

CEFRACOR
CERTIFICATION
Protection
Cathodique



AFGC

IMGC



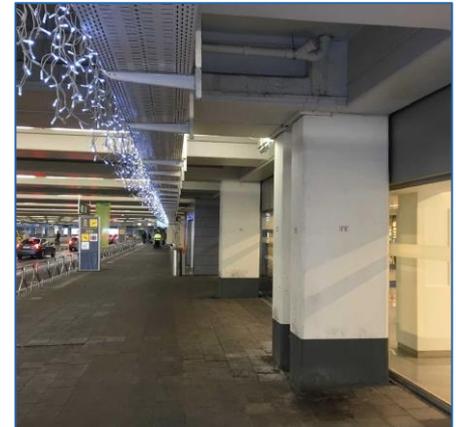
« LA PROTECTION CATHODIQUE DES OUVRAGES EN BETON ARME : DU DIAGNOSTIC AUX TRAVAUX »

Journée Technique AFGC Méditerranée
Mercredi 12 décembre 2018
Centre de Formation Emile Picot de Mallemort



Contrôle de fonctionnement Points de vigilance et REX

Christophe Michaux

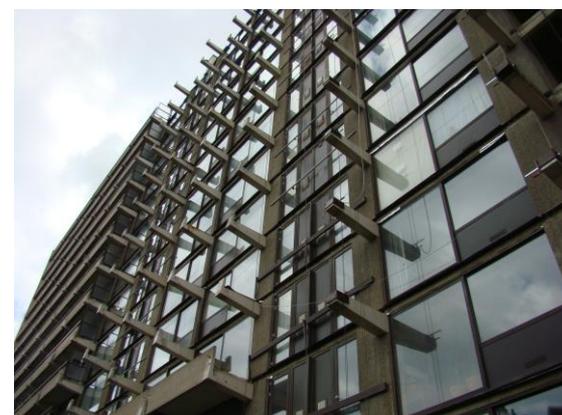
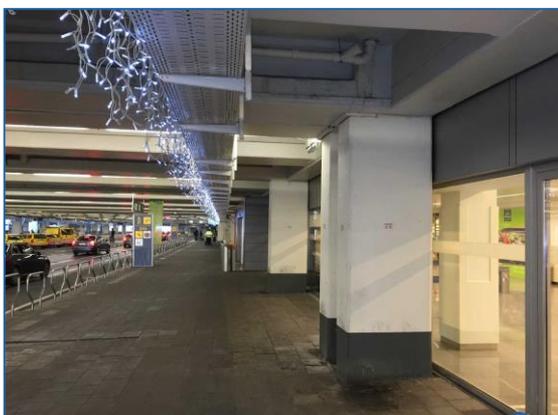


LA PROTECTION CATHODIQUE DES OUVRAGES EN BETON ARME : *DU DIAGNOSTIC AUX TRAVAUX*

Slide introductive de type 2 (avec photos)

Protection cathodique des bétons armés

REX et Points de Vigilance



Tunnel Howald – OA1161

Courant imposé



Tunnel Howald	Résumé
Année d'installation	2010
Éléments protégés	Périphérie des fissures Pied de voûte
Anodes	Anodes discrètes
Electronique	1 unité centrale Deux sous-stations 40 cabinets esclaves

Tunnel Howald – OA1161

Courant imposé

Travaux spéciaux	Iraco S.A. (L)
Référentiel normes	EN 12696, EN 1504, ISO 9000
Durée du chantier	Année 2010, 2 ^{ème} semestre, 4 mois au total
Longueur	2 tubes en béton armé, ± 470 et 430 m
Surface PCCI	± 6300 m ²
Anodes Ti	13000 pièces
Sondes	320 pièces
Protection époxy ciment et peinture époxydique	16 tonnes

Tunnel Howald

Suivi de l'ouvrage depuis 2010 (3)

Tunnel Howald:

Sur 320 points de mesures avec 25 points de mesures sont déclarés non fonctionnels après 8 ans de fonctionnement.

L'ensemble des sondes et électrode de référence a été scellé au coulis dans des réservations forées au préalable. 2/3 des électrodes de référence sont du type Mn/MnO₂.

1/3 sont des coupons Ti.

La performance (critère 2) est obtenue quasi à tout moment sur en 85 % des points de mesure fonctionnels

Pas de dégradation constatée du revêtement au regard du fonctionnement de la protection cathodique.

Nota, Tunnel 2 :

216 points de mesures ont été installés sur l'ensemble des joints.

L'ensemble des sondes a été encapsulé dans un mortier de ragréage après purge locale du béton d'enrobage. 40 à 50% des points de mesures sont déclarés douteux aujourd'hui; des investigations sont en cours

Viaducs autoroutier les Alpes

PCCI/PCCG, 4 types d'anodes



Viaduc autoroutier – Les Alpes

- Ces Viaducs sont l'exemple type d'une protection cathodique qui associe différents types de PC et d'anodes. Une seule électronique de commande permet de piloter l'ensemble des composantes du système.
- Les systèmes par courant imposé sont performants depuis leur mise en service. Les systèmes galvaniques (anodes surfaciques) présentent une performance variable, mais globalement satisfaisante.
- La souplesse du système de commande a permis de séquencer les travaux sur 4 ans. Cette souplesse représente un grand intérêt pour le maître d'ouvrage qui dispose d'un budget limité et un temps annuel alloué aux travaux très courts.
- La construction du système et son design ont été réalisés au fur et à mesure des besoins et des informations issues des diagnostics.

Viaduc autoroutier - Sylans – A40 (F)

- Traitement des voussoirs sur piles-culées



Après application



Après application

Viaduc autoroutier - Sylans – A40 (F)

- Traitement des piles-culées

Protection cathodique par courant imposé, anodes multiples

Zones traitées	Anodes
Hourdis inférieur du tablier	Anodes discrètes durAnode 3
Extrados de la tête de pile	Bandes de titane déployé, ribon mesh Elgard 150
Parement extérieur – 4 faces	Bandes de titane déployé, ribon mesh Elgard 150
Pied de pile	Bandes de titane déployé, ribon mesh Elgard 150
Tête intérieur de la pile-culée	Anodes discrètes durAnode 3, 500 mm
Fondation	Anodes discrètes durAnode 3, 130 mm et 800 mm

Viaduc autoroutier - Sylans – A40 (F)

- Pathologies et traitement des voussoirs sur piles-culées

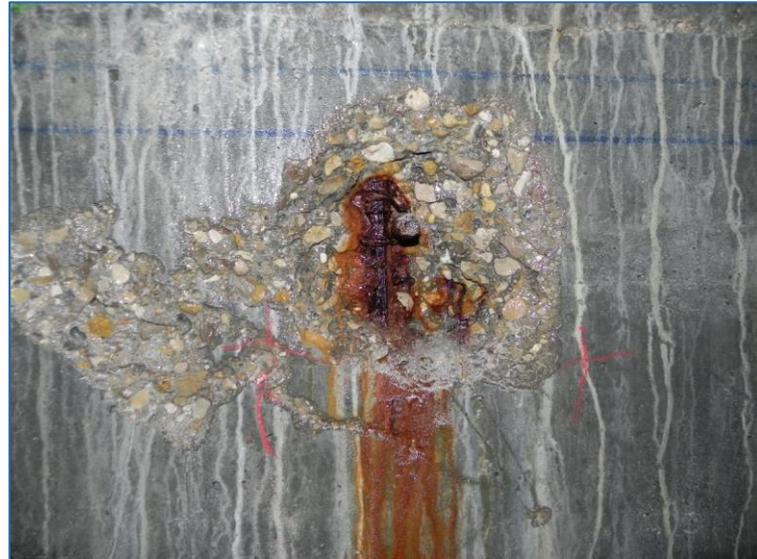
- Les $\frac{1}{2}$ voussoirs posés de part et d'autre des joints de route des piles culées souffrent de corrosion initiée par les sels de déverglaçage
- Une pile-culée comporte deux demi-voussoirs, chacun divisé en 4 sous zones anodiques + un $\frac{1}{2}$ voussoir adjacent à la culée C1 Nord est également traité
- Les éléments sont fins et précontraints
- 64 ponts de mesure
- 9 cabinets esclaves
- Anodes en zinc collé type ZLA
- Protection LHM des anodes (Mapelastic)

Viaduc autoroutier - Sylans – A40 (F)

- Pathologies des culées



Eclatement généralisé du béton d'enrobage



Corrosion sévère avec coulures et perte de section

Viaduc autoroutier - les Alpes

- Pathologie et traitement des culées

Protection cathodique par courant imposé, anodes discrètes

- Les culées sont creuses et comportent un sommier, un plafond, des murs en retour et un mur garde-grève.
- Les parements intérieurs des culées souffrent d'une corrosion sévère des armatures initiée par les sels de déverglaçage issus des joints de route qui ne sont pas étanches.
- 1700 anodes discrètes
- 48 sondes
- 8 cabinets esclaves

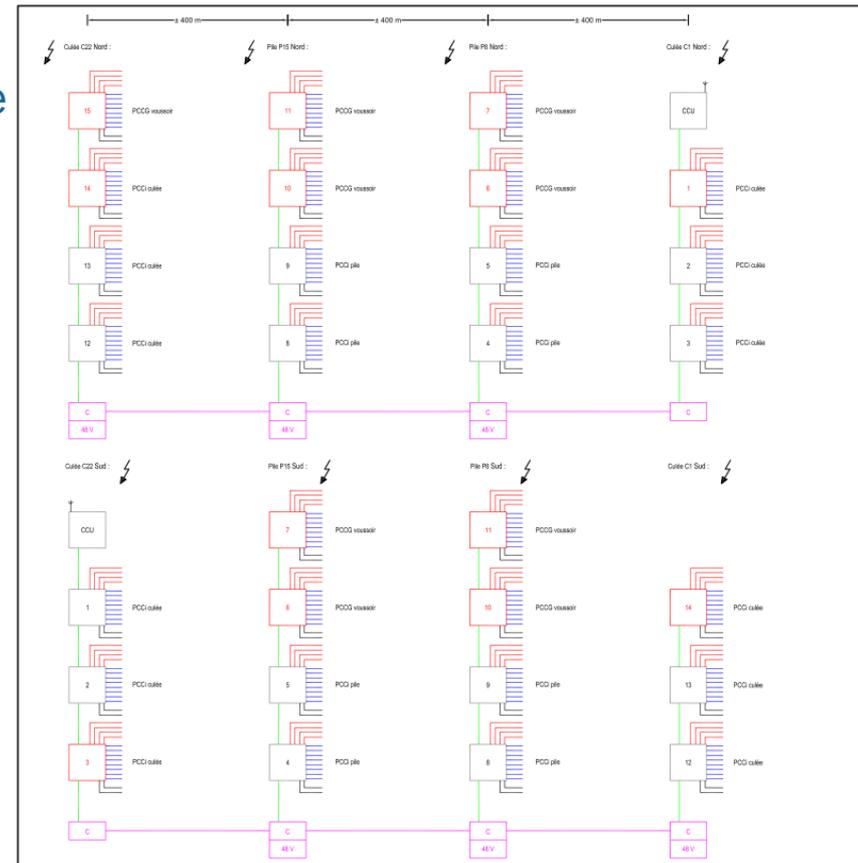


Vue de la culée

Viaducs autoroutiers- Les Alpes

- Electronique de commande

- Deux viaducs, chacun équipé d'une ligne de commande bus en fibre optique de 1,2 km de long
- 2 unités centrales
- 29 unités esclaves : 14 au sud et 15 au nord
- Isolation galvanique entre les esclaves des culées et ceux des piles
- Une connexion Gsm



Commissionning et contrôle



Pense bête !? – toujours revenir au texte de la NF EN 12696 qui vous dit tout (ou presque..)

- Bon sens paysan – mes contacts sont-ils bons ?
- Brancher le générateur +/- dans le bon sens ?
- Zut, j'ai mis trop de jus, que peut-il arriver ??
- Etc..., etc...
- **Faites vous un PAQ (Plan Assurance Qualité)**

c'est une liste des choses à faire que l'on coche pas à pas lors de :

- l'installation du dispositif
- sa mise en route (phase de commissioning)
- du contrôle de bon fonctionnement (avec tests de dépolarisation)

Considérez chaque étape comme un point d'arrêt

Inspection visuelle avant mise en service NF EN 12696 chapitre 8.1

Commencer par **UNE INSPECTION VISUELLE complète**

Vérifier les éléments avant qu'ils soient recouverts

(enterrés, enduits...)

- Câbles bien installés ?
- **Câbles** à la bonne couleur, section, **bien numérotés ?**
- Éléments bien protégés des chocs / de l'humidité ...

Bref, vérifier qu'on est conforme aux plans et au bon sens !

Ca évite de chercher une panne évidente !!

Isolement et continuité des circuits

- (PCCI) Vérification de la non continuité électrique acier/anode



- Vérification de la continuité entre les anodes

À votre avis comment fait-on ? Raisonnement idem aciers

Le voltmètre (ou ohms) est mon ami !

Fonctionnalité des points de mesure REF

Immédiatement après installation je vérifie:

- L'évolution logique du potentiel OFF
- La résistance de circuit (si possible)

J'analyse le fonctionnement logique de la sonde.

Si anomalie, je la remplace

Mise en service! (oui mais comment ?)

NF EN 12696 chapitre 8.3

- Que mesurer ?

a) Le pot. Acier/béton par rapport à toutes les électrodes de référence & sondes permanentes

- Le pot. Acier/béton par rapport à toutes les électrodes de référence portables (surface)

b) La tension de sortie et les intensités débitées par toutes les sources de courant continu des installations de PCCI

c) **La confirmation que la polarité de toutes les valeurs est conforme** au PAQ, à la conception, **et que les pot. Acier/béton** mesurés par rapport à toutes les Erefs & sondes (fixes et portables) **se décalent négativement** par rapport à NF EN 12696 – 8.2

Réglage initial des systèmes PCCI

NF EN 12696 chapitre 8.4

- installation doit être mise sous tension à un niveau de courant jugé adéquat pour atteindre les objectifs de la protection cathodique »
- Note 1)
 - Par ex : Niveau de courant pré-calculé, ou obtenir un baisse de pot. de 200mV

Note 2)

- Une polarisation lente obtenue pour une densité de courant faible peut être bénéfique pour la performance long terme *(génération lente de H+ ?)*

Le système doit être exploité à ces réglages initiaux du courant qui doivent être maintenus avant l'évaluation de la performance initiale, pendant une période suffisante pour atteindre une polarisation significative

Note 3)

- **La période type se situe entre 7-28j après mise sous tension initiale.**
- Si faible polarisation initiale (courant faible au départ) une polarisation complète peut nécessiter plus de 28j

Evaluation de la performance initiale (1)

NF EN 12696 chapitre 8.5

a) Mesure tension de sortie et intensité du courant dans chaque zone de l'installation & calcul de la résistance du circuit

b) Mesure des pot. Instantanés à courant coupé (sans chute ohmique IR)

- *Entre 0,1 et 1 seconde après ouverture du circuit en courant continu*
- *Sur toutes les Erefs (et portable si possible)*

c) **Suivi de ces pot. à courant coupé au cours du temps (courbe dépol)**

- **0,5 / 1 / 2 / 3 / 4 / 12 / 16 / 24 / 25 h** après coupure

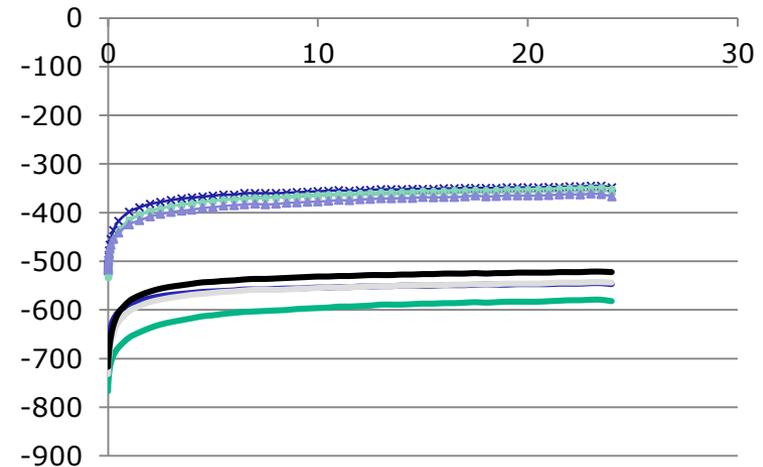
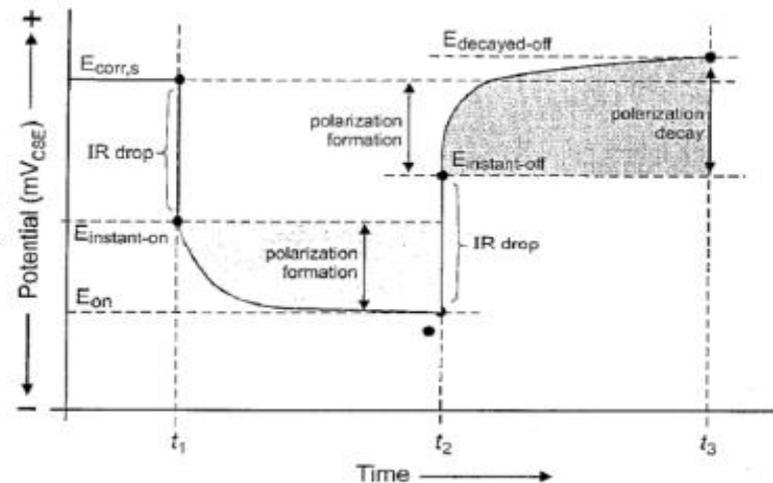
Evaluation de la performance initiale(2)

NF EN 12696 chapitre 8.5

- On est là après la période 8.4 de polarisation initiale

d) Mesure des paramètres de tous les autres capteurs de surveillance

e) Mesure des pot. Acier/béton à courant enclenché (avec chutes IR)



Evaluation de la performance

Critères de performance

Attention à l'environnement du béton (marées, c.vagabonds..., variations fortes de T° et HR)

Si on mesure par rapport à Ag/AgCl/KCl 0,5M)

- B.Armé

Aucun pot. Acier/béton à courant coupé < -1100mV

- B.Précontraint.

Aucun pot. Acier/Béton à courant coupé < -900mV (fragil. Hydrogène)

Pour toute structure, tout point représentatif de l'acier dans le béton doit satisfaire **à l'un des critères** donnés aux alinéas a) à c)

- a) Un potentiel « à courant coupé » plus négatif que -720mV par rapport à Ag/AgCl/KCl 0,5M; ou
- b) Une dépolarisation d'au moins 100mV sur un maximum de 24 h à partir de la coupure; ou
- c) Une dépolarisation pendant une longue période (typiquement 24h ou plus) d'au moins 150mV à partir de la coupure du courant, sujette à une décroissance continue et de l'utilisation d'électrodes de référence (et non des capteurs de décroissance) pour des mesures au-delà de 24h.

Note : pour les ensembles galvaniques (PCCG) utilisant des anodes en zinc, le degré de polarisation excessive est limité par nature. Il convient en général que ceci suffise à maintenir le potentiel acier/béton à une valeur inférieure à la limite du potentiel de -900mV par rapport à Ag/AgCl/KCl 0,5M

Note 4 : les critères a), b) et c) mentionnés ci-dessus, ne sont pas nécessairement fondés sur des considérations théoriques mais sont proposés comme une série non exhaustive pratique de critères susceptibles d'indiquer une polarisation adéquate et qui conduiront au maintien ou au rétablissement des conditions de protection pour l'acier dans le béton.

Note 6 : dit – il convient de placer les électrodes de référence et autres capteurs à une certaine distance des réparations du béton

Points de vigilance



Points de vigilance

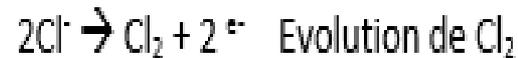
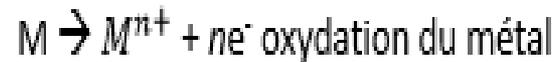
adhérence et couches rapportées

- ▶ Les problématiques:
 - ▶ 1,5 MPa ? Au niveau de la réparation , de la couche de protection-finition, de la couche rapportée encapsulant l'anode
 - ▶ Préparation support , poussières, corps gras
 - ▶ Incompatibilité planning
 - ▶ Qualité uniforme sur de grandes surfaces
 - ▶ Perturbation dues à la mise en place de l'anode
 - ▶ Acidification à l'anode
 - ▶ Garantir l'adhérence dans le temps (T, Venues d'eau, gel, cisaillement à l'interface)

Points de vigilance

acidification à l'anode (1)

Réaction à l'anode



- Concentrations des chlorures à l'anode (*effet bénéfique*)
- Phénomène d'acidification à l'anode (*effet négatif, diminution du pH*)
- Transformation des ions chlorures en gaz (*effet négatif*)

Points de vigilance

acidification à l'anode (2)



- Echanges gazeux inévitables
- Attention aux revêtements/ barrières
- Points chauds et venues d'eau
- Décollements des mortiers et couches rapportées
- Dégradation de l'anode, tout type (des signes d'acidification sont constatés sur une dizaine d'anodes en pied de voûte au tunnel Howald); investigations en cours
- Pression de gaz et phénomènes de Pop-up

Points d'attention particulière

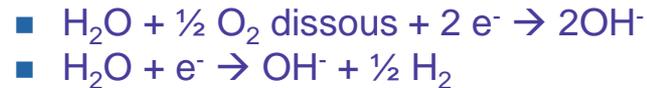
mortier et encapsulage de l'anode

- ▶ Les mortiers et coulis encapsulant l'anode doivent donc être réfléchis et formulés à façon.
- ▶ Le mortier encapsulant devrait être réfléchi au regard des propriétés suivantes ; toute propriété venant empêcher la distribution attendue du courant protecteur étant source de non fonctionnement :
 - ▶ Contact intime avec l'anode et bon encapsulage
 - ▶ Résistivité électrique testée et maîtrisée
 - ▶ Retrait compensé
 - ▶ Fort pouvoir adhérent
 - ▶ Fort pouvoir d'acceptation des acides de la protection cathodique
 - ▶ Fort pouvoir de diffusion des gaz
 - ▶ Mise en œuvre aisée

Points de vigilance, cathode

Fragilisation à l'hydrogène

- Réaction à la cathode



→ Production d'alcalinité à la cathode, risque d'alcali-réaction (*effet bénéfique*)

→ Production d' H_2 si polarisation trop négative risque de fragilisation de l'acier par l'hydrogène (*effet négatif*)



Limites à respecter

Acier précontraint limite $E_{\text{off}} < -900 \text{ mV/Ag-AgCl/KCl } 0,5 \text{ M}$ aciers à haute limite élastique

Armature béton armé limite $E_{\text{off}} < -1100 \text{ mV/Ag-AgCl/KCl } 0,5 \text{ M}$

→ Risque de perte d'adhérence acier/béton pour $E < -1100 \text{ mV/ECS}$ à long terme

Points de vigilance

mortier et encapsulage de l'anode

- ▶ Les mortiers et coulis encapsulant l'anode doivent donc être réfléchis et formulés à façon.
- ▶ Le mortier encapsulant devrait être réfléchi au regard des propriétés suivantes ; toute propriété venant empêcher la distribution attendue du courant protecteur étant source de non fonctionnement :
 - ▶ Contact intime avec l'anode et bon encapsulage
 - ▶ Résistivité électrique testée et maîtrisée
 - ▶ Retrait compensé
 - ▶ Fort pouvoir adhérent
 - ▶ Fort pouvoir d'acceptation des acides de la protection cathodique
 - ▶ Fort pouvoir de diffusion des gaz
 - ▶ Mise en œuvre aisée

Points de vigilance

Pérennité et encapsulage des sondes de référence

- ▶ Même raisonnement que pour les anodes
- ▶ Les mortiers et coulis encapsulant les REF(s) doivent donc être réfléchis et formulés à façon.
- ▶ Au-delà du mortier la géométrie de l'ouvrage et la localisation du point de mesure peuvent a priori rendre l'installation plus ou moins difficile et donc affecter son fonctionnement dans le temps:
 - ▶ Cas typique des REF installées en plafond

MERCI
POUR VOTRE ATTENTION