



Journée COTITA

« Gestion d'un patrimoine
d'ouvrages terrestres »

Rennes, le 4 mars 2015

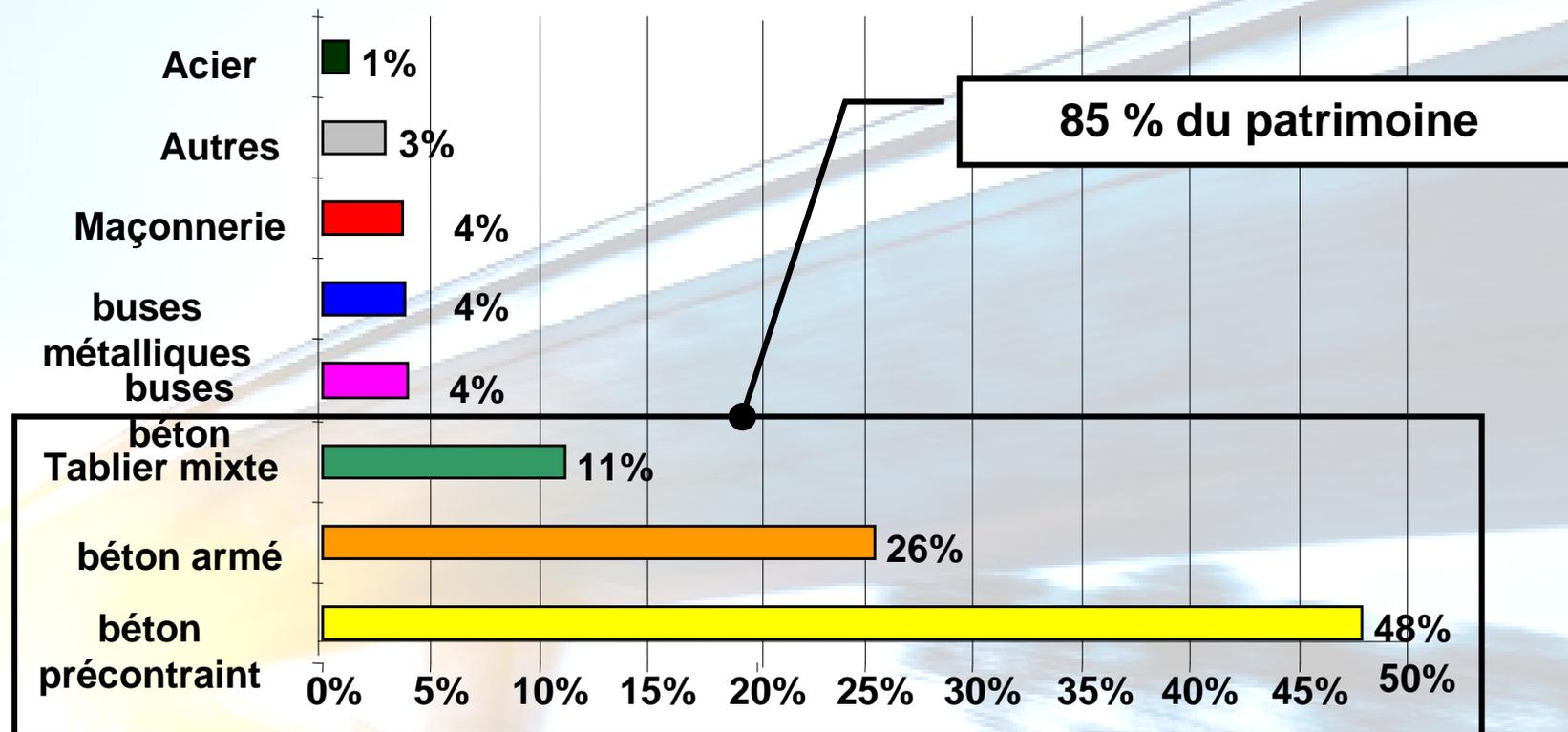
Les Inspections Ciblées

Benoit THAUVIN, Cerema (DTEROuest)

Christian CREMONA, Cerema (DTecITM)

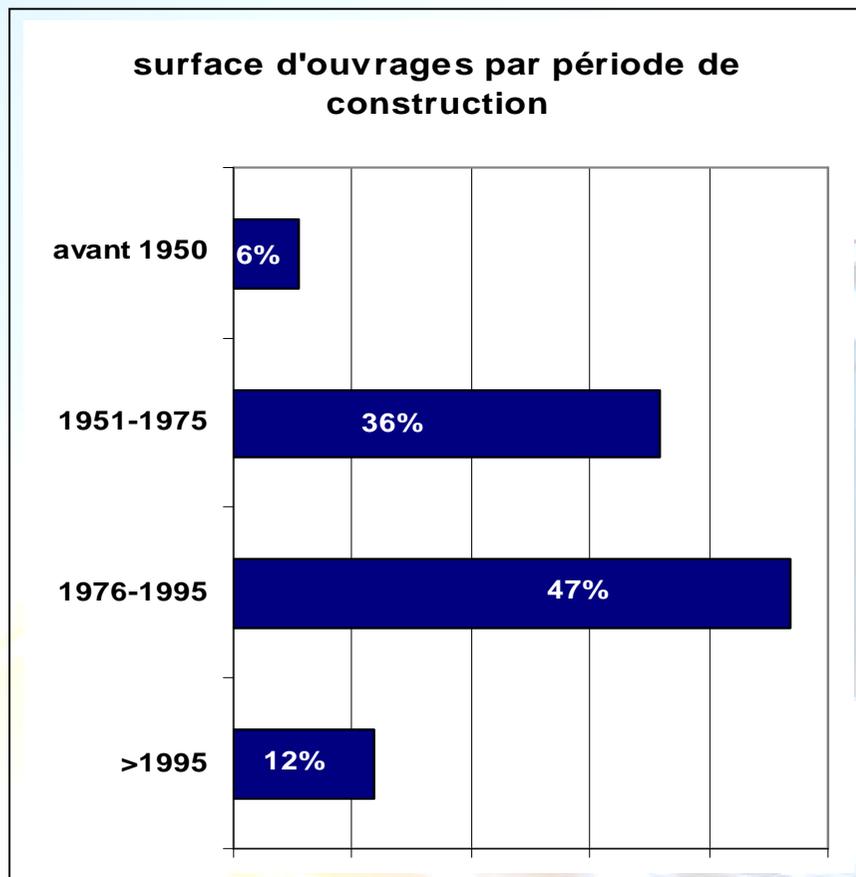
Contexte

Surface de tablier (%) par type de matériau



Patrimoine des ponts sur le RRN

Contexte



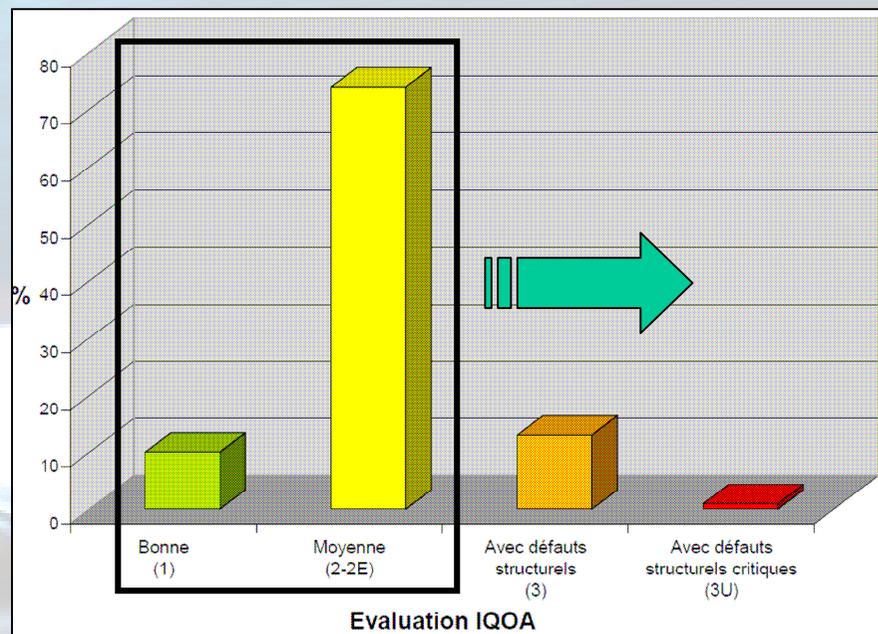
Patrimoine des ponts sur le RRN

~ 40 % > 36 ans

~ 60 % entre 0 et 36 ans

Parc vieillissant

Probabilité de dégradations forte à moyen/long terme



Contexte

Projet de nouvelles infrastructures

Déconstruction des ouvrages



Contraintes :
budgétaires, environnementales,
d'exploitation

Surveillance et maintenance des ouvrages existants
Défi majeur pour les maîtres d'ouvrages gestionnaires

Optimisation de la surveillance et de la maintenance

Mieux gérer ses ouvrages

- Définir des priorités d'intervention
- Identifier les risques de dégradation et les points critiques
- Mieux évaluer l'état des ouvrages : cibler les interventions
- Développer la **maintenance préventive**



Besoin de méthodologie

Contexte

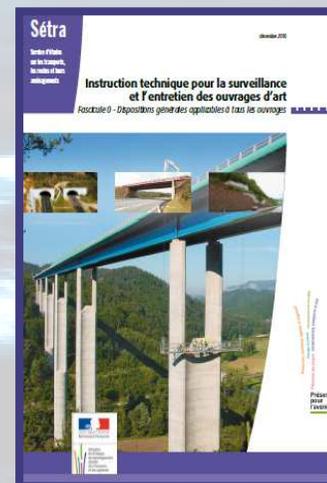
L'ITSEOA version 2010 :

Organisation basée sur :

- Contrôle annuel : visite rapide ne nécessitant pas de compétences particulières – Détection de désordres graves ou d'évolution rapide de désordres,
- Visite d'évaluation (triennale) : selon la méthode IQOA avec ou sans moyen d'accès, Formalisation sous forme d'un PV,
- Inspection Détaillée (tous les 3, 6 ou 9 ans) : sur des ouvrages pré-identifiés, réalisée par du personnel qualifié avec des moyens d'accès.



Évaluation précise de l'état des ouvrages
Mais ne permet pas de programmer des actions de maintenance préventive



Objectifs et champs d'application

Optimiser et organiser la maintenance préventive

Maintenance préventive : ensemble des opérations visant à limiter voire stopper les processus de vieillissement à l'origine de désordres ou dégradations sur les ouvrages

Méthode

Déclencher des actions de maintenance préventive pour :

- éviter l'apparition de pathologie,
- maintenir et prolonger la durée d'utilisation de l'ouvrage.

Optimiser la gestion des ouvrages en complétant le suivi visuel :

- par des contrôles quantitatifs du vieillissement des matériaux,
- en optimisant le nombre de contrôles.

Organiser les programmes de maintenance préventive :

- en déterminant un indice de vieillissement par ouvrage,
- en définissant la périodicité des inspections.



Objectifs et champs d'application

Inspections **ciblées** selon trois considérations :

- 1 Portent sur des phénomènes de vieillissements spécifiques identifiés comme sensibles :
 - **Corrosion du béton armé**
 - **Fatigue assemblages métalliques**
- 2 Menées sur des zones représentatives des ouvrages (là où les risques de vieillissement sont les plus importants)
- 3 Réalisées soit sur l'ensemble des ouvrages d'un patrimoine, soit sur un échantillon d'ouvrages représentatif d'un patrimoine



Objectifs et champs d'application

Inspections **ciblées** :

- Complémentaires aux visites d'évaluation et aux inspections détaillées
- Quantification du vieillissement des matériaux ou des structures
- Utilisation de méthodes d'évaluation spécifiques éprouvées

~~Évaluation d'un
endommagement déjà
constaté et de son évolution~~



Diagnostic ou Régime de la
surveillance renforcée ou de
la haute surveillance

**Anticipation d'une dégradation future pour
déclencher des actions préventives**

Inspection ciblée # Diagnostic d'ouvrage préalable au montage d'un
projet de réparation

Objectifs et champs d'application

Les inspections ciblées ne s'appliquent pas aux ouvrages suivants :

- Ouvrages pathologiques (notés 3 ou 3U selon IQOA par ex) : ne relèvent plus de la maintenance préventive ...
- Ouvrages dits « sensibles » concernés par des analyses de risques:
 - VIPP, buses métalliques, massifs en terre armée
- Ouvrages en maçonnerie
- Buses béton
- Tranchées couvertes

Les inspections ciblées s'appliquent aux ouvrages suivants :

	Processus d'endommagement suivi	
	Corrosion du béton armé	Fatigue des assemblages
Ponts en béton armé	X	
Ponts en béton précontraint	X	
Ponts métalliques		X
Ponts mixtes	X	X

Étapes de déploiement des inspections ciblées

Préparation de l'inspection ciblée

- Analyse préalable du dossier d'ouvrage.
- Liste des aléas potentiels à suivre : pénétration de chlorures, fissures de fatigue...
- Identification des zones représentatives à inspecter.
- Pré-visite destinée à préciser les paramètres de l'inspection ciblée : nombre et type d'essais, accessibilité, moyen d'accès, contraintes diverses (circulation, ...).

Réalisation de l'inspection ciblée

Exploitation des résultats

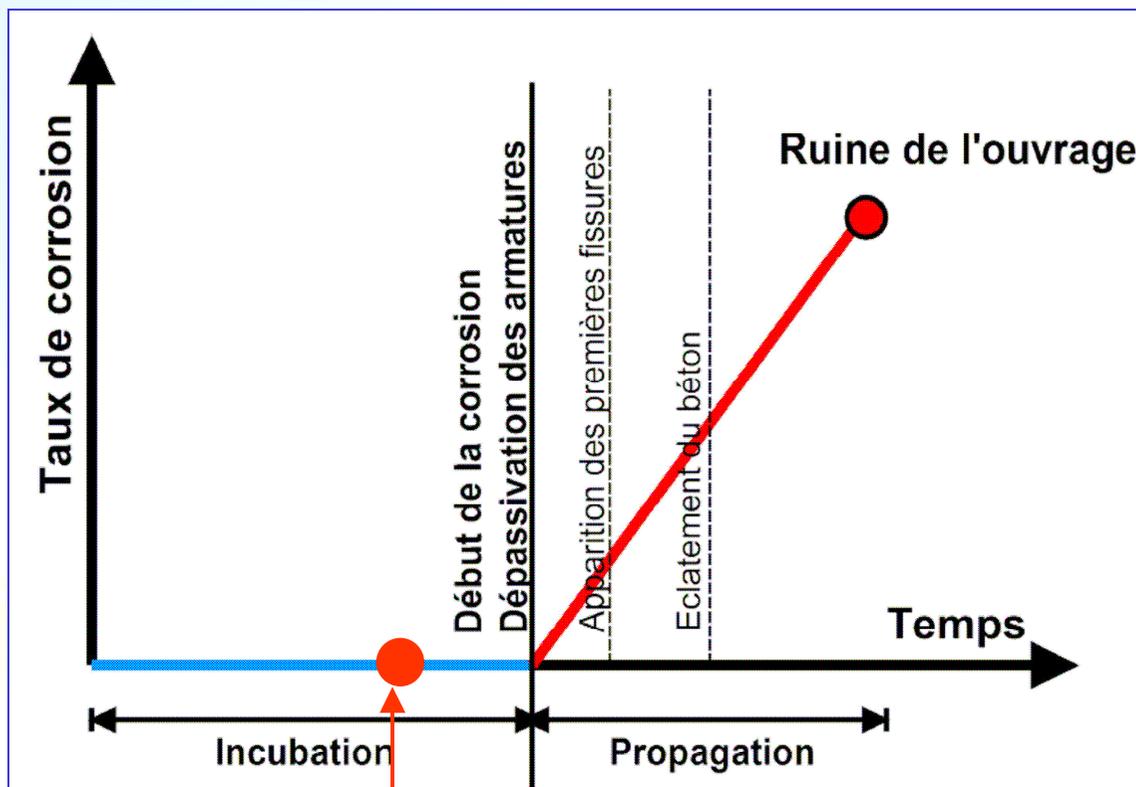
- Calcul d'un indice de vieillissement pour chaque zone représentative inspectée. La combinaison de ces indices donnera un indice global de vieillissement l'ouvrage.
- Détermination de la date de la prochaine inspection.

Conclusions et suites à donner

- Vieillissement normal des zones critiques.
- Vieillissement anormal des zones critiques. Dans ce cas, un diagnostic détaillé doit être mené avant toute action corrective.

Inspection ciblée « Béton armé »

Corrosion : cause principale de dégradation des structures en BA



Processus de corrosion :

- Carbonatation (CO_2)
- Pénétration des chlorures

Inspection Ciblée

Inspection ciblée « Béton armé »

Classes d'environnement des ouvrages (aléa) :

	Classe	Type d'environnement	Classes d'exposition selon EN206
Carbonatation	1c	Environnement rural	XC4
	2c	Environnement urbains ou industriel	XC4
Chlorures	1d	Absence de salage	XD1
	2d	Salage peu fréquent	XD1
	3d	Salage fréquent	XD2
	4d	Zones de marnage et de submersion marine ou salage très fréquent	XS2, XS3, XD3

Classes de matériaux des ouvrages (vulnérabilité) :

Bétons ordinaires

Bétons de qualité supérieure

Inspection ciblée « Béton armé »

Nombre de zones à inspecter et processus à évaluer

		Vulnérabilité	
		Béton de qualité supérieure	Béton ordinaire
Aléa	Environnement (1c;1d)	Classe 1	Classe 3
	Environnement (2c;1d) ou (1c ou 2c;2d)	Classe 2	Classe 4
	Environnement (1c ou 2c;3d)	Classe 5	Classe 7
	Environnement (1c ou 2c;4d)	Classe 6	Classe 8

Classes de criticité vis-à-vis du risque de corrosion

	Phénomène prédominant	Essai à réaliser	Nombre de zones
Classes 1 et 2	Carbonatation	Mesure du front de carbonatation	4 (Tablier, appuis)
Classes 3 et 4	Carbonatation & pénétration des chlorures	Mesure du front de carbonatation Mesure du front de chloruration	4 (Tablier, appuis)
Classes 5 à 8	Pénétration des chlorures	Mesure du front de chloruration	6 (Tablier, appuis, autres)

Optimisation des essais et du nombre de zones à investiguer

Inspection ciblée « Béton armé »

Détermination des zones à inspecter sur un ouvrage :

Choix effectué en fonction :

- des données du dossier d'ouvrage
- d'une pré-visite de l'ouvrage

Critères à considérer :

- agressivité de l'environnement (chlorures, sels, gel, humidité)
- assainissement (étanchéité, collecte et évacuation des eaux, projection, ruissellement)
- anomalies détectées lors de la construction (enrobage, béton)
- constats effectués lors de la pré-visite

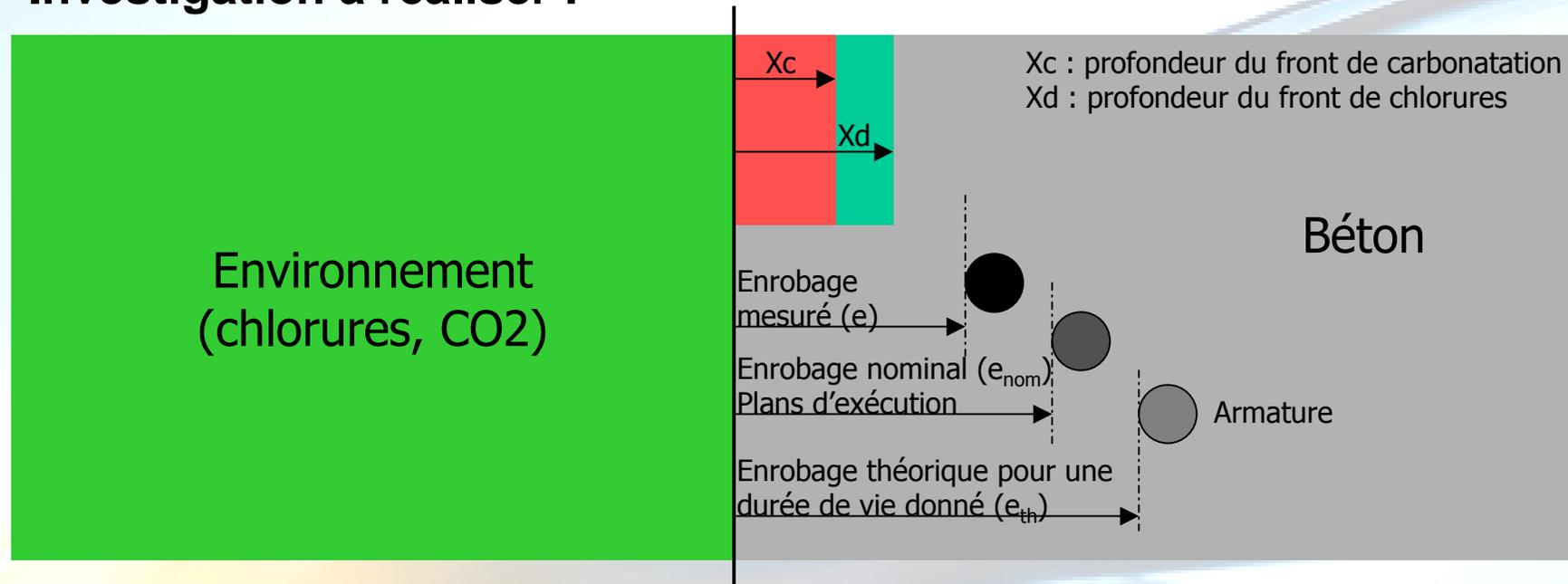
Exemple : PSDA et PSDP

ZR : zone de référence
ZE : zone exposée

Intrados de tablier	ZR (tablier)	zone saine (éloignée des abouts et des encorbellements par exemple)
	ZE (tablier)	zone soumise à des ruissellements d'eau en provenance des voies portées (contenant ou non des sels de déverglaçage) ou au brouillard salin en provenance des voies franchies
Piles	ZR (pile)	zone saine (protégée des projections en provenance des voies franchies)
	ZE (pile)	zone soumise à des projections d'eau en provenance des voies franchies (contenant ou non des sels de déverglaçage)
Culées, murs en retour	ZR (culée)	zone saine
	ZE (culée)	zone soumise à des ruissellements d'eau en provenance des voies portées (contenant ou non des sels de déverglaçage)

Inspection ciblée « Béton armé »

Investigation à réaliser :



- Relevé statistique des enrobages
- Détermination de la profondeur du front de carbonatation
- Détermination de la profondeur du front de chlorures

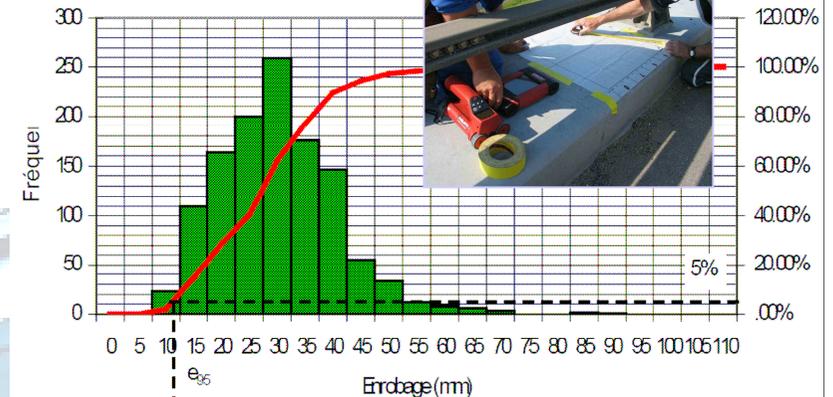
Nombre volontairement limité d'investigation :
l'IC n'est pas un diagnostic ni une expertise

Inspection ciblée « Béton armé »

Investigation à réaliser :

Relevé statistique des enrobages :

Détermination de l'enrob. caractéristique e_{95}
(95% des valeurs d'enrobage mesurées sont supérieures à e_{95})



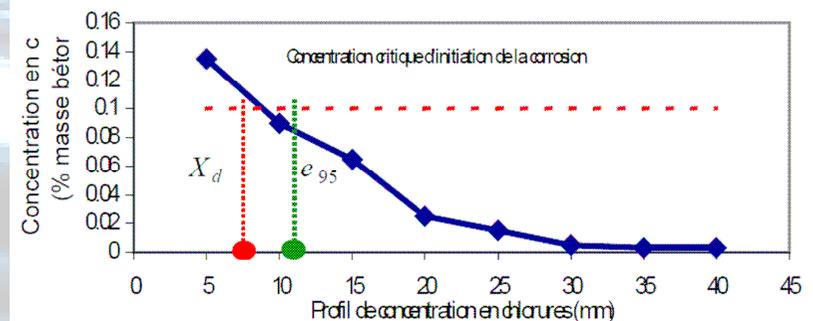
Profondeur du front de carbonatation (X_c) :

Essai colorimétrique : indicateur coloré pulvérisé sur une carotte fendue en 2



Profondeur du front de chlorures (X_d) :

A partir de profils de pénétration de chlorures



Inspection ciblée « Béton armé »

Évaluation de l'indice de vieillissement I_v :

Un indice de vieillissement par zone inspectée (indice local)

Un indice par phénomène :

$I_{v,(c)}$ (processus de carbonatation)

$I_{v,(d)}$ (processus de pénétration des chlorures)

$$I_{v,(c,d)}(T_i) = \left(\frac{X_{(c,d)}}{e_{95}} \right)^2 = \frac{T_i}{T_c}$$

$$\left[\begin{array}{l} T_i : \text{date de l'inspection ciblée} \\ X_{c,d} = A\sqrt{(\alpha T_i)} \\ T_c : \text{date d'amorçage de la corrosion} \\ e_{95} = A\sqrt{(\alpha T_c)} \end{array} \right.$$

Un indice de vieillissement par ouvrage (indice global)

$$I_{v,global}(T_i) = \left[\min \left(I_{v,local}(T_i) \right), \max \left(I_{v,local}(T_i) \right) \right]$$

Inspection ciblée « Béton armé »

Actions à engager :

	Indice de vieillissement	Description	Actions
0	$lv = 0$	Cas d'un ouvrage neuf	Programmation de la prochaine inspection ciblée
1	$0 < lv \leq 0,5$	Le béton armé est en phase d'incubation Les armatures sont correctement protégées Le risque de corrosion est négligeable.	
2	$0,5 < lv \leq 0,75$	La phase d'incubation de la corrosion est relativement avancée Le front de carbonatation et/ou de chlorures n'atteint pas encore les armatures Le risque de corrosion est faible.	Programmation de la prochaine inspection ciblée
3	$0,75 < lv < 1$	La phase d'incubation de la corrosion est très avancée Le front de carbonatation et/ou de chlorures est proche des armatures Le risque de corrosion est moyen.	
4	≥ 1	La corrosion est théoriquement amorcée (sans manifestation possible par des dégradations extérieures) Le risque de corrosion est élevé.	Programmation d'un diagnostic préalable à la définition d'une éventuelle opération de maintenance préventive

Inspection ciblée « Béton armé »

Programmation de la prochaine inspection ciblée (T_{i+}) :

Fixée au quart de la durée de vie résiduelle

Par définition $I_{v(c,d)} = \frac{T_i}{T_c}$ | T_i : date de l'inspection ciblée
 | T_c : date théorique d'amorçage de la corrosion

Date de la prochaine inspection ciblée :

$$T_{i+} = T_i + \frac{T_c - T_i}{4} = T_i + \frac{T_i}{4} \left(\frac{1 - I_{v(c,d)}}{I_{v(c,d)}} \right)$$

Cas particulier des ouvrages neufs :

La première inspection ciblée est programmée au quart de la durée de vie réduite T_r :

$$T_{i+} = \frac{T_r}{4} = \frac{1}{4} \left(\frac{e_{95}}{e_{th}} \right)^2 T_{th}$$

| T_h : Durée de vie théorique (100 ans)
 | e_{th} : Enrobage théorique permettant de garantir la durée de vie T_h ($C_{\min,dur}$)

Inspection ciblée « Béton armé »

Pile d'un pont (51 ans) en zone de marnage :

- Classe d'exposition : XS3.
- Durée de vie théorique: 100 ans.
- Relevé statistique des enrobages : $e_{95} = 35$ mm.

$$e_{th} = C_{\min, dur} = 55 \text{ mm}$$

Durée de vie réduite :

$$T_r = \left(\frac{e_{95}}{e_{th}} \right)^2 T_{th} = \left(\frac{35}{55} \right)^2 \times 100 \approx 40,5 \text{ ans}$$

Inspection ciblée

- Profondeur du front de chlorures : $X_d = 20$ mm.

Indice de vieillissement :

$$I_{v,(c,d)}(T_i) = \left(\frac{X_{(c,d)}}{e_{95}} \right)^2 = 0,32$$

Prochaine inspection ciblée :

$$T_{i+} = T_i + \frac{T_c - T_i}{4} = 51 + \frac{0,32 - 51}{4} \approx 78,5 \text{ (Dans 27 ans)}$$



Inspection ciblée

« Fatigue des assemblages métalliques »

Phénomène de fatigue :

Dégradation progressive des structures soumises à des sollicitations fluctuantes, alternées et répétées : apparition et développement de fissures => A terme endommagement et ruine de la structure

3 étapes : initiation de la fissure, propagation et rupture

Objectif de l'inspection ciblée :

- Anticiper le moment où l'intégrité de la structure pourrait être mise en cause
- Procéder de manière préventive à des opérations de réparation des fissures

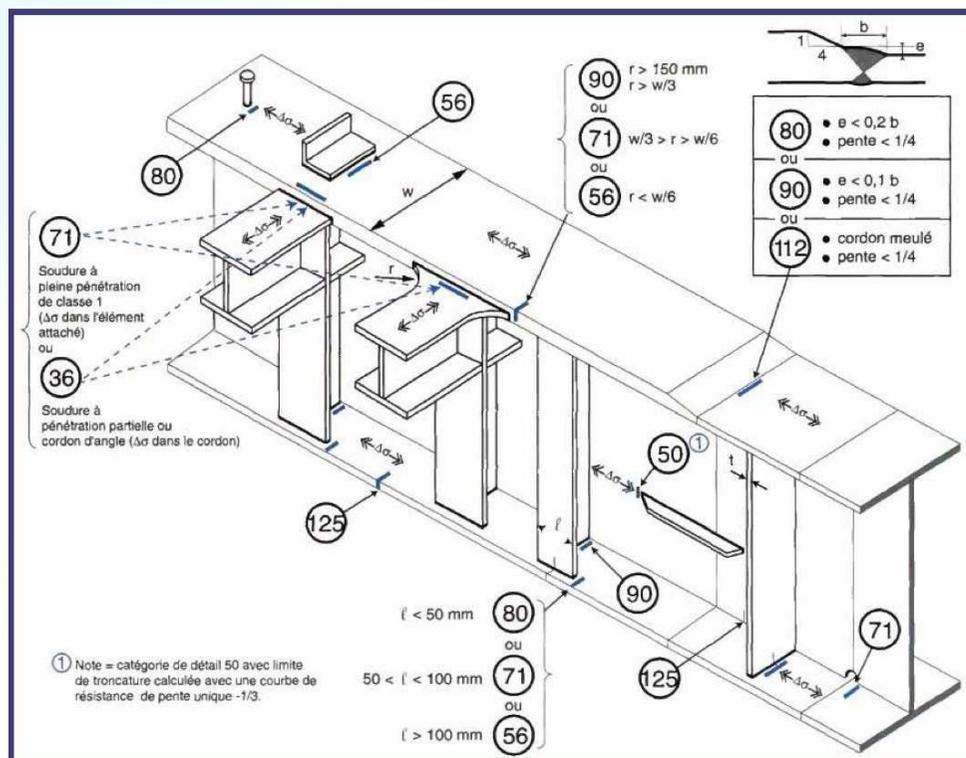
Paramètres d'influence de l'endommagement par fatigue :

- Étendues de contraintes appliquées
 - Nombre de cycles subits
- Fonction du trafic
(niveau et charges)**

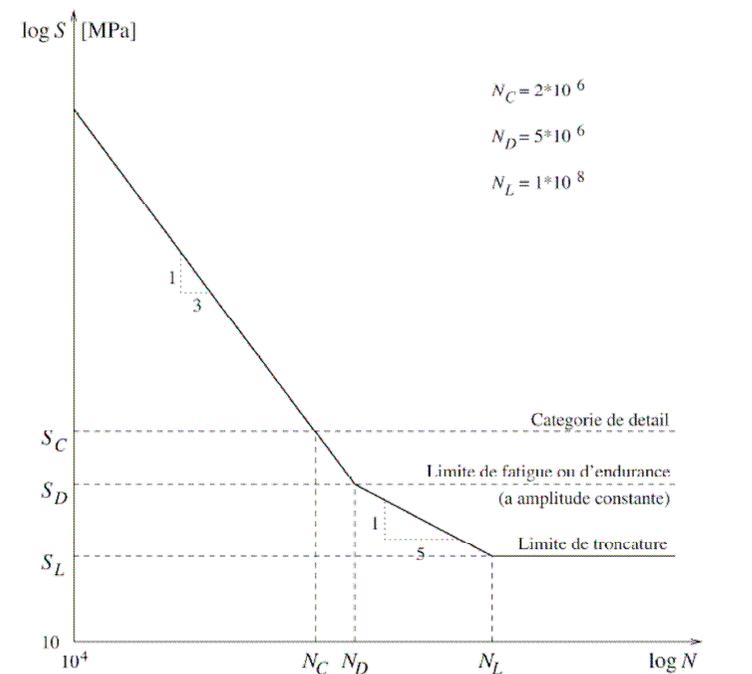
« Fatigue des assemblages métalliques »

Identification des zones à plus fort risque de fatigue

Caractérisation de la durée de vie en fatigue (approche S-N)



Catégorie de détail des assemblages



Courbe conventionnelle de Wöhler

Catégorie de détail S_C : résistance à N_C cycles
 Limite de fatigue S_D : résistance à N_D cycles
 Limite de troncature S_L : résistance à N_L cycles

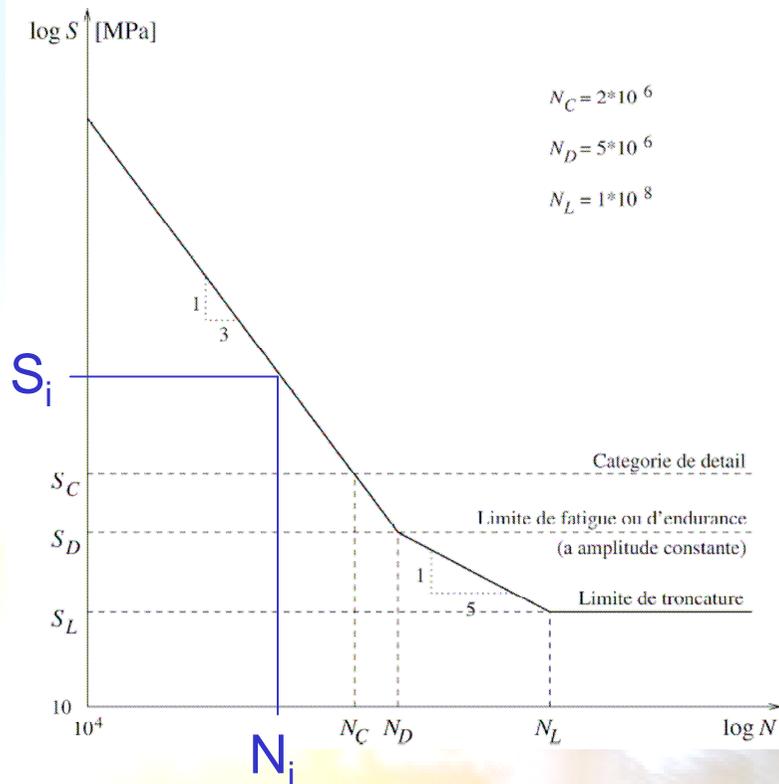
« Fatigue des assemblages métalliques »

Évaluation de l'endommagement en fatigue D

Exploitation des données de l'instrumentation :

$$D = \sum_i \frac{n_i}{N_i} \leq 1$$

Modèle de Miner (1945)



S_i : Étendue de contrainte

N_i : Nombre de cycle à la rupture (pour S_i : Wöhler)

n_i : Nombre de cycles subis pour S_i

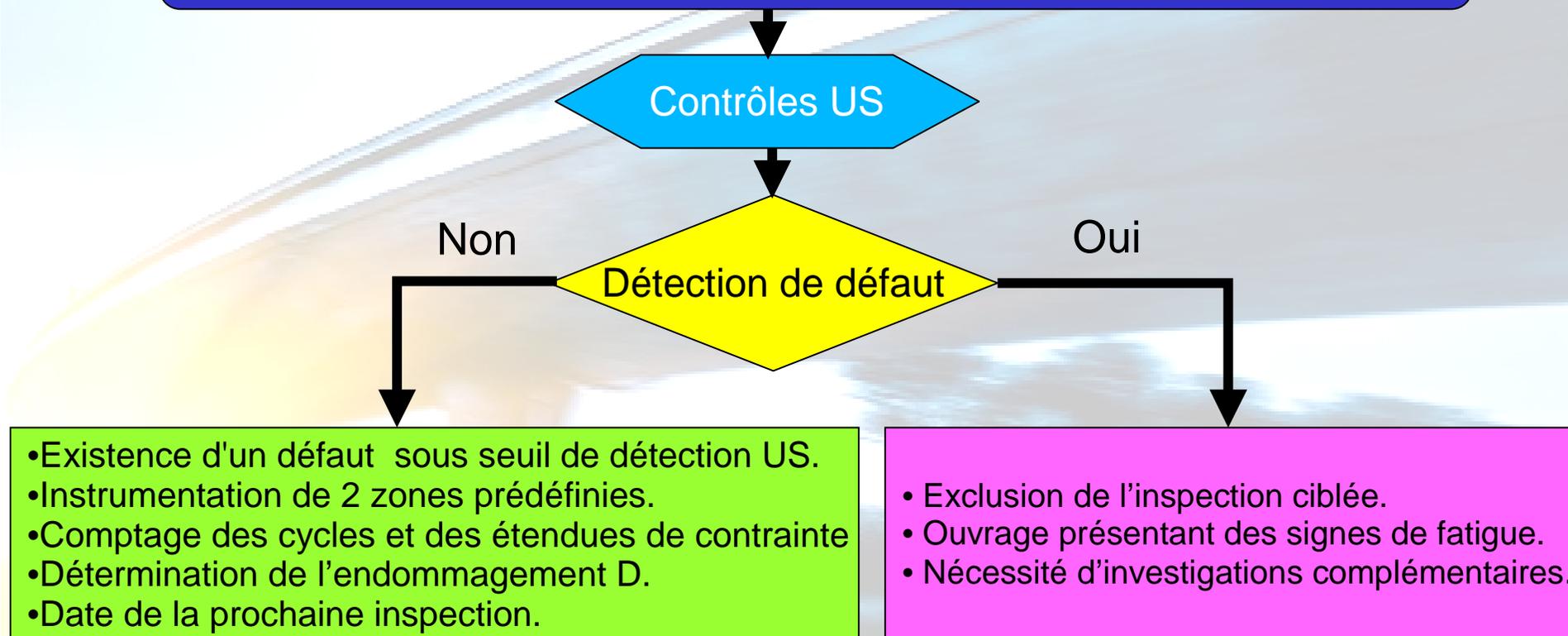
$D = 1$: l'élément est dit « ruiné »

$1-D$: durée de vie résiduelle de l'élément

« Fatigue des assemblages métalliques »

Déploiement de l'inspection ciblée :

- Étude de la note de calcul en fatigue et pré-visite de l'ouvrage.
- Détermination des zones pour **contrôle US** (4 assemblages minimum).
- Détermination de 2 zones pour **l'instrumentation par jauges**.



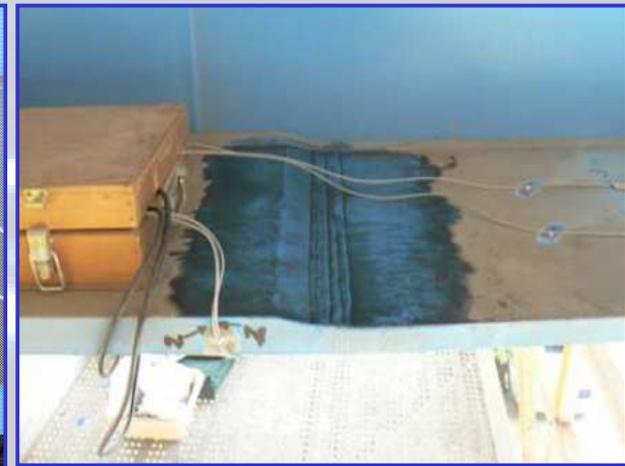
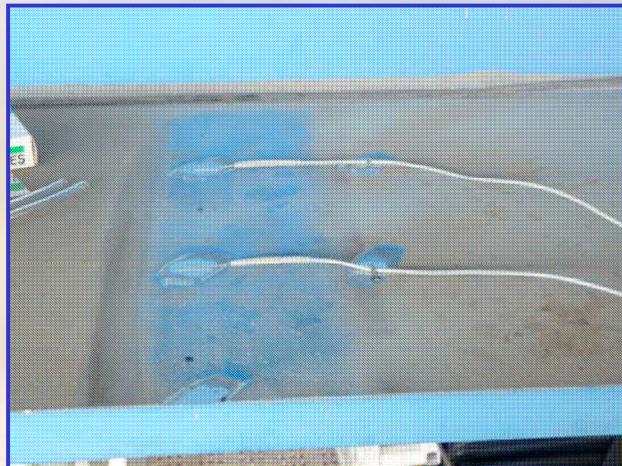
« Fatigue des assemblages métalliques »

Investigations à réaliser :

Contrôles US sur 4
assemblages
minimum



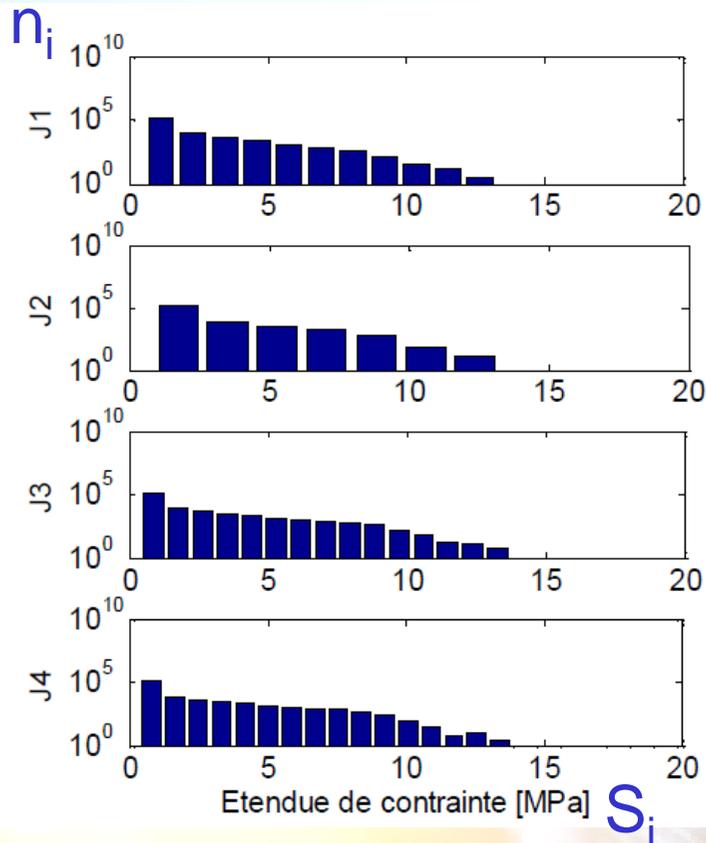
Instrumentation par
jauges de déformation
de 2 assemblages
(enregistrement sur 1
mois minimum)



(Crédit photos : DL Autun, DL Strasbourg, DL Saint-Brieuc)

« Fatigue des assemblages métalliques »

Exploitation de l'instrumentation :



T_i : Age de l'ouvrage (en années)

T_c : Age théorique de ruine de l'assemblage

$$I_{v,(f)} = \frac{T_i}{T_c} = \frac{D}{D_{\max}} = D \quad (D_{\max} = 1)$$

T_e : Durée d'instrumentation (en semaines)

D_e : Endommagement calculé sur la période T_e

$$D_e = \sum_i \frac{n_i}{N_i}$$



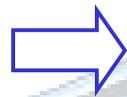
$$D = 52 \cdot \frac{D_e}{T_e} \cdot T_i$$

Histogramme de rainflow d'une jauge

« Fatigue des assemblages métalliques »

Durée de vie résiduelle de l'assemblage :

Par définition : $T_r = T_c - T_i$ Et : $T_c = \frac{T_i}{D}$



$$T_r = \left(\frac{1}{D} - 1 \right) \cdot T_i$$

Date de la prochaine inspection ciblée :

Fixée au quart de la durée de vie résiduelle :

$$T_{i+} = T_i + \frac{T_r}{4}$$

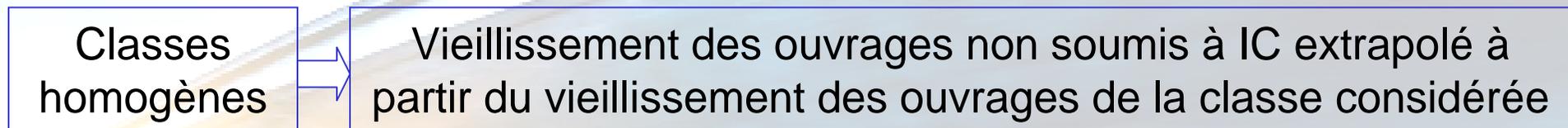
Échantillonnage (patrimoine important)

Objectif :

Réduire le nombre d'ouvrages soumis à inspection ciblée par une approche statistique

Principe :

Répartition des ouvrages du patrimoine dans des classes homogènes
Réalisation des IC sur un % représentatif d'ouvrages pour chaque classe



Exemple : Réseau routier national

Groupe 1	Ensemble des ponts courants non soumis à IDP : principalement ponts en béton armé, ponts courants en béton précontraint)	Échantillonnage par classes homogènes (10%) : matériaux, agressivité de l'environnement
Groupe 2	Ensemble des ouvrages soumis à IDP : ponts métalliques, ponts mixtes, ponts précontraints de grandes dimensions	Suivi individuel

Perspectives

A court terme

Rédaction d'un guide technique (en cours)

Chiffrage du coût des inspection ciblées (en cours)

Identification de DIRs (ou autres MOA) pour test

A plus long terme

Démarches de maintenance préventive

Extension des IC à d'autres dégradations :

- Vieillissement de la protection anti-corrosion

Utilisation d'outils de contrôles non destructifs :

- Résistivité
- Potentiels d'armatures
- ...

Conclusions

Apprécier de manière quantitative le vieillissement du patrimoine, compte-tenu d'une meilleure compréhension du fonctionnement des ouvrages et des mécanismes de dégradations des matériaux

Se focaliser sur les parties jugées critiques du point de vue du fonctionnement ou de l'exposition aux agressions environnementales

Organiser les inspections pour permettre une maintenance préventive avant l'apparition de pathologie et **prolonger la durée d'utilisation des ouvrages**

Conclusions

Améliorer la gestion des ouvrages

Améliorer la connaissance de la performance des ouvrages

Collecter, documenter et maintenir des données de performance quantitative de qualité

Merci de votre attention