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

LMDC
Toulouse - Tarbes

setec
lerm

Le suivi en temps réel de la corrosion par instrumentation

Par F. Deby (LMDC) et O. Anterrieu (Setec LERM)

Contexte

- Plus de 80% des défaillances des ouvrages sont générées par les phénomènes liés à la corrosion
- 3 à 4% PIB (pays industrialisés)
- Coûts indirects > 10 x coûts directs (de maintenance et de réparation)

Dalle de parking, Université de Syracuse (USA, NY, 1995) - Ollivier et Vichot (2008)

Viaduc Morandi, Gênes (Italie), Août 2018 (www.ledevoir.com)

FARDEAU FINANCIER COLOSSAL > >
BUDGETS DE MAINTENANCE DISPONIBLES

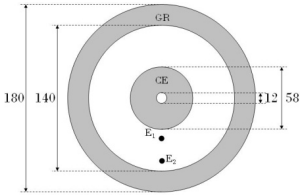
Rappel des principaux moyens de suivi de la corrosion

- Peigne de résistivité
- MultiRing Electrode
- Anode Ladder
- Mesure de la Résistance de Polarisation, V_{corr} (anneau de garde)
- .....

→ Ces instruments permettent d'accéder à différents paramètres utiles dans le cadre du diagnostic corrosion (mise en évidence d'un environnement favorable au développement de la corrosion).

Evaluation de R_p

Dispositifs existants

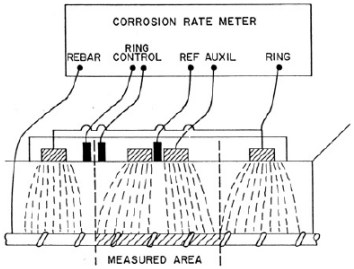


- Contre électrode (injection du courant polarisant)
- Anneau de garde (confinement du courant polarisant)

Mesure en surface du béton / informations sur l'armature

Protocole d'interprétation RILEM TC-154 EMC, M&S 2004

ANR APPLET GT-3 2007-2010



- Densité de courant non uniforme
- Effets de sur (sous) confinement

  - Véritable problème physique 3D
  - Distribution complexe de la sollicitation électrique

Vers une nouvelle mesure de R_p

PROJET DIAMOND (DIAgnostic MONitoring Durability)

- Objectif: Fournir une solution technique robuste et fiable basée sur les dernières avancées scientifiques afin de quantifier l'état de corrosion des ouvrages en béton armé.
- Livrables : sondes de surface et de monitoring de $V_{corr.}$
- Projet collaboratif initié en 2015 (financement FUI).

EDF	LMDC Toulouse - Tarbes	setec lerm
End user	*Université*	*PME*

- 4 ans (3 ans + extension d'1 an).
- Labélisé par plusieurs pôles de compétitivité.

Objectifs de la mesure

Quantifier l'état de corrosion avec 3 grandeurs estimées

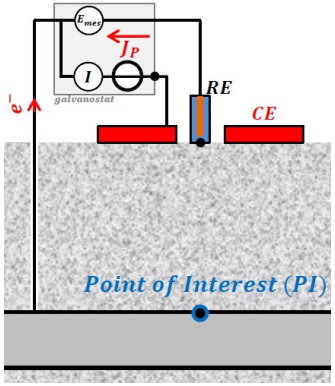
Potentiel de corrosion E_{corr}

Résistivité du béton d'enrobage ρ

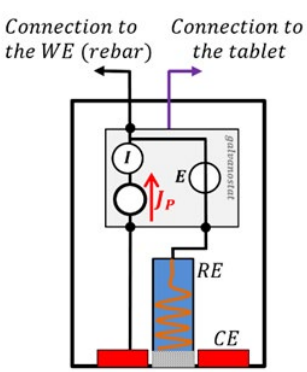
Courant de corrosion i_{corr}

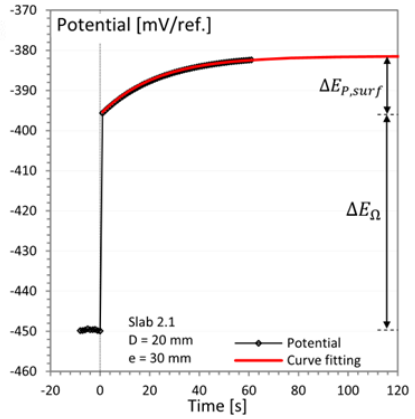
Résistivité du béton d'enrobage ρ

Sonde de surface



Sonde monitoring



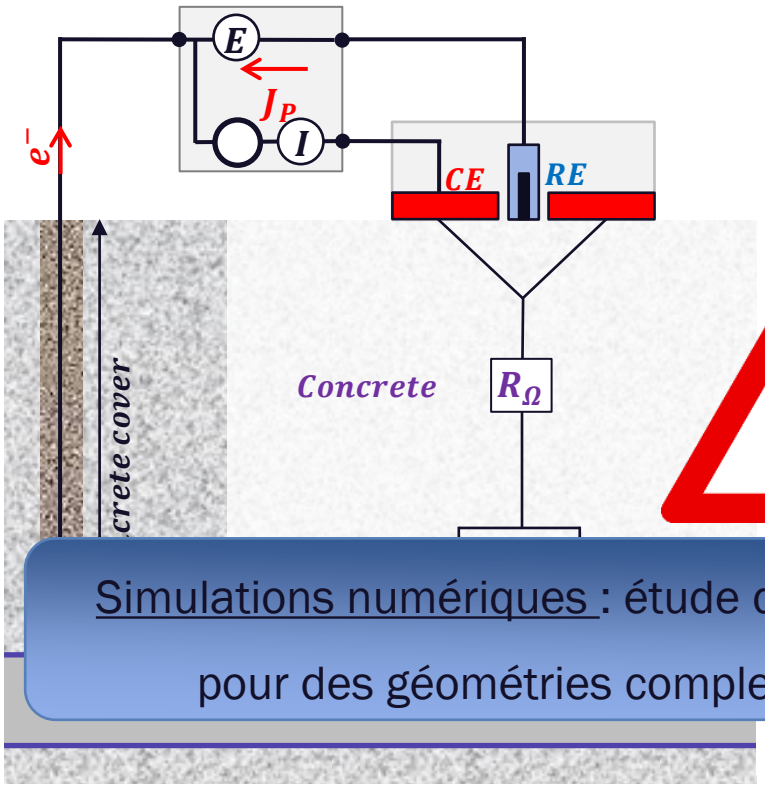


Nouveau protocole d'interprétation

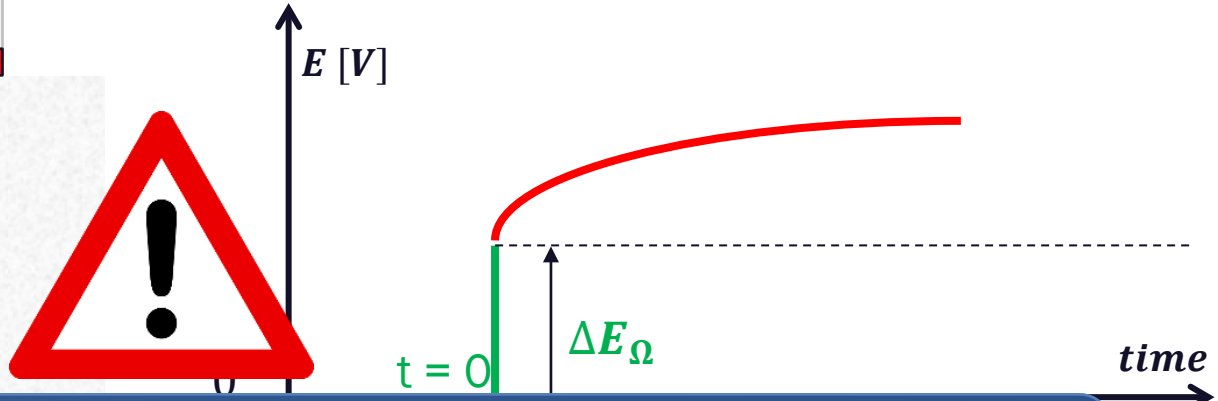
Utilisation d'abaques pour l'ingénierie

Principe de la mesure

Polarisation galvanostatique anodique



Modèle de Randles = résistance de transfert de charges R_{CT} et un condensateur C



Simulations numériques : étude de la transmission de la sollicitation électrique pour des géométries complexes / aide à l'interprétation des mesures

A t = 0, R_{CT} est court-circuitée $\Delta E = \Delta E_\Omega = J_P . R_\Omega$

1. Potentiel t < 0

Potentiel de corrosion E_{corr}

2. Réponse instantanée

ΔE_Ω

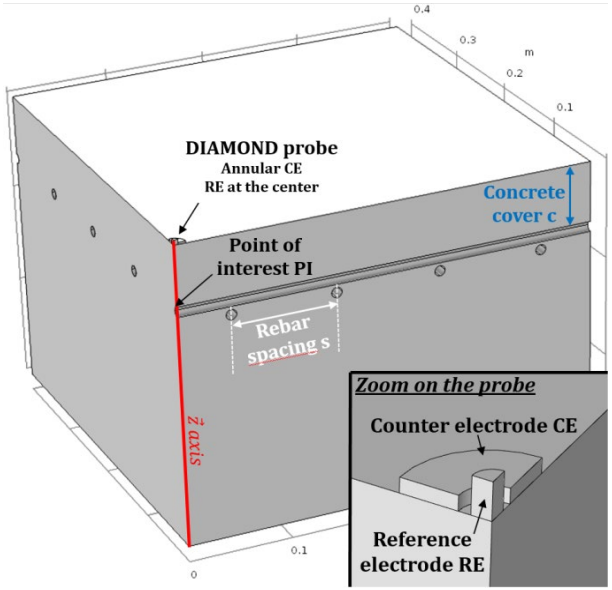
Résistivité de l'enrobage ρ

3. Réponse différée

$\Delta E_{P,RE}$

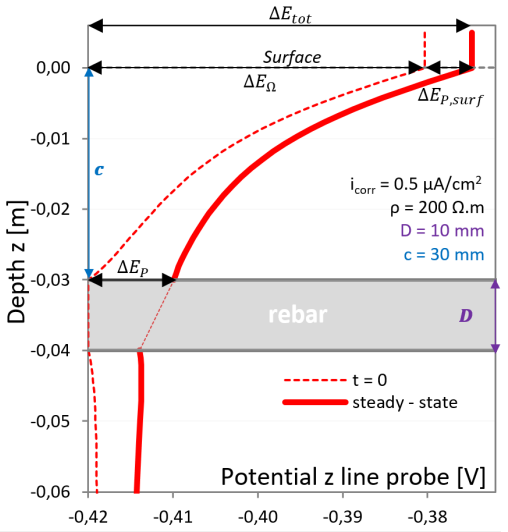
Courant de corrosion i_{corr}

Jumeau numérique 3D



COMSOL – AC/DC module

Paramètres
- Diamètre des armatures D
- Epaisseur d'enrobage c
- Résistivité du béton ρ
- Courant injecté J_P



- **Lois de l'électrocinétique**

  Conservation de la charge : $\nabla . j = 0$ **Loi d'Ohm locale :** $j = -\frac{1}{\rho}\nabla\varphi$

- **Conditions aux limites**

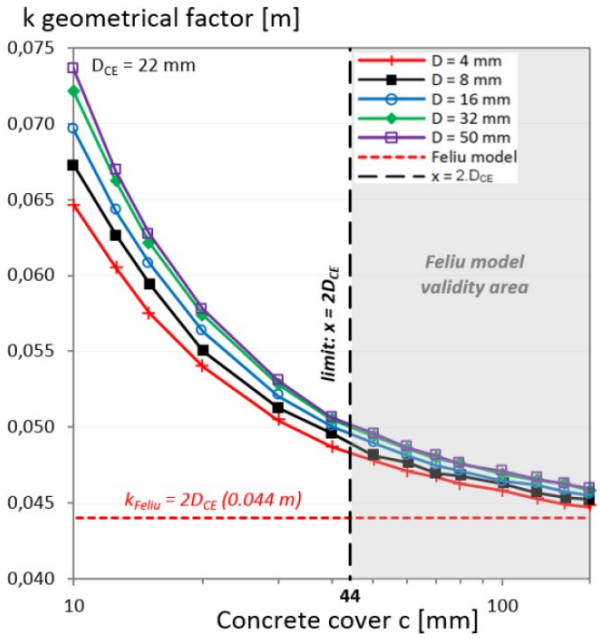
  Relation de Butler-Volmer

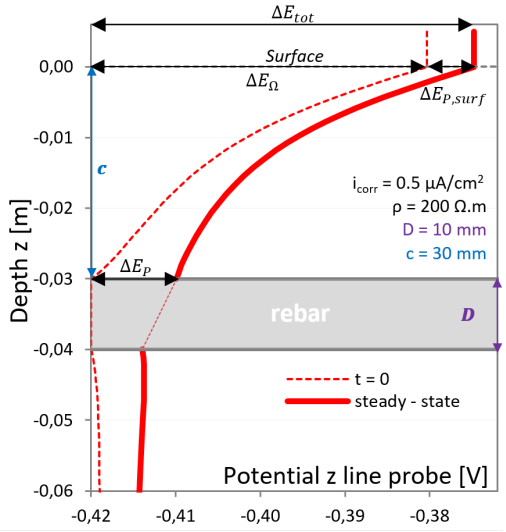
  en réponse différée :

$$j = j_{corr}\left[exp\left(\frac{Log(10)}{\beta_a}\Delta E\right) - exp\left(\frac{-Log(10)}{\beta_c}\Delta E\right)\right]$$

Résultats de simulations

Abaques de résistivité

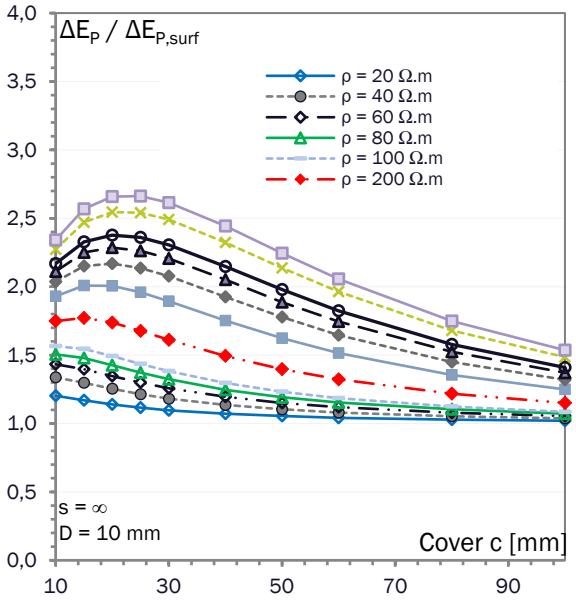


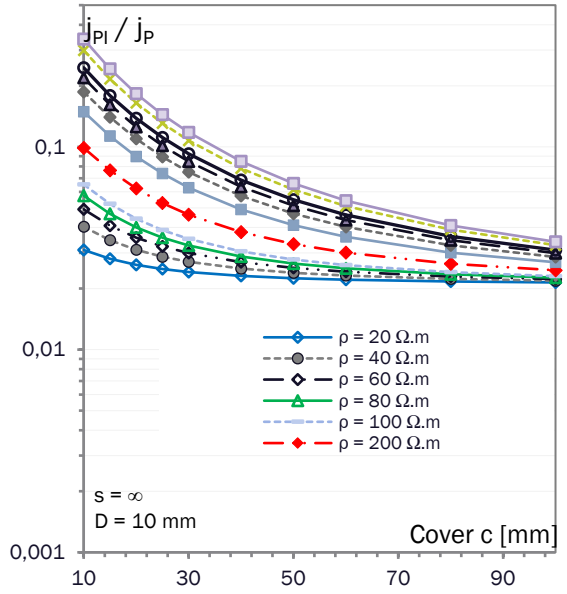


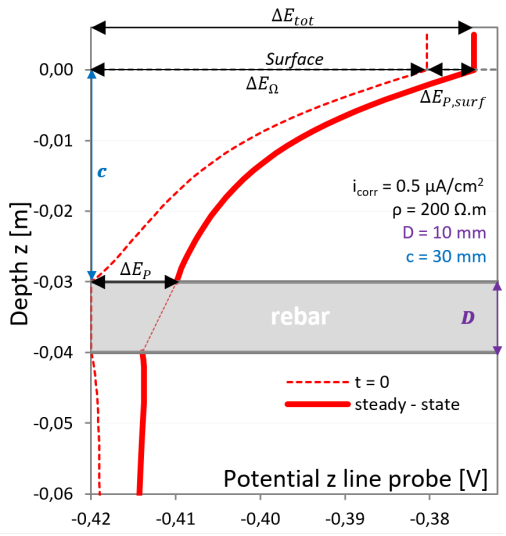
Abaques pour la détermination de la résistivité du béton d'enrobage - $\rho = k \cdot \Delta E_\Omega / J_p$

Résultats de simulations

Abaques pour la détermination de *Rp*





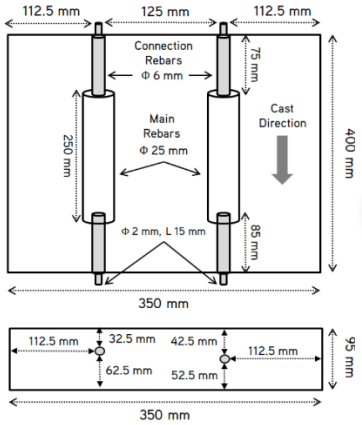


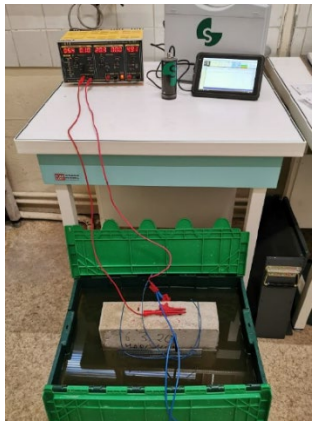
Abaque pour la détermination de la chute ohmique et de la densité de courant locale j_{PI}

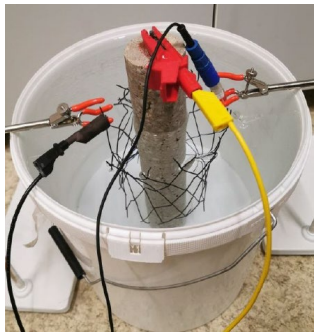
$$R_p = \Delta E_p / j_{PI}$$

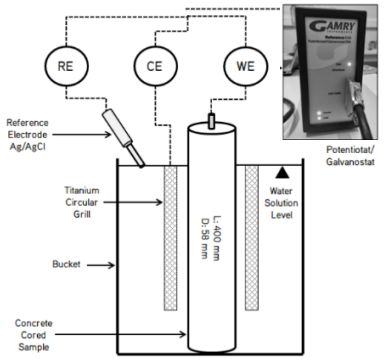
Résultats expérimentaux

Résultats en laboratoire









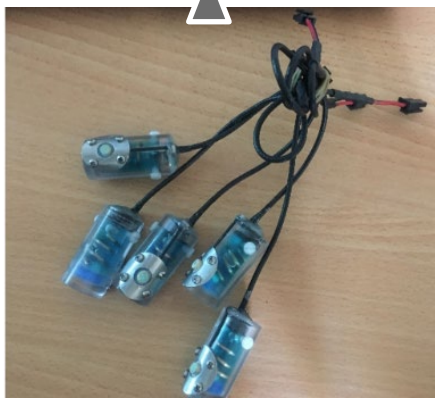
	Dalle non contaminée Sonde DIACOR	Dalle contaminée Sonde DIACOR	Dalle contaminée Essai Tafel
E_{corr} [mV / Ag/AgCl/KClsat]	**- 20** ; 14	**- 566** ; 15	**- 524**
ρ [Ω.m]	**113** ; 39	**55** ; 23	**89**
i_{corr} [µA/cm²]	**0,15** ; 0,06	**5,5** ; 1,8	**8,9**

Résultats des essais sur dalle (**moyenne** ; *écart-type*)

Mise en œuvre sur site

Considérations pratiques

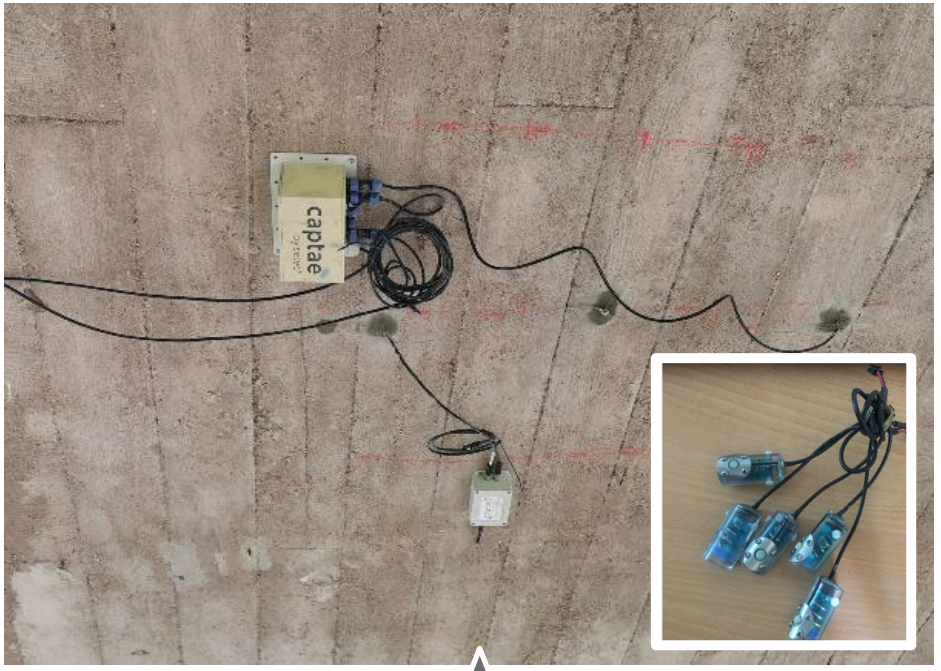
	Sonde de surface	Sonde de monitoring noyée
Contexte	Caractériser l'état actuel (diagnostic)	Anticiper et prévenir (surveillance et maintenance long terme)
Rendement	Plusieurs dizaines de points / heure	Echantillonnage temporel ajustable
Avantages	CQ in situ sur tablet PC Validation des mesures de potentiel	Possibilité de détecter l'amorce de corrosion
Limites	Méthode 'point par point' chronophage raisonnablement non-exhaustive	Logistique de mise en œuvre, maintenance en cas de bris, connexion/transmission BdD
Output	Valeurs numériques ponctuelles	3 séries temporelles



Mise en œuvre sur site

Exemples de mise en œuvre

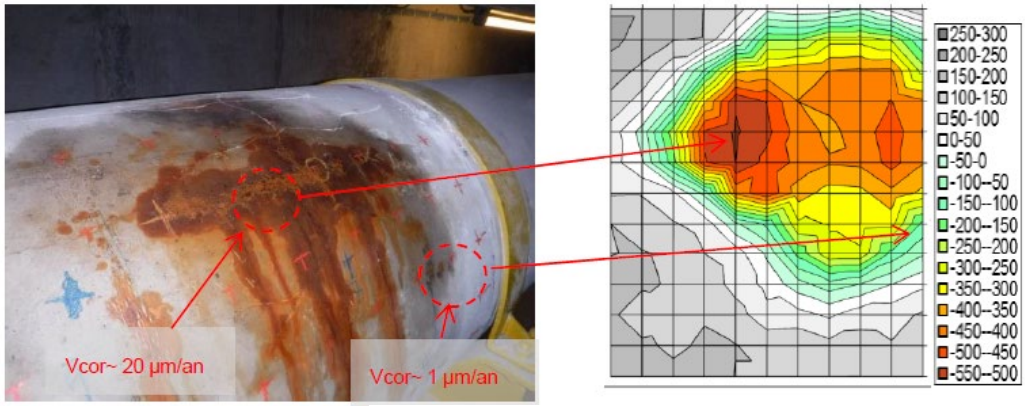
Sonde de surface



Sondes de monitoring connectées à Captae®

Résultats d'essais sur site

Sonde de Surface

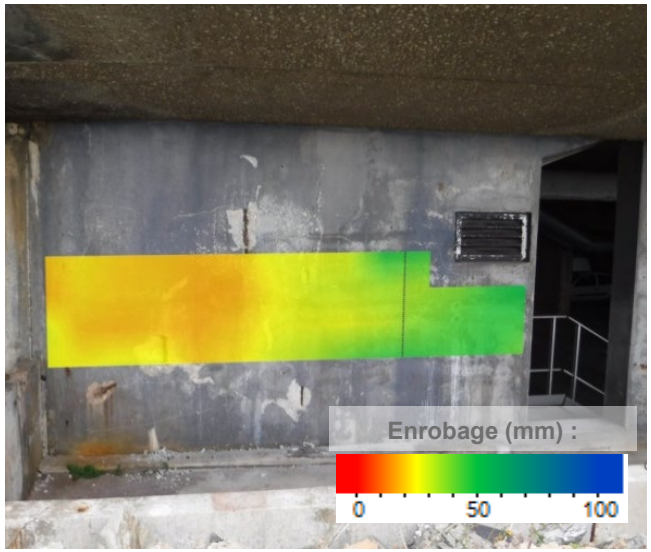


◀ Diagnostic corrosion des tuyaux BONNA (CNPE - EDF)

Diagnostic corrosion de la station d'épuration "Amphitria"

▼

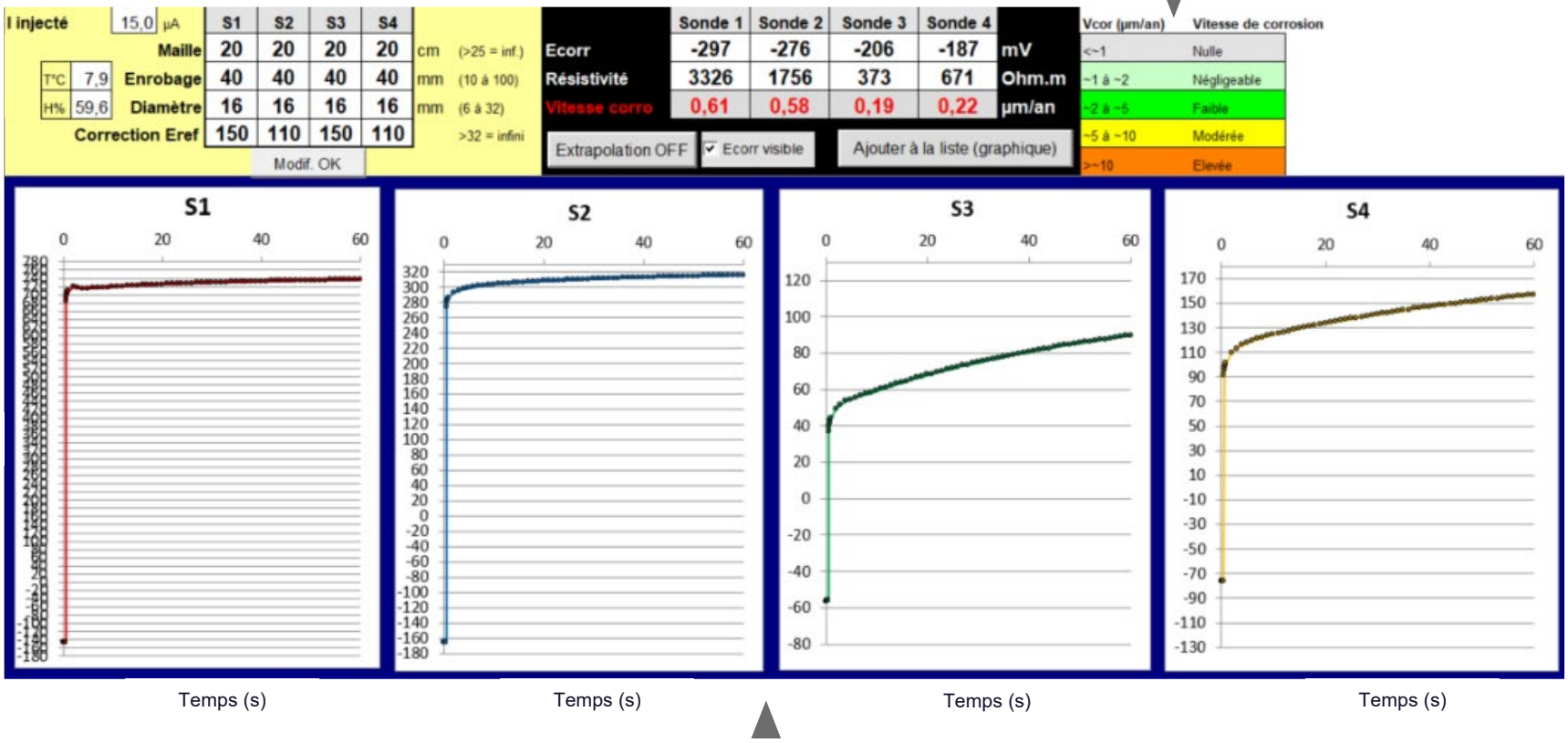
N°	*Résistivité*	*Vitesse*
V_1	340 Ωm	≃ 12,3 µm/an
V_2	360 Ωm	≃ 18.8 µm/an
V_3	274 Ωm	≃ 7.6 µm/an
V_4	106 Ωm	≃ 3.3 µm/an
V_5	91 Ωm	≃ 12 µm/an
V_6	240 Ωm	≃ 4 µm/an



Résultats d'essais sur site

Sondes de Monitoring

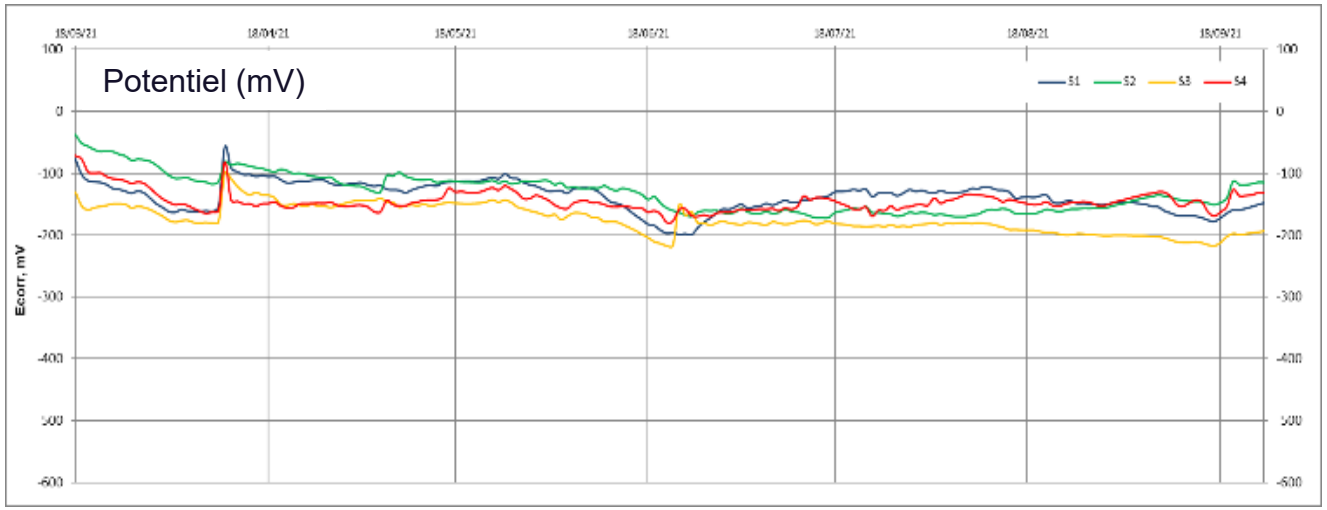
D'après les recommandations de la RILEM (TC 154-EMC)

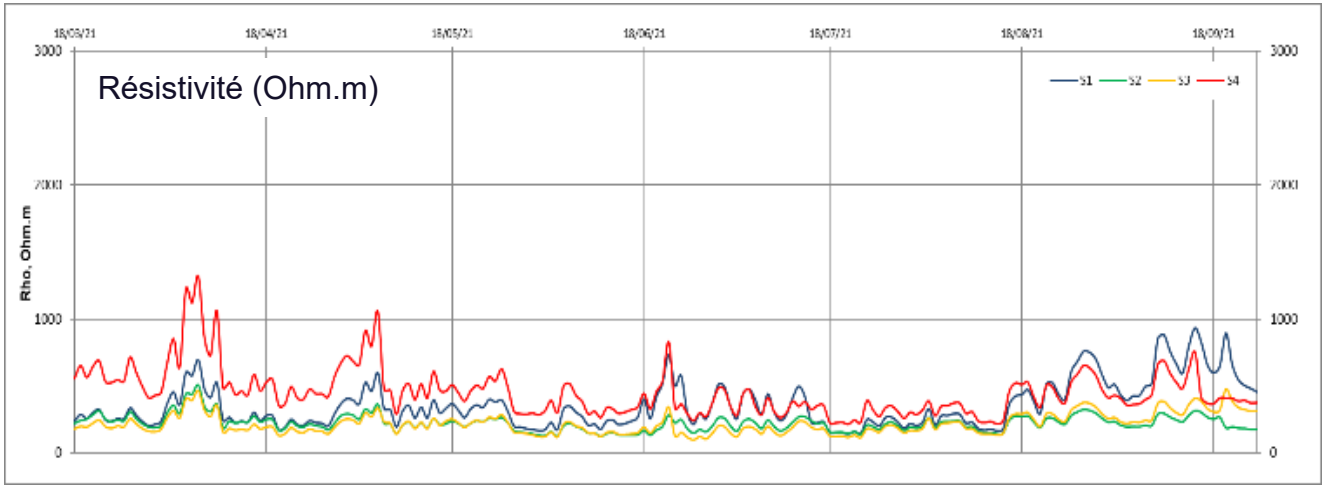


Interface LERM présentant les résultats numériques et graphiques issus de 4 sondes Diamond de Monitoring (S1 à S4)

Résultats d'essais sur site

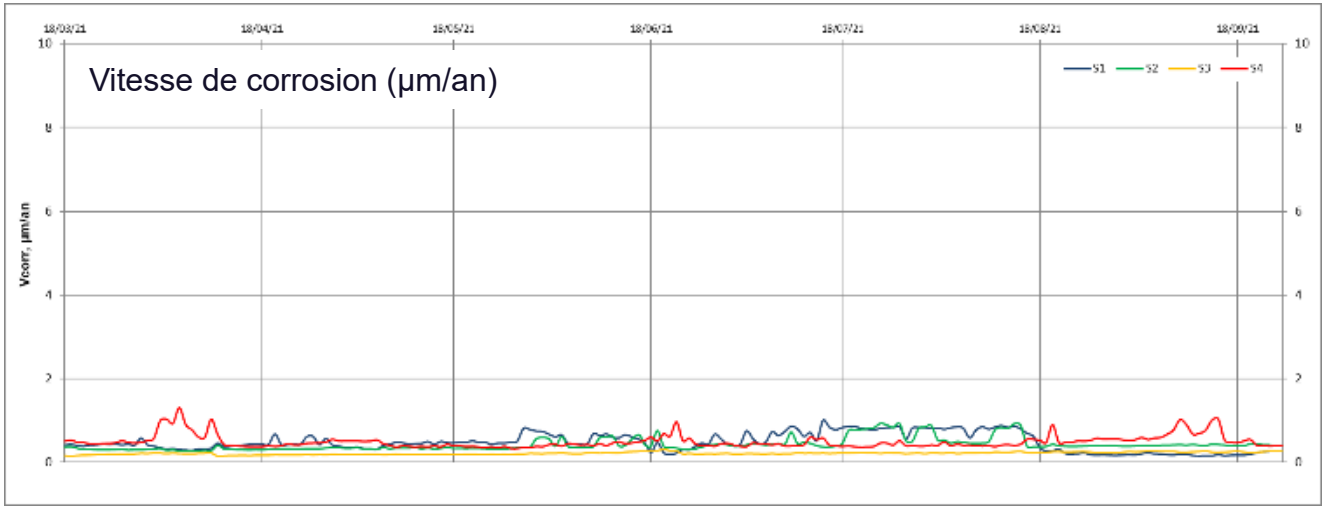
Sondes de Monitoring

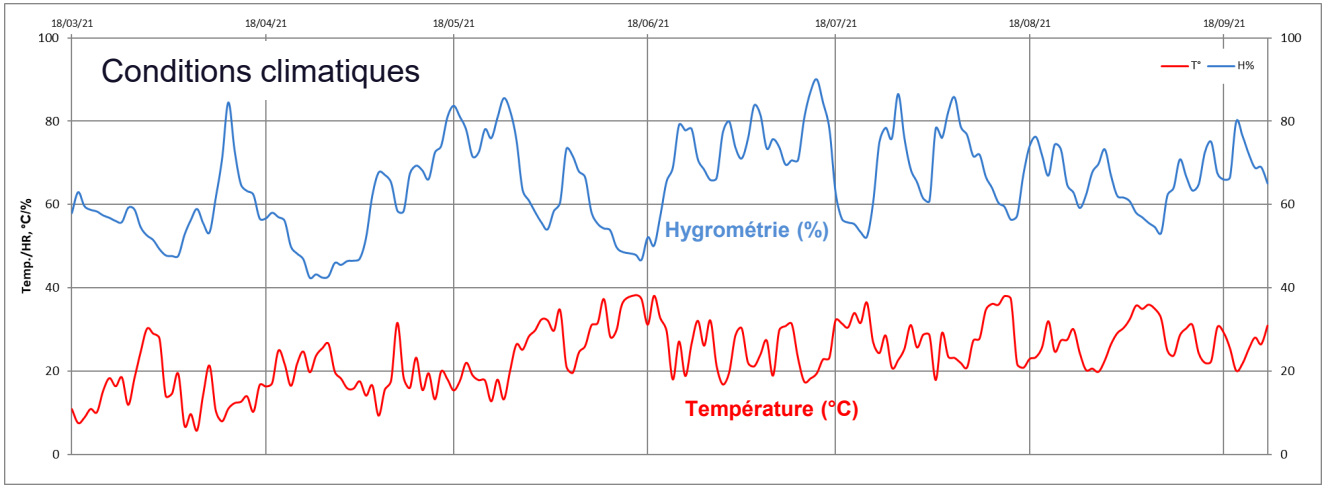




Résultats d'essais sur site

Sondes de Monitoring





Synthèse et conclusions

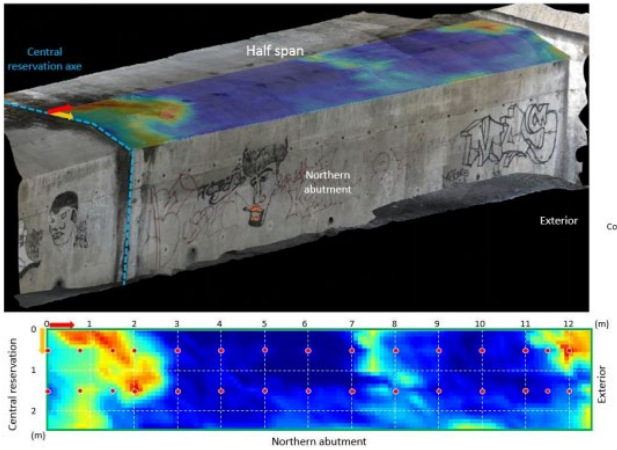
- DIAMOND est un dispositif d'investigation innovant, fruit d'une collaboration étroite entre EDF, le LMDC et SETEC LERM…
- 3 paramètres colocalisés mesurés conjointement (V_{corr}, rho, E_{corr}) + possibilité de couplage avec paramètres environnementaux (T°C, Hygro.%)
- En complément des mesures de potentiel et/ou d'enrobage.

→ Fiabilisation du diagnostic car accès à la cinétique de corrosion.

- 2 gammes de sondes développées (surface et monitoring).
  - Surface: diagnostic de l'état actuel.
  - Monitoring: suivi/surveillance temps réel de l'évolution de la corrosion.
- Exploitation directe des résultats dans le cadre de diagnostic d'état.
- Utile dans le cadre de travaux de surveillance/maintenance/réparation.

Perspectives

- Utiliser les résultats Diamond comme input pour alimenter des modèles prédictifs de dégradation des ouvrages.
- Produire des cartographies de V_{corr} par interpolation géostatistique et IA à l'aide d'outils numériques également développés dans le cadre du projet DIAMOND.



Extrait de Anterrieu et al. (2019):
"Non-Destructive data assimilation as a tool to diagnose corrosion rate in reinforced concrete structures" in Journal of Building Engineering

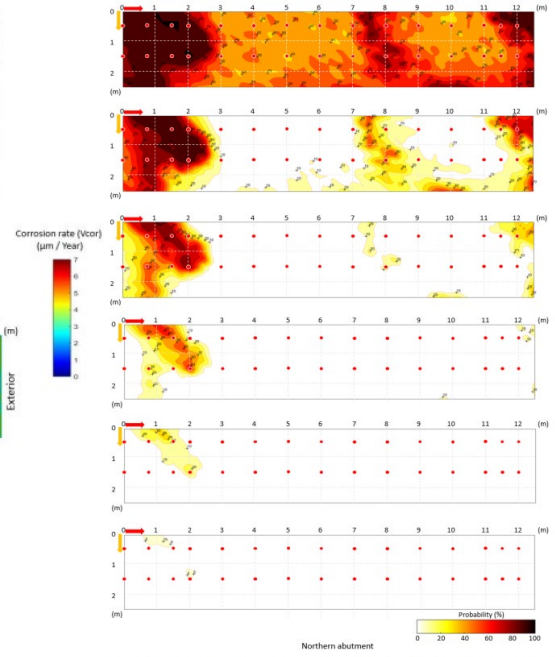


Figure 13: From top to bottom - probability maps that V_{cor} is greater than 1,2,3,4,5 and 6 µm / year obtained by BSS (red dot = V_{cor} data)

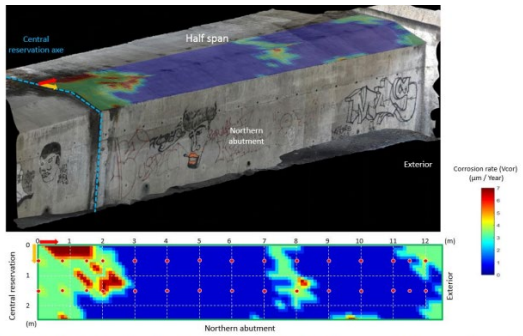
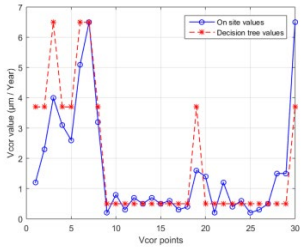


Figure 16: Mapping of V_{cor} obtained by decision tree (supervised learning) and projection on 3D photogrammetric model of the structure (red dot = V_{cor} data)



Merci pour votre attention

Contacts

Fabrice Deby, Ph.D.
Maître de conférences

+33 6 86 78 73 43

f_deby@insa-toulouse.fr

Olivier Anterrieu, Ph.D.
Ingénieur Géophysicien

+33 6 28 60 29 16

olivier.anterrieu@setec.com