nécessite une maintenance rigoureuse.

IX.2.5 CAS PARTICULIER DES SOUDURES

Il convient d'être particulièrement vigilant quant aux travaux de soudure. En effet ces travaux doivent faire l'objet d'une attention particulière en termes de qualification de l'opérateur et de type de soudure réalisée.

Les opérateurs doivent présenter une qualification répondant à une norme européenne. Cette qualification a pour principal objectif la vérification de la dextérité et de l'habileté d'une personne dans l'exécution d'un travail précis de soudage et de reconnaître l'aptitude du soudeur à mettre en œuvre des consignes précises, rédigées sur un descriptif de mode opératoire de soudage (les bords à souder, le choix des métaux d'apport et des gaz industriels de soudage, les techniques de soudage à mettre en œuvre, les précautions à respecter).

La durée de validité d'un certificat de qualification est de deux années à compter de la date d'obtention des résultats conformes de l'essai pratique.

Tous les six mois, le certificat doit être visé et reconduit par l'employeur ou le superviseur.

Deux soudures au minimum doivent être réalisées par le soudeur tous les six mois avec contrôle non destructif de compacité pour les « bout à bout » et contrôle destructif pour les soudures d'angle.

Le soudeur ne doit pas avoir d'interruption d'activité dans les travaux de soudage de plus de six mois.

Tous les deux ans, le certificat de qualification doit être reconduit par un organisme officiel de certification avec présentation d'un dossier de suivi de travaux de soudage du soudeur ou sur essai pratique.

Un exemple de certificat d'habilitation se trouve en figure suivante.



TYPE DE CONTROLE ou D'ESSAIS Type of qualification tests	Effectué et accepté Performed & accepted	Non vérifié Not tested
- Visual / Visuel	X	
- Radiographie / Radiography		X
- Texture / Fracture		X
- Pliage / Bend		X
- Traction avec entaille Notch tensile		X
- Microscopie / Macro exam	X	
- Ultrasons / US testing		X

Figure 46 : Certificat d'habilitation de soudeur



POUR ALLER PLUS LOIN

Normes de qualification des soudeurs
NF EN 287-1 (fusion des aciers), EN ISO 9606 (Aluminium et ses alliages), EN 1418, B540.9, FDA 88111, ASME, B527.9, AIR 0191, Gaz de France ATG 540...

D'autre part, les techniques de soudure sont définies par le concepteur sur les plans de réalisation. Il convient que l'opérateur soit en mesure de comprendre les consignes et de réaliser la soudure conformément à ces dernières.



Sur la figure suivante, les endroits où les passes montantes et les passes descendantes seront réalisées ont été identifiés sur la structure. Les passes montantes seront face aux tirants.



Figure 48 : Soudures sur un silo palplanche

Le choix entre ces techniques sera réalisé par le concepteur de l'installation. Pour une réparation, il sera essentiel de respecter les choix faits lors de la conception.

X - PERSONNEL EN CHARGE DES INSPECTIONS

Le personnel en charge des inspections est formé aux problématiques des désordres sur les structures.

Niveau 1

Les personnes en charge des visites de niveau 1 devront être capables de remplir la fiche de visite adaptée et ainsi être capables d'identifier des défauts visuels majeurs sur les structures.

L'information devra présenter, a minima, la feuille de relevés.

Cette démarche aura pour but d'améliorer la capacité des opérateurs à remarquer, identifier et faire remonter l'information quant aux désordres et aux différents évènements précurseurs.

Ces informations, issues des personnes en charge des visites de niveau 1, seront transmises à la personne en charge des visites de niveau 2.

Niveau 2

Ces personnes auront la charge de l'analyse des fiches de niveau 1 et ainsi celle du déclenchement de la visite de niveau 2 qu'elles réaliseront.

Compétences nécessaires :

- ▶ Les grands principes de construction (matériaux, éléments porteurs, ...);
- ▶ Les causes de défaillances majeures des installations;
- ▶ Les signes avant-coureurs de désordres;
- ▶ Les méthodes de contrôle;
- ▶ Les solutions (réparations) possibles.

Les personnes concernées auront des compétences leur permettant d'avoir un avis éclairé sur les désordres, les actions à mener et les travaux à réaliser.

Naturellement, ces personnes pourront faire appel à des sociétés extérieures afin de consolider leur expertise.

Leurs compétences devront également leur permettre d'échanger avec les différents acteurs : bureau d'études, de construction, entreprise de génie civil, ...



XI - GLOSSAIRE

Alcali réaction : Réaction entre les granulats du béton et les alcalins de la pâte de ciment, pouvant se manifester sous la forme de faïençage, de gonflement puis d'éclatement du béton.

BARPI : Bureau d'analyse des risques et pollutions industriels

Carbonatation : Réaction chimique de combinaison de la chaux libre du béton avec le gaz carbonique de l'air, entraînant notamment une baisse du Ph du béton susceptible de favoriser la corrosion des armatures.



Figure 49 : Contreventement

Contreventement : système statique destiné à assurer la stabilité globale d'un ouvrage vis-à-vis des effets horizontaux issus des éventuelles actions sur celui-ci (par exemple : vent, séisme, choc, freinage, etc.). Il sert également à stabiliser localement certaines parties de l'ouvrage (poutres, colonnes) relativement aux phénomènes d'instabilité (flambage ou déversement).

Désordres : Ecart entre l'état d'un élément ou d'une partie d'un élément et son état prévu lors de sa conception.

Ecaillage : Décollement du mortier de peau laissant apparaître les agrégats.

Efflorescence du béton : Apparition en surface du béton ou mortier d'un dépôt cristallin souvent blanchâtre dû à la carbonatation de la chaux

Enrobage : distance entre la surface du béton et celle de l'armature la plus proche

Epaufures : Eclatement du béton avec chute de fragments.

Faïençage : Phénomène de microfissuration régulière et superficielle de la peau des enduits et bétons, dû à un retrait trop important ou trop rapide, ou à un phénomène d'alcali-réaction.

Fluage : Déformation lente que subit un matériau soumis à une charge constante et permanente.

Joint de dilatation : Joint de structure qui divise un ouvrage en plusieurs parties indépendantes de dimensions limitées, afin de reprendre les mouvements dus aux déformations thermiques sous des écarts de température

Palplanche : Paroi constituée de tôles métallique enclenchées les unes aux autres.



XII - ANNEXES

Recueil de l'accidentologie

Date	Localisation	Phénomène	Conséquence	Causes
1988	Blaye	Effondrement d'une paroi de cellule dans un silo de 40 000 t de maïs.	Déversement de 450 t de grains sur un quai.	
1989	Meru	Effondrement d'un silo béton.	Le trafic des premiers trains du matin est interrompu sur la voie ferrée Paris- Le Tréport.	
1990	Monthois	Effondrement d'un silo.		
1993	Saint Jean de Sauves	Le pignon sud d'un silo s'effondre.	Pertes d'exploitation importantes. Travaux de confortement.	Malfaçons et fautes d'exécution à la construction.
1995	Monthois	Un chauffeur aperçoit du grain s'échapper au-dessus de la goulotte de chargement. Il ferme la vanne et déplace son camion. Le responsable du silo demande une vidange à vitesse réduite de la cellule. Au bout de 10 min, la fissure, sous la pression des grains, s'est propagée jusqu'au bas de la cellule qui éclate libérant 500 t de grains.		Déficit important en armatures horizontales, Traces de corrosion sur 90% des aciers, Diminution de la section des aciers par étirement au niveau des zones de rupture. Présence de nombreux vides autour des aciers et présence de fissures verticales le long des barres de vérin sur la paroi interne de la cellule.
2002	Vailly sur aisne	En cours de vidange par le système latéral de vidange. On observe la chute de petits morceaux de béton puis d'un morceau de 3 t.		Ajout après construction d'une vidange latérale.



date	Localisation	phénomène	Conséquence	Causes
2002	Jussy	La paroi en béton d'une cellule verticale d'un silo se fissure sur les 25 m de hauteur.	Une centaine de tonnes de maïs se déverse détruisant un mur permettant l'accès aux installations de commande situées au niveau du sol.	Vieillessement du béton armé avec corrosion du ferrailage .
2003	Nogent sur Seine	Au cours de sa vidange une cellule béton s'éventre sur sa demi-périphérie et sur 10 m de haut.	Épandage de plusieurs centaines de tonnes de grains et chute de bloc de béton dans la cour de l'établissement.	Manque de ferrailage du béton lors de la construction du silo.
2004	Seux	Rupture mécanique de la structure d'une des 4 cellules métalliques (diamètre : 10,7 m ; hauteur : 17,8 m) construite en 1985 et renforcée 2 ans plus tard.	L'accident a endommagé la tour de manutention, enseveli des fosses de réception de grains et détruit une case d'ammonitrates dans un bâtiment de stockage d'engrais.	Déchirure de la paroi aux points de fixation des tôles sur un poteau .
2004	Vilette sur Aube	L'une des 20 cellules en béton d'un silo de céréales se fissure à 10 m de haut sur une longueur de 3 m.	450 des 1 043 t de pois stockées se répandent sur le sol.	
2006	Anglure	Une cellule d'un silo métallique se rompt et s'effondre.	Déversement de 1 300 t de blé dans l'enceinte de l'établissement jusqu'à 20 m de la capacité.	La rupture initiale est localisée le long des files de boulonnage en partie basse de la cellule à proximité de 2 trous d'homme superposés. Les experts établissent que des contraintes excessives dans la zone d'assemblage proche de ces trous sont à l'origine de cette rupture. La superposition de ces orifices sur une même cellule est défavorable pour la répartition des efforts et le boulonnage de la plaque de renfort ne permet pas une transmission efficace des efforts

date	Localisation	phénomène	Conséquence	Causes
2006	Ennezat	Un silo de 1 000 t de maïs s'effondre et menace une seconde cellule contiguë.		
	Pezens	Une cellule métallique de 1 000 t de blé d'un silo de 4 500 t se rompt sur toute sa hauteur.	Déversement des grains sur la route communale jouxtant le site. Les 2 cellules identiques à la cellule accidentée situées de part et d'autre de celle-ci sont déformées à la suite de contraintes mécaniques dues aux installations de manutention reliées à la tour de manutention.	L'accident est consécutif à la rupture des boulons d'assemblage verticaux entre 2 panneaux de la virole de la cellule Les 2 cellules déformées, contenant respectivement 570 et 520 t de blé, sont munies d'un renforcement circulaire à leur base (câble). Par contre la capacité accidentée ne dispose d'aucun renfort particulier.
2007	Vaux sur Blaise	Un silo métallique de maïs de 14 m de haut et 5,60 m de diamètre menace de s'effondrer sur un bâtiment d'élevage.		
2008	Berzieux	Le voile en béton de l'une des 3 cases de stockage de céréales d'un silo de 13 920 m ³ se rompt.	Le voile percute et projette une cuve de fioul. Le fioul se répand et pollue les sols. La zone souillée est couverte puis 80 m ³ de terres polluées sont excavées.	La corrosion du ferrailage du béton armé est à l'origine de la rupture de la paroi au niveau des fondations du silo.
2008	Saint Hilaire sur Puisseaux	Rupture des parois d'un silo palplanche .	Un épandage de 2 100 t de blé et 1 000 t de maïs Le déversement de grains ensevelit partiellement un réservoir de propane de 95 m ³ situé à une quinzaine de mètres du silo provoquant la rupture d'une canalisation et une fuite de GPL.	



date	Localisation	phénomène	Conséquence	Causes
2009	Faux vesigneul	Effondrement de la cellule métallique contenant 2 600 t de blé.		Aucune trace de corrosion sur la capacité n'est visible La rupture d'un poteau latéral de soutien de la cellule serait à l'origine de l'accident.
2009	Gouezec	Affaissement d'une cellule métallique .		Un affaissement du sol, ramolli par la pluie, est une hypothèse émise.
2010	Estralin	Une cellule métallique de 300 t construite en 1964 se rompt.		
2011	Tonneins	Une cellule métallique de 150 t de maïs se rompt sur 1,5 m en partie basse : rupture de la tôle à la jonction entre le cône et la robe.	Un épandage de grains et la déformation du toit de la capacité par dépression.	La cellule ne présentait pas de signes de vétusté apparents .
2012	Rouen	Ouverture d'une cellule béton .	Epannage de grains.	Défaut de ferrailage et d'enrobage. Sous dimensionnement possible au regard du débit et du taux de rotation très importants.



Catalogue de désordres

Structure béton armé

Description du défaut	Cotation	Illustrations
Armatures apparentes sans éclatement Localisée Étendue	 D1 D2	
Nids de cailloux	D1	
Désagrégation du béton	D2/D3	
Ecailage Stabilisé Évoluant (cf. visite précédente)	 D1 D2	



Description du défaut	Cotation	Illustrations
Faïençage Stabilisé Evoluant (cf. visite précédente)	D1 D2	
Fissures isolées < 0,2 mm Entre 0,2 mm et 1mm > 1 mm	D1 D2 D3/D3P	
Fissures multiples < 0,2 mm Entre 0,2 mm et 1mm > 1 mm	D1 D2 D3/D3P	



Description du défaut	Cotation	Illustrations
<p>Béton éclaté</p> <p>sans mise à jour des armatures</p> <p>armatures apparentes peu altérées</p> <p>Réduction importante des sections ou rupture</p>	<p>D1</p> <p>D2</p> <p>D3</p>	
<p>Fondations visibles, affouillement</p> <p>Localisé</p> <p>Étendu</p>	<p>D1</p> <p>D3</p>	
<p>Défaut de verticalité</p> <p>Stabilisé, sans fissure > 0,2 mm</p> <p>Stabilisé, avec fissures > 0,2 mm</p> <p>Non stabilisé (cf. visite précédente)</p> <p>Fissures > 1 mm</p>	<p>D1</p> <p>D2</p> <p>D3</p> <p>D3</p>	



Description du défaut	Cotation	Illustrations
Affaissement Stabilisé, sans fissure > 0,2 mm Stabilisé, avec fissures > 0,2 mm Non stabilisé Fissures > 1 mm	D1 D2 D3 D3	
Tassement Si à proximité immédiate de la structure	D2 D3	
Lézardes (> 1cm)	D2	

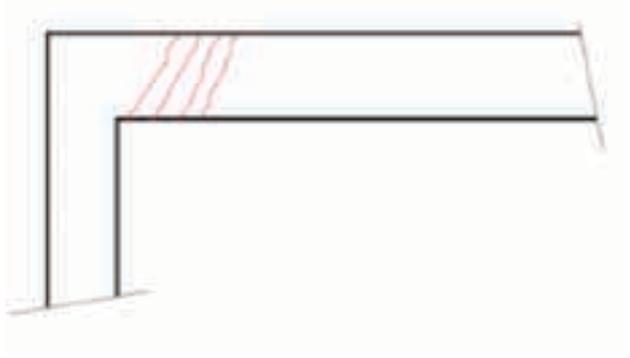


Description du défaut	Cotation	Illustrations
Fissures « sous chargement »	D2	 <p>fissuration du mur suite à la charge induite par la poutre métallique</p>
	D2	 <p>murs de soutènement non liés</p>
	D3	 <p>fissures sur poteau et ferme en béton</p>



Description du défaut	Cotation	Illustrations
Fissures dans la dalle d'un silo plat Localisées Généralisées	D1 D2	
Fissuration de type faïençage ou reprise de bétonnage Ouverture inférieure à 0.5 mm Éclatement de la couverture béton des armatures	D1 D2	
Fissuration linéaire qui suit le tracé des armatures Moyenne (0.5 à 1 mm) Forte (sup à 1 mm) Traduit une corrosion des aciers	D1 D2	



Description du défaut	Cotation	Illustrations
<p>Fissuration structurelle sur appui</p> <p>Fines fissures à 45°</p> <p>Fissures marquées à 45°</p> <p>Ces fissures, même fines, traduisent un problème structurel</p>	<p>D2</p> <p>D3</p>	
<p>Fissuration structurelle en travée</p> <p>Fines fissures</p> <p>Fissures ouvertes à plus de 1 mm</p> <p>ces fissures, même fines, traduisent un problème structurel</p>	<p>D2</p> <p>D3</p>	   <p>Poutre en partie haute d'un silo coque</p>



Description du défaut	Cotation	Illustrations
Stagnation d'eau en pied de la structure	D2	
Cas des musoirs		
Armatures apparentes Désordre de faible surface Désordre étendu ou multiple	D1 D2	
Fissures < 0,2 mm Entre 0,2 mm et 1mm > 1 mm	D1 D2 D3/D3P	 <p>Cause possible : Création d'un passage pour une gaine de ventilation</p>
Musoirs pétales Ouverture entre les éléments	D2	 <p>Réparation : Cerclage</p>

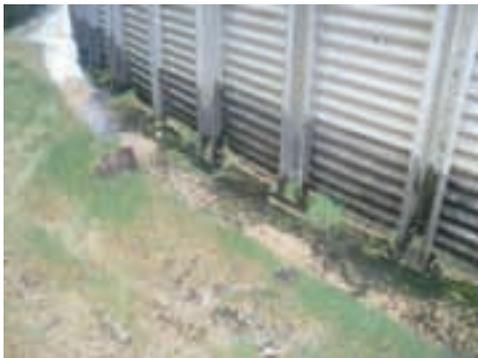
Cellules métalliques

Description du défaut	Cotation	Illustrations
Corrosion importante jonction robe sol	D2	
Fixation des pieds de poteaux défaillante Absence d'écrou	D2 D3	
Déplacement ou défauts des platines Si généralisé	D2 D3	
Déformation du pied Si généralisée	D2 D3	



Description du défaut	Cotation	Illustrations
Assemblage des montants	D2	
Boulons manquants/ écrou non serré	D3	
Défaillance de fixation des tôles	D2	
Si généralisée	D3	



Description du défaut	Cotation	Illustrations
Fissures	D2	 
Si étendues	D3	 
Stagnation d'eau en pied de cellule	D1	
Si début de corrosion	D2	
Corrosion de tôles	D2	
Si étendues	D3	
A confirmer par une visite par l'intérieur		



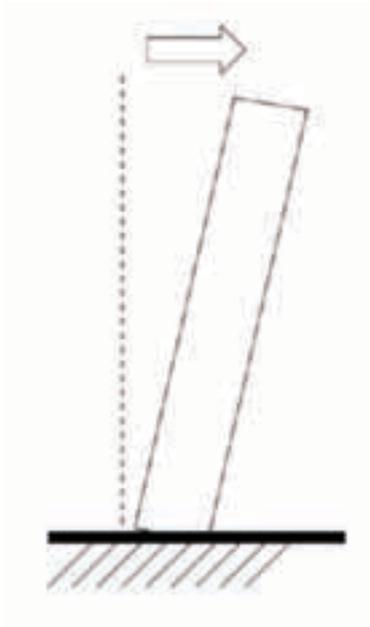
Description du défaut	Cotation	Illustrations
Sur une surface importante	D3	
Déformation de poteaux	D2	
Produits collés sur les parois Vérifier l'absence de corrosion sous le produit	D1	



Palplanche

Description du défaut	Cotation	Illustrations
Défauts de fixations des tirants	D2	
Absence de tirants	D2	
Déformation des tirants	D2	
Corrosion des tôles	D2	
Si corrosion étendue	D3	



Description du défaut	Cotation	Illustrations
Déformation des tôles	D3	
Défaut de verticalité Perceptible Fort	D2 D3	

Visite de niveau 1

Cellules de stockage/magasin

	Localisation	Action à réaliser définie par la personne formée (C.f. Chapitre X) Exemple d'action possible : - Réparation (service maintenance ou entreprise extérieure) - Visite de niveau N2
<input type="checkbox"/> Fuite de grain sur les cellules		
<input type="checkbox"/> Endommagement des éléments en béton armé (chute de blocs de béton, fissures importantes, ferrailage apparent, ...)		
<input type="checkbox"/> Endommagements des éléments métalliques (corrosion, déformation, ...)		
<input type="checkbox"/> Tirants cassés ou déformés		
<input type="checkbox"/> Défaut majeur : verticalité, rotundité, ..		
<input type="checkbox"/> Fondations découvertes		

Passerelles/échelles

	Localisation	Action à réaliser définie par la personne formée (C.f. Chapitre X) Exemple d'action possible : - Réparation (service maintenance ou entreprise extérieure) - Visite de niveau N2
<input type="checkbox"/> Éléments manquants ou défectueux : barreau, garde-corps, ...		
<input type="checkbox"/> Corrosion		



Stockage de liquide

	Localisation	Action à réaliser définie par la personne formée (C.f. Chapitre X) Exemple d'action possible : - Réparation (service maintenance ou entreprise extérieure) - Visite de niveau N2
<input type="checkbox"/> Fuite de liquide		
<input type="checkbox"/> Corrosion		
<input type="checkbox"/> Défaut majeur : verticalité, rotondité, ...		

Réseau d'eau pluviale

	Localisation	Action à réaliser définie par la personne formée (C.f. Chapitre X) Exemple d'action possible : - Réparation (service maintenance ou entreprise extérieure) - Visite de niveau N2
<input type="checkbox"/> Gouttière endommagée ou bouchée		
<input type="checkbox"/> Circulation ou stagnation d'eau au pied des structures		

Bâtiment/usine/moulin/ tour de manutention

	Localisation	Action à réaliser définie par la personne formée (C.f. Chapitre X) Exemple d'action possible : - Réparation (service maintenance ou entreprise extérieure) - Visite de niveau N2
<input type="checkbox"/> Déformation importante des éléments porteurs (poteaux, poutres, murs)		
<input type="checkbox"/> Corrosion des éléments métalliques (poteaux, poutres, planchers)		
<input type="checkbox"/> Endommagement des éléments en béton armé (chute de blocs de béton, ferrailage apparent, ...)		
<input type="checkbox"/> Fondations découvertes		