



**Cerema**

Centre d'études et d'expertise sur les risques,  
l'environnement, la mobilité et l'aménagement



# Journée technique

## Auscultation et diagnostic des ouvrages d'art

### Corrosion : Exemple du pont Canada (Conseil Départemental des Côtes d'Armor)

**Benoit THAUVIN, Ronan QUEGUINER, Patrick LE ROY, Cerema Ouest**

Département Laboratoire de Saint-Brieuc

**Thierry GOYER, Conseil Départemental des Côtes d'Armor**

Grands travaux



# • Démarche de diagnostic de corrosion

## => La méthodologie du diagnostic de corrosion est détaillée dans le cahier interactif – fiche D 1-1 (novembre 2017)

DIAGNOSTIC DE L'ÉTAT DES MATÉRIAUX BÉTON

**D1-1**

DIAGNOSTIC DE CORROSION DU BÉTON ARMÉ

**CONTEXTE**

La pathologie principale du béton armé est la corrosion des armatures.

Mécanisme de la corrosion des armatures

La corrosion des armatures dans le béton est un phénomène électrochimique. Les réactions se produisent en milieu humide, en présence d'oxygène.

À l'état initial, la solution interstitielle du béton est à un pH de l'ordre de 13 étant donné le teneur en alcalins (Na et K) et la quantité de chaux libérée par le ciment lors de son hydratation. Dans ce milieu basique, les armatures sont recouvertes d'une couche d'oxydes passifs protectrices, on dit alors qu'elles sont passives. Le béton par sa compacité s'oppose à la pénétration d'agents agressifs. La polarisation de ces derniers est d'autant plus faible que le porosité du béton est faible.

Plusieurs agents extérieurs peuvent influer sur la protection naturelle assurée par le béton :

- les eaux sures et acides qui provoquent un appauvrissement du liant par lixiviation de la chaux et un abaissement du pH du béton ;
- les ions chlorure provenant de l'eau de mer ou des sels de déneigement qui agissent par rupture du film passif ;
- la dioxyde de carbone qui engendre un abaissement du pH.

D'autres agents agressifs (sulfates, nitrates, sels d'ammonium, etc.) peuvent également pénétrer dans le béton d'enrobage.

En outre, la vulnérabilité du béton d'enrobage vis-à-vis de l'intrusion d'agents agressifs peut dépendre des désordres, notamment de la fissuration dont les origines potentielles multiples comme les causes mécaniques, les cycles de gel/dégel, les différentes réactions sulfatiques, etc. sont traitées dans d'autres fiches de diagnostic du présent Cahier Interactif (D1-2, D1-3, D1-4, etc.).

Les deux agents les plus couramment rencontrés sur les ouvrages étant le dioxyde de carbone et les chlorures, nous résumerons comme causes principales de la corrosion des armatures, la carbonatation du béton et la pénétration des ions chlorure.

En fonction de la perméabilité de surface du parement, le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>) et les ions chlorure (Cl<sup>-</sup>) du milieu environnant pénètrent dans le béton, ce qui conduit à la destruction du film d'oxydes passifs des armatures ; on dit alors qu'elles sont dépassivées.

Des produits de corrosion susceptibles se forment alors à la surface de l'acier, ce qui entraîne une fissuration puis un éclatement du béton d'enrobage, accélérant le processus de corrosion et pouvant conduire à la ruine locale de la structure. Le schéma de la figure suivante explicite le processus. À noter que dans certains cas où il existe une circulation importante d'eau, les produits de corrosion peuvent être délavés au fur et à mesure de leur formation et ne pas donner lieu au développement de gonflement d'armatures et de fissuration du béton. On distingue traditionnellement deux phases de corrosion :

- une phase d'initiation de la corrosion (ou phase d'incubation) qui va jusqu'à la dépassivation des aciers et pour laquelle il existe une modulation abondante sur les phénomènes de transfert dans le béton ;
- une phase de propagation de la corrosion qui va jusqu'à la ruine de la structure et pour laquelle peu de modèles fiables existent.

Les collections de l'Ifsttar | Novembre 2017 - page 1

avec :  $c_{Cl}^{init}$ , la concentration initiale en ions chlorure libres ;  
 $c_{Cl}^{amb}$ , la concentration en ions chlorure dans le milieu environnant ;  
 $D_{app}$ , le coefficient de diffusion apparent des ions chlorure (m<sup>2</sup>/s).

**Méthodologie de diagnostic**

Elle se fonde sur la phase de l'Etat Global Site (EG), l'évolution de la performance d'un ouvrage au cours du temps fait appel à 3 phases qui sont modélisées à partir de modèles classiques de la littérature.

- La première phase correspond à l'apparition de la fissuration. Le principe du modèle consiste à comparer la quantité de rouille formée au cours du temps avec une quantité nécessaire elle critique pour créer une fissure le long de l'armature (modèle de Meyer). Lorsque le porosité du béton autour de l'armature est remplie, la pression de gonflement dépasse la traction du béton qui se fissure.
- La seconde phase est représentative de la propagation de cette fissure jusqu'à une ouverture d'environ 1 mm d'ouverture où l'on observe un éclatement du béton. Dans cette phase, la fissure se propage avec l'augmentation des produits de corrosion de façon linéaire selon le modèle le plus simple (Modèle de Trost-Cristenau).
- La troisième phase correspond à la perte de sécurité structurale : le modèle le plus simple considère une perte de section progressive des aciers qui réduit la performance des structures.

Il s'agit de définir des valeurs d'un paramètre prépondérant pour l'évaluation de l'appareil partant des ouvrages, c'est-à-dire paramètre comme la perte d'adhérence acier/béton qui résulte de la fissuration ou de l'éclatement du béton et la base de déclassement des aciers corrodés peuvent également être considérées.

La notion de la résistance en fatigue d'acier corrodé est également à prendre en considération si l'on veut vérifier l'état limite de fatigue de la structure.

**Méthodologie du diagnostic**

On identifie dans le dossier de l'ouvrage tous les éléments utiles au diagnostic :

- fabrication du béton (nature et dosage du ciment, rapport C/E, nature et dosage des additifs, etc.) ;
- nature, diamètre et position des aciers ;
- enrobage des aciers ;
- cloisons d'isolation des parties d'ouvrage ;
- fréquence de saignée et nature des fondations utilisées ;
- traitement des parements ;
- durée de la cure.

Cette étape a pour objectif de repérer les désordres susceptibles d'indiquer une corrosion des armatures comme :

- des gonflements ;
- des zones sombres le creux ;
- des fissures le long des aciers ;
- des traces d'oxydation ;
- des épaulements du béton ;
- des éclatements de béton avec armatures apparentes et oxydées.

**ÉTAPE 1 ANALYSE DU DOSSIER DE L'OUVRAGE**

**ÉTAPE 2 INSPECTION DÉTAILLÉE**

Même en l'absence de tels défauts visibles ou sonores, l'ouvrage pourra faire l'objet d'une auscultation visant à déterminer le risque de corrosion des armatures (mesures de l'épaisseur d'enrobage, de la profondeur de carbonatation, de la teneur en chlorure, de la résistivité, de la perméabilité de surface). Ce type d'auscultation entre dans la démarche des « inspections ciblées » qui vise à avoir une approche préventive pour anticiper l'apparition de désordres dus à la corrosion.

Ce type d'auscultation entre également dans le cadre de l'approche performantielle de la durabilité des ouvrages d'art (D) qui implique un suivi de l'ouvrage par la mesure des limites de durabilité (profondeur de carbonatation, profil de teneur en CaCl<sub>2</sub>, profondeur de pénétration des chlorures, profil de teneur en chlorure, etc.).

Si ces données sont décelées, il est impératif de procéder à une auscultation plus approfondie de l'ouvrage.

Concernant le diagnostic des armatures, la mesure du potentiel d'auscultation permet d'évaluer leur état d'oxydation, et l'analyse de la vitesse de corrosion permet d'obtenir une vitesse de corrosion instantanée (R).

Les collections de l'Ifsttar | Novembre 2017 - page 3

**D1-1 : DIAGNOSTIC DE CORROSION DU BÉTON ARMÉ**

**Étape 1** : Analyse du dossier de l'ouvrage

**Étape 2** : Inspection détaillée + martau

Résultats de l'inspection

- Cas 1 : Aucun désordre apparent
- Cas 2 : Corrosion possible (Fissures, Gonflements, Zones sombres le creux)
- Cas 3 : Corrosion visible et évidente (Éclatements de béton avec armatures apparentes et oxydées)

Mesure de l'épaisseur d'enrobage

Mesure de la profondeur de carbonatation

Mesure de la teneur en chlorure

Recherche d'autres causes des désordres

Parurements

Mesure de la résistivité

Mesure de la vitesse de corrosion

Mesure de la teneur en chlorure

Mesure de la profondeur d'oxydation

Mesure de la teneur en chlorure

Causes de la corrosion des armatures

Évaluation de l'impact des zones défectueuses

Si  $V < 17$  : Intervention à court terme visant à limiter le risque de corrosion des armatures

Si  $17 < V < 5000$  : Suivi de l'évolution de la concentration et de la teneur en chlorure dans le béton

Si  $V > 5000$  : Intervention rapide visant à stopper ou limiter la corrosion et à éliminer la cause (selon cas)

Les collections de l'Ifsttar | Novembre 2017 - page 6



- **Démarche de diagnostic de corrosion**
  - **Déclinaison sur le pont Canada à Tréguier**



ouvrage en béton armé

portée : 153 m

chaussée : 7 m

trottoirs : 2 x 2,65 m

mis en service le 25 juillet 1954

environnement marin agressif (embruns et marnage)

situé sur la RD 786

relie Paimpol à Lannion

trafic important avec pourcentage PL élevé



Crédit photos : CD 22



- **Démarche de diagnostic de corrosion**
  - **Déclinaison sur le pont Canada à Tréguier**



**Observations de l'inspection détaillée effectuée en 2011 :**

- fissures, éclatements de béton présents au niveau des appuis, des poutres et entretoises ;
- aciers apparents, corrosion des armatures , traces d'oxydation particulièrement sur les appuis en rive

**=> Diagnostic de corrosion réalisé à la demande du service des Infrastructures du Conseil Départemental des Côtes d'Armor**

Crédit photos : CEREMA



- **Démarche de diagnostic de corrosion**

- Consistance d'un diagnostic de corrosion**

- **Etape 1 : Analyse du dossier de l'ouvrage**
    - **Etape 2 : Inspection détaillée**
    - **Etape 3 : Auscultation**



- **Démarche de diagnostic de corrosion**
  - **Etape 1 : Analyse du dossier de l'ouvrage**

### Recueil des éléments utiles au diagnostic :

- formulation du béton (nature et dosage du ciment, rapport E/C, origine des granulats, etc.);
- nature, diamètre et position des aciers ;
- enrobages des aciers ;
- classes d'exposition des parties d'ouvrages ;
- traitement des parements
- durée de la cure
- Etc...





# • Démarche de diagnostic de corrosion

## – Recueil d'informations sur l'ouvrage



### formulation du béton :

ciment 230/315 Flambeau : 400 kg  
sable roulé du Trieux (0/8) : 500 litres  
gravillon de Brestant (5,3/25) : 650 litres  
eau sur agrégats secs : 160 litres

### nature, diamètre et position des aciers :

armatures arcs : 32 mm – acier 60 au chrome cuivre  
armatures pile : 40 mm – acier 42  
armatures tablier : 40 mm – acier 42

### enrobages des aciers :

enrobage théorique : 35 mm

(conformément à la circulaire série A n° 8 du 19 juillet 1934)

### traitement des parements :

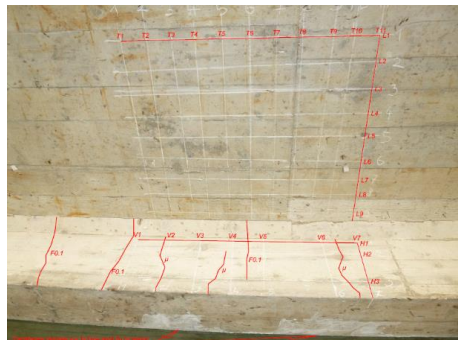
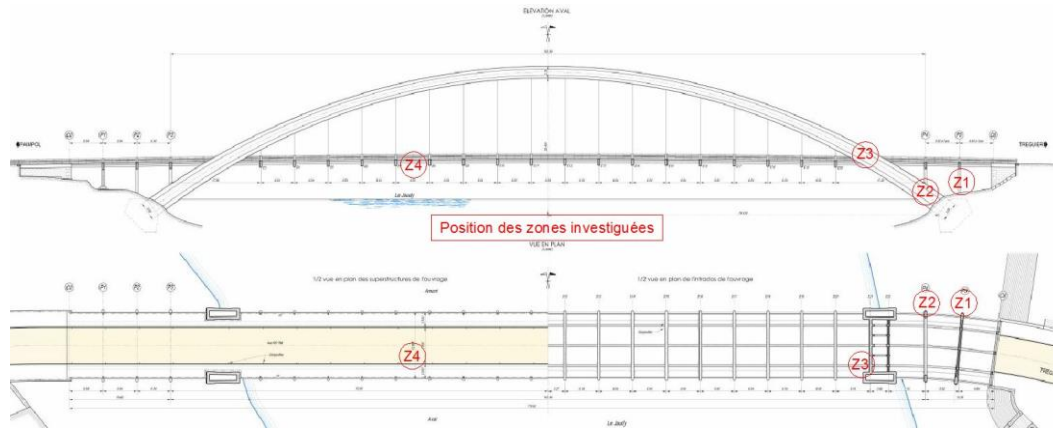
surface hydrofugée par application d'une "peinture incolore aux silicônes Aquellus S.1"



# • Démarche de diagnostic de corrosion

## – Etape 2 : Inspection détaillée

Sélection de zones d'investigation représentatives de l'état de l'ouvrage



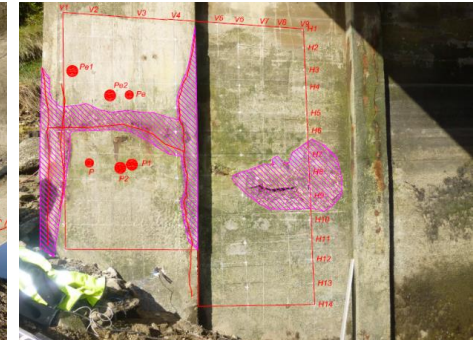
Zone Z4 : intrados



Zone Z3 : arc aval – niveau trottoir -  
rive gauche



Zone Z2 : naissance arc amont -  
rive gauche



Zone Z1 : Pile rive gauche



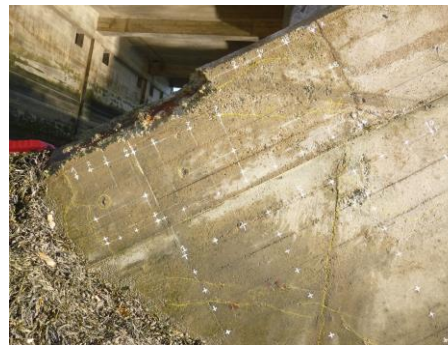


- **Démarche de diagnostic de corrosion**
  - **Etape 2 : Inspection détaillée**

**Objectif : repérer des désordres consécutifs à la corrosion des armatures**



Fissures le long des aciers  
Traces d'oxydation



Eclatements de béton avec  
armatures apparentes et oxydées



Fissures le long des aciers



- **Démarche de diagnostic de corrosion**

- **Etape 3 : auscultation**

**Essais complémentaires nécessaires pour établir un diagnostic :**

**Mesure de l'épaisseur d'enrobage des armatures (B 2-1)**

**Mesure de la résistivité (B 2-6)**

**Mesure du potentiel d'électrode (B 2-4)**

**Mesure de la vitesse de corrosion (B 2-5)**

**Mesure de la profondeur de carbonatation (B 2-2)**

**Mesure de la teneur en chlorures (prélèvement – B 2-3)**





- **Démarche de diagnostic de corrosion**
  - **Etape 3 : auscultation**

**Mesure de positionnement et de l'épaisseur d'enrobage des armatures**

**Objectif : Localisation des armatures, détermination de leur profondeur d'enrobage par méthode électromagnétique basse fréquence**



Ferroskan (Hilti)



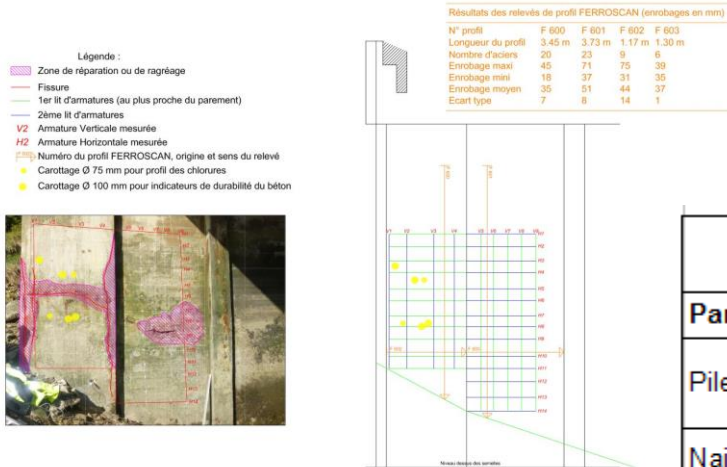
StructureScan (Gssi)



# • Démarche de diagnostic de corrosion

## – Etape 3 : auscultation

### Mesure de l'épaisseur d'enrobage des armatures



Élévation Portique rive gauche - Extrémité amont

Partie - Zone		Armatures transversales (ou horizontales)			Armatures longitudinales (ou verticales)		
		Moy.	Min	≤50	Moy.	Min	≤50
Pile (Z1)	Poteau	35	18	100%	45	31	89%
	Voile	52	37	43%	38	35	100%
Naissance Arc (Z2)	Bandeaux	62	46	4%	67	58	0%
	Ame	41	38	100%	50	40	71%
Arc – Trottoir (Z3)	Bandeau	72	40	10%	66	46	22%
	Ame	55	51	0%	55	46	29%
Tablier (Z4)	Poutre	50	39	67%	52	46	67%
	Hourdis	26	17	100%	41	18	96%



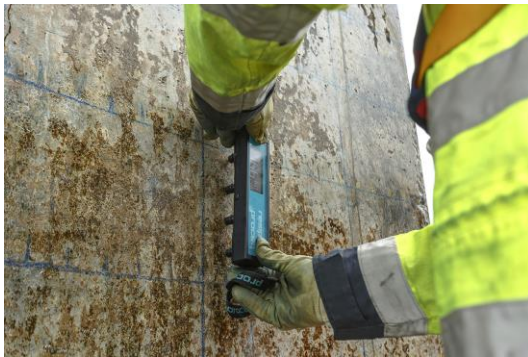


# • Démarche de diagnostic de corrosion

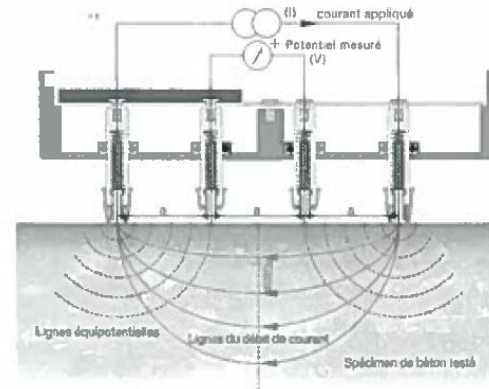
## – Etape 3 : auscultation

### Mesure de résistivité du béton (fiche B 2-6)

**Objectif** : Évaluation du risque de corrosion des armatures du béton armé.



Résipod (Proceq)



**Principe** : Application d'un appareil à quatre électrodes à la surface du béton (méthode Wenner). Les deux électrodes extérieures induisent un courant et les deux électrodes intérieures mesurent la chute de potentiel résultant

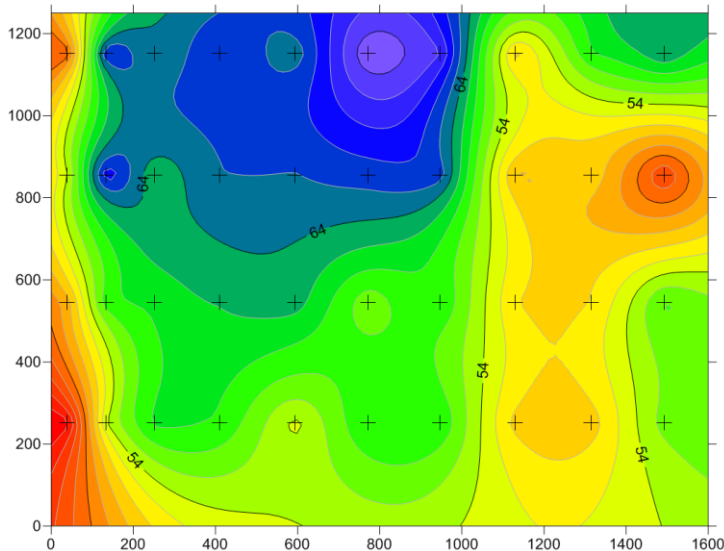


# • Démarche de diagnostic de corrosion

## – Etape 3 : auscultation

### Mesure de résistivité du béton

Restitution des mesures sous forme de cartographie



Résistivité électrique (kOhm.cm)\*

$Re > 100$   
 $50 < Re < 100$   
 $10 < Re < 50$   
 $Re < 10$

Risque de corrosion\*

Négligeable
Faible
Modéré
Elevé

Pourcentage de mesures

0 %  
80 %  
20 %  
0 %

\*Classement et valeurs seuils établis à 20° pour un béton avec CEM I (RILEM TC154 - Résistivité,)



# • Démarche de diagnostic de corrosion

## – Etape 3 : auscultation

### Mesure de résistivité du béton

#### Analyse des mesures :

- **Zone Z1 (pile)** : en partie inférieure : risque de corrosion élevé (phénomène lié au marnage)  
en partie supérieure : risque de corrosion faible
- **Zone Z2 (naissance de l'arc)** : risque de corrosion élevé
- **Zone Z3 (arc – niveau trottoir)** : risque de corrosion faible
- **Zone Z4 (intrados)** : pas de mesure possible en raison du maillage trop serré



- **Démarche de diagnostic de corrosion**
  - **Etape 3 : auscultation**

**Mesure du potentiel d'électrode (fiche B 2-4)**

**Objectif : Évaluation de l'état d'enrouillement des armatures du béton armé.**



Canin (Proceq) – électrode à barre



Canin (Proceq) – roue d'électrodes

**Principe : Mesure à l'aide d'un voltmètre à haute impédance la différence de potentiel entre une armature situé dans le béton et une électrode de référence (en général Cu/CuSo4) placée sur le parement béton**

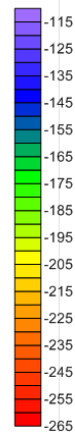
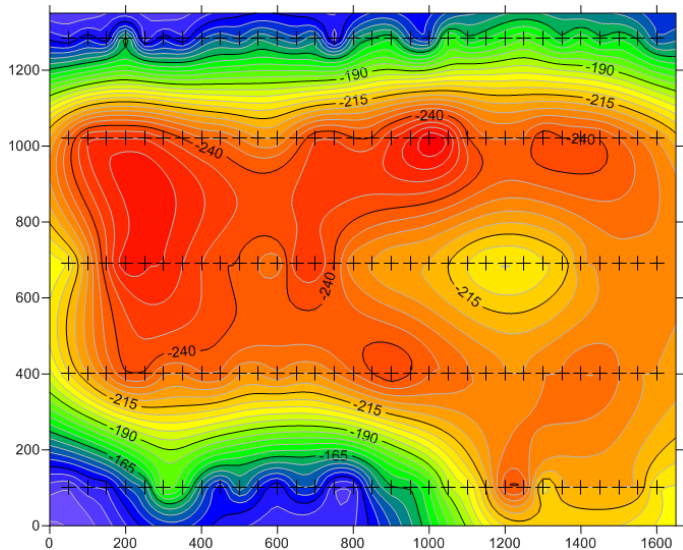


# • Démarche de diagnostic de corrosion

## – Etape 3 : auscultation

### Mesure du potentiel d'électrode

#### Restitution des mesures sous forme de cartographie



**Potentiels  
d'armatures  
(mV)**

> -200  
-200 à -350  
< -350

**Probabilité de  
corrosion**

Faible

Moyenne

Forte

**Pourcentage de mesures**

Armatures longitudinale s	Armatures transversale s
---------------------------------	--------------------------------

30 %

33 %

70 %

67 %

0 %

0 %

Résipod (Proceq)





# • Démarche de diagnostic de corrosion

## – Etape 3 : auscultation

### Mesure de potentiel d'armatures

#### Analyse des mesures :

- **Zone Z1 (pile)** : en partie inférieure : forte probabilité de corrosion (phénomène lié au marnage)  
en partie supérieure : probabilité modérée de corrosion
- **Zone Z2 (naissance de l'arc)** : probabilité modérée à forte de corrosion pour l'âme et le bandeau supérieur, faible pour le bandeau inférieur
- **Zone Z3 (arc – niveau trottoir)** : probabilité faible à négligeable de corrosion
- **Zone Z4 (intrados)** : probabilité faible de corrosion pour la poutre et négligeable pour le hourdis



- **Démarche de diagnostic de corrosion**

- **Etape 3 : auscultation**

- Mesure de la vitesse de corrosion (fiche B 2-5)**

**Objectif** : Détermination de la densité de courant instantané de corrosion des armatures du béton armé.



Galvapulse (Germann instrument)



Galvapulse (Germann instrument)

- **Principe** : Les valeurs de densité de courant de corrosion  $I_{corr}$  sont obtenues à l'aide d'un appareil dont le principe de fonctionnement est basé sur la mesure de la résistance de polarisation. Cette densité de courant peut ensuite être traduite en vitesse de corrosion instantanée ( $V_{corr}$ ).



# • Démarche de diagnostic de corrosion

## – Etape 3 : auscultation

### Mesure de la profondeur de carbonatation (fiche B 2-2)

- **Objectif** : Évaluation de la profondeur de béton carbonaté d'un parement en béton à partir de mesures effectuées sur carottes prélevées sur des structures en béton.



Prélèvement de corps d'épreuve par carottage



Carotte imprégnée de phénolphtaléine

**Principe** : Mesure en laboratoire sur les cassures des carottes fendues.

Pulvérisation d'un indicateur coloré de pH comme la phénolphtaléine (virage pH à 9) ou la thymolphtaléine (virage pH à 10)



# • Démarche de diagnostic de corrosion

## – Etape 3 : auscultation

### Mesure de la teneur en chlorures

- **Objectif** : Détermination de la position du front de chlorures à partir de carottes sciées en tranches de 1 cm



Prélèvement de corps d'épreuve par carottage

Parties d'ouvrage Zones d'investigation	Exposition	Profondeur du front de chlorures (mm)	
		Chlorures libres Xd(libres)	Chlorures totaux Xd(totaux)
Pile (poteau) (Z1)	Marnage	103	> 105
	Embruns	53	76
Naissance Arc (Z2)	Marnage	62	> 85
Arc Niveau trottoir (Z3)	Embruns	0	0
Tablier (poutre) (Z4)	Embruns	< 5	19

**Principe** : Mesure en laboratoire sur des tranches de 1 cm d'épaisseur à partir de carottes, selon le mode opératoire AFPC - AFREM

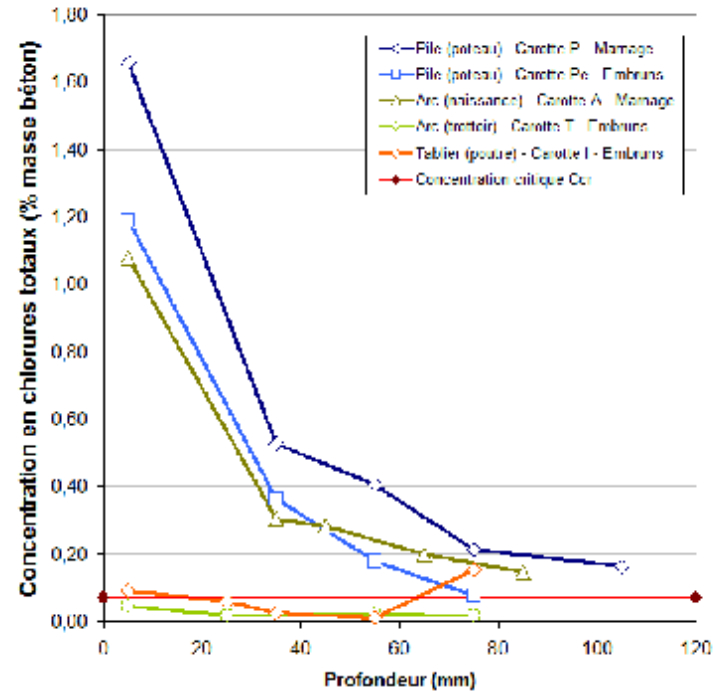
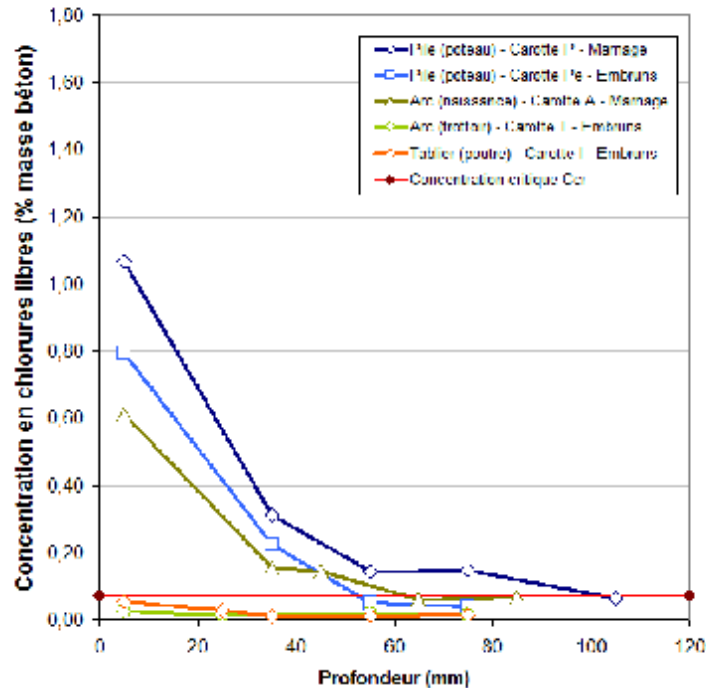


# • Démarche de diagnostic de corrosion

## – Etape 3 : auscultation

### Mesure de la teneur en chlorures

- Evaluation de la pénétration des chlorures







- **Démarche de diagnostic de corrosion**

- Synthèse des investigations :**

- Le croisement de l'ensemble des données montre :**

- un risque important de corrosion des armatures dans les parties basses de l'ouvrage plus exposées (poteaux et voiles des piles ainsi que la naissance des arcs, dû au marnage, aux éclaboussures et embruns)

- ⇒ **ces dégradations vont s'étendre et se multiplier à court terme**

- ⇒ **des travaux de réparation sont nécessaires à court terme pour stopper ce processus de corrosion et pérenniser l'intégrité de l'ouvrage**



- **Démarche de diagnostic de corrosion**

**Merci pour votre attention**

