



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





Présentation des procédés de traitement électrochimiques

T. Desbois – Cerema
B. Thauvin – Cerema
V. Bouteiller – Ifsttar



2



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

Introduction

- D'après le projet CONREPNET : 50% du budget de l'Europe pour la construction affecté à la réhabilitation ou la remise à neuf d'infrastructures détériorées
- Technique de patch repair : un échec une fois sur deux
- Techniques de protection cathodique : vraisemblablement une solution intéressante

Principales causes de détérioration	Fréquence	Succès
Corrosion	54%	50%
Défaut de construction	18%	90%
Gel	12%	25%
Fissures	9%	65%

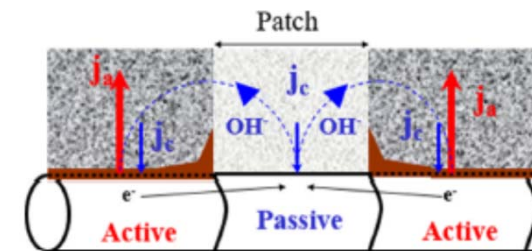


Fig. 3. Situation 1 - Macrocell after patch repair.

Source : *Contribution of Sacrificial Anode in reinforced concrete patch repair : Results of numerical simulations*, E. Loziquez and al., *Construction and Building Materials* 178 (2018) 405-417

Réhabilitations électrochimiques

- Textes et recommandations
 - Réalcalinisation : NF EN 14038-1 (mai 2016)
 - Déchloration : PR NF EN 14038-2 (Date cible de publication : 07/02/2020)
 - Protection cathodique
 - par courant imposé (PCCI) : NF EN ISO 12696 (février 2017)
 - par courant galvanique (PCCG) : NF EN ISO 12696 (février 2017) + Guide sur les Anodes galvaniques du Cefracor (2012)

Réhabilitations électrochimiques

Principes généraux

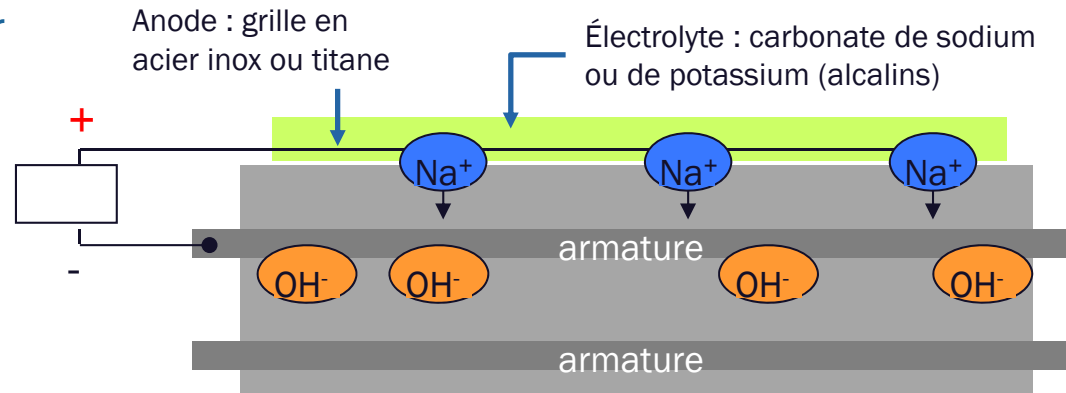
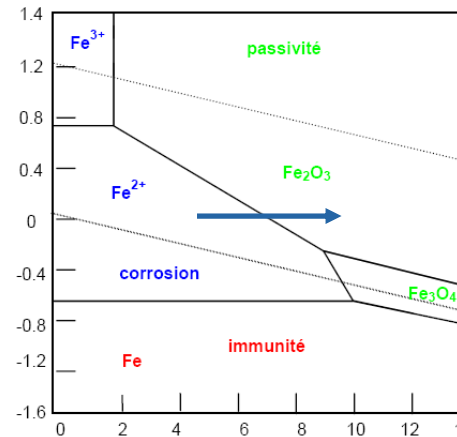
- Importance du diagnostic
 - Pour choisir la solution la plus adaptée (caractérisation du béton armé, enrobage)
 - Pour effectuer le zonage le plus approprié
- Volet réparation
 - Purge du béton non adhérent
 - Nettoyage des armatures apparentes
 - Reconstitution du béton d'enrobage (ragréage, projection)
- Points de vigilance
 - Continuité électrique du ferrailage
 - Dans le cas de bétons avec laitiers ou RAG, ainsi qu'en présence de précontrainte
 - Réalisation de chantier pilote ou d'épreuve de convenance
 - Personnels qualifiés : NF EN ISO 15257 (juillet 2017)
 - **LE BÉTON POLLUÉ (CHLORURES ET CARBONATATION) ADHÉRENT PEUT RESTER EN PLACE**

Réalcalinisation

- Objectif : Augmentation du pH du béton autour de l'armature
=> Passivation

- Principe

- Polarisation de l'armature la plus proche du parement à l'aide d'une anode placée sur ce parement
- Anode enrobée d'une pâte saturée d'un liquide adhoc
- Circulation du courant de polarisation de l'anode par l'armature (cathode)



Réalcalinisation

Mise en œuvre

- Projection d'une 1^{ère} couche de pâte (cellulose ou laine de roche) avec la solution d'électrolyte
- Mise en place du treillis anodique (acier ou titane) sur des baguettes isolantes fixées au parement
- Connexion des fils d'anode sur le treillis
- Projection d'une 2^{ème} couche de pâte
- Raccordement électrique au générateur du courant continu (42V)
- Humidification de la pâte par l'électrolyte (ou par de l'eau)
- Suivi des tensions et courants, prélèvements de béton en cours de traitement pour analyses (pH)
 - Densité de courant < 2 A/m² de surface d'armature
 - Durée du traitement : au moins 200h (traitement temporaire)
- Dépose de l'installation
- Rinçage à l'eau basse pression

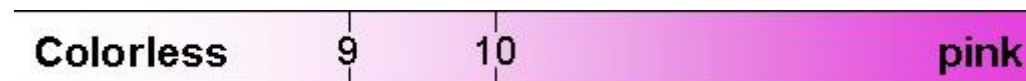


Ex : Traitement de réalcalinisation par CI du pont Camille de Hogues (86) – Novbéton® (Renofors)

Réalcalinisation

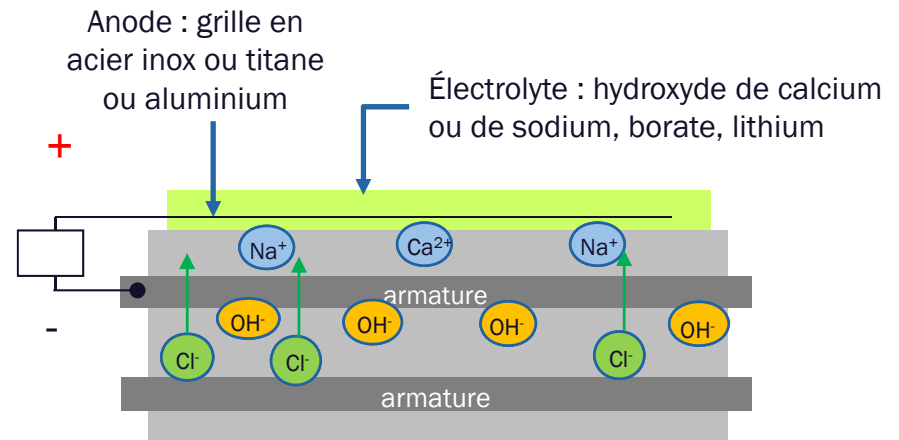
Contrôles de réception

- Essais de pH à la phénolphthaléine dans chaque zone anodique : EN 14630
 - Changement de couleur à pH 9-10, rose alors que si pH < 9-10, incolore
 - Coloration rose autour de l'armature doit atteindre au moins 10mm ou le diamètre de la barre (la plus petite des deux valeurs)
 - Vigilance : Même si le béton se colore en rose, le pH de 13 n'est pas forcément retrouvé (Thèses de YunYun Tong et Yolaine Tissier)



Déchloration

- **Objectif** : Extraction des ions chlorures de l'enrobage
- **Principe**
 - Polarisation de l'armature la plus proche du parement à l'aide d'une anode placée sur ce parement
 - Anode enrobée d'une pâte saturée d'un liquide adhoc
 - Circulation du courant de polarisation de l'anode par l'armature (cathode)



Déchloration

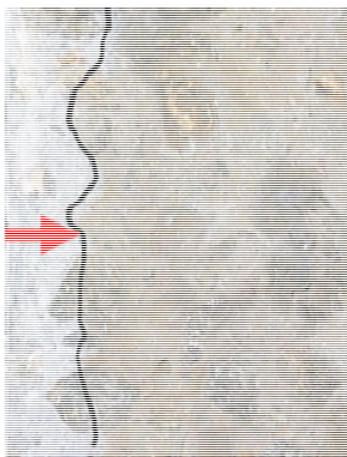
Mise en œuvre

- Projection d'une 1^{ère} couche de pâte avec la solution d'électrolyte
- Mise en place du treillis anodique (acier ou titane) sur des baguettes isolantes fixées au parement
- Connexion des fils d'anode sur le treillis
- Projection d'une deuxième couche de pâte
- Raccordement électrique au générateur de courant continu
- Humidification de la pâte par l'électrolyte (ou par de l'eau)
- Suivi des tensions et courants, prélèvements de béton en cours de traitement pour analyses ([Cl⁻], résistivité)
 - Densité de courant < 10 A/m² de surface d'armature => **Attention une densité de courant trop importante peut amener à un échauffement du béton et à fissuration !**
 - Durée du traitement : 8 à 10 semaines (traitement temporaire)
- Dépose de l'installation
- Rinçage à l'eau basse pression

Déchloration

Contrôles de réception

- Dosage quantitatif de $[Cl^-]$ selon mode opératoire AFREM-AFPC
 - Nécessité de faire un point zéro avant traitement
 - Prélèvement au trépan de poudre de béton par tranche
- Détermination qualitative de la position du front de chlorures par la méthode colorimétrique (nitrate d'argent) : méthode d'essai LPC n° 58

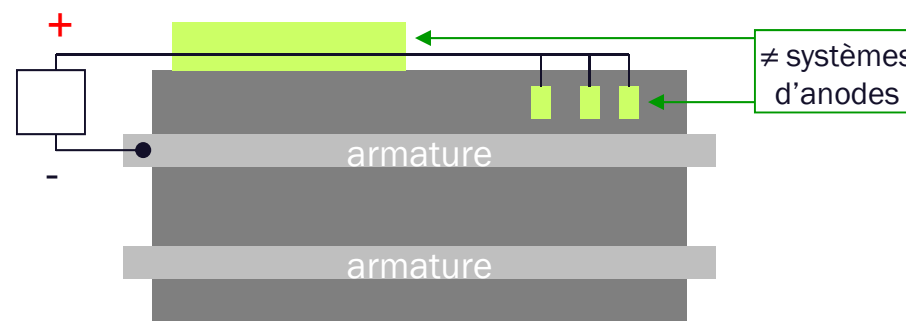


Réalcalinisation et déchloruration : limites de vigilance

- La durabilité de ces traitements sur le long terme n'est pas connue
 - D'après des travaux Ifsttar, la réalcalinisation ne serait pas durable au-delà de 2 à 5 ans
- Introduction d'alcalins dans le béton => attention au risque d'alcali-réaction : analyse préalable du béton (teneur en alcalins équivalent, granulats potentiellement réaction PR)
- Enrobage important et/ou très compact => perte d'efficacité
- Présence d'armatures de précontrainte => risque de fragilisation des armatures dû à un dégagement d'hydrogène (H₂) provoqué par le courant de polarisation – Possibilité de protection des armatures passives sous réserve : armatures passives suffisamment éloignées de la précontrainte, pas de continuité électrique entre les armatures passives et de précontrainte.
- Réalcalinisation : Présence de chlorures en grande quantité => prévoir une extraction de chlorures au préalable
- Déchloruration
 - Présence de chlorures en grande quantité ou au-delà des armatures => perte d'efficacité
 - Rester à 1A/m² d'acier

Protections cathodiques

- **Objectif** : Prévenir, ralentir, voire stopper la corrosion
- **Principe**
 - Traitement permanent
 - Abaissement du potentiel électrochimique de l'armature jusqu'à une valeur seuil : **potentiel de protection**
 - Polarisation de l'armature dans le béton à l'aide d'une anode placée en parement ou dans l'enrobage
- **Courant de polarisation** (de l'anode vers la cathode)
 - **Courant imposé** : générateur électrique anode/cathode (PCCI)
 - **Courant galvanique** : connexion directe anode/cathode (PCCG)



Protections cathodiques

Niveaux de protection

- Deux niveaux selon la NF EN ISO 12696 (Annexe A Informative)

Niveau de protection	Description	Densité de courant (mA/m ²)
Prévention cathodique	Empêche l'apparition de nouveaux sites de corrosion	0,2 à 2 mA/m ²
Protection cathodique	Haut niveau de protection, arrêt de la corrosion active	2 à 20 mA/m ²

Protection Cathodique par Courant Galvanique

Protection Cathodique par Courant Imposé

Protections cathodiques

PCCI vs. PCCG

PCCI

- Niveau de courant calculé en fonction de la quantité d'armatures à traiter
- Selon le niveau du courant imposé
 - Application en préventif (phase d'incubation de la corrosion)
 - Application en protection (phase de propagation de la corrosion)
- Anodes surfaciques : treillis de titane traité recouvert de béton, revêtements conducteurs, fibres de carbone
- Anodes discrètes en réseau : pièces tubulaires en titane enfoncées dans le béton

PCCG

- Densité de courant visée suivant l'exposition
 - Exposition faible (aérien) : $0,5\text{mA/m}^2$
 - Exposition modérée : 1mA/m^2
 - Exposition forte (marnage, sels) : 2mA/m^2
- Courant galvanique : différence de nature de métal entre l'anode et l'armature (potentiel redox)
- Anodes surfaciques : zinc projeté, treillis ou bandes collées
- Anodes discrètes : anodes isolées ou en réseau

Protections cathodiques

Installation et mise en œuvre

- Purge des bétons dégradés et non adhérents
- Reconstitution du ferrailage (si nécessaire)
- Mise en place des électrodes de références (pour le contrôle/suivi)
 - 2 par zone protégée par PCCI
 - 2 par zone représentative pour la PCCG
- Mise en place possible de sondes de dépolarisation par zone (pour le contrôle/suivi)
- Vérification de la continuité électrique du ferrailage
- Réalisation des connexions
 - Au moins 2 points de connexion négatifs à l'armature/acier pour le courant de protection cathodique
 - Au moins 1 connexion d'essai à l'armature/acier pour le mesurage des potentiels acier/béton par rapport aux électrodes permanentes ou portables
- Reconstitution du béton d'enrobage
- Installation des anodes (dans forages ou en surface)
- Contrôle de l'absence de court-circuit entre anodes/armatures
- Scellement des anodes (cas des anodes dans forage)
- Recouvrement par béton ou mortier projeté (cas des anodes surfacique de type treillis) et contrôle d'adhérence
- Connexions et câblage
- Mise sous tension et mise en fonctionnement par zone

Protections cathodiques

Critères de performance de la protection

- D'après la norme, l'acier en tout point représentatif doit satisfaire à l'un des critères suivants
 - Potentiel des armatures à courant coupé $< -720\text{mV}$ par rapport à Ag/AgCl/KCl 0,5M
 - Dépolarisation à 24h $\geq 100\text{mV}$
 - Dépolarisation au-delà de 24h $> 150\text{mV}$ (utilisation d'électrodes de référence et non de sondes de dépolarisation)
- En PCCG : critères peuvent être difficiles à atteindre

Protections cathodiques

Comparaison

	PCCI	PCCG
Courant	<ul style="list-style-type: none"> - Constant dans le temps - Choisi au préalable - Débité par un générateur 	<ul style="list-style-type: none"> - Fluctue selon la demande de l'armature - Débité par le couple anode/cathode
Consommation de l'anode	Non	Oui
Monitoring	Oui	Uniquement si prévu
Critères de performance	NF EN ISO 12696	NF EN ISO 12696 mais avec des difficultés possibles à les atteindre

Conclusion

- Nécessité sur ces sujets d'une meilleure communication / formation (notamment certification des personnels) ainsi que d'un travail collectif (scientifiques, laboratoires, entreprises, MOA etc), s'agissant de techniques peu courantes, nécessitant le recours à des compétences d'experts
- Besoin de constituer un REX sur les traitements électrochimiques (techniques peu courantes)
- Vigilance :
 - Réparation et preuve d'efficacité → monitoring
 - Temps d'équilibre de la solution technique en courant/tension
 - Monitoring à vie
 - Besoin de chantiers pilotes avant réparation (adaptation au cas de réparation) - *coût seulement 2% dans le cas de Saint-Cloud*
 - Inclure le monitoring et son dépouillement dans le CCTP (faire évoluer les CCTP !)
- Exemples de chantiers suivis par l'Ifsttar et le Cerema
 - Réalcalinisation du pont Camille de Hogues
 - Chantier pilote PCCI anodes forées du Viaduc de Saint-Cloud
 - Chantier expérimental PCCG par le Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire