IMGC

DIAGNOSTIC ET RÉPARATION DU BÉTON ARMÉ DÉGRADÉ PAR CORROSION

Journée Technique

MARDI 31 MAI 2022

FNTP – 3 Rue de Berri, 75 008 PARIS

En collaboration avec le CEFRACOR

La protection cathodique : conception, systèmes et contrôles





Première partie : conception

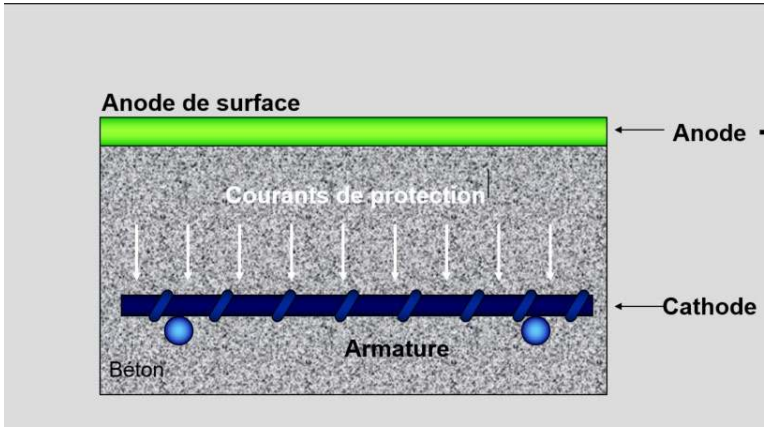
Michel Grill, Sixense Engineering

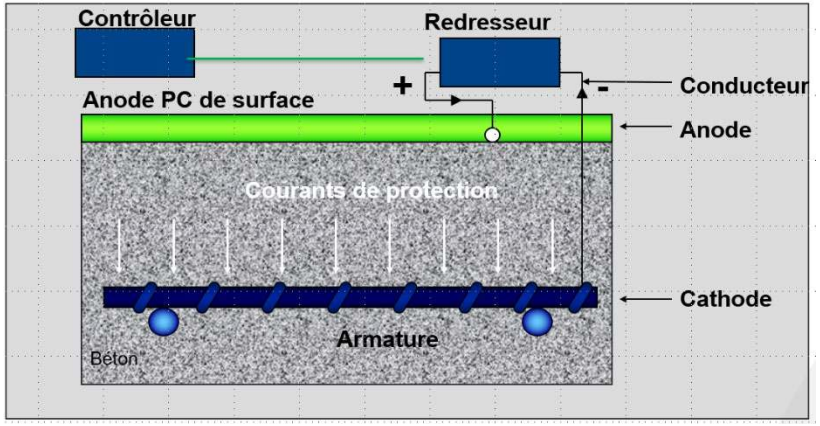
Définition

- La protection cathodique dans les ouvrages en béton armé vise à réduire la vitesse de corrosion des armatures à un niveau acceptable en faisant passer un courant continu à partir d'anodes vers la surface des armatures.

Comment faire circuler un courant électrique dans du béton ?

- Deux grandes familles de protection cathodique existent :
  - PC par courant imposé
  - PC par courant galvanique (sacrificiel)





Cadre normatif

- Normes NF EN 1504 parties 1 à 10, Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Définitions, prescriptions, maîtrise de la qualité et évaluation de la conformité

- Norme NF EN ISO 12696, Février 2017 (Protection cathodique de l'acier dans le béton) :

- Norme NF A 05-800 de Mars 2006 « Prestations de services en protection cathodique »,

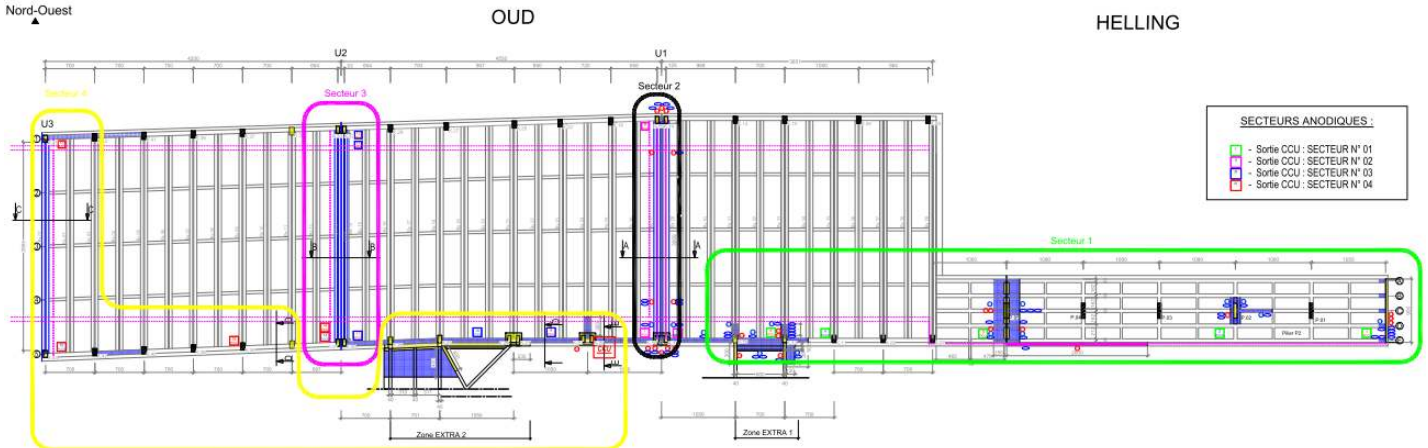
- Norme NF EN ISO 15257 de Juillet 2017 « Protection Cathodique - Niveaux de compétences et certification du personnel en protection cathodique – Base pour un dispositif particulier de certification »,

Conception

Objectifs

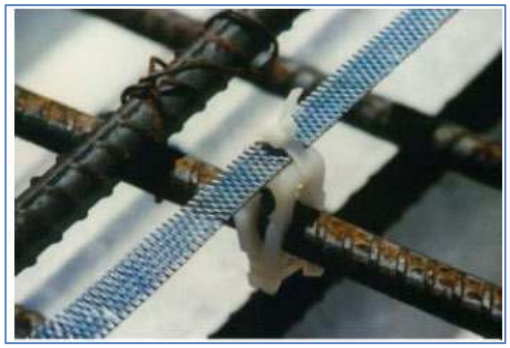
- La conception vise à définir les zones à protéger et à assurer la bonne diffusion des courants de protection dans ces zones :
  - Distribution homogène
  - Distribution de courant suffisante
  - Distribution adaptée à chaque zone

Zonage anodique



Conception

Données d'entrées

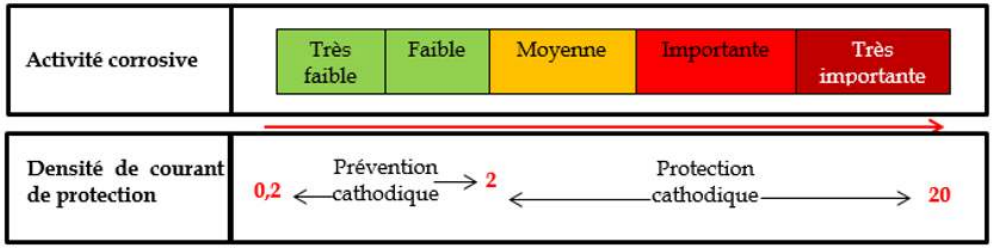


- L'ouvrage
  - Ouvrage ancien ou neuf ?
  - DOE et historique, diagnostics
  - Exposition, situation géographique, environnement
  - Alimentation électrique à proximité
- Le projet
  - Contrainte d'exploitation
  - Durée de vie visée
- **Qui conçoit ?** Une personne qualifié niveau 4 suivant EN 15257, spécialiste en protection cathodique (ou expert)

Conception

Dimensionnement

- Le dimensionnement vise à définir le besoin en courant de protection.
  - Découpe de la structure en zones de protection cathodique
    - Densité de ferraillage
    - Expositions
  - Etude du ferraillage
    - Calcul de la surface d'acier à protéger
    - Calcul du ratio surface acier surface béton
  - Hypothèse en courant de protection (densité de courant)

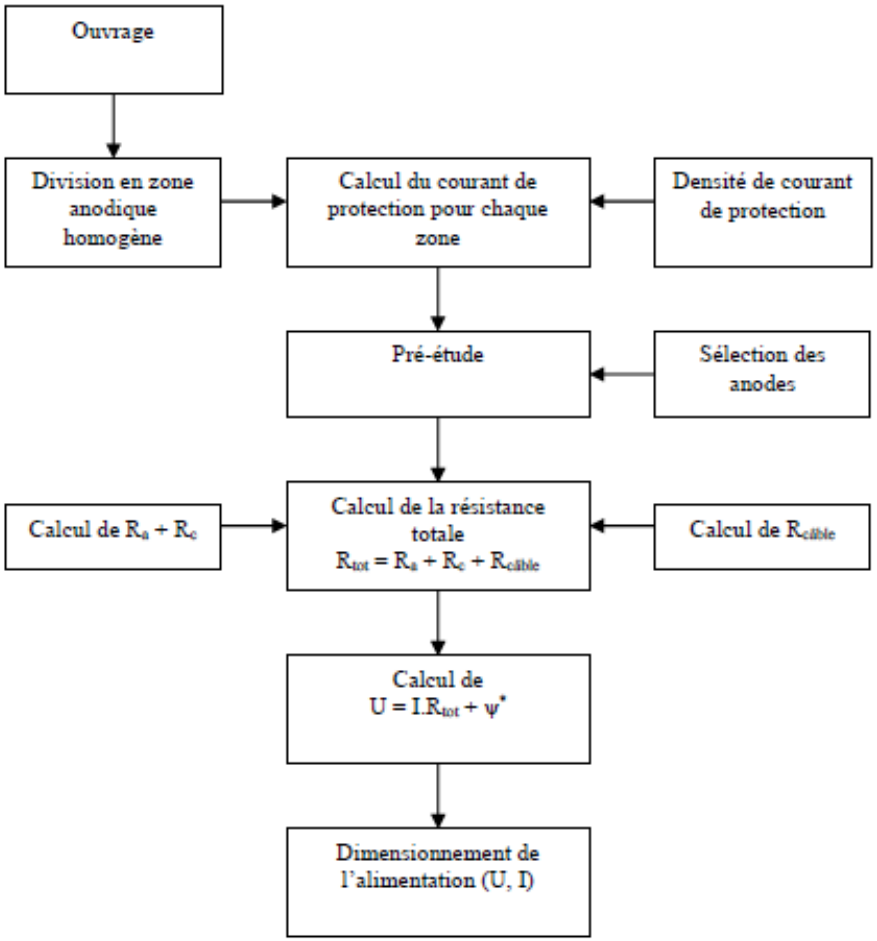


mA/m²

  - Choix du type de protection (courant galvanique ou imposé)
  - Calcul du nombre d'anodes (choix de l'anode)
  - Distribution des anodes (espacement entre anodes)

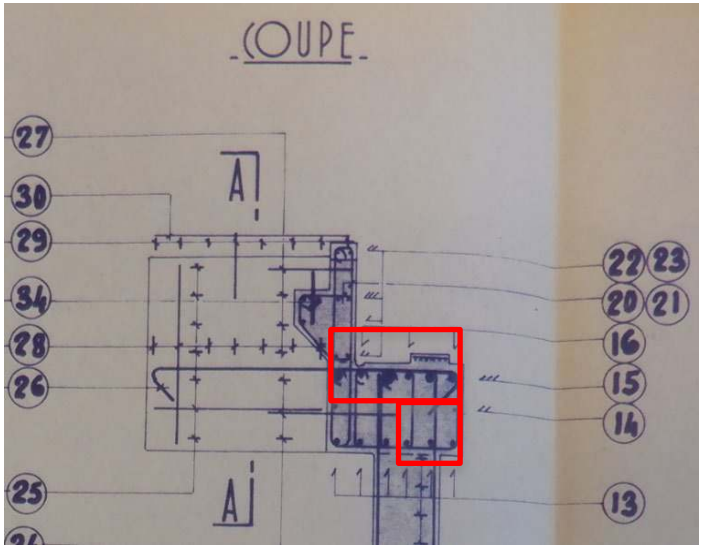
Conception

Dimensionnement, schéma de conception Lazari



Conception

Dimensionnement, étude du ferraillage



Chevêtre culée 1						
Repère	Schéma	Diamètre (mm)	Nombre	Longueur (m)	Sa (m²)	Observations
13		16	6	9.35	2.82	Filants partie inf
14		14	2	8.65	0.76	Filants intermédiaires
15		25	3	9.75	2.30	Filants partie sup
16		20	3	9.53	1.80	Filants partie sup
17		12	35	3.92	5.17	Cadres
18		12	35	3.08	4.06	Cadres
19		12	35	2.18	2.88	Cadres
20		10	35	2	2.20	Cadres mur garde grève (partiel)
31		8	3	2.97	0.22	Frettes de bossage
32		8	3	3.05	0.23	Frettes de bossage
33		8	4	5.71	0.57	Frettes de vérinage
				Somme surface acier (Sa):	23.01	m²

Quelle surface d'acier doit-on protéger ?

Surface béton:	6.96	m²
Ratio:	**3.31**	**m² acier/ m² béton**
Longueur béton:	8.70	m
Ratio:	**2.65**	**m² acier/ m béton**

Conception

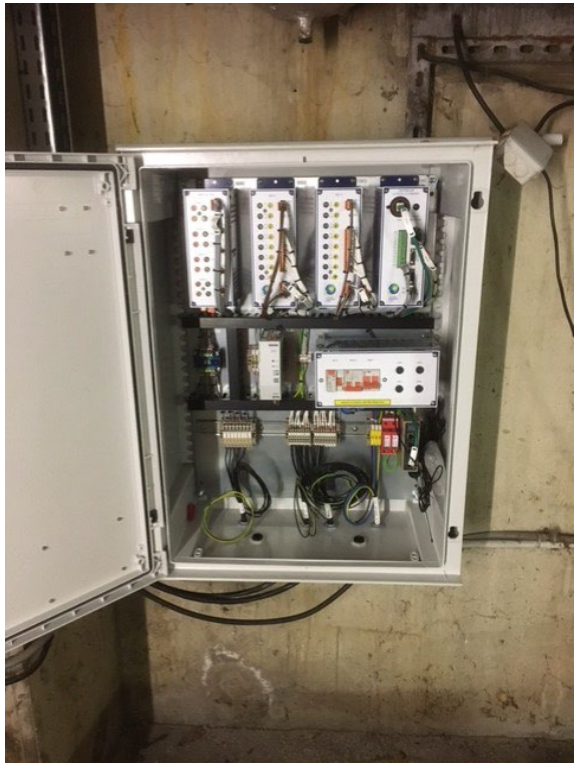
Système

- La conception du système vise définir les composantes du système, son architecture et le suivi dans le temps de la performance.
  - Choix de l'architecture (centralisée ou esclaves)
  - Dimensionnement des redresseurs
  - Dimensionnement des modules de mesures
  - Définition du monitoring (capteurs de surveillance)
  - Dimensionnement de la puissance requise
  - Dimensionnement des câbles
  - Choix de l'interface



Conception

Système centralisé





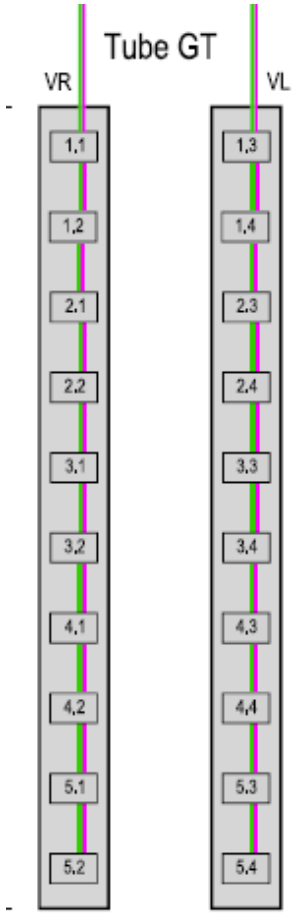
Exemples d’unités centrales sans esclaves

Conception

Système déporté



Unité centrale

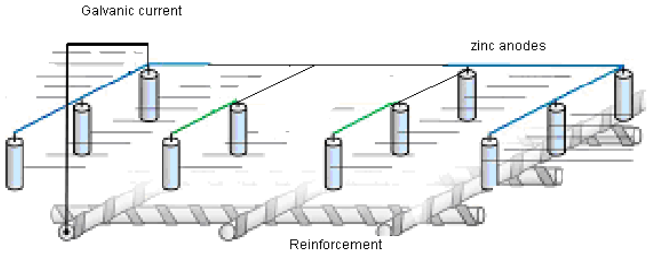


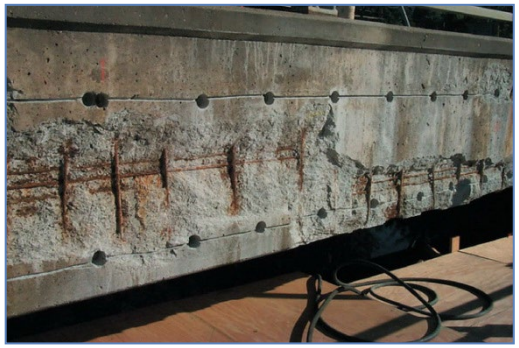


Unité esclave

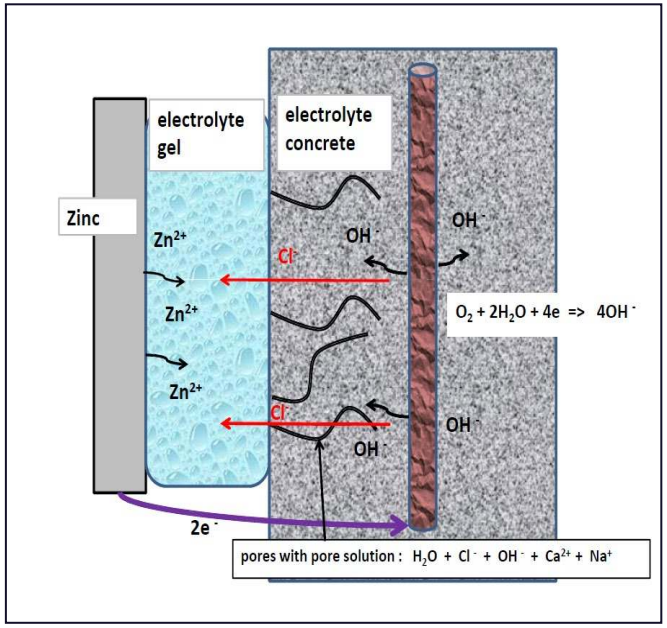
Types d'anodes

Anodes discrètes





Anodes surfaciques





Anodes galvaniques



Zinc projeté



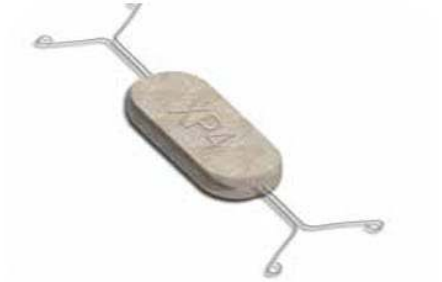
Bandes de Zinc collées



Anodes discrètes Zinc

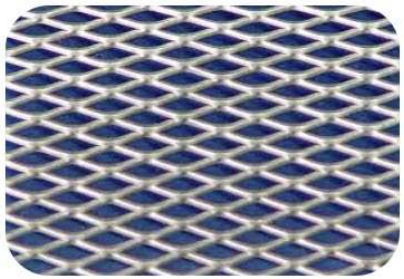


Pain de zinc

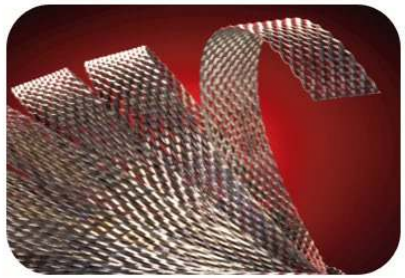


Pain de zinc

Anodes pour courant imposé



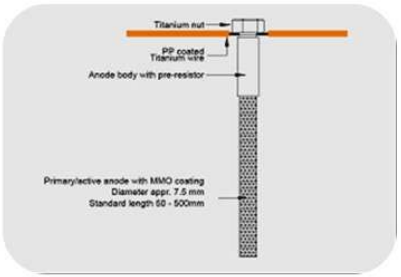
Treillis Ti



Rubans Ti



Peintures-Revêtements conducteurs



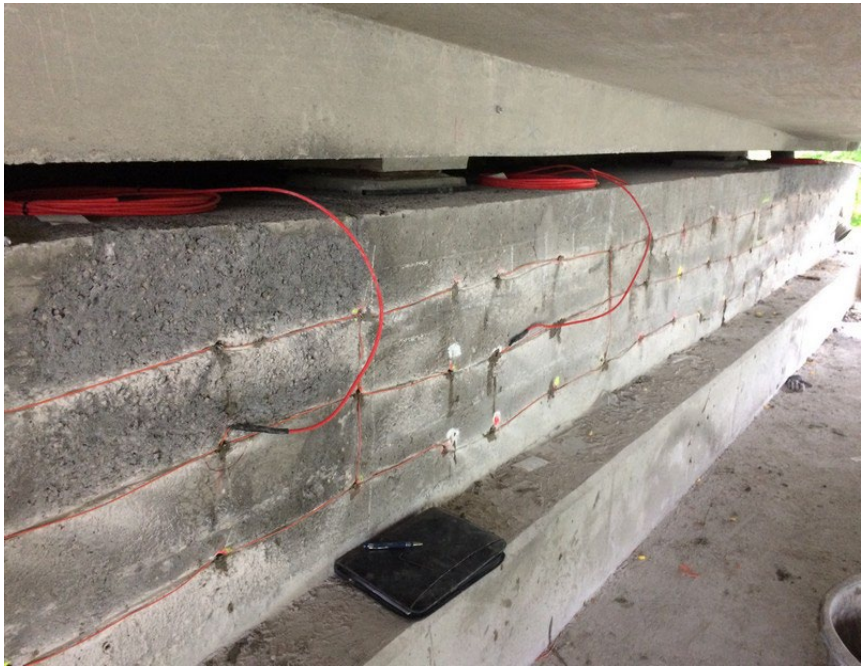
Anodes discrètes Ti (réseau)

Systèmes

Exemple, chevêtres par anodes forées PCCG ou PCCI



Anodes PCCG



Anodes PCCI

Systèmes

Exemples, cantilever par anodes forées et anodes surfaciques (PCCG)



Anodes forées



Anodes surfaciques

Systèmes

Exemple, PCCI tablier par rubans et piles par treillis





Systèmes

Exemple, système multiple avec PCCI et PCCG





Système multiple PCCI et PCCG :

- Anodes forées PCCI
- Anodes rubans PCCI
- Anodes surfaciques PCCG

Réalisation

- La réalisation d'une protection cathodique suit les étapes suivantes :
  - Diagnostic et définition stratégie de réparation
  - Prédimensionnement et conception du système
  - Etudes d'exécution (dimensionnement, procédures, conception du système)
  - Installation de chantier
  - Repérage des armatures
  - Contrôle de la continuité électrique du ferraillage
  - Travaux de pose (anodes, contacts aux armatures, sondes et électrodes)
  - Travaux de câblage
  - Mise en service et precommissionning
  - Suivi dans le temps

- Les points de vigilance en conception sont :
  - La sécurité
  - Les défauts de distribution de courant (zone résistive, résistance cathodique et anodique…)
  - La robustesse du système
  - La maintenance dans le temps

Points de vigilance et de contrôles lors de la réalisation et du suivi

Deuxième partie : contrôles et suivi

Benoit THAUVIN et Tiffany DESBOIS, Cerema



Contrôles préalables au traitement

- Diagnostic réalisé en amont par le gestionnaire
- Investigations complémentaires menées par l'entreprise
- Consiste en
  - Une évaluation de l'état et de l'intégrité de la structure
  - Une détermination de la nature et de l'ampleur des dégradations
    - Examen visuel, détection des zones non adhérentes (test d'adhérence)
    - Mesure des épaisseurs d'enrobages et localisation des aciers
    - Profils de pénétration des chlorures (profondeur polluée)
    - Profondeur de carbonatation
    - Potentiels d'armatures (cartographie si possible)
    - Résistivité électrique du béton (cartographie si possible)

Contrôle et suivi de la protection

- À différents stades de la mise en place de la protection
  - Épreuve de convenance
  - Contrôles en phase chantier *(contrôles de l'entreprise/normatifs non présentés)*
  - Contrôle de réception/mise en service
  - Contrôles et suivi dans le temps
- De deux types
  - Normatifs (NF EN 12696)
  - Complémentaires

Épreuve de convenance

- À réaliser avant le déploiement de la protection cathodique sur l'ensemble de l'ouvrage
- Sur un élément témoin ou une partie d'ouvrage
- En s'appuyant pour l'implantation des chaînes d'anodes sur les résultats du diagnostic
- Vérification des critères de performance
- Permet de valider le dimensionnement envisagé ou de le réajuster
- Permet de valider les produits employés et les procédures
- La validation de l'épreuve est à prévoir comme point d'arrêt dans le marché

Contrôles en phase chantier

Exemples de contrôles extérieurs en cours de mise en œuvre

- Vérification de la présence et du bon remplissage des fiches de contrôle
  - fiche de contrôle de la continuité électrique des armatures
  - fiche de contrôle des connexions négatives
  - fiche de contrôle des électrodes de référence et sondes de dépolarisation
  - fiche de contrôle de la pose des anodes
- Vérification de la continuité électrique des armatures ou du bon rétablissement de cette continuité électrique pour les barres isolées (soudure de barre ou de treillis acier d'interconnexion => surtout pas de fil de ligature)
- Vérification de la bonne soudure pour la mise en place de connexion négative, par contrôle de la continuité entre connexion négative et armature
- Vérification du respect de la couleur des câbles

Contrôle en phase chantier

Exemples de contrôles extérieurs en cours de mise en œuvre, spécifiques à la pose d'anodes forées

- Implantation des forages, pour la pose des anodes, repérée sur le parement
- Réception systématique des forages en utilisant un appareil de type durAbar qui permet de vérifier qu'une distance minimale est respectée avec les aciers
- Vérification du pré-enrobage des anodes
- Une fois les anodes posées, vérification de l'absence de contact avec l'armature
- Vérification du mortier de réparation utilisé pour le rebouchage
- Vérification du remplissage au fur et à mesure du plan de récolement, notamment déplacement des forages en cas de forage trop proche des armatures

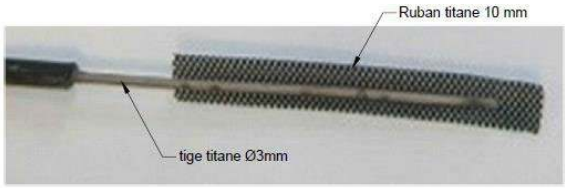
Contrôle et suivis

Système de surveillance d'après la norme NF EN 12696

- Capteurs aux points représentatifs sur toute la zone structure/anode à protéger
  - Électrodes de référence
    - Deux types : Ag/AgCl/KCl ou Mn/MnO_2/NaOH 0,5M
    - Minimum 2 par zone de PCCI ou zone représentative en PCCG
  - Sondes de dépolarisation (possibilité et non obligation)
    - Uniquement utilisées pour suivre les dépolarisations
    - De l'ordre d'une par zone



ERE 20 (Mn/MnO_2/NaOH 0,5M)



Sonde de dépolarisation

- Également, par zone, au moins 1 connexion d'essai à l'armature/acier pour le mesurage des potentiels acier/béton par rapport aux électrodes

Contrôle et suivis

Gestion des données d'après la norme NF EN 12696

- Collecter, ordonner, trier et présenter les données de performance
  - Implantation des anodes
  - Type et emplacement des capteurs
  - Capacité de l'alimentation en courant continu
  - Relevés initiaux des capteurs
  - Données de mise en service
  - Données venant du capteur depuis la mise en service
  - Données de débit de la source de courant continu depuis la mise en service
  - Enregistrement des évènements

Suivi de la protection

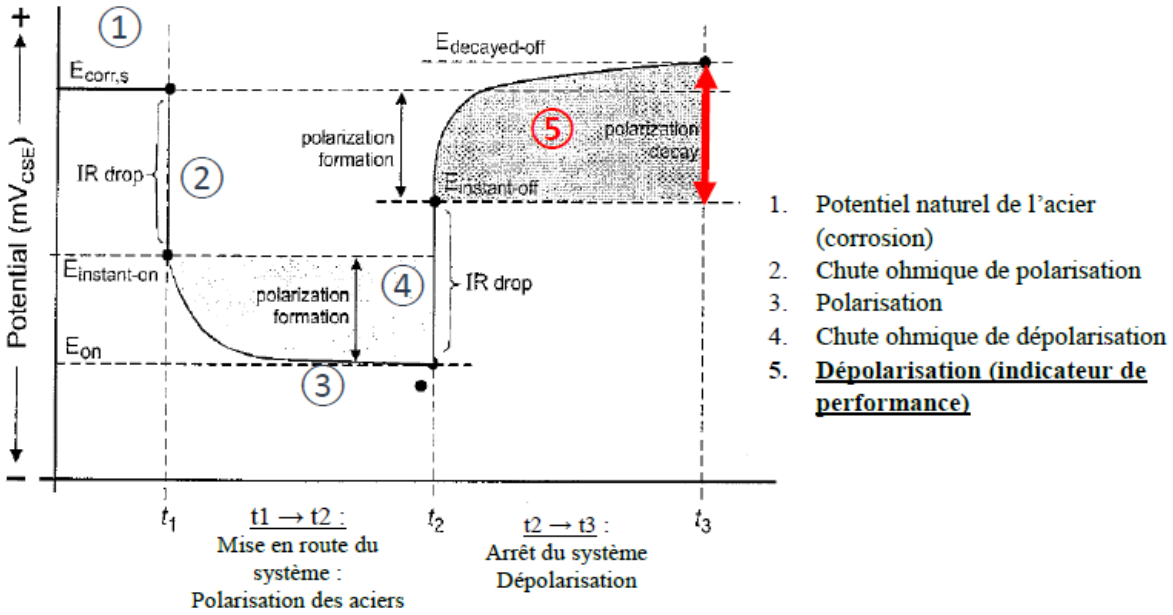
Critères de performance d'après la norme NF EN 12696

- Aucun potentiel acier/béton à courant coupé
  - <-1100 mV par rapport à Ag/AgCl/KCl 0,5M pour les aciers simples des armatures du béton
  - <-900 mV pour les aciers de précontrainte
- L'acier doit satisfaire en tout point représentatif à l'un des critères suivants
  - Potentiel « à courant coupé » <-720 mV par rapport à Ag/AgCl/KCl 0,5M
  - Dépolarisation à 24h ≥ 100 mV
  - Dépolarisation au-delà de 24h >150mV (utilisation d'électrodes de référence et non de sondes de dépolarisation)
- En PCCG : ces critères peuvent être difficiles à atteindre

Suivi de la protection

A partir du système de surveillance

- Mesure pour chaque électrode de référence et sonde de dépolarisation : E_{ON}, $E_{instant-off}$ et dépolarisation



Principe de mesure de la dépolarisation (source NACE)

Mise en service

Contrôles réalisés par l'entreprise selon la norme NF EN 12696

- Examen visuel
- Mesurages avant mise sous tension :
  - potentiel acier/béton par rapport aux électrodes de références et aux SD
  - éventuel potentiel acier/béton par rapport aux électrodes de référence portables
- Évaluation de la performance initiale, après la période de polarisation initiale
  - Mesurage de la tension de sortie et de l'intensité du courant dans chaque zone de l'installation
  - Mesurage des potentiels à courant coupé au niveau de toutes les électrodes de référence
  - Mesurage de la dépolarisation du potentiel après coupure permanente de l'alimentation en courant continu de la protection cathodique

Suivi de l'installation

D'après la norme NF EN 12696

- 1 fois/mois la 1ère année puis 1 fois tous les 3 mois si tout est satisfaisant, **vérification du bon fonctionnement**
  - Confirmation que tous les systèmes fonctionnent
  - Mesurage de la tension et du courant débité pour chaque zone du système de PCCI
  - Évaluation des données
- Tous les 3 mois la 1ère année puis 1 fois tous les 6 à 12 mois par la suite, **évaluation des performances**
  - Mesurage des potentiels instantanés à courant coupé,
  - Mesurage de la décroissance du potentiel,
  - Examen visuel complet du système de protection cathodique,
  - Évaluation des données,
  - Réglage du courant ou de la tension de sortie (PCCI)

Suivi de l'installation

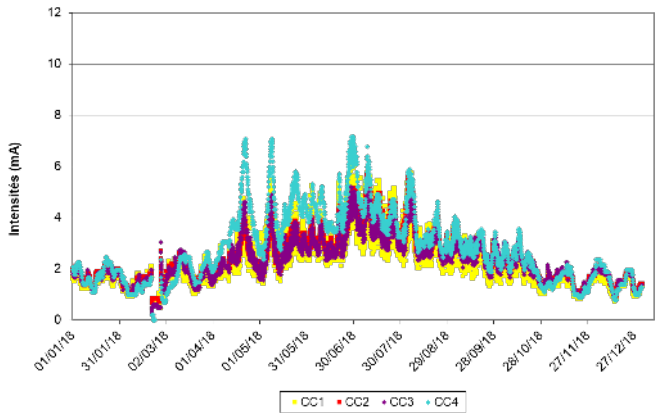
D'après la norme NF EN 12696

- Tous les ans
  - Revue de tous les enregistrements des données et inspections d'essai depuis la dernière revue
  - Évaluation des performances
  - Examen visuel de l'installation de protection cathodique
  - Revue et interprétation générales des données
  - Réglage du courant débité, le cas échéant
  - Rédaction d'un rapport de suivi de l'installation
    - Travail effectué
    - Données collectées
    - Interprétations des données et recommandations concernant tous les changements relatifs à la périodicité de fonctionnement et de maintenance ou au suivi de l'installation et aux modes opératoires
    - Recommandations relatives aux modifications apportées à l'installation de protection cathodique

Suivi de l'installation

En complément, à partir du monitoring

- Vérification de l'évolution dans le temps
  - des intensités et des potentiels des chaînes d'anode, avec pour la PCCG
    - Suivi du bon fonctionnement des anodes
    - Calcul de la durée de vie résiduelle des anodes
  - des potentiels au niveau des électrodes de référence



Exemple de suivi sur 1 an de l'intensité des anodes (PCCG)

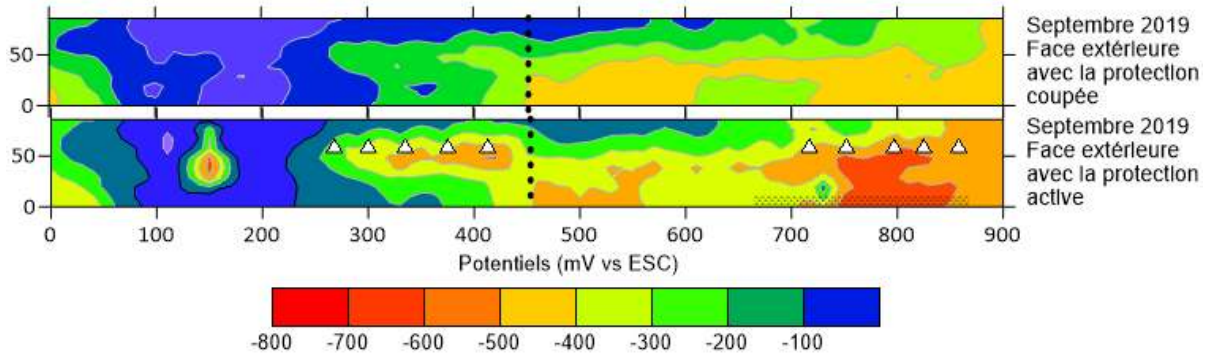


Exemple de suivi sur 2 ans des potentiels On d'électrode de référence (PCCI)

Suivi de l'installation

En complément, à partir de mesures in situ

- Mesures depuis le parement des potentiels des armatures avec la protection active (armatures protégées) et avec la protection coupée (potentiel libre des armatures) + mesure des résistivités
  - Mesures espacées d'a minima 24h (max 48h)
  - Évaluation de l'efficacité de la protection sur une zone plus étendue (vs. monitoring où l'information n'est disponible qu'à l'emplacement de l'électrode de référence)



Mesures des potentiels d'armatures (PCCG)

Quelques points d'attention

Pour les gestionnaires

- Il convient que le marché spécifie bien le recours à des personnels certifiés (voir diapo suivante)
- Compte-tenu des spécificités de ce type de protection, il est recommandé d'avoir recours à une AMO
- Un contrat de maintenance est à prévoir pour le suivi dans le temps de la protection. En complément des éléments préconisés par la norme, il est recommandé d'y faire figurer
  - Un délai de résolution des problèmes : éviter toute dérive du système
  - Un contrôle des enregistrements plusieurs fois par an (vérification sans analyse, depuis l'accès à distance) : éviter des périodes longues sans enregistrement des données

Certification des personnels

NF EN ISO 15257 – Juillet 2017

- 5 niveaux de compétence
  - Niveau 1 : collecteur de données (ou contrôleur) en protection cathodique
  - Niveau 2 : technicien en protection cathodique
  - Niveau 3 : technicien senior en protection cathodique
  - Niveau 4 : spécialiste en protection cathodique
  - Niveau 5 : expert en protection cathodique
- Secteurs d'application
  - Structures métalliques terrestres
  - Structures métalliques en mer
  - Structures en béton armé
  - Surfaces intérieures des structures métalliques contenant un électrolyte