



# 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





# La protection cathodique : conception, systèmes et contrôles





# Première partie : conception

Michel Grill, Sixense Engineering

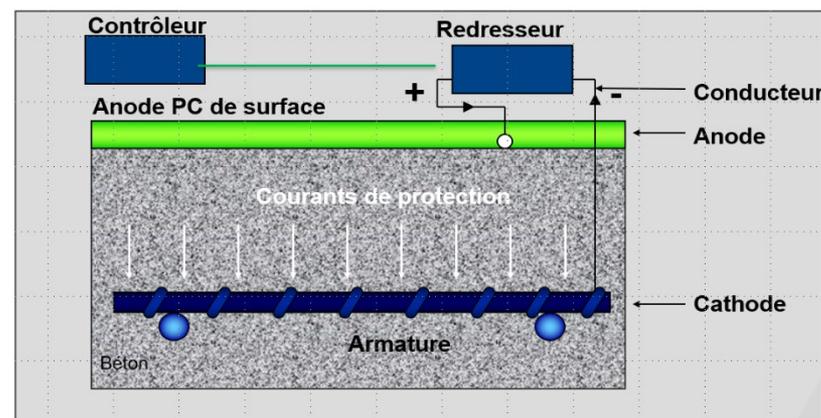
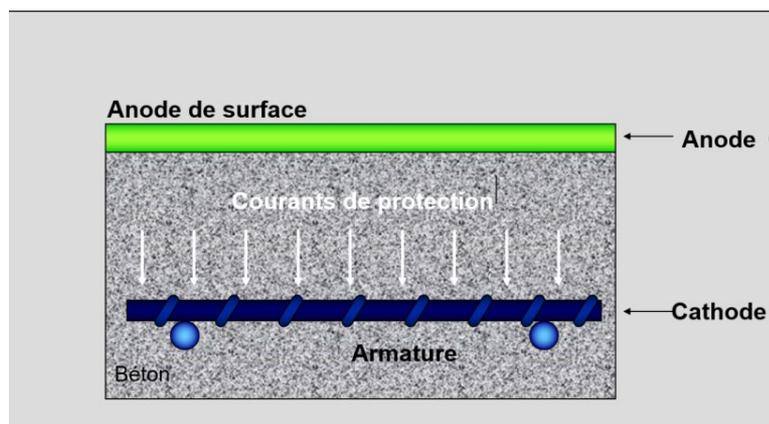
# Définition

- 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 »,

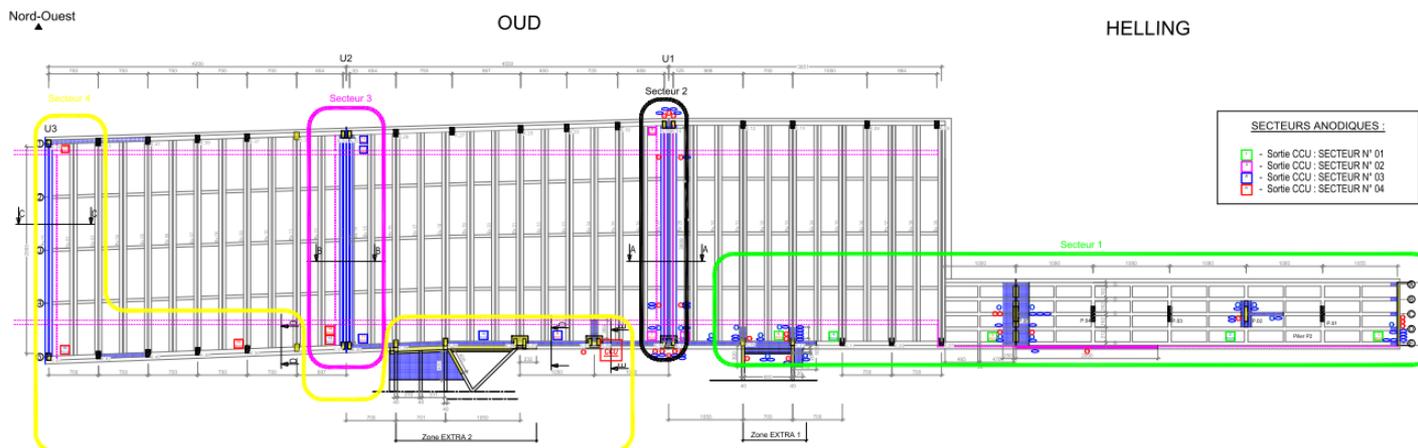
# Conception

## 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



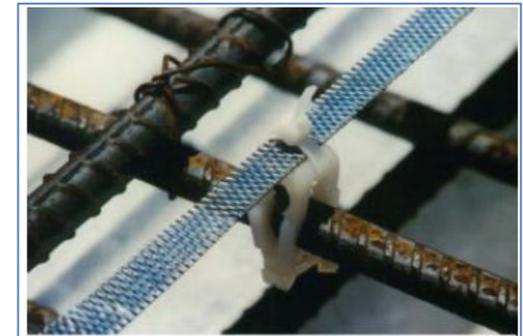
## Zonage anodique



# Conception

## Données d'entrées

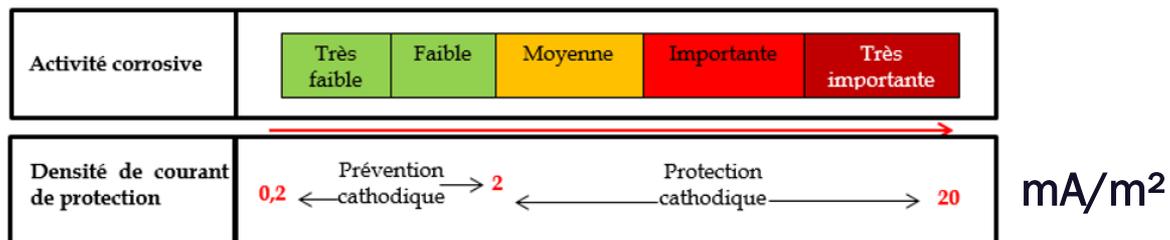
- L'ouvrage
  - Ouvrage ancien ou neuf ?
  - DOE et historique, diagnostics
  - Exposition, situation géographique, environnement
  - Alimentation électrique à proximité
- Le projet
  - Contrainte d'exploitation
  - Durée de vie visée
- **Qui conçoit ?** Une personne qualifié niveau 4 suivant EN 15257,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



# Conception

## Dimensionnement

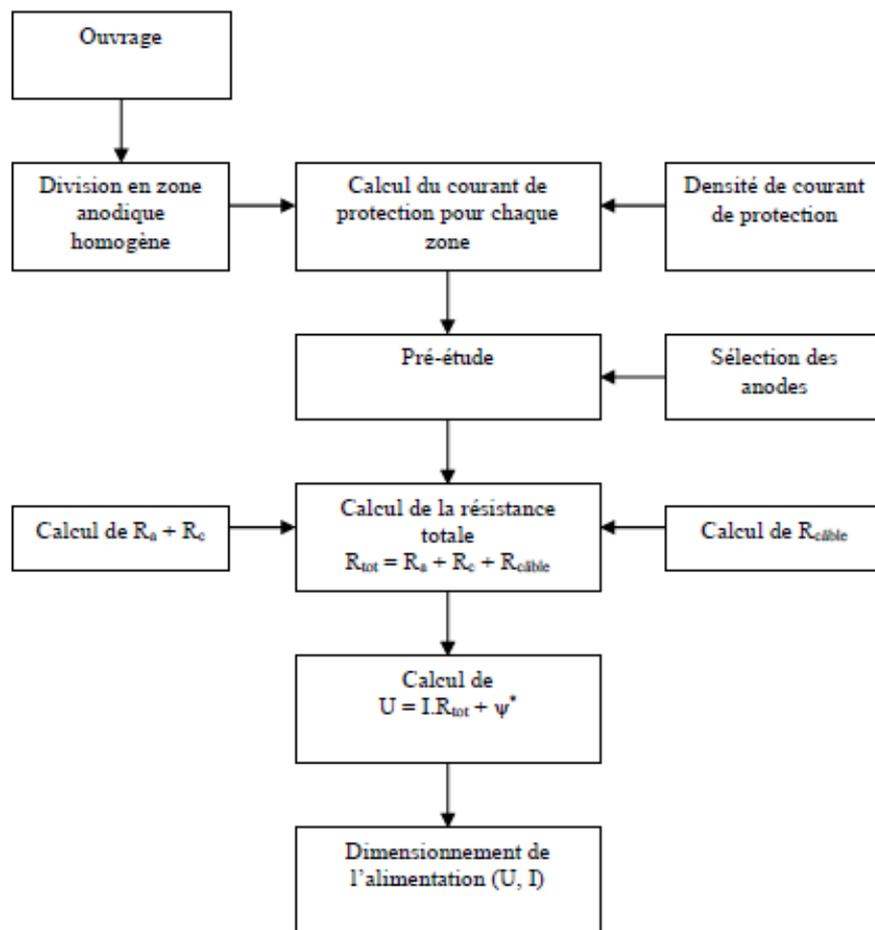
- Le dimensionnement vise à définir le besoin en courant de protection.
  - Découpe de la structure en zones de protection cathodique
    - Densité de ferrailage
    - Expositions
  - Etude du ferrailage
    - Calcul de la surface d'acier à protéger
    - Calcul du ratio surface acier surface béton
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



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

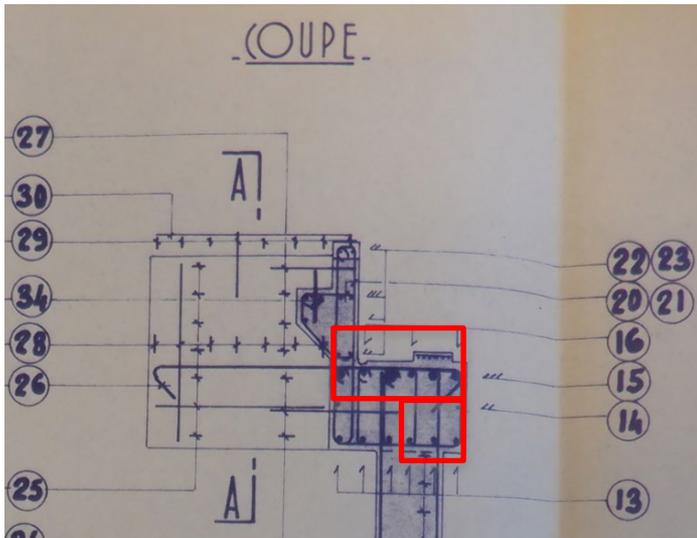
# Conception

## Dimensionnement, schéma de conception Lazari



# Conception

## Dimensionnement, étude du ferrailage



Chevêtre culée 1						
Repère	Schéma	Diamètre (mm)	Nombre	Longueur (m)	Sa (m <sup>2</sup> )	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	m <sup>2</sup>



Quelle surface d'acier doit-on protéger ?

Surface béton:	6.96	m <sup>2</sup>
Ratio:	3.31	m <sup>2</sup> acier/ m <sup>2</sup> béton
Longueur béton:	8.70	m
Ratio:	2.65	m <sup>2</sup> 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



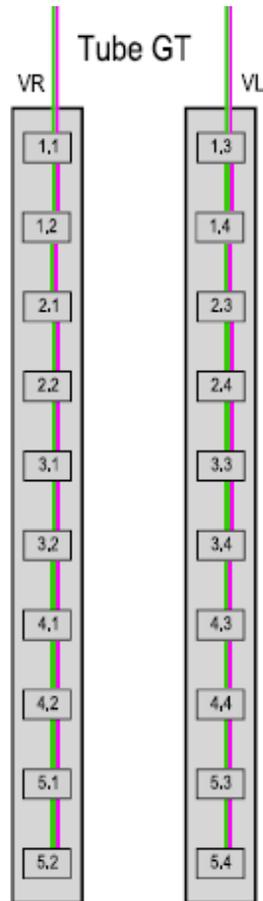
Exemples d'unités centrales sans esclaves

# Conception

## Système déporté



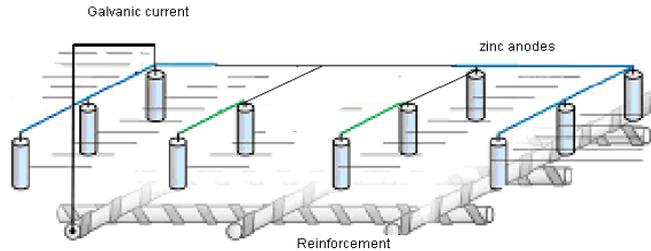
Unité centrale



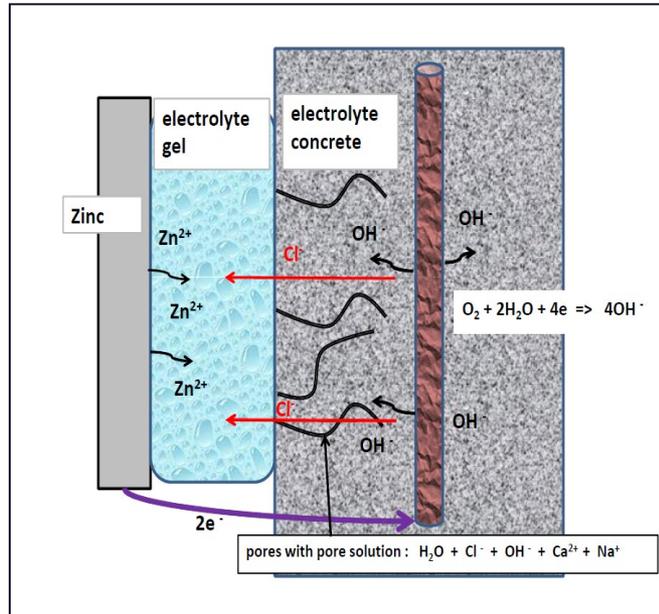
Unité esclave

# Types d'anodes

## Anodes discrètes



## Anodes surfaciques



# Anodes galvaniques



*Zinc projeté*



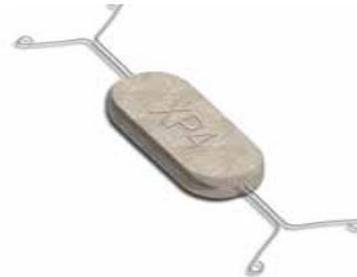
*Bandes de Zinc collées*



*Anodes discrètes Zinc*

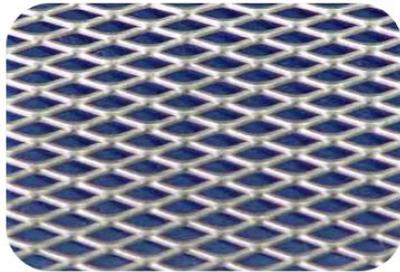


*Pain de zinc*

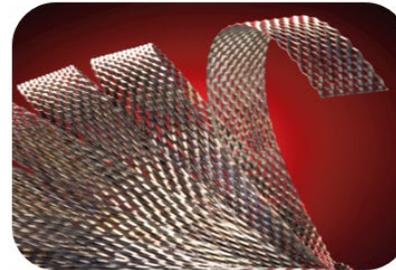


*Pain de zinc*

# Anodes pour courant imposé



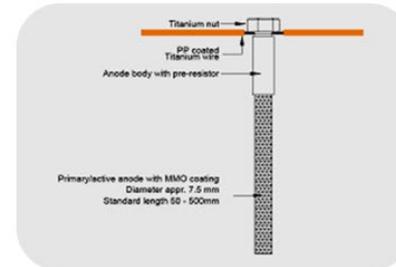
*Treillis Ti*



*Rubans Ti*



*Peintures-  
Revêtements  
conducteurs*



*Anodes discrètes Ti  
(réseau)*

# Systemes

Exemple, chevêtres par anodes forées PCCG ou PCCI



Anodes PCCG



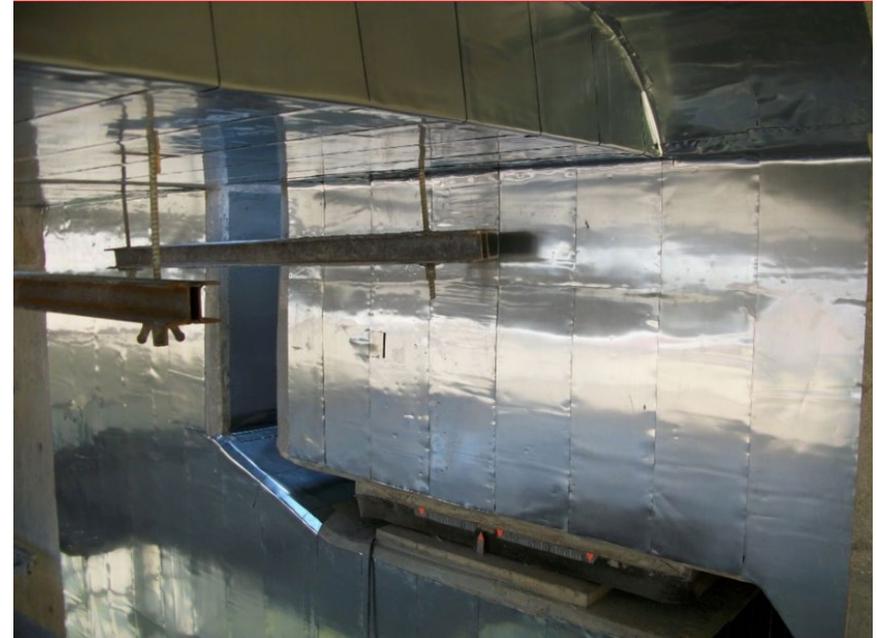
Anodes PCCI

# Systemes

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



Anodes forées



Anodes surfaciques

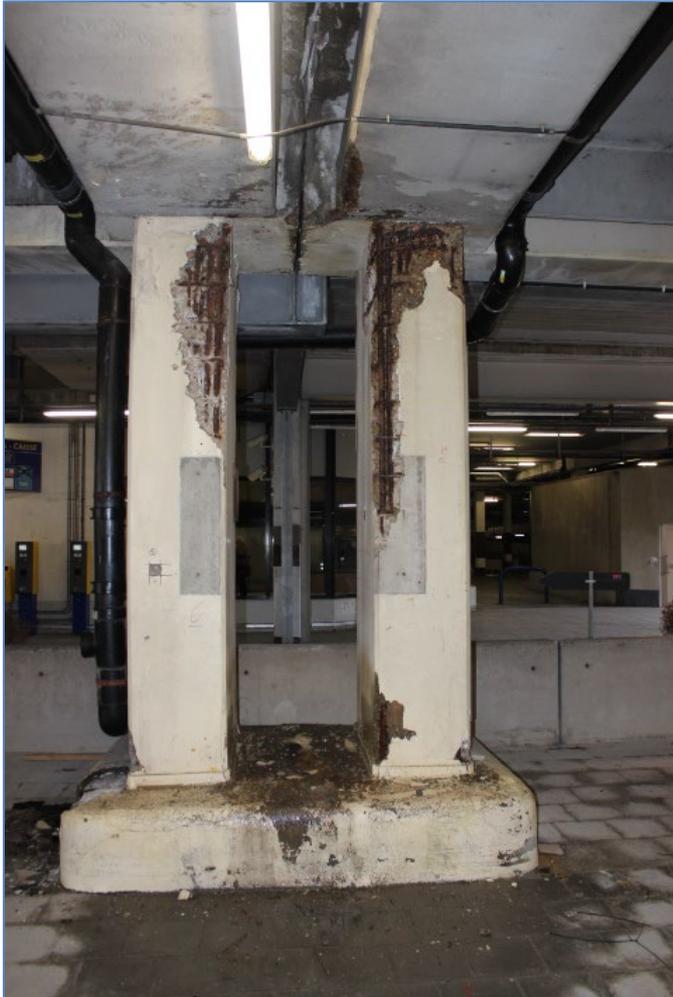
# Systemes

Exemple, PCCI tablier par rubans et piles par treillis



# Systemes

## 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 ferrailage
  - 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<sub>2</sub>/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
- Également, par zone, au moins 1 connexion d'essai à l'armature/acier pour le mesurage des potentiels acier/béton par rapport aux électrodes



ERE 20 (Mn/MnO<sub>2</sub>/NaOH 0,5M)



Sonde de dépolarisation

# 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

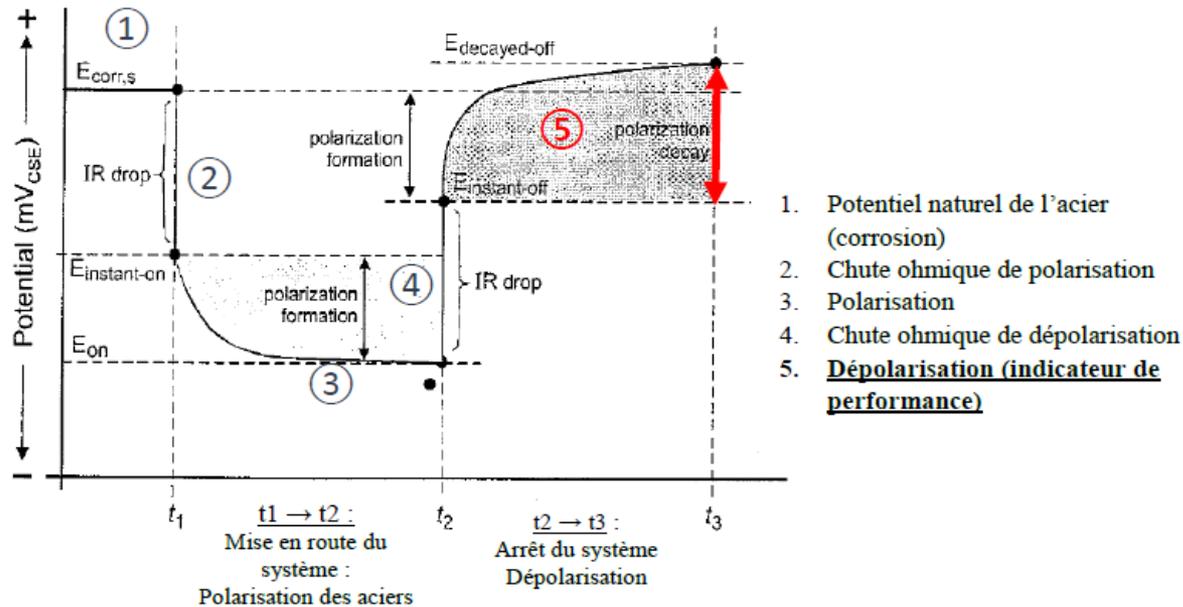
## Critères de performance d'après la norme NF EN 12696

- 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  $\geq 100$  mV
  - Dépolarisation au-delà de 24h  $> 150$  mV (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 1<sup>ère</sup> 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 1<sup>ère</sup> 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

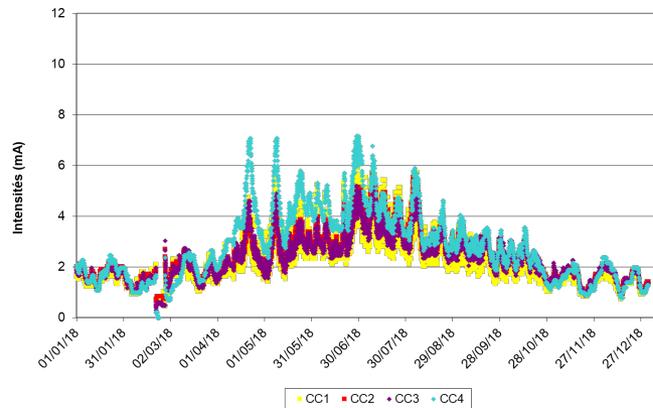
## D'après la norme NF EN 12696

- 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)

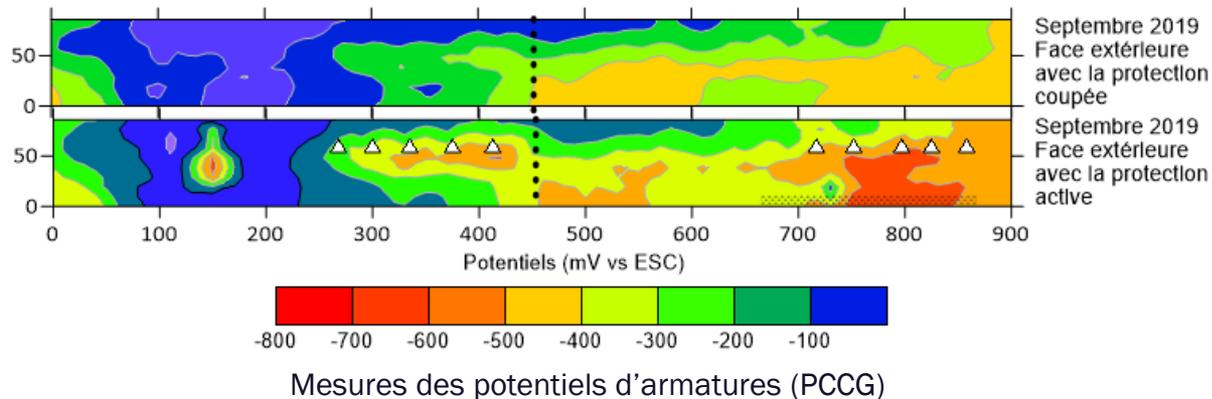


Exemple de suivi sur 2 ans des potentiels  
On d'électrode de référence (PCCI)

# 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)



# 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