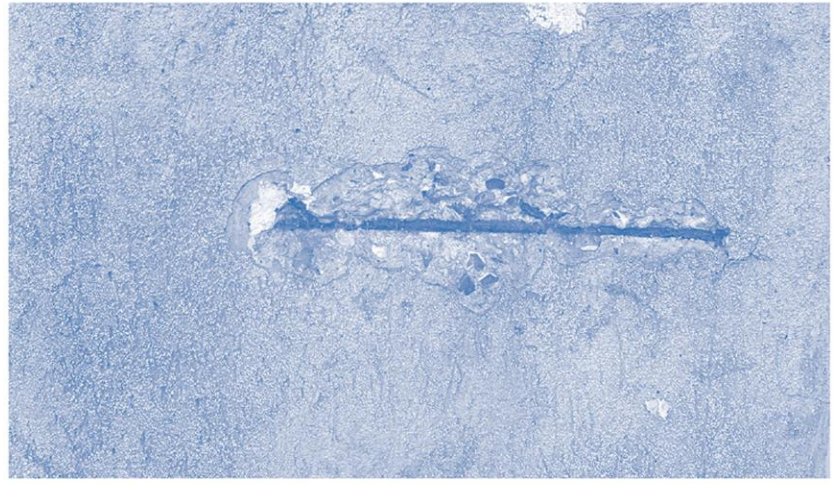


Colloque international - 4<sup>ème</sup> édition  
ÉNSA Versailles / Université de Science et Technologie du Zhejiang

# Restaurer les bétons

Enjeux méthodologiques autour des pratiques  
professionnelles et des problématiques de recherche



# Les traitements électrochimiques pour réparer les structures en béton armés dégradées par la corrosion

12 & 13.12.2022

ÉNSA Versailles / Université de Science et Technologie du Zhejiang



ÉNSA Versailles  
5 avenue de Sceaux, 78000 Versailles  
T +33 (0)1 39 07 40 00  
leav@versailles.archi.fr  
leav.versailles.archi.fr



BOUTEILLER Véronique  
12 décembre 2022

# La corrosion des armatures est la première cause de dégradation des structures en béton armé



Ouvrages d'Art



Monuments Historiques

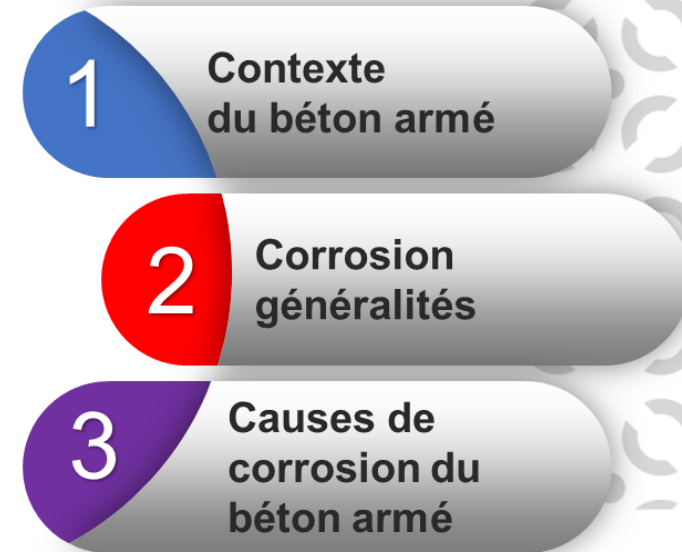
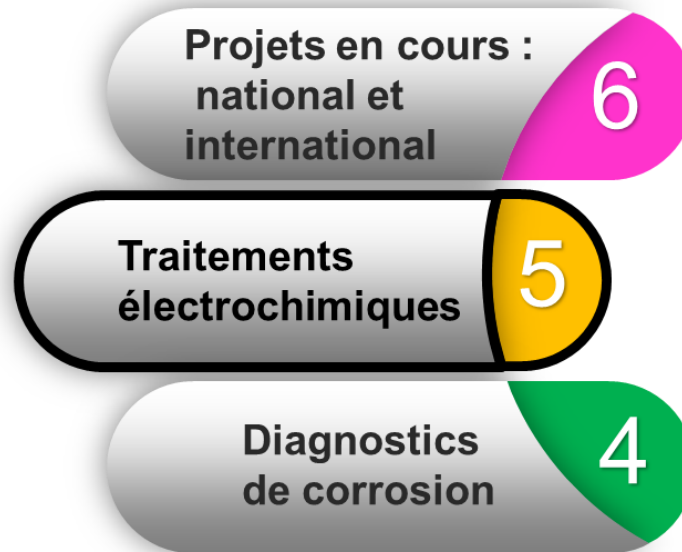


# Les traitements électrochimiques pour réparer les structures en béton armés dégradées par la corrosion

## ❑ Réparation traditionnelle

## ❑ Traitements électrochimiques

- Déchloruration
- Réalcalinisation
- Protection Cathodique



# Réparation traditionnelle

## Exécution

- **Purge de l'ensemble du béton altéré (patch)**
- **Décapage des armatures (sur toute leur circonférence)**
- **Traitement de passivation de l'armature**
- **Mortier de réparation adapté (normalisation)**
- **Revêtement (hydrofuge, lasure, peinture,...)**

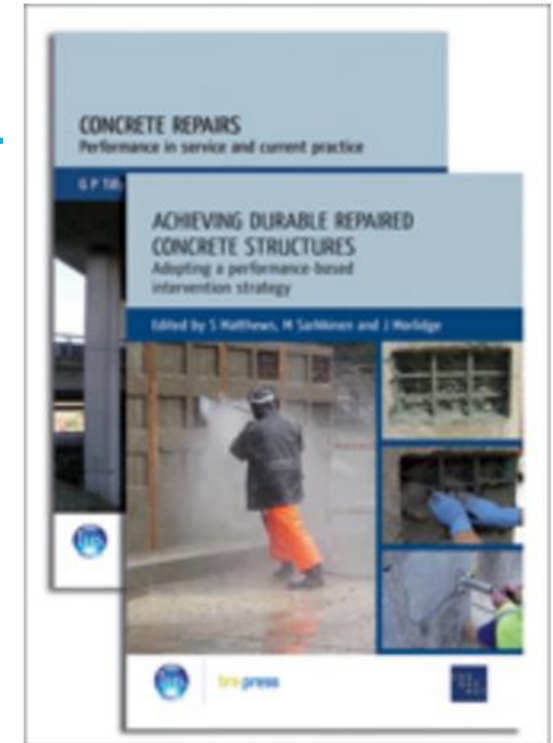
## Retour sur expérience

- **Programme européen CONREPNET**

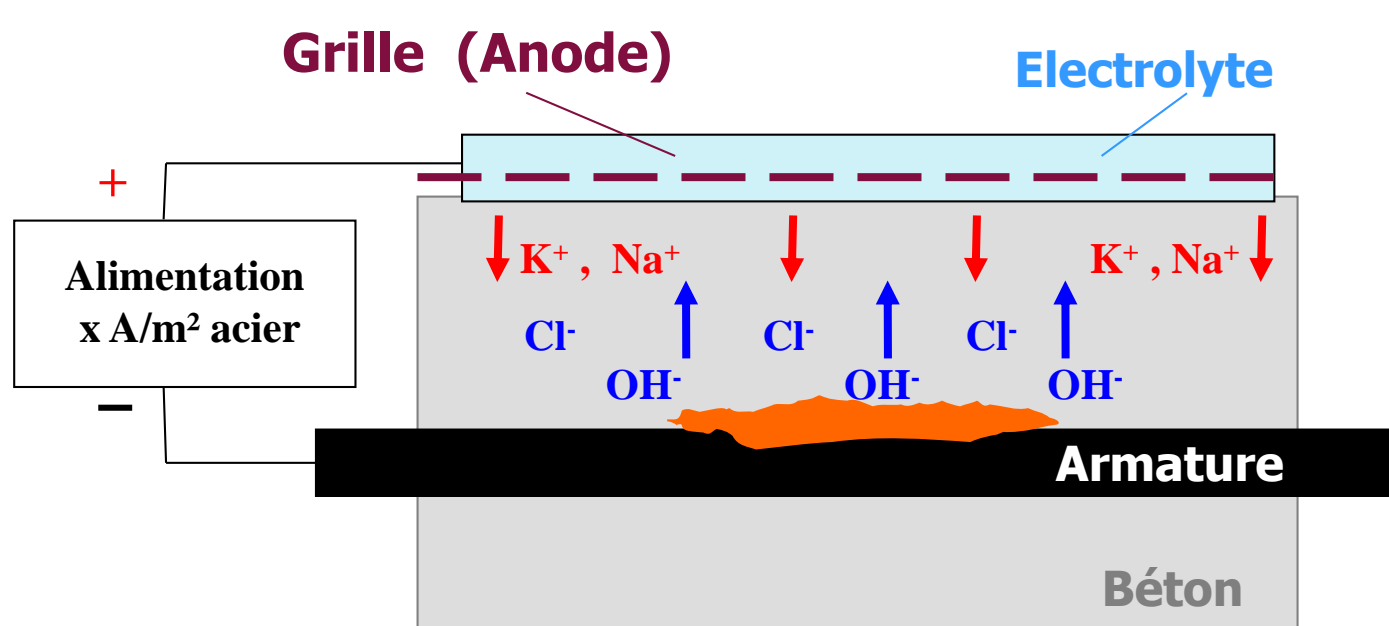
**G.P. Tilly, J. Jacobs, - Concrete repairs - Performance in service and current practice, IHS BRE Press, United Kingdom, 2007.**

**→ 50% de succès : les problèmes reviennent après 2- 10 ans**

- **Problèmes de compatibilité entre ancien et nouveau bétons**
- **Effets de piles entre zones réparées et zones non réparées**



# Traitements électrochimiques : diminuer ou stopper la corrosion des armatures dans le béton dans son environnement



## À l'anode



## À la cathode (armature)



## 2 procédés :

- Courant Imposé si alimentation électrique
- Courant Galvanique si connexion directe cathode/anode

## 3 traitements :

- Déchloruration
- Réalcalinisation
- Prévention/Protection cathodique

# Traitement de déchloruration

## Objectif

- Extraire les ions chlorure de l'enrobage du béton  
• (EN 206 : 0,4 % de Cl par rapport au poids de ciment)

## Mise en œuvre

- Alimentation électrique en courant continu (maxi 50V)
- **Traitement temporaire** : durée 8 à 10 semaines (en CI)
- Densité de courant (1-5 A/m<sup>2</sup>) → **1 A/m<sup>2</sup> d'acier**
- Electrolyte (eau, hydroxyde de calcium ou de sodium, borate, lithium)
- Anode (acier inox ou titane)

## Suivi du traitement

- Dosages quantitatifs en ions chlorure
- CND corrosion (interprétations)

## Pérennité du traitement

- Résultats optimistes (revêtements ?)

## Norme

- NF EN 14038-2 | Octobre 2020

## Limites

- Le béton d'enrobage n'est plus adhérent
- Le ferrailage n'est pas continu
- L'enrobage est très important
- La formulation du béton (laitiers)
- La présence de précontrainte
- Interactions avec certains bétons contenant des granulats potentiellement réactifs vis-à-vis de la RAG
- Les ions chlorure ont pénétré au delà du premier lit d'armatures

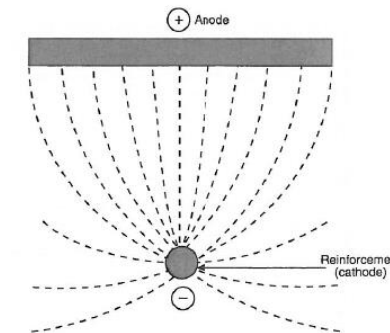


Fig. 12 Streamlines in an inhomogeneous field between bar and surface [29].

# Traitement de réalcalinisation

## Objectif

- Redonner au béton carbonaté son pH basique

## Mise en œuvre

- Alimentation électrique en courant continu (maxi 50V)
- **Traitement temporaire 1 à 2 semaines**
- Courant < 4 A/m<sup>2</sup> de surface d'armature → **1 A/m<sup>2</sup> d'acier**
- Electrolyte (hydroxyde de calcium ou de sodium)
- Anode (acier inox ou titane)

## Efficacité du traitement

- Enregistrement de la charge en A/h
- Fin de traitement pour densité de courant total = 200 A/m<sup>2</sup> d'acier
- Coloration rose sur anneau de 10 mm autour de l'acier ou le diamètre de la barre (phénolphtaléine)

## Pérennité du traitement

- ?

## Norme

- NF EN 14038-1 | Mai 2016

## Limites

- Le béton d'enrobage n'est plus adhérent
- Le ferrailage n'est pas continu
- L'enrobage est très important
- La formulation du béton (laitiers, sulfates)
- La présence de précontrainte
- Interactions avec certains bétons contenant des granulats potentiellement réactifs vis-à-vis de la RAG

# PROTECTION CATHODIQUE

*A.A. Sohangpurwala, Cathodic protection for life extension of existing reinforced concrete bridge elements, in: N.C.H.R. Program (Ed.), Transportation Registration Board, Washington, (2009)*

## Objectif

- **Abaisser le potentiel de l'acier jusqu'au potentiel dit de protection de manière à ce que le courant de corrosion devienne négligeable**

## Norme

- **NF EN ISO 12696 | Mai 2022 et guide CEFRACOR (procédé galvanique)**

## Suivi

- **Potentiel à courant coupé (-750 mV Ag/AgCl/0.5 M KCl)**
- **Décroissance du potentiel d'au moins 100 mV sur 24h après coupure de courant**
- **Décroissance d'au moins 150 mV pour des durées de coupure de courant plus longues**
- **Attention aux aciers de précontrainte**

**Prévention (0.2 à 2 mA/m<sup>2</sup>) / Protection (2 à 20 mA/m<sup>2</sup>)  
Traitement à vie de la structure**

**Bien que les anodes sacrificielles soient citées dans la norme, les critères de performances ne sont donnés que pour de la PC à courant imposé**

**Suivi du traitement ? (pas inclus dans le CCTP des travaux)**

## Certification des personnels

La norme NF EN 15257 Protection cathodique Niveaux de compétence et certification du personnel en protection cathodique distingue 4 secteurs d'application :

- **Ouvrages enterrés,**
- **Ouvrages à la mer,**
- **Surfaces internes de capacités et**
- **Ouvrages en béton**



# Etude de cas : Chantier pilote du Viaduc de Saint-Cloud

*V. Bouteiller, A. Jacquel, G. Damien, F. Boinski, J. Schneider, C. Michaux, Protection cathodique par courant imposé à l'aide d'anodes forées - chantier pilote du Viaduc de Saint-Cloud, Bulletin des Ouvrages d'Art, 2017*

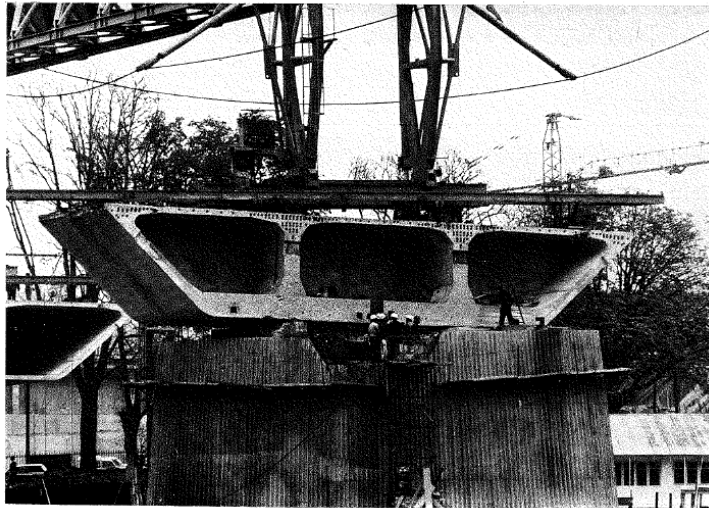
## Ouvrage autoroutier en béton entre Saint-Cloud (Ouest) et Boulogne (Est) (92)

### Construit dans les années 1970

- 2 x 2 voies, 120 000 voitures / jour
- 2 parties : le viaduc d'accès et le pont sur la Seine
- 1 km de long, 20 m de large

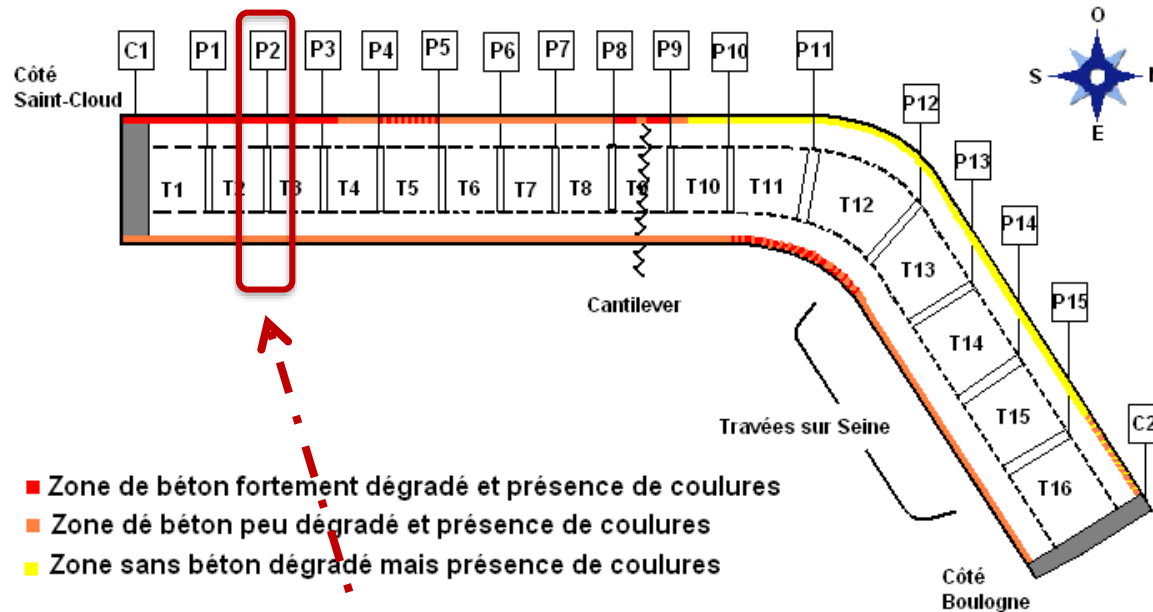
### Béton précontraint et structure poutre caisson

Fig. 1 - Vue d'un voussoir sur pile-rivière. Noter la densité du câblage.

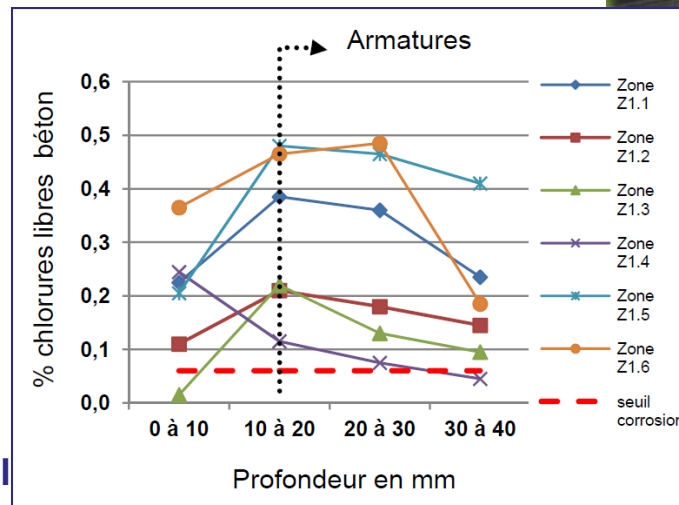


Viaduc de Saint-Cloud ©IFSTTAR – DELAHOUSSE - 2009

# Viaduc de Saint-Cloud : éléments de diagnostic



→ Pile P2  
2 bracons courants  
1 bracon sur pile



# Viaduc de Saint-Cloud : Choix et design de la Protection Cathodique Courant Imposé avec Anodes Forées

## Réparation adaptée au Viaduc de Saint-Cloud

- Pollution en ions chlorures au-delà du 1<sup>er</sup> lit d'armatures
- Pas de surcharge supplémentaire sur l'ouvrage
- Contraintes fortes de réalisation des travaux
- (intérieur du bracon avec protection de deux lits d'armatures)

## Conception et dimensionnement

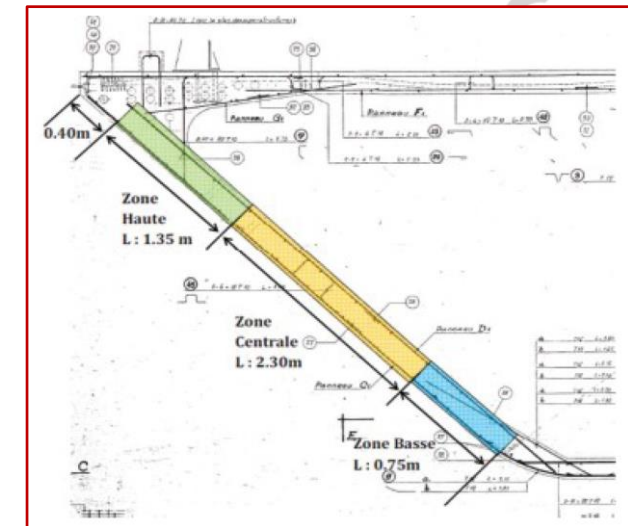
- Quantité d'acier à protéger (passif / précontrainte)
- Zonages et électronique (maîtrise du risque de fragilisation H2)
- Anode : type, durée de vie et quantité durAnodes (200mm) et durAfat (50mm)
- Distribution des électrodes de référence ERE20 (Mn/MnO2) et durAmmo

## Monitoring de la PCCI pendant 12 mois

- Evolution des courants anodiques (tension fixée) = f(temps)
- Evolution des potentiels des électrodes de référence = f(temps)
- Vérification du critère de dépolarisation : 100mV sur 24h = f(temps)
- ...

→ PC CI

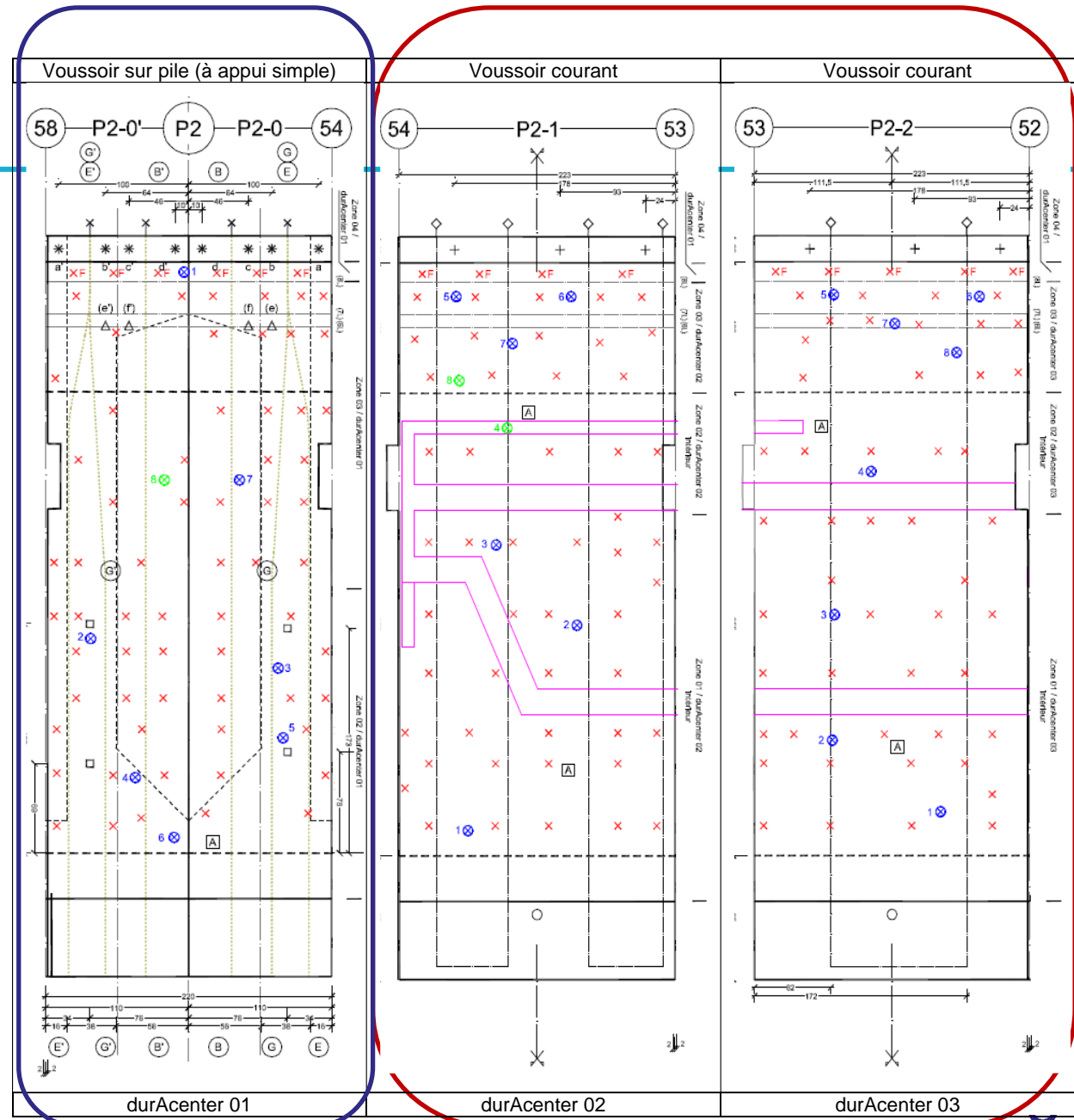
} → anodes forées



# Viaduc de Saint-Cloud : design du chantier pilote

**Voussoir sur pile** : durAcenter 01  
**Voussoirs courants** : durAcenter 02 pour P2-1 et durAcenter 03 pour P2-2

- ✕ Anode
  - ⊗ Sonde référence ERE 20
  - ⊗ Sonde référence durAmmo
  - ◇ Tête d'ancrage étrier actif
  - + Tête d'ancrage précontrainte transversale hourdis supérieur
  - ✕ Tête d'ancrage précontrainte d'entretoise voussoirs pile P2 (E/G-B)
  - \* Tête d'ancrage précontrainte d'entretoise voussoirs pile P2 (a-b-c-d)
  - △ Tête d'ancrage précontrainte d'entretoise hourdis supérieur voussoirs pile P2 (e-f)
  - Tête d'ancrage précontrainte d'entretoise voussoirs pile P2 entretoise (J-K)
  - Trou de montage
  - Tracé gaines précontraintes
  - EA- Etrier actif
  - ◇ Cette représentation indique que la tête d'ancrage est située dans l'angle entre la partie verticale du bracon et le hourdis
- ✕F Anode durAfat
  - A Contact armature
  - Chemin de câbles



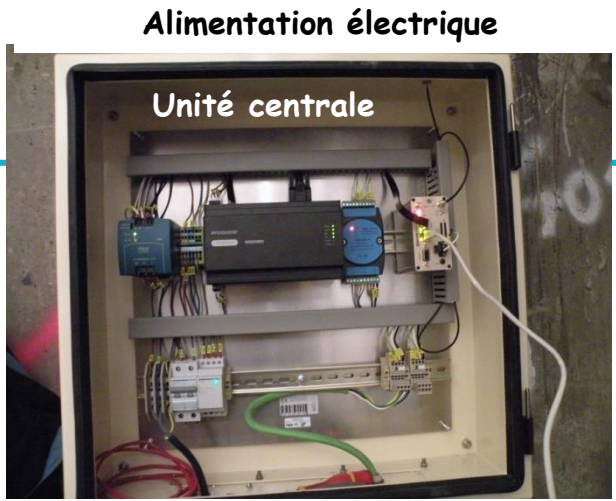
# Viaduc de Saint-Cloud : illustrations



Intérieur du voussoir



Extérieur du voussoir

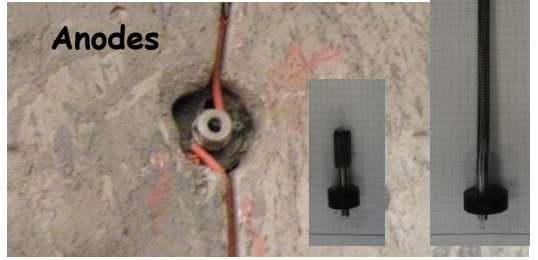


Alimentation électrique

Unité centrale



Cónnection armatures (cathodes)



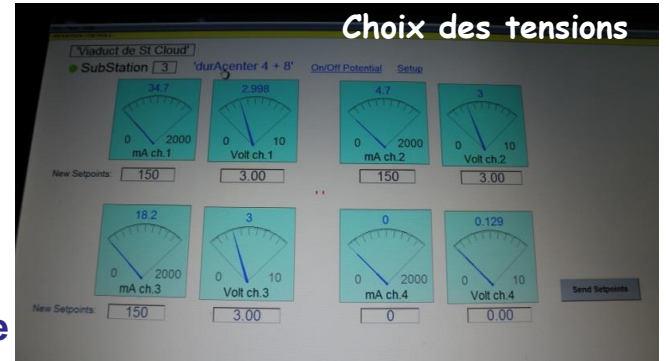
Anodes



Electrode de réf ERE20 (Mn/MnO2)



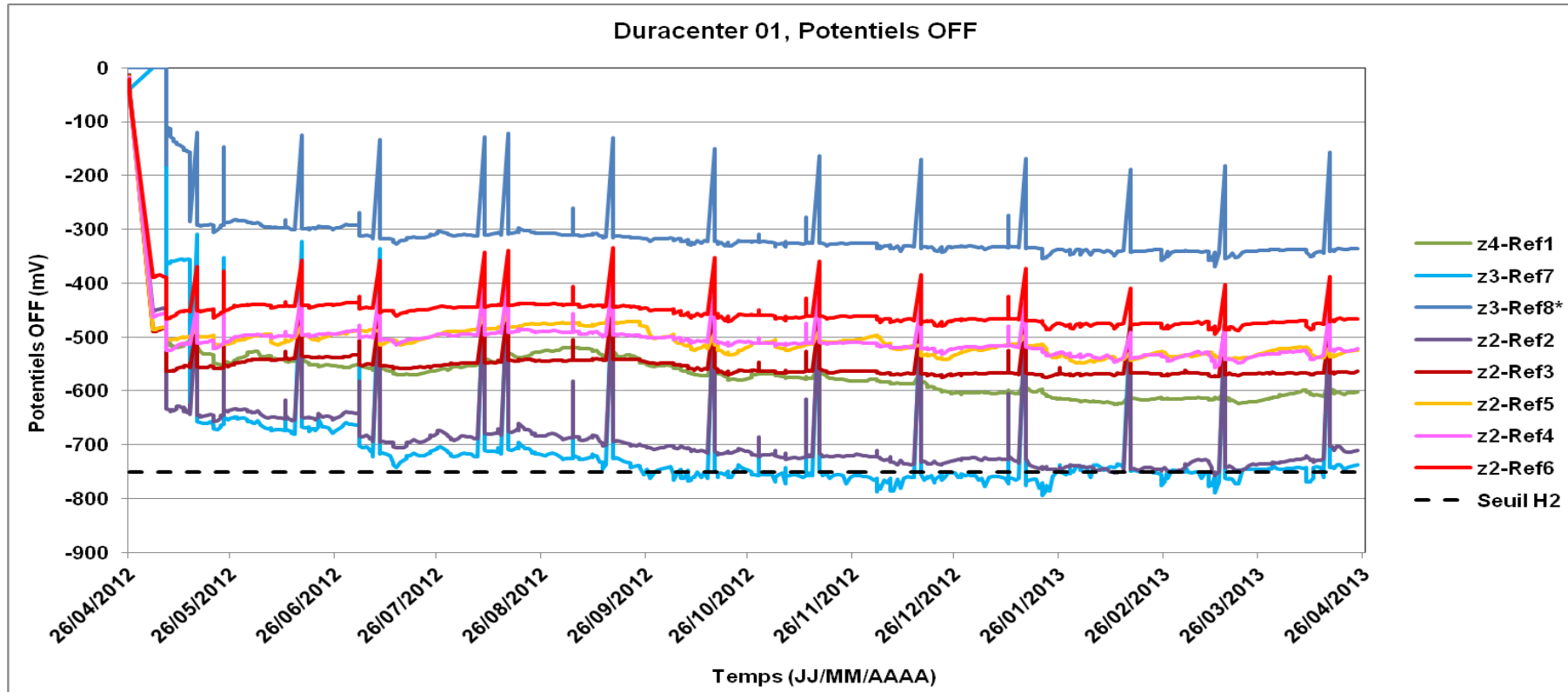
Cabinets esclaves (Duracenter)



Choix des tensions

Crédit photo H. Delahousse et V. Bouteiller

# Viaduc de Saint-Cloud : suivi des potentiels OFF



- Voussoirs courants : 
- Voussoir sur pile :  zone 4 pas de risque H2 (maîtrise)

## Viaduc de Saint-Cloud : suivi du critère d'efficacité (100mV/24h)

Année	2012								2013			
	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	déc	janvier	février	mars	avril
durAcenter 02						Voussoir courant P2-1						
z3-Ref5	53	44	114	141	146	138	147	133	139	135	135	133
z3-Ref6	95	66	194	221	209	200	202	181	189	191	203	213
z3-Ref7	120	113	194	218	213	190	195	175	181	173	172	186
z3-Ref8*	60	58	89	110	102	81	81	69	70	64	64	76
z2-Ref4*	139	137	154	176	175	152	152	134	138	127	128	138
z1-Ref3	199	206	251	259	258	244	239	228	225	213	215	227
z1-Ref2	265	269	318	323	321	308	301	296	289	290	288	306
z1-Ref1	162	167	211	214	218	211	208	198	202	193	195	199
durAcenter 01				Voussoir sur pile P2-0' / P2 / P2-0 + les zones 04 des voussoirs P2-1 et P2-2								
z4-Ref1	33	27	34	39	37	35	33	29	28	28	27	28
z3-Ref7	344	352	399	381	380	384	362	352	356	312	308	323
z3-Ref8*	170	174	192	189	187	174	172	171	174	177	167	186
z2-Ref2	204	224	259	277	277	280	304	265	287	269	302	285
z2-Ref3	81	86	102	106	118	105	106	102	107	102	100	87
z2-Ref5	25	24	-6	31	37	27	26	12	16	16	16	21
z2-Ref4	72	78	88	102	112	109	112	83	96	65	75	85
z2-Ref6	82	85	91	103	111	107	106	95	97	89	83	86

\* durAmmo

- Voussoirs courants : 🤗 100 % (excepté Ref8 durAmmo)
- Voussoir sur pile : 🤨 zone 4 du gousset ; 🤗 zone 3 ; 🙄 zone 2

## Viaduc de Saint-Cloud : Conclusions et en cours

### Essai pilote sur 12 mois





- **Solution technique : Efficace sur voussoirs courants (518 courants 16 sur pile et 16 spéciaux) ; Insuffisante (tq) dans les zones avec beaucoup de précontrainte (mais adaptations possibles)**
- **Chiffrage et CCTP pour la réparation générale**
- **Essai pilote opposable entreprise (100 k€ / 5 M€ (soit 2%))**

### Réparation générale et monitoring





- **PC CI pilotée en courant**
- **Surveillance de la PC CI depuis 4 années**

### Monitoring

#### • Sens W

	Ddp > 100 mV 		Ddp entre 80 et 100 mV 		Ddp < 90 mV 		ERE ou SD défectueuse 		Nombre de capteurs de surveillance
Y-A1	417	99%	5	1%	1	0%	0	0%	423
Y-A2	420	99%	2	0%	1	0%	0	0%	423

#### • Sens Y

	Ddp > 100 mV 		Ddp entre 80 et 100 mV 		Ddp < 90 mV 		ERE ou SD défectueuse 		Nombre de capteurs de surveillance
Y-A1	306	96%	5	2%	7	2%	2	1%	320
Y-A2	304	95%	6	2%	8	3%	2	1%	320



- Cathodic protection - doi.org/10.35789/fib.BULL.0102.Ch05
- Realkalisation - doi.org/10.35789/fib.BULL.0102.Ch06
- Chloride extraction/desalination - doi.org/10.35789/fib.BULL.0102.Ch07

## Quelques références

ECE

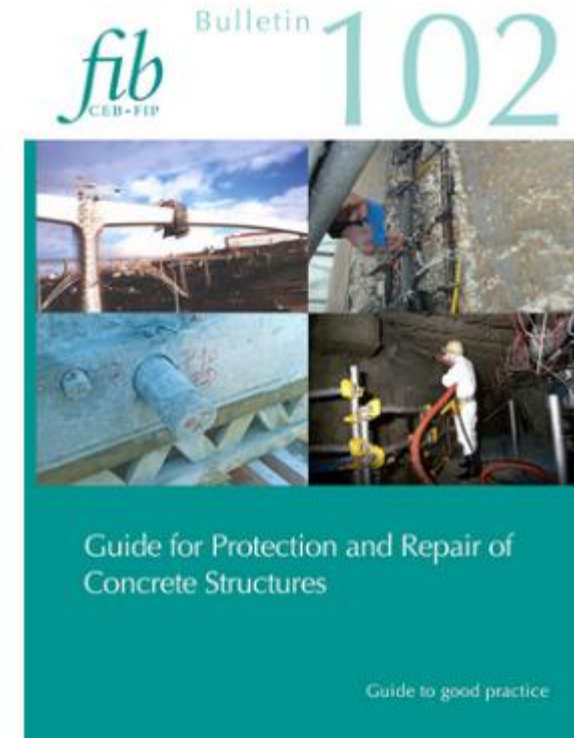
- **V. Bouteiller, Y. Tissier, E. Marie-Victoire, T. Chaussadent, S. Joiret, The application of electrochemical chloride extraction to reinforced concrete – A review, *Construction and Building Materials*, 351 (2022) 128931 DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128931>.**
- **A.A. Sohangpurwala, W.T. Scannell, Long-Term Effects of Electrochemical Chloride Extraction on Laboratory Specimens and Concrete Bridge Components, Publication No. FHWA-HRT-10-069, U.S. Department of Transportation - Federal Highway Administration, (2011)**

Realca

- **L. Bertolini, M. Carsana, E. Redaelli, Conservation of historical reinforced concrete structures damaged by carbonation induced corrosion by means of electrochemical realkalisation, *Journal of Cultural Heritage*, 9 (2008) 376-385 DOI: [10.1016/j.culher.2008.01.006](https://doi.org/10.1016/j.culher.2008.01.006).**
- **Y.Y. Tong, V. Bouteiller, E. Marie-Victoire, S. Joiret, Efficiency investigations of electrochemical realkalisation treatment applied to carbonated reinforced concrete - Part 1: Sacrificial anode process, *Cement and Concrete Research*, 42 (2012) 84-94 DOI: [10.1016/j.cemconres.2011.08.008](https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.08.008).**
- **E. Marie-Victoire, M. Bouichou, V. Bouteiller, Y.Y. Tong, Realkalisation of a late 19th century bridge *Concrete Solutions Concrete solutions : proceedings of Concrete Solutions, 5th International Conference on Concrete Repair, Belfast, Northern Ireland, 1-3 September 2014.***

PC

- **A.A. Sohangpurwala, Cathodic protection for life extension of existing reinforced concrete bridge elements, in: *N.C.H.R. Program (Ed.), Transportation Registration Board, Washington, (2009)***
- **V. Bouteiller, G. Damien, F. Boinski et al., Impressed current cathodic protection with embedded anodes - Field trial on the Viaduc de Saint-Cloud in France, *7th International Conference on Concrete Repair, Concrete Solutions (2019)***
- **J. Ducasse-Lapeyrusse, V. Bouteiller, E. Marie-Victoire, M. Bouichou, G. Damien, V. Martinet, C. Annede-Villeau & O. Lesieutre , Assessment of the Impressed Current Cathodic Protection system after 4 years operation: Case study of the Saint-Cloud Viaduct (France), to be submitted**



# MERCI !

- DOA ou ex DOA : P Peyrac, A Jacquel, J Desille, V Martinet, T Godefroy, L Cazard, P Clain, J Cathala, JP Bisogno, O El Khorssi, N Duffait, G Scaron, B Darguesse, E Sittler
- Ex DPR : C Streith, M Naudan
- CEREMA ou ex CEREMA : J Schneider, JJ Carpio Perez, F Boinski, JM Lacombe, J Berthelley
- IFSTTAR ou ex IFSTTAR : V Bouteiller, B Godart
- In Situ / Concrete : C Michaux, M Grill
- BAC Corrosion : J Crouzillac
- Freyssinet C Annede-Villeau, O Lesieutre, X Hallopeau, F Penven, les chefs et ouvriers



[veronique.bouteiller@univ-eiffel.fr](mailto:veronique.bouteiller@univ-eiffel.fr)