

# Etude de la cinétique de corrosion des bétons armés et développement de nouvelles approches électrochimiques

Chaire DÉCISION - Action 1 : Prisme de béton armé en conditions environnementales et contrôlées

**Nathan REBOURS**

Doctorant LaSIE – La Rochelle Université & Université Gustave Eiffel

Direction : M. JEANNIN et V. BOUTEILLER

Encadrement : Ph. TURCRY

GIS-DECADES  
22/05/2026

## Les partenaires scientifiques et financiers



## Les partenaires financeurs



La Fondation



**80 %** des pathologies  
béton armé dues  
à la corrosion [1,5,6]

**3-4 %** du PIB mondial pour  
maintenance  
corrosion [2]

**~50 ans** durée de vie des  
ouvrages [3]

**8%** Des émissions CO<sub>2</sub> [4]  
→ production de ciment  
Décarbonation

**Projet DéCoF-Ré (2015-2021) Piles du Pont de l'île de Ré - Coordination V. Bouteiller Univ Eiffel**  
**Projet National PerfDuB (2016-2024) : Approche performantielle de la durabilité des ouvrages en béton - Coordination IREX**

**Chaire DÉCISION (2025-2030) : Durabilité du béton Et Corrosion des armatures en environnements chlorure ou carbonatation portée par la Fondation de l'Université Gustave Eiffel**

[1] Markeset G. et al. (2006), cité dans : Taffese W.Z. & Siston E. — Carbonation-induced and chloride-induced corrosion in RC structures — *Journal of Structural Engineering*, ASCE (2017)

[2] Organisation Mondiale de la Corrosion (WCO) / Angst U.M., Elsener B. et al. — La corrosion : un défi pour une société durable — *Materials and Corrosion*, Wiley-VCH (2022)

[3] Angst U.M. et al. — *Materials and Structures*, 51, 4 (2018)



[4] Chatham House (2018) — *Making Concrete Change: Innovation in Low-carbon Cement and Concrete* — J. Lehne & F. Preston

[5] B. Belin, *Sécurité des ponts : face au « chantier du siècle », l'urgence d'une action publique plus ambitieuse*, Institution: SENAT, Rapport n° 669 2021-2022 2022

[6] D. de Matteis, P. Peyrac, J.-M. Lacombe, A. Orcesi, J.-F. Douroux, F. Schmidt, et al., *Surveillance et entretien des ouvrages d'art, Usage de l'instrumentation pour les ouvrages du réseau routier national – Notions sur les "Ponts Connectés"*, DGITM 2020

Pont de l'île de Ré Diagnostic de corrosion – Projet DéCoF-Ré

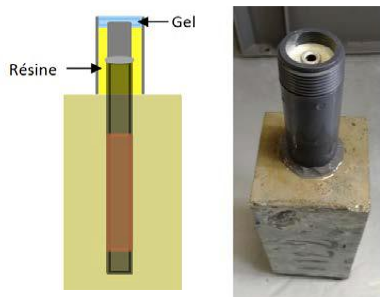
## Objectif de la Thèse :

- 1) **Établir des lois de cinétique de corrosion**  
→ alimenter des modèles prédictifs de durée de vie des structures en béton armé
- 2) **Développer la chronoampérométrie comme technique complémentaire pour le suivi in situ non destructif de la corrosion.**

## Verrous scientifiques & positionnement de la thèse

- ▶ **Contribution à l'apport de données de cinétiques de corrosion > 6 ans**  
(couplant formulation béton, classe d'exposition, conditions environnementales et temps)
- ▶ **Corrélation milieu naturel (TeHe) ↔ vieillissement accéléré (T/HR)**
- ▶ **Influence des bétons bas-carbone (CEM III/A, laitier) peu connu**  
sur les cinétiques de corrosion en exposition marine à long terme

# Prismes béton armé et paramètres d'étude



(a) Schéma en coupe (b) Prisme XS2 équipé



(c) Prismes B01-G-T1H3



Haute adhérence



Rond-Lisse

## 1) Formulation des bétons (kg/m<sup>3</sup>)

Constituant	B01	B04	B31
Ciment	CEMI 52,5	CEMIII/A 42,5	CEMIII/A 42,5
E/C	0,60	0,60	0,40

## 2) Contamination

T – Témoin (sans Cl<sup>-</sup>)

G – Gâchage (3% Cl<sup>-</sup>/ciment)

## 3) Type d'armature

RL – Rond Lisse (ø6 mm / S = 18,85 cm<sup>2</sup>)

HA – Haute adhérence (armature)

Numenclature : « 1000-B01-T-RL-XS3 » = prisme 1000 - béton B01 - Témoin - Rond Lisse - marnage

## 4) Conditions environnementales

**XS3** Marnage  
**XS2** & Immersion  
La Rochelle



**T/HR** Conditions  
contrôlée  
**TeHe** Univ Eiffel



**Carbonatation**  
CERIB



# Protocoles de caractérisation électrochimique

## Cellules électrochimiques & Potentiostats



Grille titane  
platinée / CE

Prisme/ WE

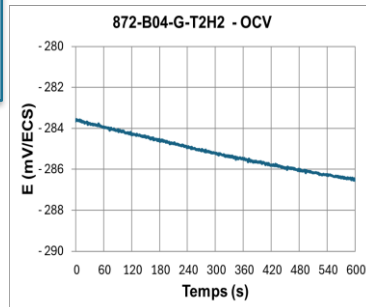
REF/ECS

## MESURES

### OCP

Potentiel libre

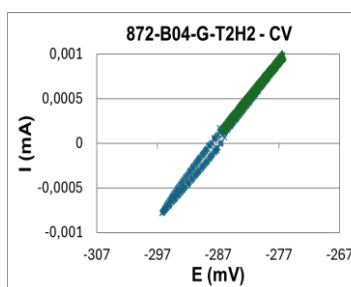
- Mesure potentiel état stationnaire
- Indicateur de l'état de corrosion



### CV

Voltamétrie cyclique

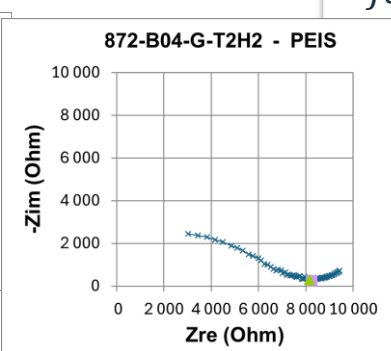
- Balayage en potentiel  $\pm 20$  mV / OCP
- But : Déterminer la pente  $I = f(E)$



### EIS

Spectroscopie

- 100 kHz  $\rightarrow$  30 mHz à  $\pm 15$  mV / OCP
- Re : Résistance d'enrobage



## CALCUL

### Jcorr

$$pente = \frac{1}{R_p + R_e}$$

- EIS  $\rightarrow$  Re

$$R_p = \frac{1}{pente} - R_e$$

- Stern-Geary

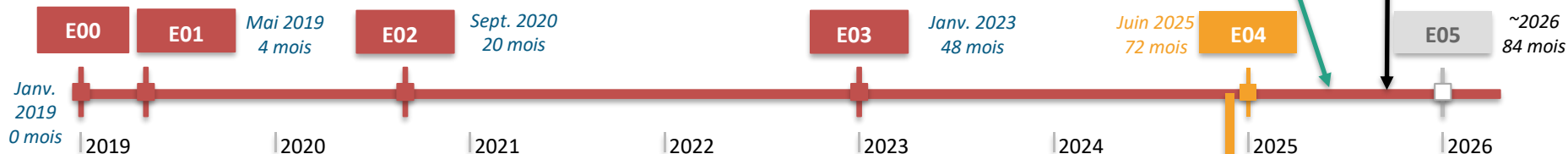
$$J_{corr} = \frac{B}{R_p * S}$$

# Chronologie des campagnes de mesure

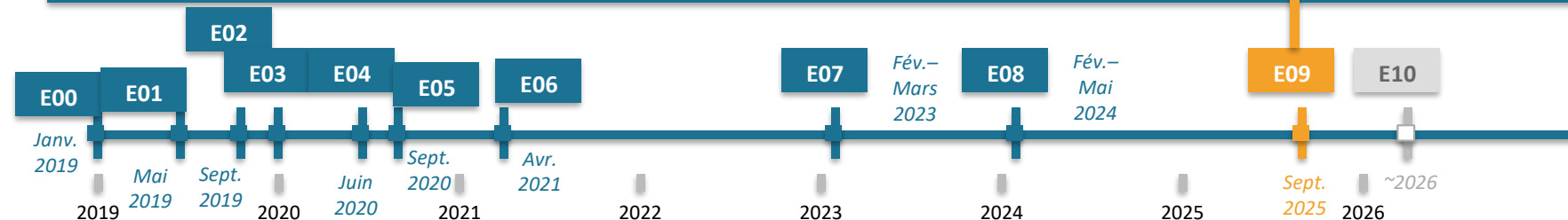
PN

PerfDuB

La Rochelle Université (LaSIE) — Sites marins XS2 (immersion) & XS3 (marnage)

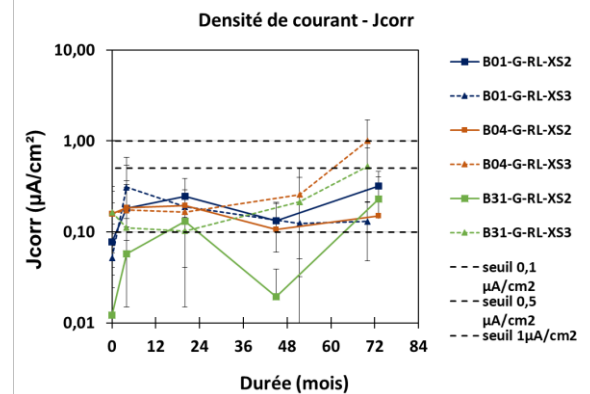
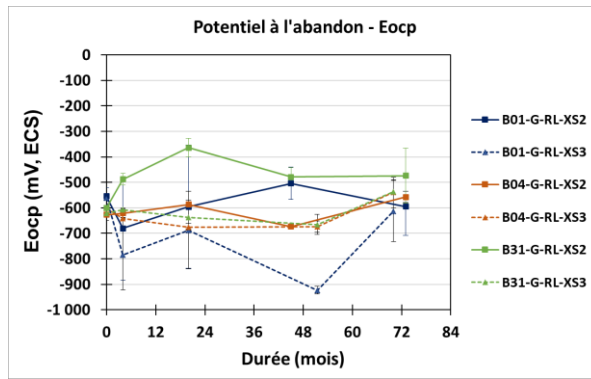
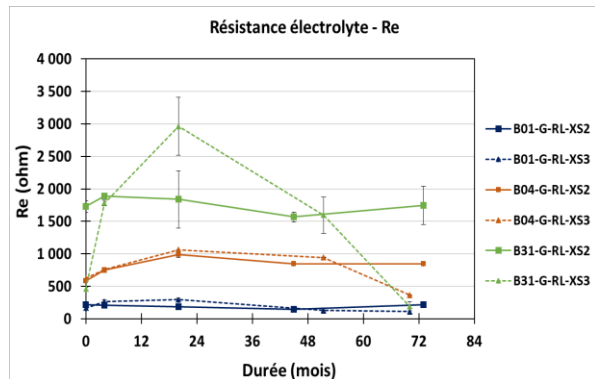


Université Gustave Eiffel (EMGCU) — Conditions climatiques contrôlées ou naturelles (T/HR)



# Résultats XS2/XS3 (LaSIE) - Influence des classes d'exposition

Résultats moyennés sur 5 prismes par référence - Chlorures au gâchage (G, 3 %  $\text{Cl}^-/\text{ciment}$ ) - Armature Rond-Lisse - E00-E04 (0-72 mois)

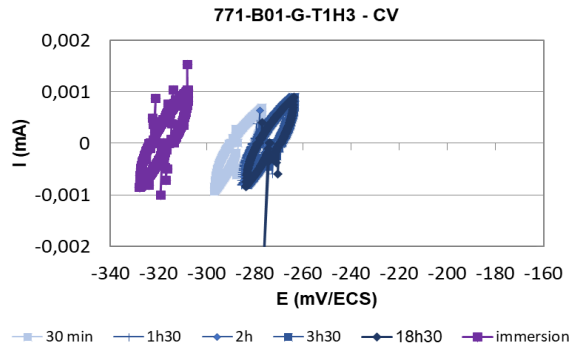


	Re	Eocp	Jcorr
Formulation Béton	<b>B31</b> > <b>B04</b> > <b>B01</b>	$E_{ocp} \in [-700; -500] \text{ mV}$	72 mois : $0,1 < J_{corr} < 1 \mu\text{A}/\text{cm}^2$
Classe exposition (XS2/XS3)	Influence non significative → Béton saturé	<b>B01</b> et <b>B31</b> - XS3 < XS2 <b>B04</b> - XS2 $\approx$ XS3	<b>B04</b> & <b>B31</b> - XS3 > XS2 : écart significatif <b>B01</b> non significatif

# Résultats 20 °C et 92% HR (EMGCU) - Mesures CV par formulation

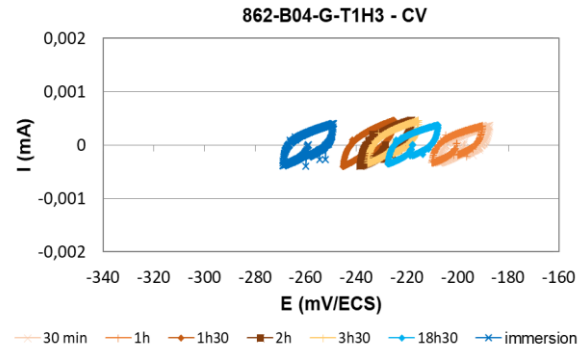
Protocole : imbibition progressive (eau robinet) - mesures à 30 min · 1h · 1h30 · 2h · 3h30 · 18h30 + immersion complète

## B01 — CEM I (E/C=0,60)



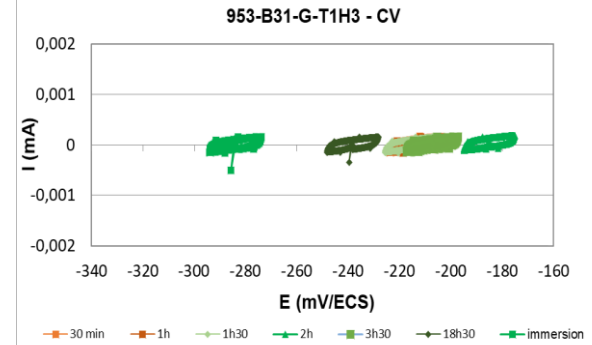
$I \approx \pm 2 \mu\text{A}$

## B04 — CEM III/A (E/C=0,60)



$I \approx \pm 80 \text{ nA}$

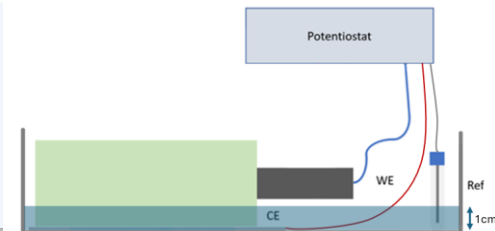
## B31 — CEM III/A (E/C=0,40)



$I \approx \pm 20 \text{ nA}$

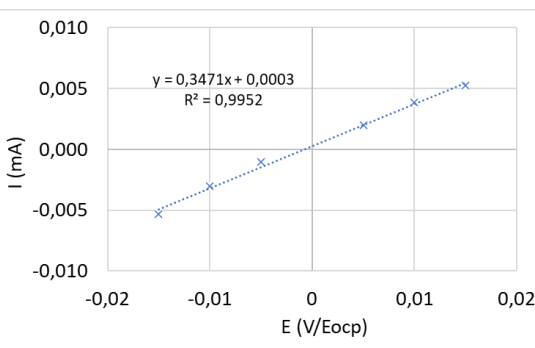
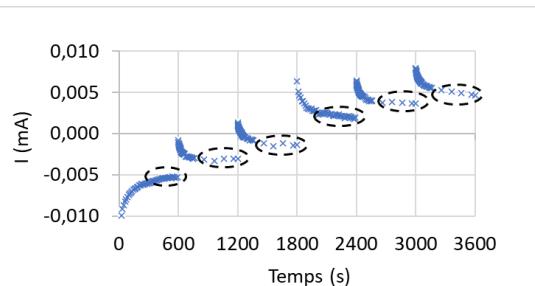
## Observations clés

- ▶ Courants CV : ~100 fois plus faibles pour B31 vs B01
- ▶ Béton plus poreux → + conductivité ionique → + grande surface active
- ▶ Courants d'échange ( $i_0$ ) plus grands → réactions redox à l'interface sont plus rapides



## Chronoampérométrie

- Échelons  $\pm 5/10/15$  mV/OCP
- Plateau = courant faradique pur



## Développement mathématique - Modèle

### Réponse temporelle avec CPE (Constant Phase Element)

$$I = \frac{e_0}{Re + Rp} * \left( 1 + \frac{Rp}{Re} * \exp\left(-\frac{t^k}{\tau}\right) \right)$$

Avec  $\tau = \frac{Re.Rp}{Re+Rp} * C'$

$Re$  = résistance électrolyte ( $\Omega$ )  
 $Rp$  = résistance polarisation ( $\Omega$ )  
 $\tau$  = constante de temps (s)  
 $k$  = exposant CPE  $\in [0,1]$   
 $C'$  = capacité (en  $F.s^{(k-1)}$ )

$$Re = \Delta E / I(t \rightarrow 0)$$

$\lim t \rightarrow 0$   
= régime capacitif

$$Rt = \Delta E / I(t \rightarrow \infty)$$

$\lim t \rightarrow \infty$   
= régime stationnaire

$$Rp = Rt - Re$$

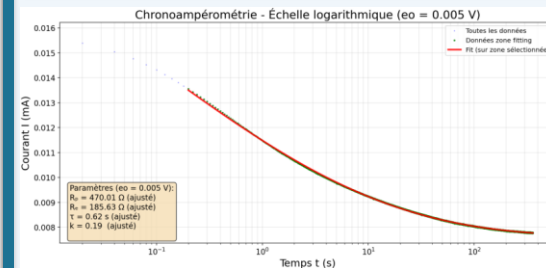
Avantage vs CV : la composante capacitive est modélisée  $\rightarrow Rp$  non biaisée  
 $\rightarrow J_{corr}$  plus fiable

## Méthode des moindres carrés

### Algorithme de Levenberg-

Minimise la somme des résidus<sup>2</sup> :  
 $\Sigma [I_{mes}(ti) - I_{mod}(ti)]^2$   
 Variables ajustées :  $Re, Rp, \tau, k$

### Exemple — 795-B01-G · +5 mV/OCP



Résultats ajustés (exemple) :  
 $Re = 470 \Omega$  ·  $Rp = 186 \Omega$   
 $\tau = 0,62 \text{ s}$  ·  $k = 0,19$

# Conclusions & Perspectives

Nathan REBOURS · LaSIE / Université Gustave Eiffel · Chaire DÉCISION 2026

## ① Classe d'exposition

**XS3 > XS2**

- Le marnage → cinétiques + élevées
- Vérifier l'oxygénation ?

## ② Protocole opératoire validé T/HR

La durée d'imbibition semble avoir une influence non significative sur les conditions environnementales (20°C-92%HR ; 45°C – 80%HR)

## Perspectives

### Campagnes E05 & E10

*Lois de cinétique de corrosion*

### Biofilm / Biofouling

*Mesures avant/après nettoyage*

### Loi d'échelle

*Comparaison cm (Prismes) vs m (CE)*

### Analyses

**μ-Raman**  
**MEB**  
**Tomographie RX**

### Valorisation EROCORR 2026

### Oxygénation

*Mesures à différent temps  
D'oxygénation*

### Lab / Réelle

*Comparasion Env  
Controlé / extérieur*