



Les Techniques d'auscultation des ouvrages en Béton Armé : Exemples d'application, limites d'emploi, conseils sur leur prescription

Bruno GODART

Laboratoire Central des Ponts et Chaussées

Colloque sur les OA, LE PONT, Toulouse, 19 & 20 Octobre 2005

Association Française de Génie Civil
Confédération Française pour les Essais Non Destructifs



**Le nouveau
guide AFGC-
COFREND
(Sept. 2005)**

The cover of the book features a central photograph of a concrete structure with visible reinforcement bars and some surface damage. To the right of the photograph are three vertical panels showing different types of non-destructive testing results: a green and yellow thermal or acoustic image at the top, a blue and yellow wave pattern in the middle, and a red and orange thermal or acoustic image at the bottom.

Méthodologie d'évaluation non destructive de l'état d'altération des ouvrages en béton

Sous la direction de
Denys Breysse et Odile Abraham

Presses de l'École nationale des
Ponts et chaussées

A. La problématique

- ❑ Auscultation, évaluation et diagnostic
- ❑ Les attentes des maîtres d'ouvrage
- ❑ L'évaluation de l'état du matériau
- ❑ L'évaluation géométrique des ouvrages
- ❑ L'évaluation de l'étanchéité
- ❑ L'évaluation de la durée de vie des ouvrages

B. Les techniques

C. Utilisation et valorisation des résultats de l'END

Les Principales méthodes

Les méthodes sur prélèvements

- Les essais mécaniques
- Les essais physiques
- Les analyses chimiques et minéralogiques
- Les analyses optiques (pétrographie, métallographie)

Les méthodes non-destructives

- Les méthodes par propagation d'ondes mécaniques
- Les méthodes électromagnétiques
- Les méthodes thermiques
- Les méthodes électriques et électrochimiques
- Les méthodes radiographiques
- Les méthodes optiques

Diagnostic du béton armé vis-à-vis de la corrosion

- **Récapitulatif des essais les plus couramment mis en œuvre :**
 - béton (porosité, densité)
 - mesures d'enrobage
 - profondeur de carbonatation
 - gradient de chlorures
 - mesures de potentiel d'armatures
 - plus récent : mesures de vitesse de corrosion

Zoom sur quelques techniques

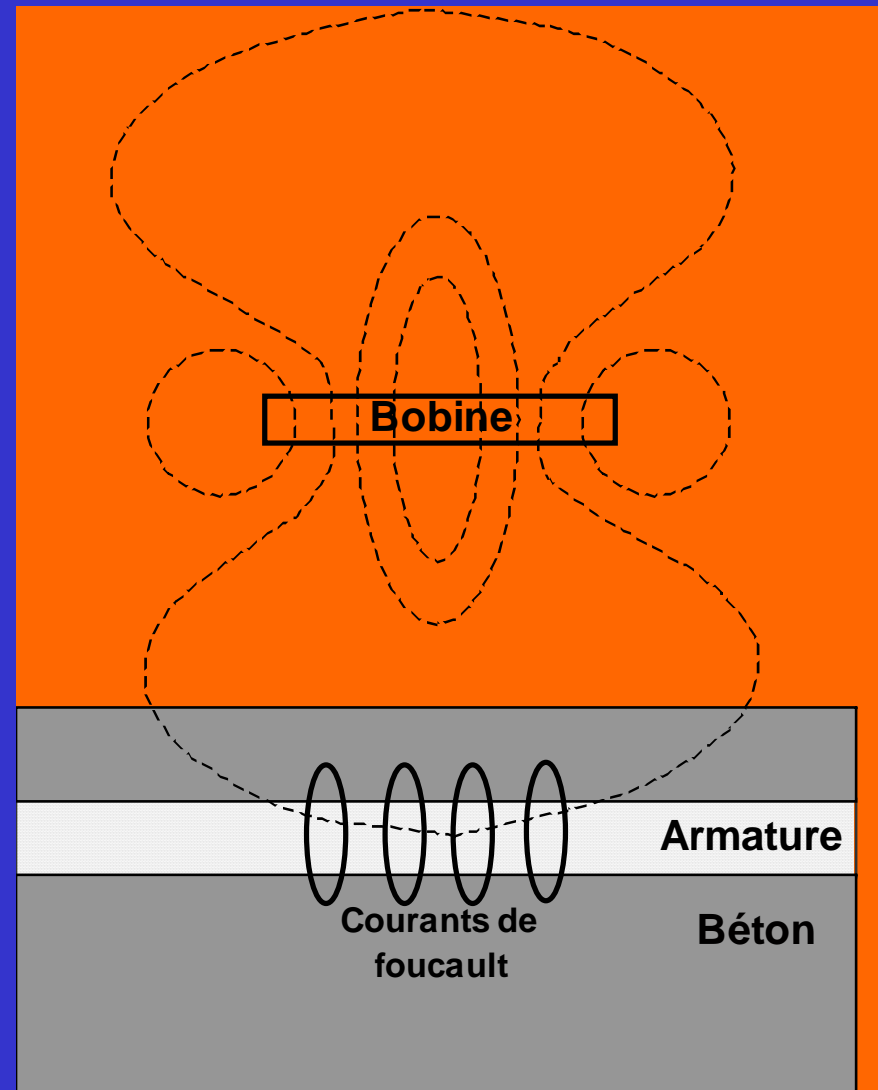
Enrobage et détection d'aciers

Le potentiel d'électrodes

La vitesse de corrosion

Enrobage et diamètre des aciers

- ❑ **Le principe** repose sur la mesure d'un champ électromagnétique induit par la présence d'éléments ferromagnétiques
- ❑ Le signal reçu augmente avec le diamètre de la barre et diminue avec l'épaisseur d'enrobage



Enrobage et détection d'armatures

Principe :

variation électro-magnétique due à la présence d'armatures

Détecteur d'armature :

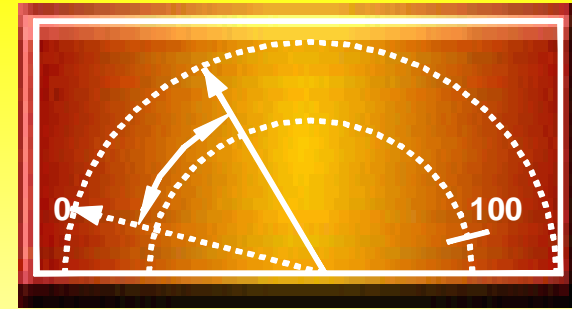
position –direction

enrobage (épaisseur)

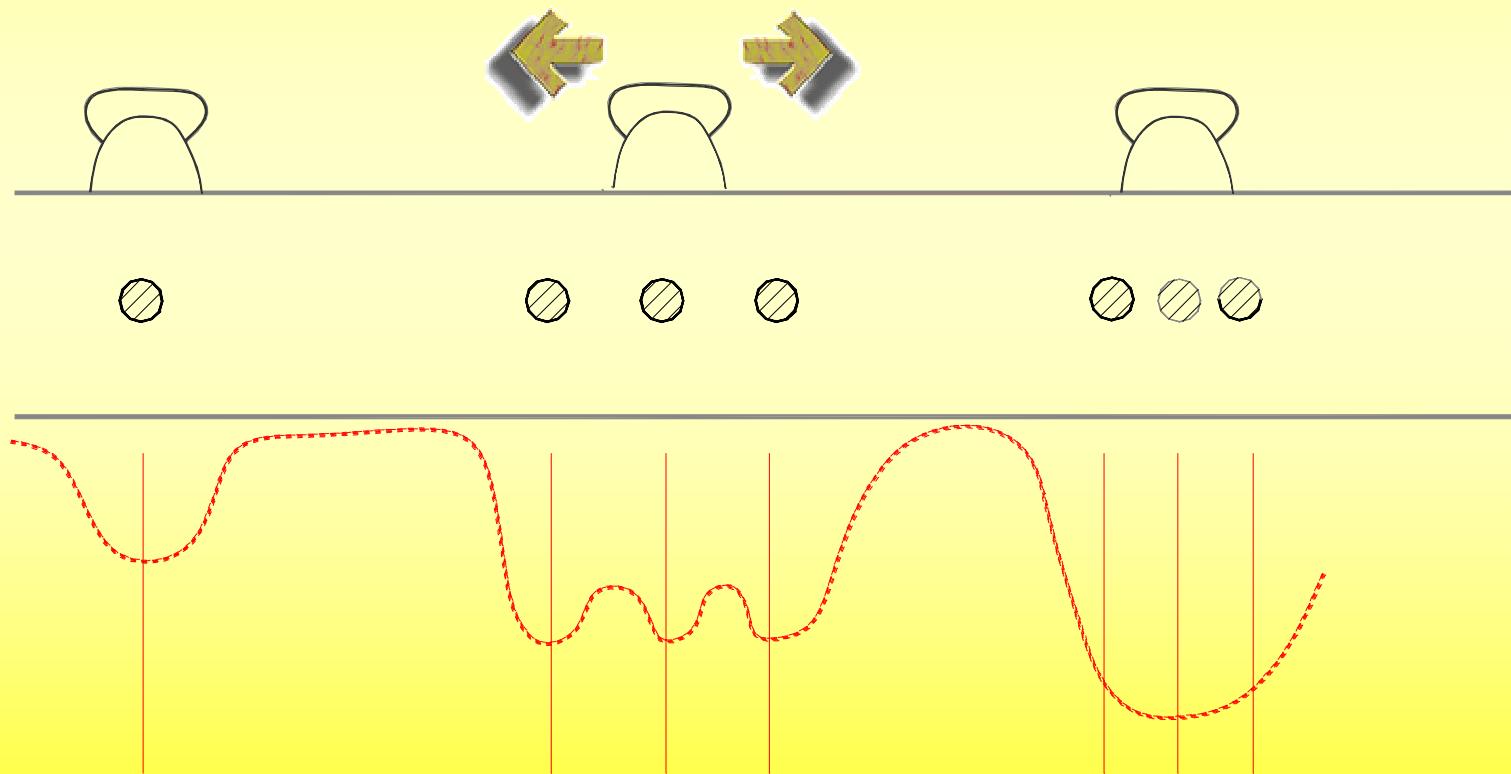
diamètre (*barre isolée*)



Enrobage et détection d'aciers



Réponse de l'indicateur fonction de la densité d'acier



Ματ ριελ



Photo 1

Ferroscan

**dans sa mallette de
transport**

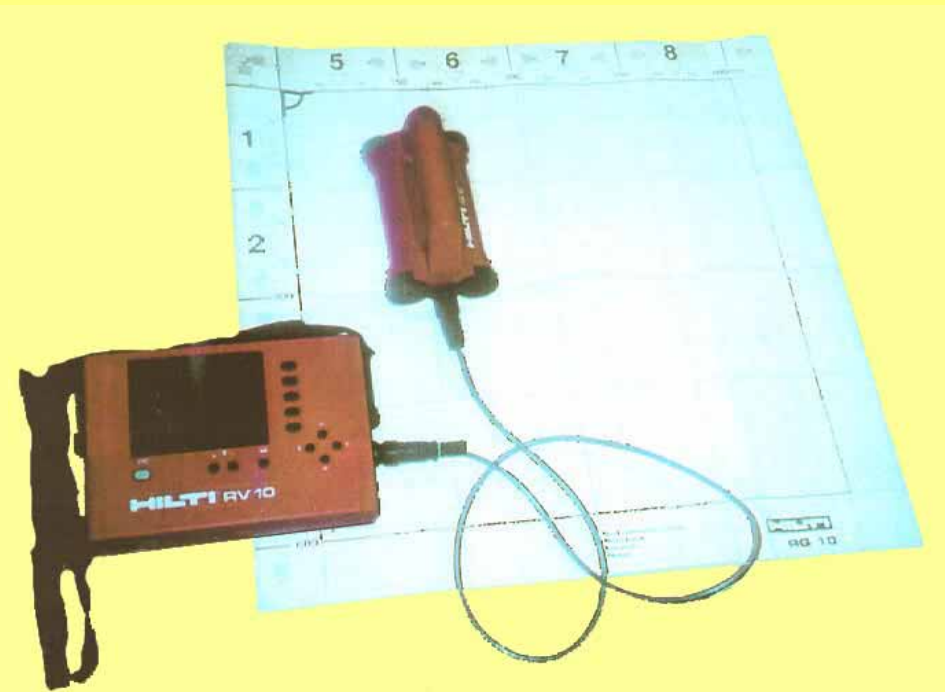
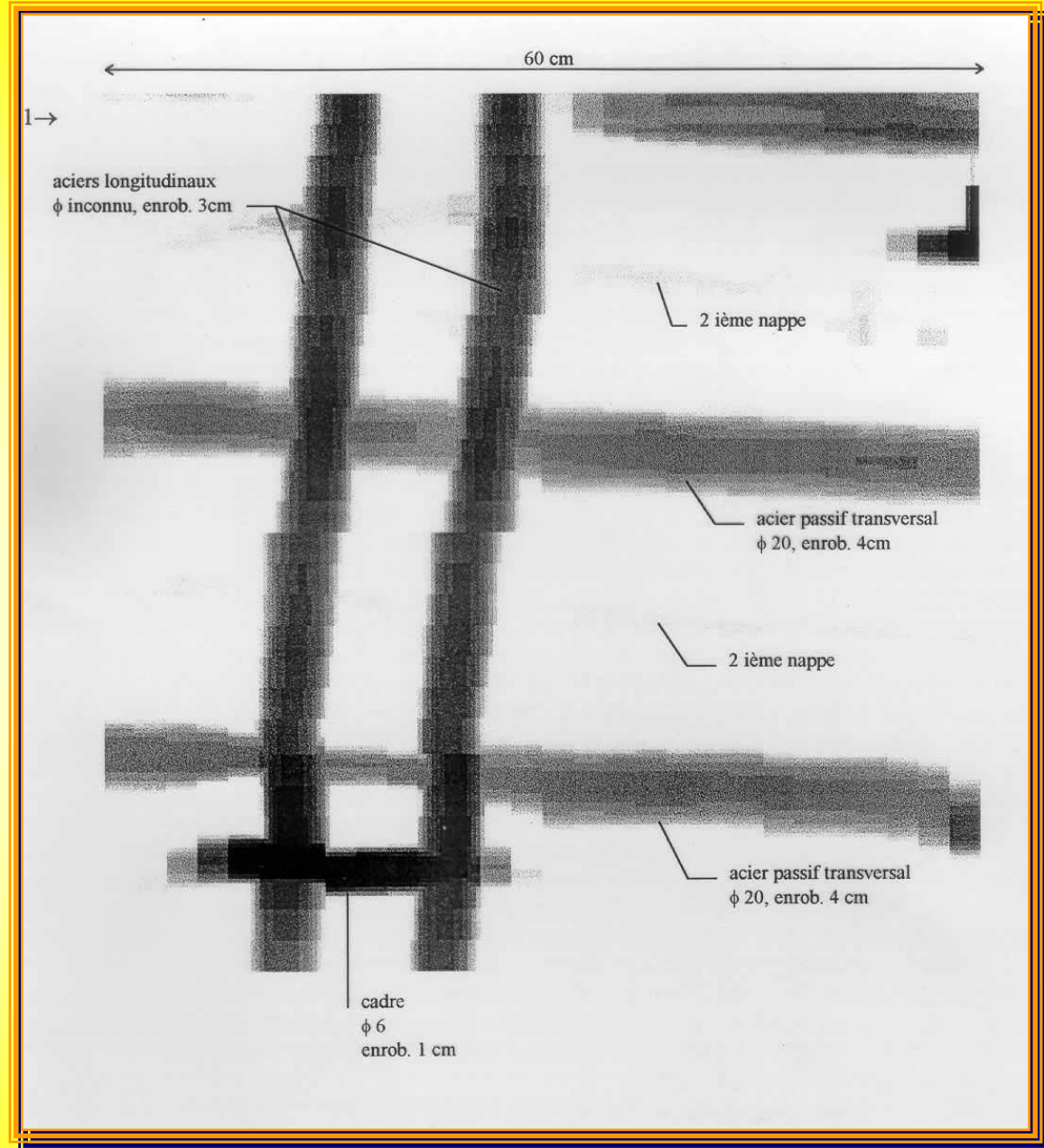


Photo 2

Moniteur et scanner

Exemple d'image obtenue par le Ferroskan



Enrobage et détection d'armatures

□ limites :

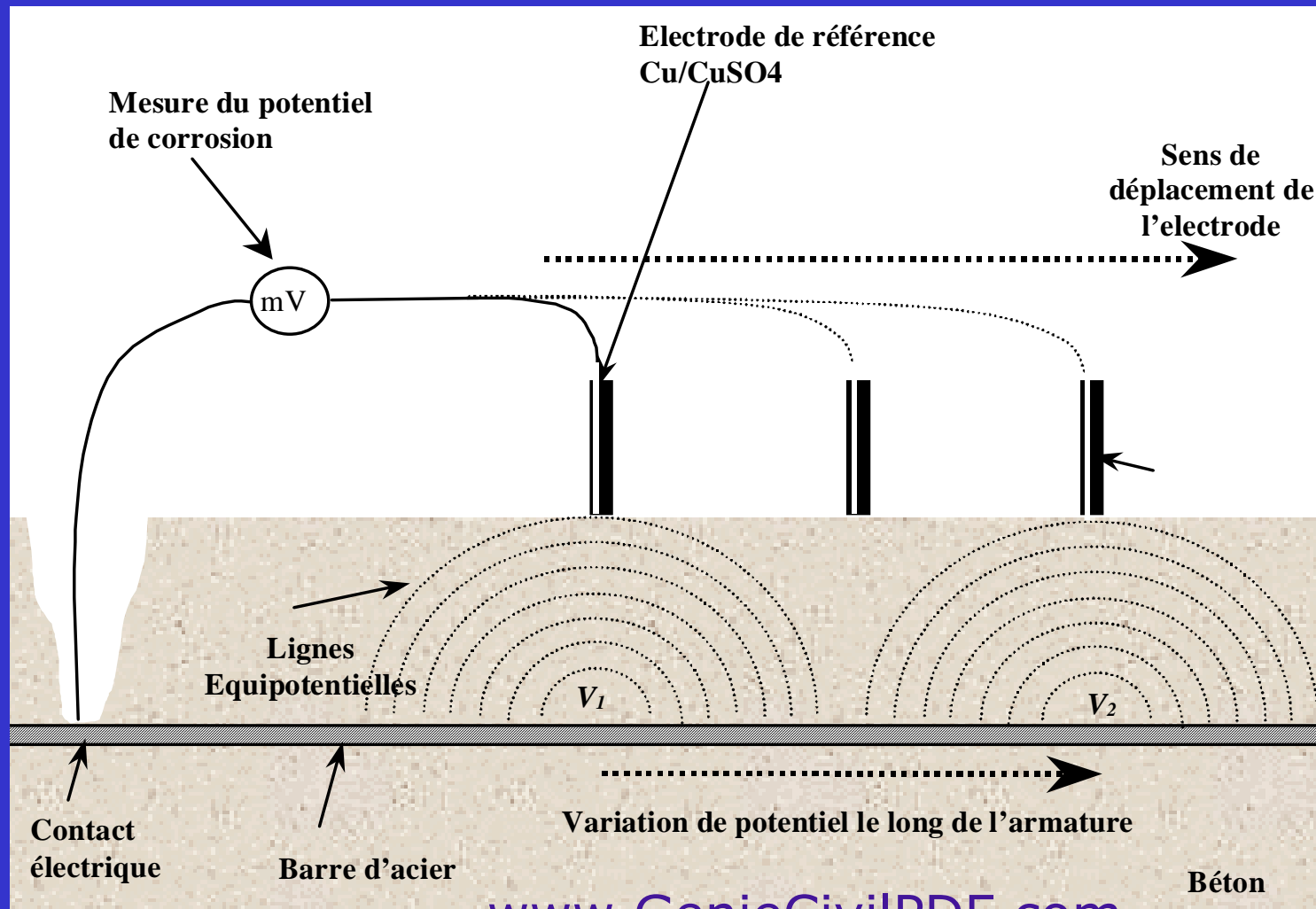
- tolérance de 5 mm sur la localisation des barres
- tolérance de 2 mm sur la mesure de l'enrobage
- tolérance de 5 mm sur la mesure du diamètre (ou deux gammes près...)
- Peu efficace au delà d'une dizaine de centimètres (employer le radar....)

□ Biais possibles

- effets des armatures voisines
- effets des armatures transversales (intersections)
- effets des recouvrements d'armatures

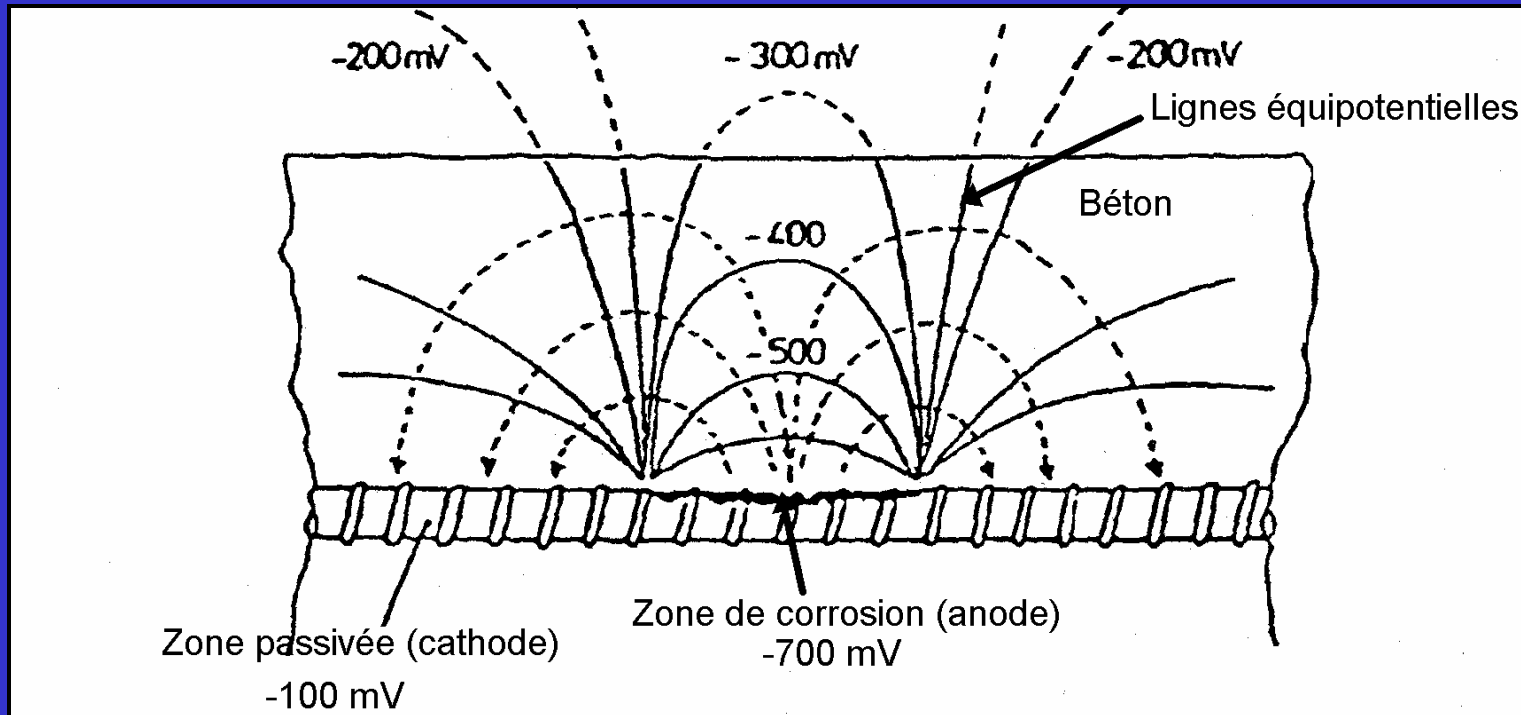
La mesure du potentiel de corrosion

□ **Principe de la mesure** : le potentiel de corrosion de la demi-pile armature / béton est une tension mesurée par rapport à une électrode de référence placée en parement



Nécessité de percer le béton en un point...

La mesure du potentiel de corrosion



□ interprétation qualitative des résultats

(ASTM C876-91 avec électrode Cu/CuSO₄)

si $E > -200 \text{ mV}$

Corrosion peu probable (Prob < 10%)

si $-350 < E < -200 \text{ mV}$

Corrosion possible (Prob = 50 %)

si $E < -350 \text{ mV}$

Corrosion très probable (Prob 50 à 90 %)

Électrode Cu/CuSO_4



Photo G. Grimaldi

Potential



Photo G. Grimaldi



Photo G. Grimaldi

Cartographie des potentiels

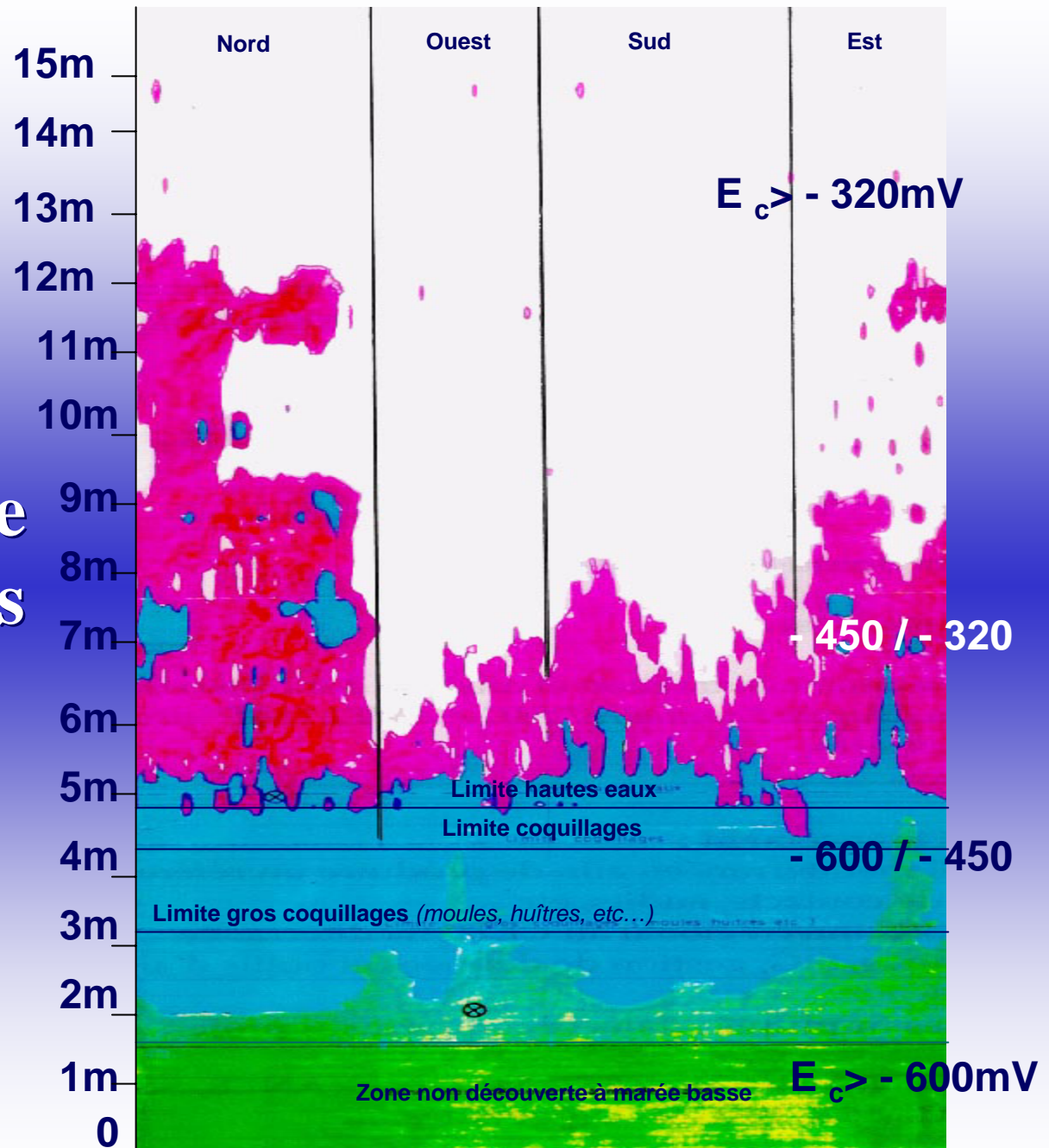


Photo G. Grimaldi

La mesure du potentiel de corrosion

□ limites :

- le ferrailage doit être continu
- pas de revêtement en surface pouvant agir comme isolant
- le béton doit être suffisamment humide pour assurer la conductivité

□ Biais possibles

- l'hygrométrie en surface du béton modifie les mesures : une diminution de 100 mV peut être observée entre une mesure sur surface humide (après une forte pluie) et une mesure à l'état sec
- La carbonatation modifie la résistivité du béton : les potentiels sont plus positifs...
- la présence de chlorures augmente la conductivité de la solution : les potentiels deviennent alors plus négatifs → revoir les seuils de la norme ASTM C876....en milieu marin

La mesure du potentiel de corrosion

Mesures complémentaires :

➤ des mesures de résistivité peuvent permettre de localiser les zones de forte conductivité (forte humidité ou chlorures...)

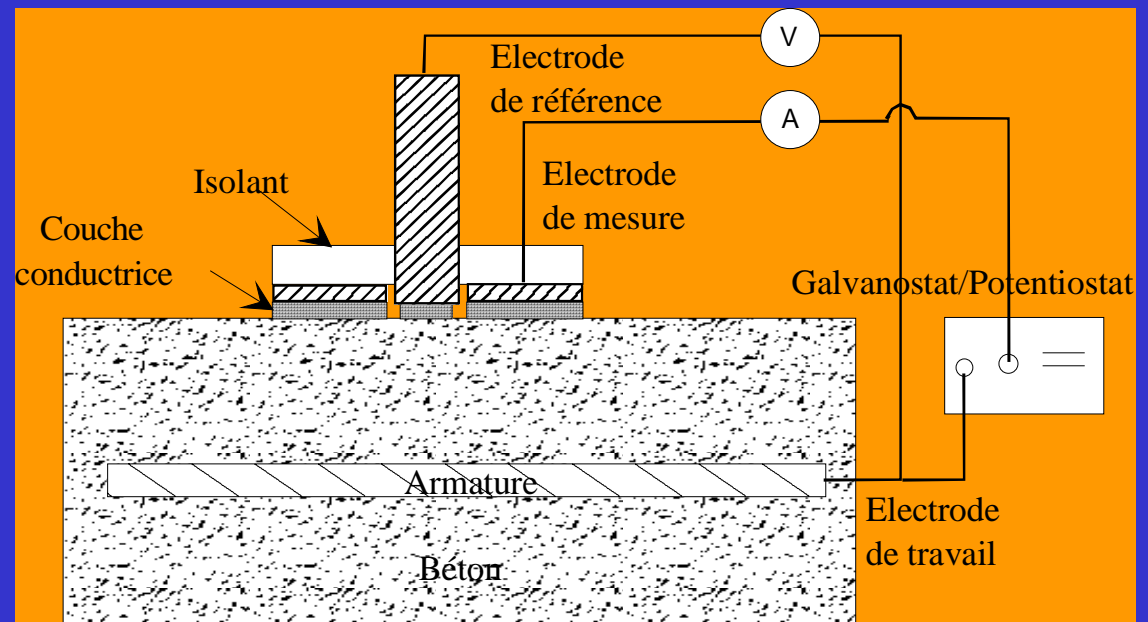
Recalage souhaitée

➤ ouverture de fenêtres dans des zones bien choisies pour observer visuellement l'enrouillement des aciers

La mesure de la vitesse de corrosion

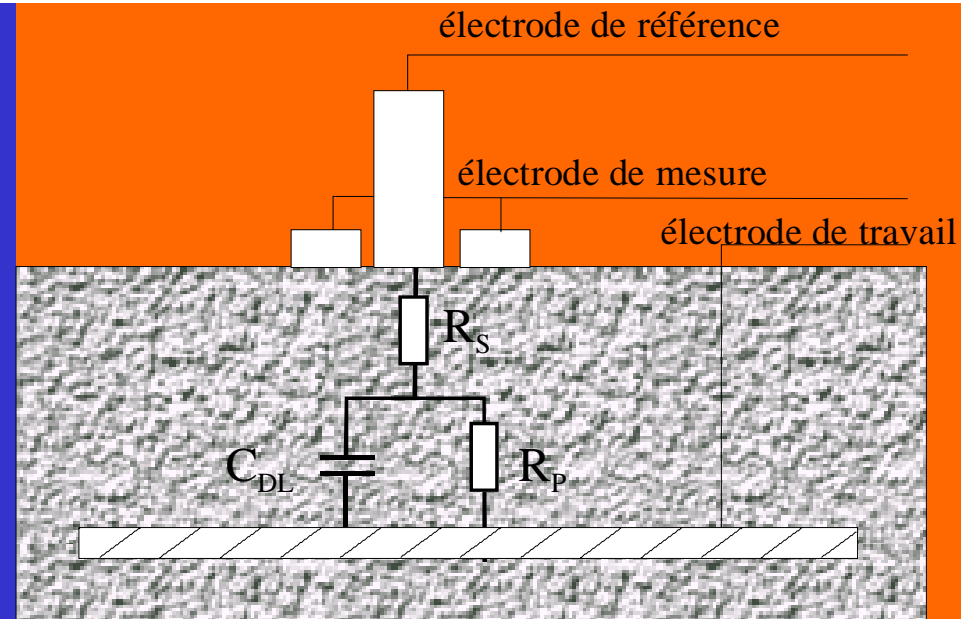
- ❑ Elle fournit une grandeur **quantitative** de l'état **instantané** de corrosion d'une armature
- ❑ **Principe de la mesure** : mesure de la réponse du système acier/béton à une perturbation électrique de faible amplitude ; elle fait appel à 3 électrodes :

- une électrode de référence
- Une électrode de travail reliée à l'armature
- Une électrode de mesure disposée en anneau autour de l'électrode de référence



La mesure de la vitesse de corrosion

0. Application d'un potentiel de faible amplitude dans l'armature et mesure du courant généré



1. Détermination de la résistance de polarisation R_p

Circuit de randles

➤ $R_p = \text{variation de potentiel imposée} / \text{courant mesuré}$

2. Détermination de I_{corr}

➤ $I_{corr} = B / R_p$ où $B = cte$

3. Interprétation des mesures du courant de corrosion ($\mu A/cm^2$)

➤ I_{corr} inférieure à 0,1 : négligeable

➤ comprise entre 0,1 et 0,5 : faible

➤ comprise entre 0,5 et 1 : modéré

➤ $I_{corr} > 1$: élevé

$$1 \mu A/cm^2 = 10 \mu m/an$$

La mesure de la vitesse de corrosion

Appareil de mesure et capteur



02/10/2005

ID et méthodes d'investigations - ESTP 20 mai 2003

52

Photo G. Grimaldi

La mesure de la vitesse de corrosion

□ limites :

- le ferrailage doit être continu
- pas de revêtement en surface pouvant agir comme isolant
- le béton doit être suffisamment humide pour assurer la conductivité

□ Biais possibles

- l'estimation de l'aire de métal polarisée est difficile
- l'humidité du béton modifie les mesures (pas de loi simple...)
- la température influe sur la mesure (pas de loi simple...)
- les diverses lois utilisées reflètent partiellement la réalité
- la présence de chlorures perturbe les résultats...

□ **EN CONCLUSION :** une méthode qui manque de référentiel et qui est affaire d'expert...

Le cas du pont B...

Description du pont



Pont en BA mis en service en 1937

Il permet à une RD de franchir plusieurs voies ferrées...

Il comporte 7 travées dont les plus longues font une vingtaine de mètres. Largeur : 12 mètres

Description du pont

Pont composé de 3 portiques :

- un portique central à 3 travées ;
- deux portiques latéraux dont l'une des 2 travées prend appui sur des corbeaux fixés aux piles extrêmes du portique central (appui de type cantilever).

Chaque pile est constituée de 6 poteaux entretoisés à mi-hauteur : poteaux espacés de 1,55 m, de largeur 34 cm et d'épaisseur 50 cm.

Chaque travée se compose d'une dalle en BA sur 6 poutres, sans entretoise intermédiaire : poutres de largeur 34 cm et de hauteur 1 m, et dalle d'épaisseur 17 cm.

Description de la pathologie



Poutres Principales : Des fissures de flexion, des fissures longitudinales en sous-face, et de nombreuses stalactites...

Description de la pathologie



Poutres Principales : Des fissures de flexion et la présence d'anciens ragréages.....

Description de la pathologie

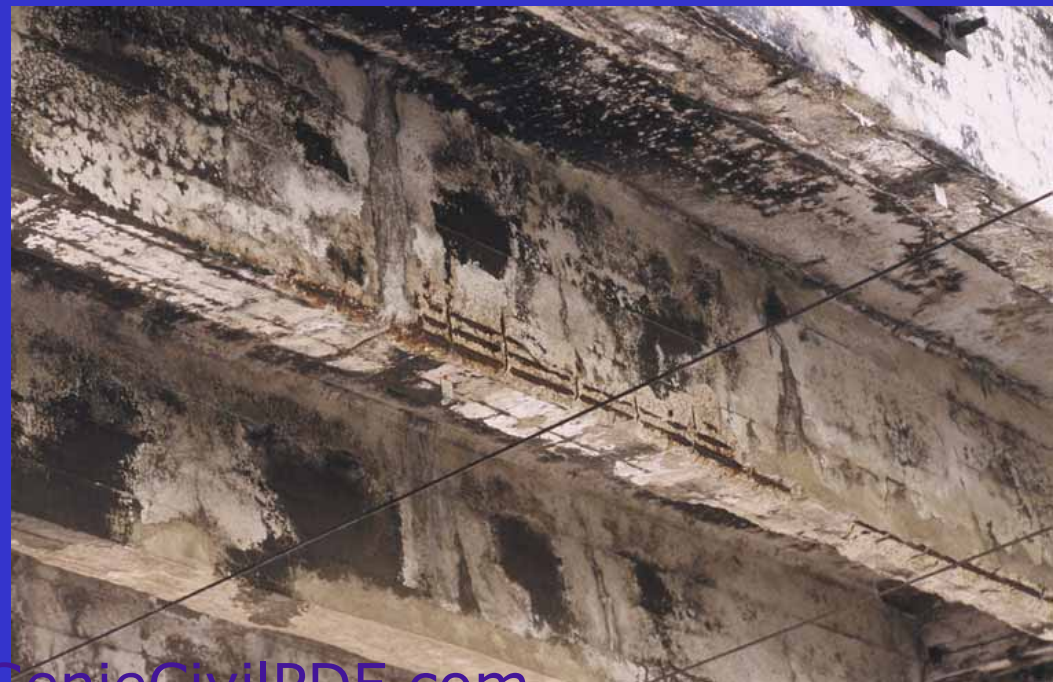


Poutres Principales : Des fissures d'effort tranchant près des appuis sur certaines poutres...

Description de la pathologie



Poutres Principales :
De nombreux éclats
de béton avec fers
apparents...



Description de la pathologie



Poutres Principales :
Des armatures
verticales apparentes,
ou plutôt ... des
ficelles apparentes !

Description de la pathologie



Hourdis : Des sous-faces écaillées avec plaques de béton décollées (plusieurs m²) laissant voir les aciers du lit inférieur et des sous-faces fissurées pleines de calcite

Description de la pathologie



Encorbellements : une fissure longitudinale à la jonction avec la poutre, bien ouverte et avec stalactites

Description de la pathologie



Poteaux : De nombreuses arêtes épauffrées ou fissurées, avec parfois des armatures verticales apparentes sur plusieurs mètres

Description de la pathologie



Corbeaux : Des altérations des abouts de corbeaux avec décollement de plaques de béton et fers apparents...

Problématique

S'il existait un argus des ponts, celui-ci ne serait plus coté !

Cause des désordres : une étanchéité complètement défailante depuis des années, voire inexistante...

Un partage de gestion entre structure et chaussée peu clair.....

Les questions posées ?

Quelle est sa capacité portante ?

Faut-il étayer d'urgence les appuis cantilever ?

Peut-on laisser passer le trafic PL et les bus urbains ?

Faut-il limiter les charges ?

Est-il réparable ? Faut-il le reconstruire ?

REPONSE → AUSCULTATION ET RECALCUL....

Programme d'auscultation

Hypothèse : la dalle est tellement « pourrie » qu'elle est à reconstruire, donc auscultation inutile...

Auscultation du BA (poteaux et poutres) par le LREP

Mesures de profondeur d'enrobage

Mesures de profondeur de carbonatation

Mesure de teneur en chlorures

Mesure de diamètre résiduel des armatures

Mesure de potentiel d'électrodes

Mesure de densité de courant

Auscultation du béton

Mesure de résistance en compression

Analyse minéralogique du béton

Auscultation de la structure

Essais de chargement avec mesure de flèches



Auscultation du BA

(Doc LREP)

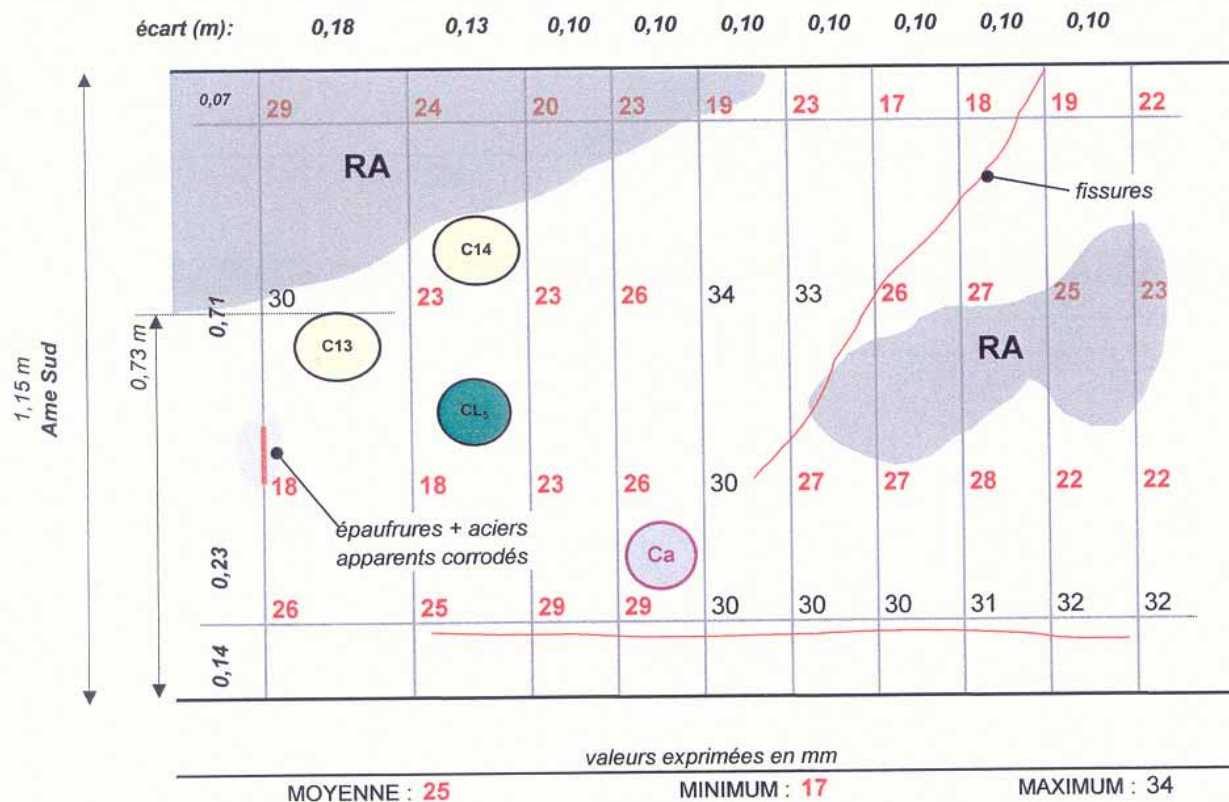
Résultats des
mesures
d'enrobage :

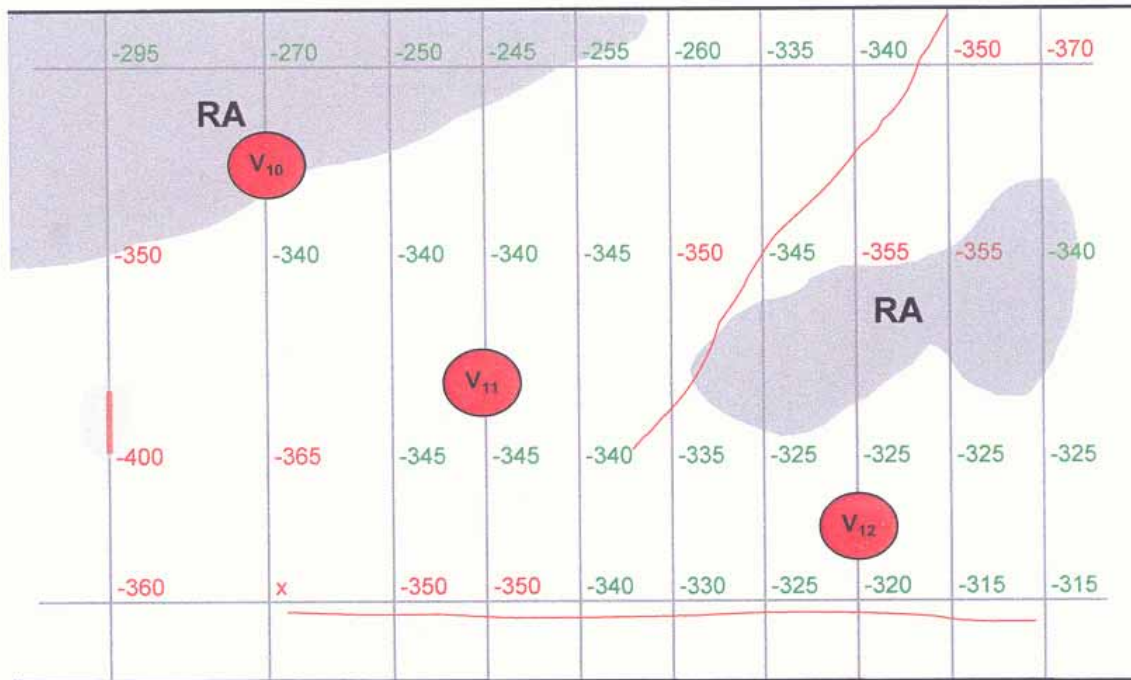
Mini : 17 mm

Moyenne : 25 mm

Maxi : 34 mm

résultats des mesures de profondeur d'enrobage (en mm)





valeurs exprimées en mV

MOYENNE : -330

MINIMUM : -400

MAXIMUM : -245

passivation	enrouillement possible	enrouillement certain
EP >= -200	- 350 mV <= Ec < - 200 mV	< -350
0%	72%	28%

mesures de densité de courant ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

Valeurs (unités : $\mu\text{A} / \text{cm}^2$)	V10 = 3,472	V11 = 2,104	V12 = 1,051	
Niveau de corrosion	négligeable	faible	modéré	élevé
valeurs ($\mu\text{A} / \text{cm}^2$)	0 à 0,200	0,200 à 0,500	0,500 à 1	> 1

Aus-
cul-
ta-
tion
du
BA

(Doc
LREP)

Auscultation du BA



Résultats des mesures d'enrobage :

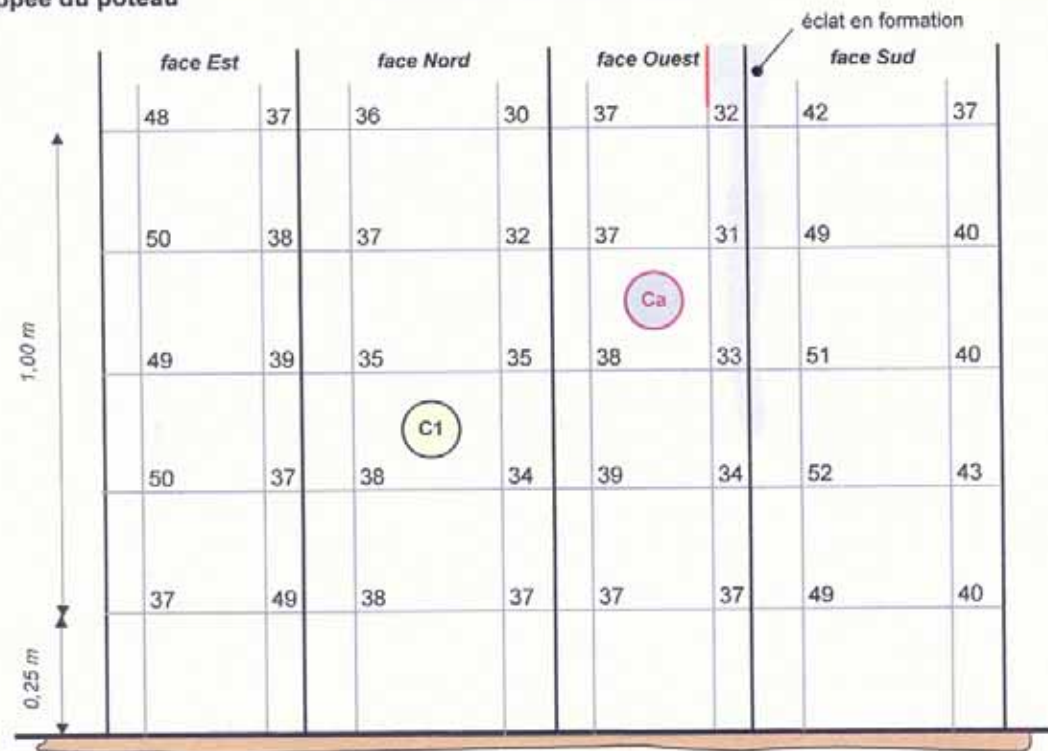
Mini : 30 mm

Moyenne : 47 mm

Maxi : 52 mm

résultats des mesures de profondeur d'enrobage (en mm)

vue développée du poteau



valeurs exprimées en mm

MOYENNE: 40

MINIMUM: 30

MAXIMUM: 52



emplacement carottage pour mesure de la profondeur de carbonatation

résultats des mesures de potentiels d'électrodes (en mV)

vue développée du poteau



valeurs exprimées en mV

MOYENNE: -181

MINIMUM: -295

MAXIMUM: -95

% de valeur dans domaine

passivation	enrouillement possible	enrouillement certain
EP >= -200	- 350 mV <= Ec < - 200 mV	< -350
62%	38%	0%

mesures de densité de courant ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)

Valeurs (unités : $\mu\text{A} / \text{cm}^2$)

V1 = 0,046

V2 = 0,101

Niveau de corrosion

valeurs ($\mu\text{A} / \text{cm}^2$)

négligeable	faible	modéré	élevé
0 à 0,200	0,200 à 0,500	0,500 à 1	> 1

Auscultation du BA

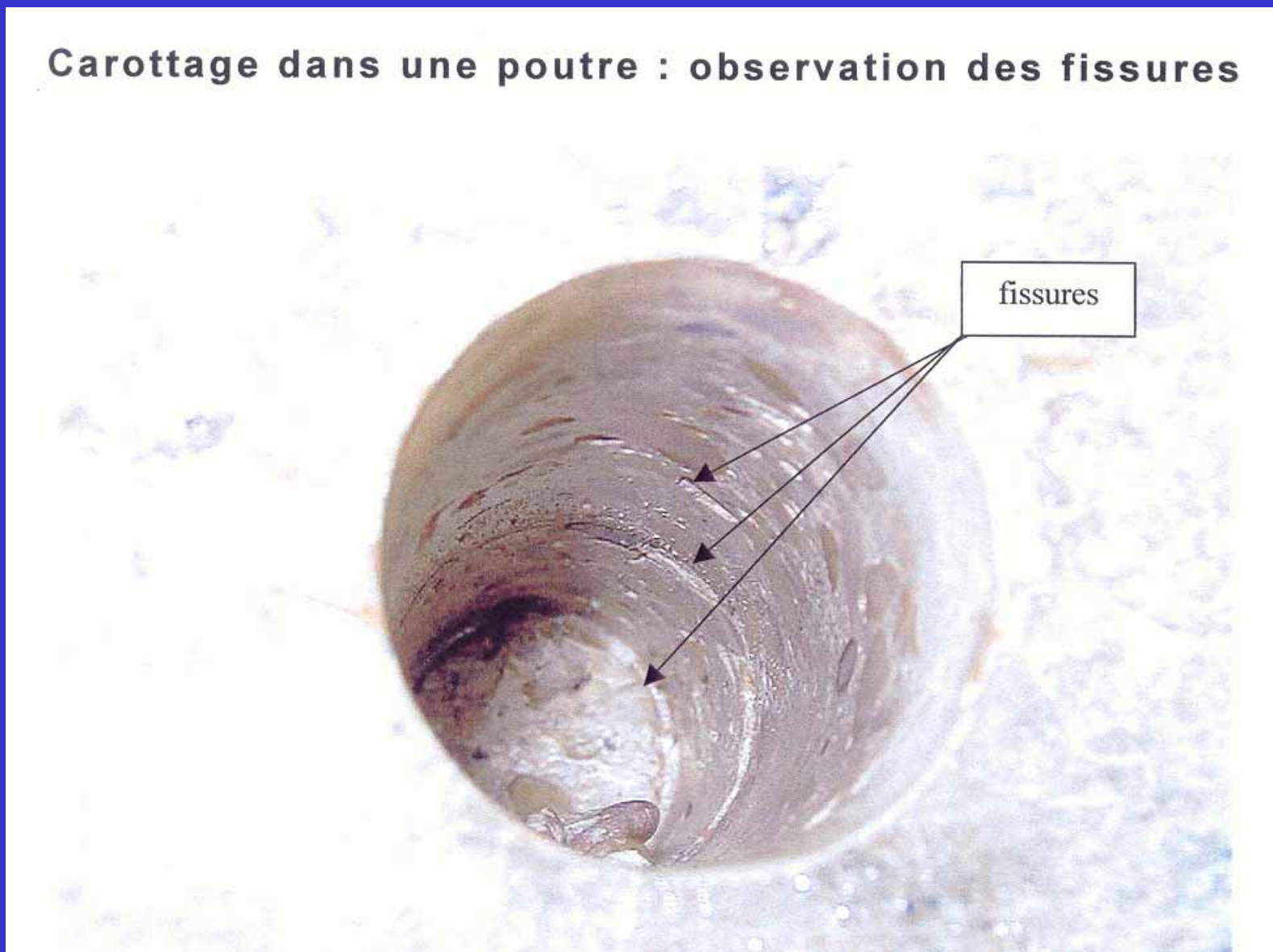
Auscultation du BA



A noter : la porosité du béton
www.GenieCivilPDF.com

Auscultation du BA

Carottage dans une poutre : observation des fissures



A noter : le feuilletage de l'âme des poutres...

Auscultation du BA

Profondeur d'enrobage (Pachomètre) :

- Enrobage des poteaux dispersé : de 22 à 41 mm (99 % > 30 mm)
- Enrobage des poutres très dispersé : entre 6 et 56 mm !...
 - 55 % < 30 mm
 - 13 % < 20 mm
 - 3 % < 10 mm

Profondeur de carbonatation (ϕ 50 mm) :

- Poteaux : carbonatation très faible : de 1 à 3 mm
- Poutres : carbonatation variable : de 6 à 15 mm
- Résultat assez surprenant... : peut-être dû à la forte humidité du béton ?

Auscultation du BA

Potentiel d'électrodes :

- Poteaux :

- enrouillement certain : 50 % des mesures
- enrouillement possible : 20 % des mesures
- passivation : 30 % des mesures

- Poutres

- enrouillement certain : 50 % des mesures
- enrouillement possible : 50 % des mesures
- passivation : 0 % des mesures

Confirmation que tous les aciers des poutres sont en voie de corrosion....

Auscultation du BA

Densité de courant (GECOR 6) :

- Poteaux :

- vitesse de corrosion négligeable pour les zones saines
- vitesse de corrosion très élevée pour les zones malades

- Poutres

- vitesse de corrosion élevée à très élevée dans 50 % des cas
- vitesse de corrosion faible à négligeable dans les autres 50 %

Teneurs en chlorures et en OH⁻ (sur poudre) :

- Valeurs toutes $< 0,1$ % / béton sec et gradients quasi nuls
- rapport Cl⁻/OH⁻ $< 0,125$ (soit largement en dessous du seuil de 0,6)

Auscultation du BA

Diamètre résiduel des armatures :

- Poteaux :

les armatures horizontales de 8 mm ont un diamètre résiduel variant entre 5,5 et 7,5 mm

les armatures verticales de 40 mm ont un diamètre résiduel variant entre 35,2 et 39,2 mm

- Poutres :

les armatures horizontales de 8 mm ont un diamètre résiduel variant entre 5,5 et 7,5 mm

Pertes de section adoptées pour les calculs :

- Poteaux : armatures horizontales = 35 %

armatures verticales = 10 %

- Poutres : armatures horizontales = 20 %

armatures verticales = 35 %

Caractéristiques mesurées sur quelques aciers :

Limite d'élasticité apparente $f_e = 300$ MPa

Résistance à la rupture : 410 Mpa et Allongement : 20 %

Auscultation du Béton

Analyse minéralogique :

- porosité du béton très élevée : 19,4 % en moyenne...
- Ciment de type CEM I / CPA dosé à environ 380 kg/m³
- Rapport E / C estimé à 0,37
- Absence de réaction de gonflement interne
- pâte de ciment apparaissant très carbonatée (beaucoup de calcite)

Conclusions : Mauvaise compacité du béton due à sa mise en œuvre, plus qu'à une mauvaise composition...

La grande porosité favorise la circulation d'eau et de gaz carbonique

Auscultation du béton

Résistance en compression (ϕ 80 mm):

- Poteaux (sur 10 valeurs) :

- Moyenne : 40 MPa
- Ecart type : 10, 5 MPa

→ Résistance caractéristique : $f_{c28} = 30 \text{ Mpa}$

- Poutres (sur 7 valeurs) :

- Moyenne : 31 MPa
- Ecart type : 9 MPa

→ Résistance caractéristique : $f_{c28} = 20 \text{ Mpa}$

Valeurs très dispersées empêchant l'application des règles actuelles supposant un contrôle de production avec un écart type faible....

→ Module instantané estimé à : $E = 30\,000 \text{ MPa}$

Auscultation de la structure

Objectif des essais de chargement :

vérifier le comportement expérimental et caler le modèle de calcul

Résultats :

- Flèches mesurées globalement proches des flèches calculées
- Endommagement de la travée 4 dont les poutres 3 et 5 accusent une flèche plus importante
- Pas de flèche résiduelle mesurée : fonctionnement élastique...

Conclusions principales pour le modèle :

- Les poutres fonctionnent de façon indépendante : absence d'entretoises intermédiaires et hourdis en très mauvais état
- Absence de report possible entre poutres...

Recalcul de l'ouvrage

Vérification « selon les plans » (BAEL 91) :

(méthode de Guyon-Massonet et ELU avec fissur. très préjudiciable)

- Ouvrage globalement conforme en flexion, sauf en moment négatif pour les poutres de rive
- En cisaillement, insuffisance d'armatures verticales dans les âmes des poutres
- Mais hypothèse de Guyon-Massonet optimiste...

Vérification en se calant sur les essais de chargement :

- L'analyse en flexion conduit à limiter la charge dans les poutres sous chaussée à 27,8 t et à n'autoriser aucune charge routière sur les de rive
- Au cisaillement, les poutres de rive sont non réglementaires : il manque 27 à 29 cm²/ml d'armatures verticales
- Les bus peuvent circuler, mais loin des poutres de rive....
- Le hourdis ne tient que grâce à l'épaisseur de la chaussée...

Conclusions tirées pour l'ouvrage

Mesures d'urgence :

Placer des étais provisoires sous certains corbeaux

Ecarter la circulation des véhicules des poutres de rive en la recentrant vers le milieu et placer des barrières de sécurité près des trottoirs

Limiter le tonnage à 27 tonnes

Mesures à moyen terme (3 à 5 ans) :

Remplacer l'ouvrage (la réparation ne fera qu'essayer de remettre en état un ouvrage bien malade au niveau de ses matériaux, et en plus des renforcements structurels sont nécessaires...)

Mettre en œuvre une surveillance renforcée

Purger les hourdis de temps en temps pour éviter les chutes de plaques

Côût de l'auscultation...

Auscultation du BA :

- 4 journées d'une équipe de 3 techniciens qualifiés (5 zones) :
 $4 \times 2\,700 = 10\,800 \text{ €}$
 - 8 carottages de diamètre 50 ou 80 mm :
 $8 \times 300 = 2\,400 \text{ €}$
 - Location d'une plate-forme élévatrice
 $4 \times 600 = 2\,400 \text{ €}$
 - Essais chimiques (Cl⁻ , rapport Cl⁻/OH⁻)
 $14 \times 200 = 2\,800 \text{ €}$
 - Rapport et 3 j de chef de projet
 $3 \times 1\,200 = 3\,600 \text{ €}$
- TOTAL : 22 000 €**

Côut de l'auscultation (suite...)

Analyse minéralogique complète :

- 2 analyses à 2 500 € 5 000 €

Essais de chargement

11 500 €

Recalculs

20 000€

Rapport et 4 j d'expert

3 500 €

GRAND TOTAL : 62 000 €

soit 2% du coût de reconstruction !... (estimé à 3 000 000 €)

Conclusions

D'une manière générale, et surtout lors d'aménagements coûteux, il est indispensable de faire un **bilan de santé du pont** avant de lancer le projet d'aménagement.

Ce bilan de santé n'est pas un simple état de santé apparent !...

Il fait appel à un **diagnostic** et si possible à un **pronostic**...

L'**auscultation** joue alors un rôle fondamental...

Conseils avant de se lancer dans une campagne d'investigations

- ❖ Choisir une société ou un organisme qualifié ayant de l'expérience ou des références d'interventions effectuées avec sérieux
- ❖ Dissocier la société qui fait les investigations de la société qui répare (comme dans l'automobile !...)
- ❖ Ne pas abuser de techniques d'auscultation qui n'apportent pas d'éléments directement utiles pour le diagnostic
- ❖ Ne pas chercher à comprimer outrageusement les délais (rapidité n'est pas forcément synonyme de qualité...)
- ❖ Ne pas hésiter à faire appel à une contre-expertise dans le cas où l'on a des doutes sur les résultats fournis...