



CEFRACOR  
CERTIFICATION  
Protection  
Cathodique



AFGC

IMGC

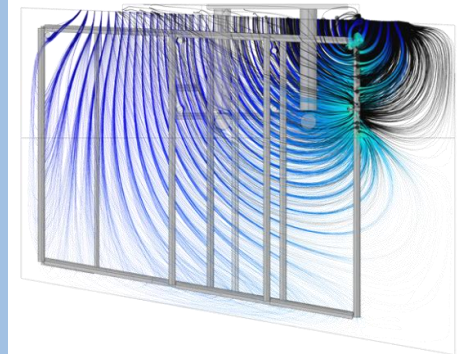
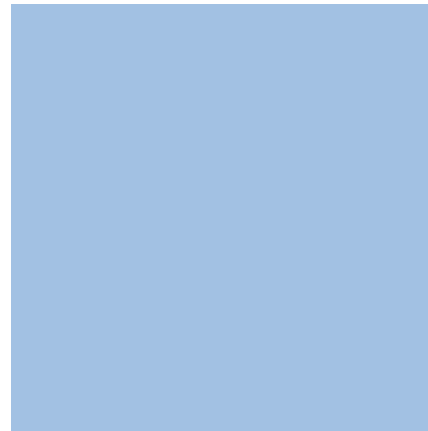
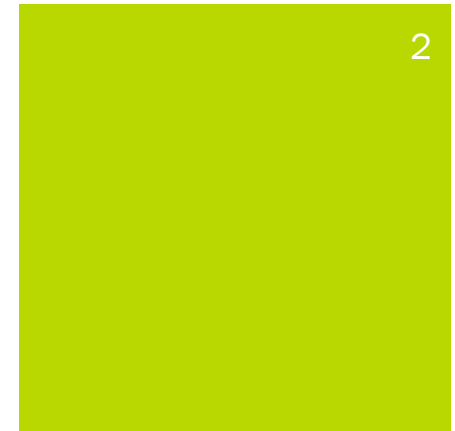


« LA PROTECTION CATHODIQUE DES  
OUVRAGES EN BETON ARME : DU  
DIAGNOSTIC AUX TRAVAUX »

Journée Technique AFGC Méditerranée  
Mercredi 12 décembre 2018  
Centre de Formation Emile Picot de Mallemort



# Intérêt de la modélisation pour la conception d'une installation de protection cathodique



## LA PROTECTION CATHODIQUE DES OUVRAGES EN BETON ARME : *DU DIAGNOSTIC AUX TRAVAUX*

**D. Garcia<sup>1</sup>, S.Deharo<sup>1,2</sup>, Dr S. Laurens<sup>1</sup>, S. Panin<sup>2</sup>, Pr. R. François<sup>1</sup>, Dr A. Dubosc<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> INSA Toulouse – Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions

<sup>2</sup> R3S

<sup>3</sup> OTEIS

Protection cathodique contre la corrosion des aciers  
d'armature des structures en béton  
=  
Problème physique 3D (non réductible 1D)

Aujourd'hui

Approche empirique du design des solutions de  
protection cathodique

Norme  
NF EN ISO 12696

Demain

Amélioration de la compréhension physique  
+  
Développement d'outils de simulation numérique 3D

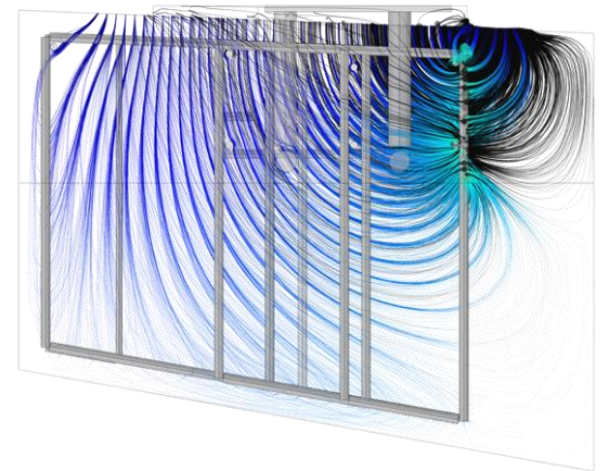
Après-demain

**CAO de la protection cathodique**  
Optimisation du processus global de dimensionnement, de  
mise en œuvre et de contrôle



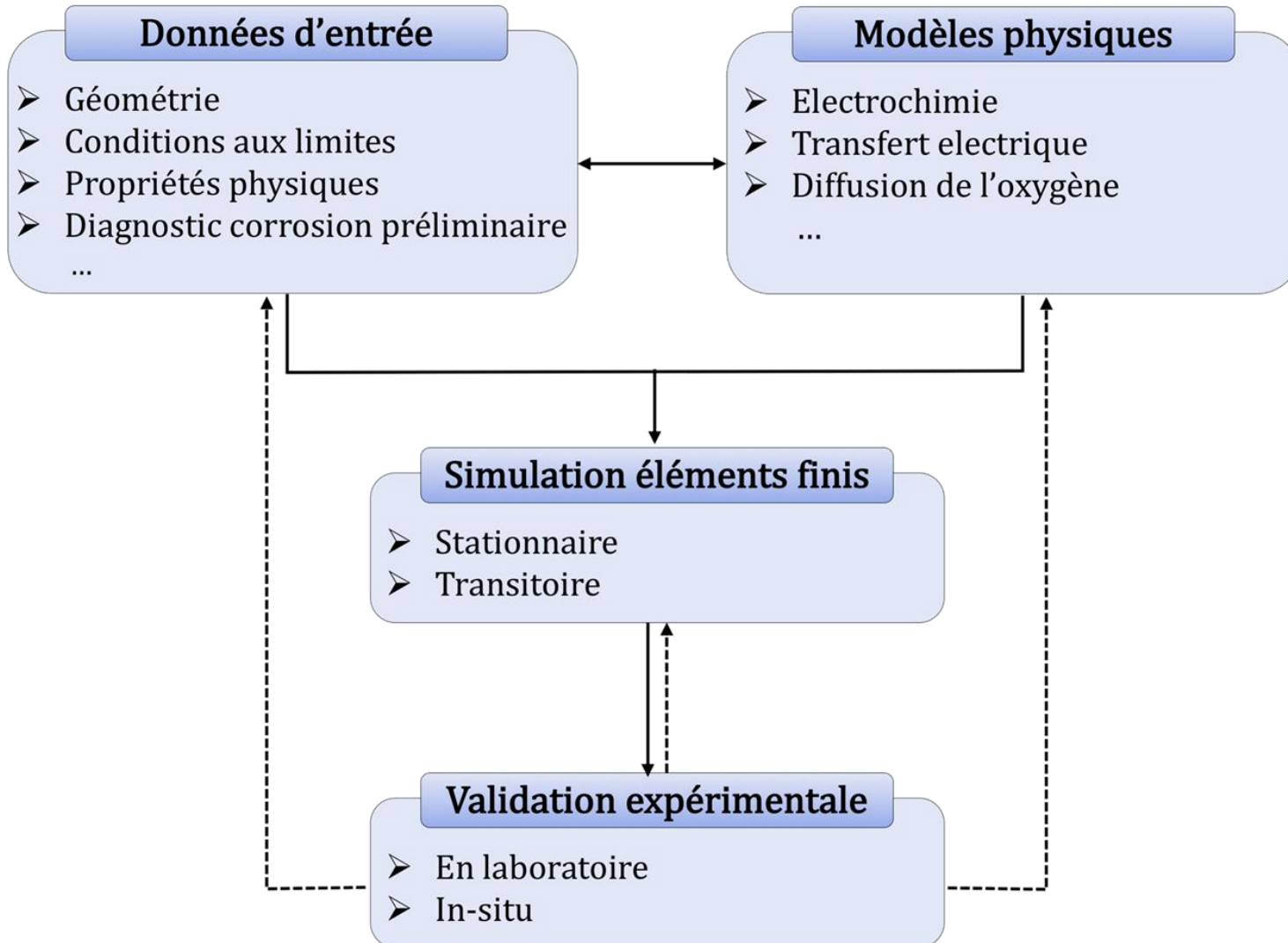
## Questions légitimes (liste non exhaustive) ...

- Comportement électrochimique de l'anode ?
- Zone d'influence d'un système anodique ?
- Distribution du courant de protection dans le volume ?
- Influence de la disponibilité en oxygène ?
- Influence du champ de résistivité du béton ?
- Modalités de contrôle du système de protection ?

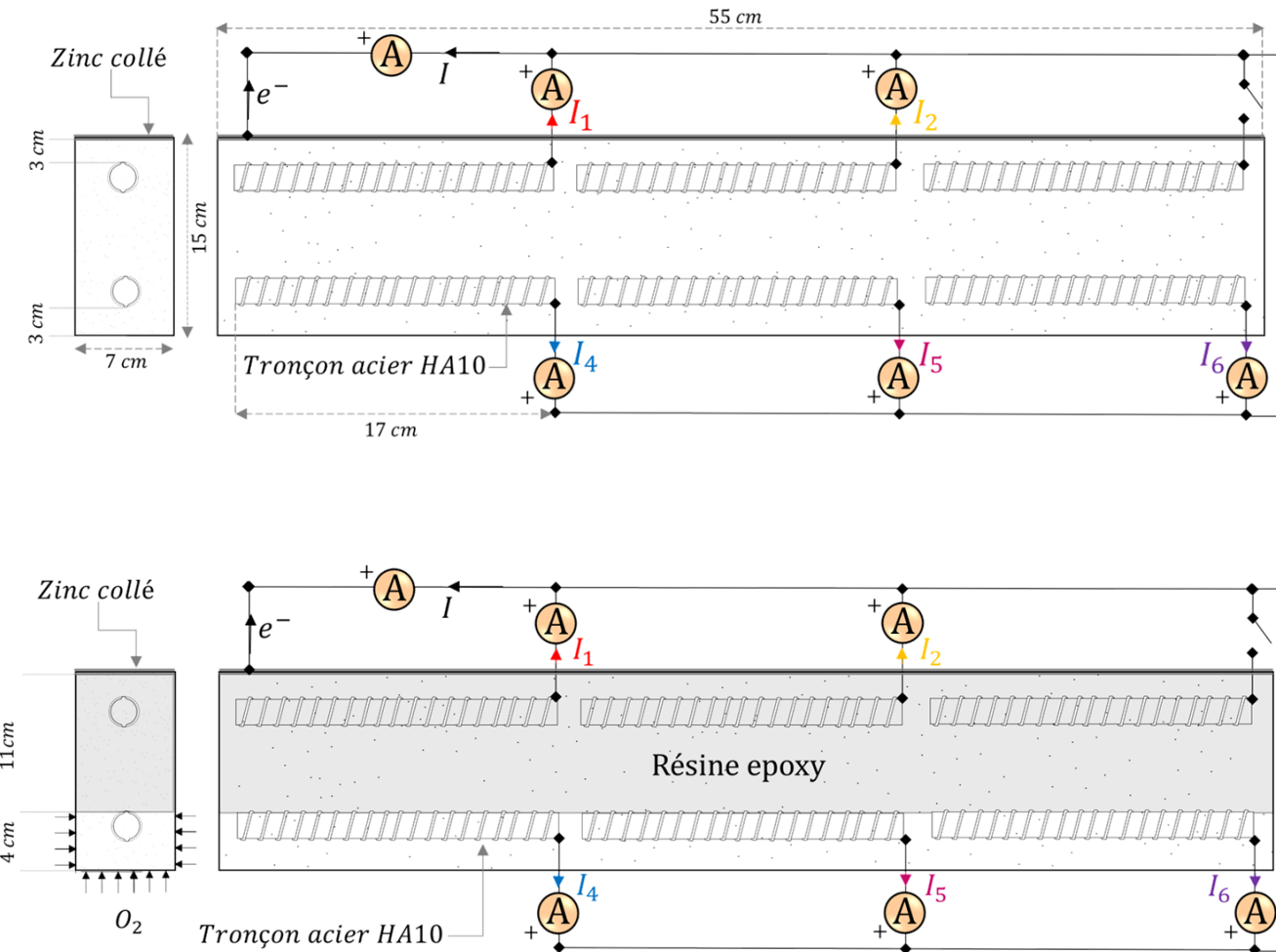


**Impossible de répondre empiriquement !**

**↳ Nécessité de modéliser pour simuler un système « procatho »**



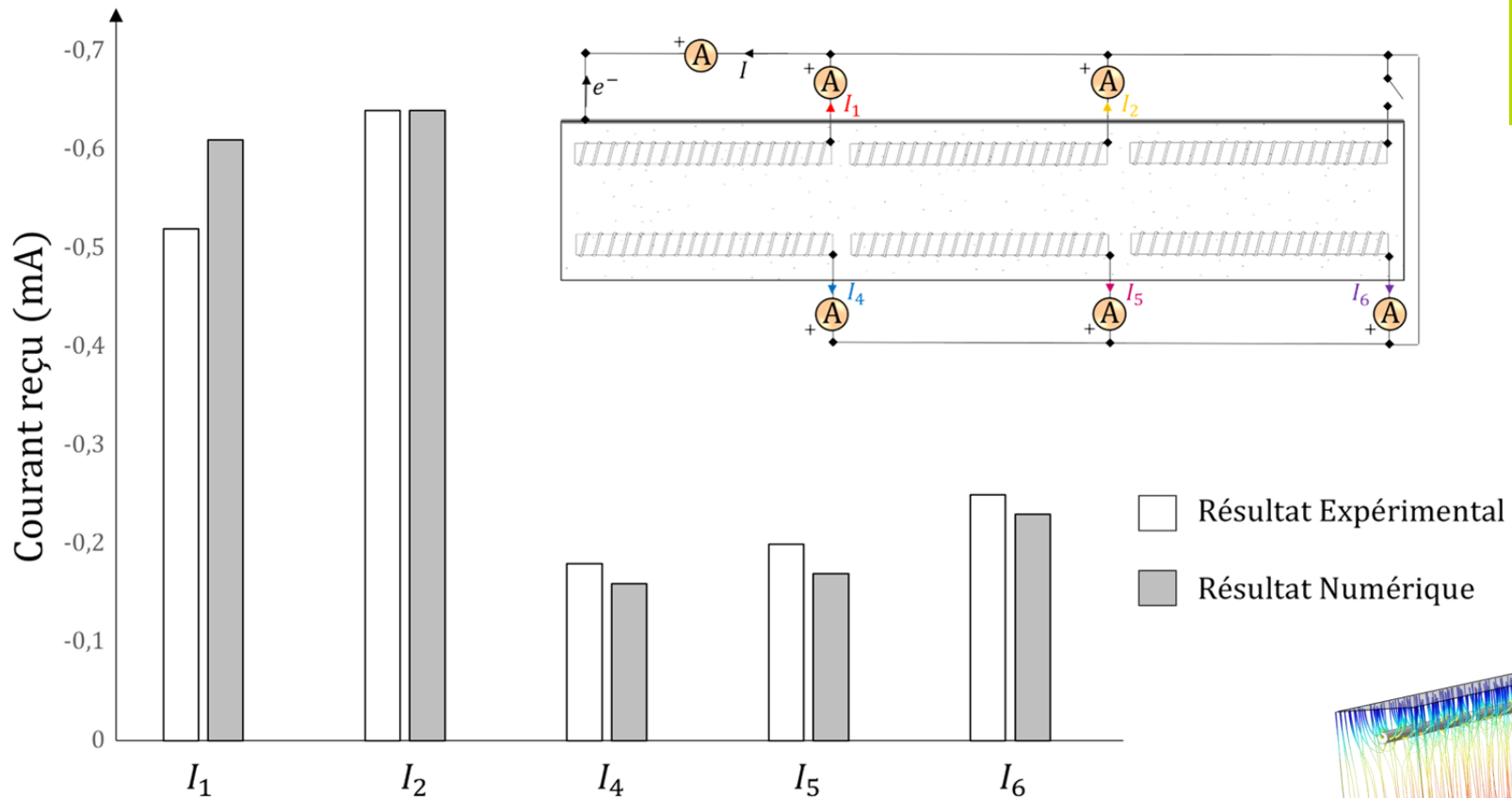
## Corps d'épreuve Labo



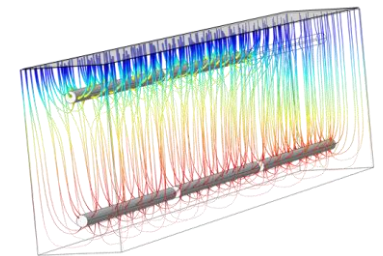
Renouvellement en  $O_2$   
assuré

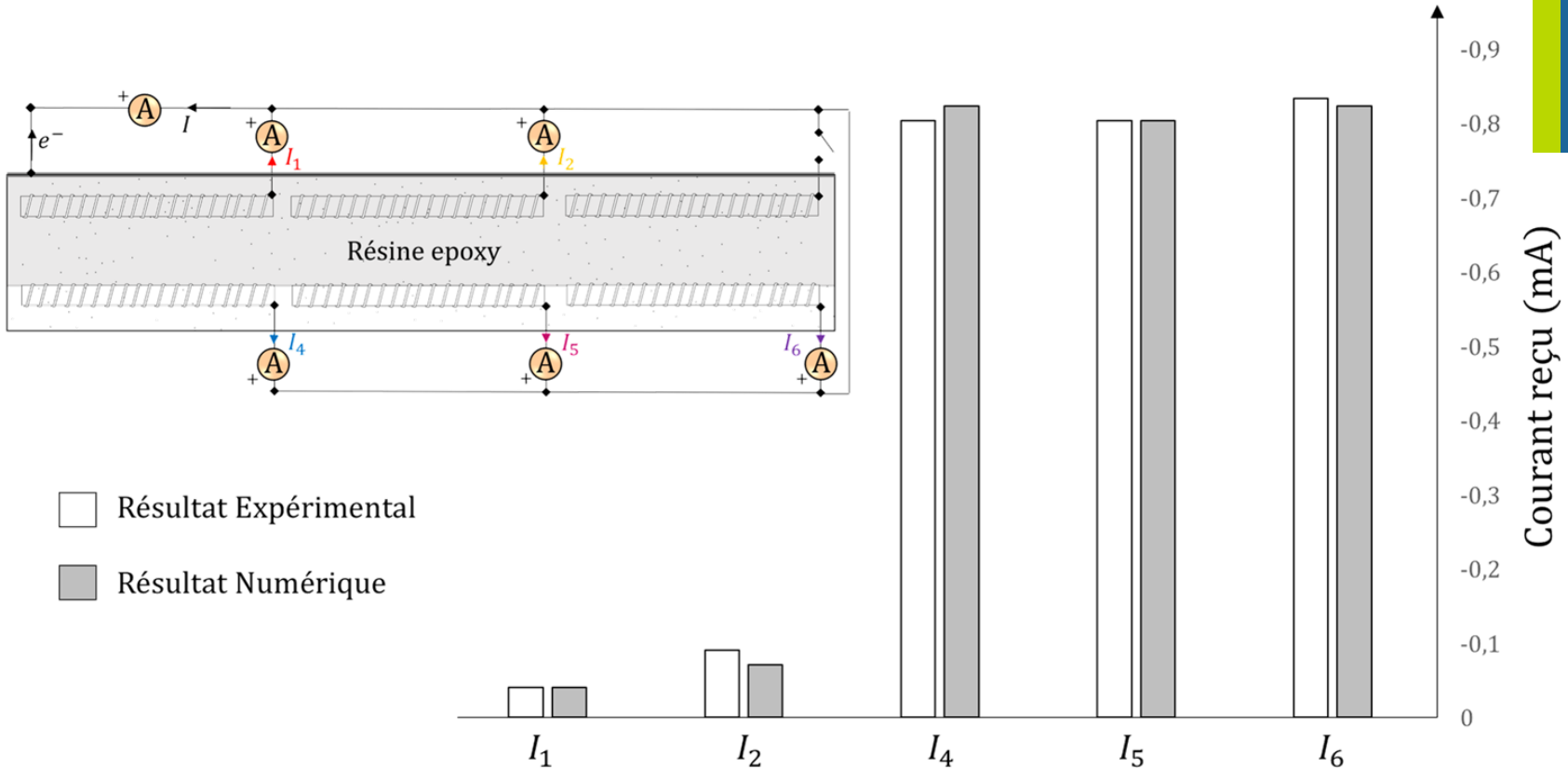


Renouvellement en  $O_2$   
limité



- Pas de problème de renouvellement en  $O_2$  au niveau des aciers
- Système contrôlé par les phénomènes électriques et électrochimiques



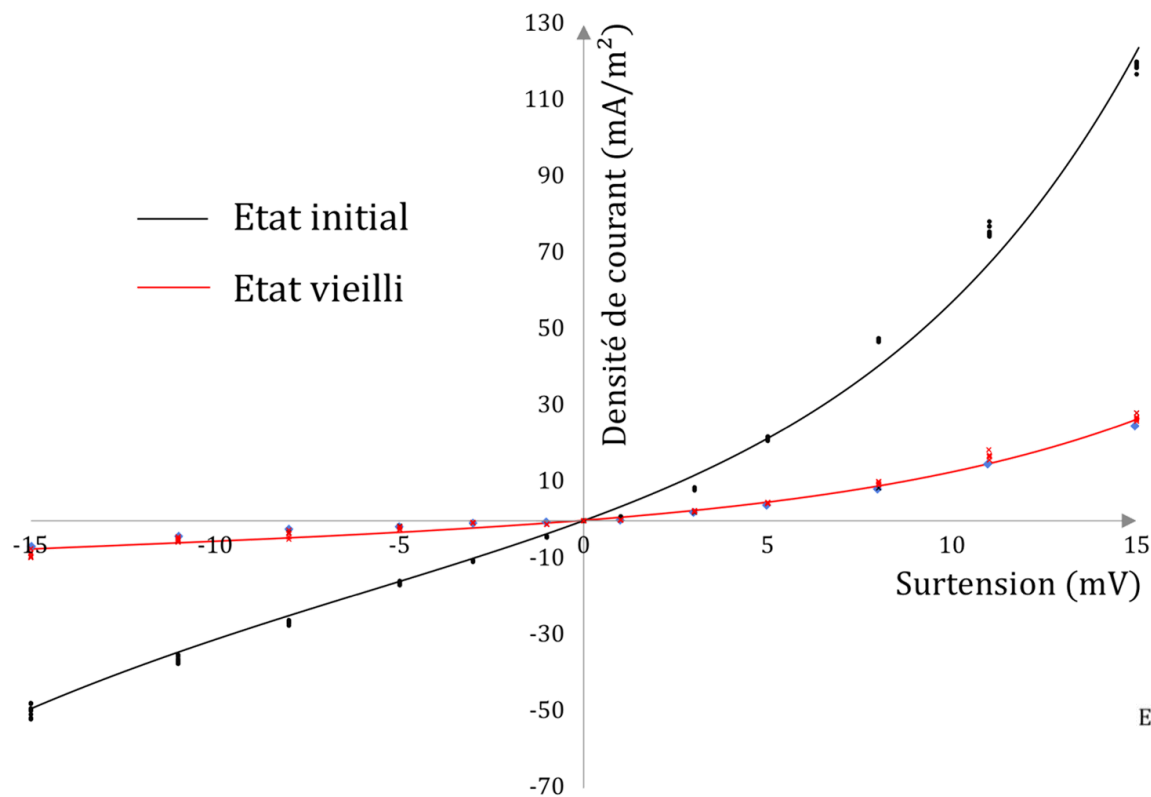


- Pas de renouvellement en  $O_2$  au niveau du lit supérieur (résine époxy)
- Redistribution du courant vers le lit d'acier inférieur
- Système contrôlé par la diffusion du dioxygène

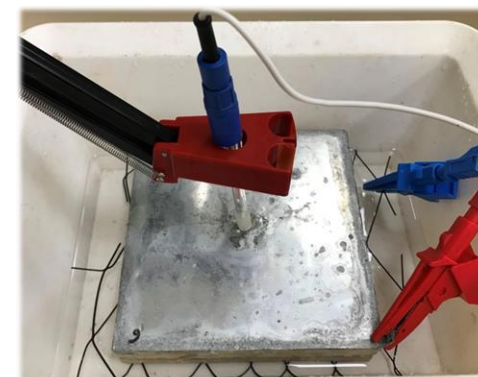


# Modélisation, simulation numérique et validation

## Comportement électrochimique d'un système anodique Exemple : Zinc Layer Anode (ZLA)

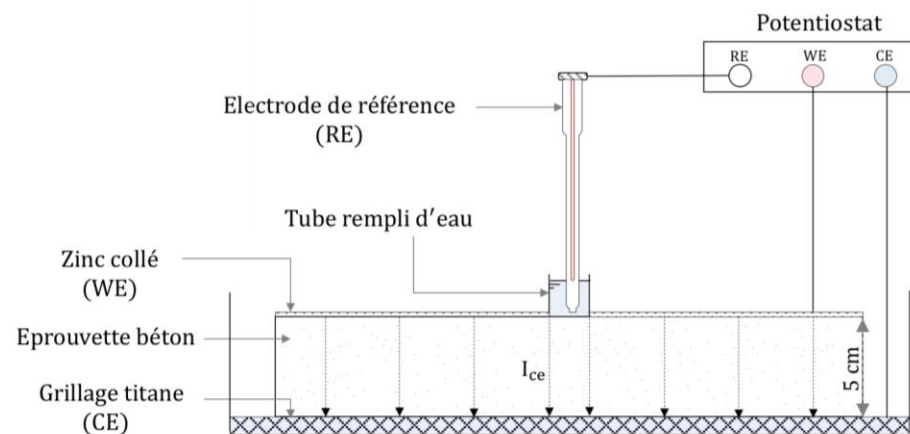


RILEM Technical Letters, 2020



**Viellissement initial rapide de l'anode !**

**Stabilisation après 10 jours et jusqu'à 3 mois !**



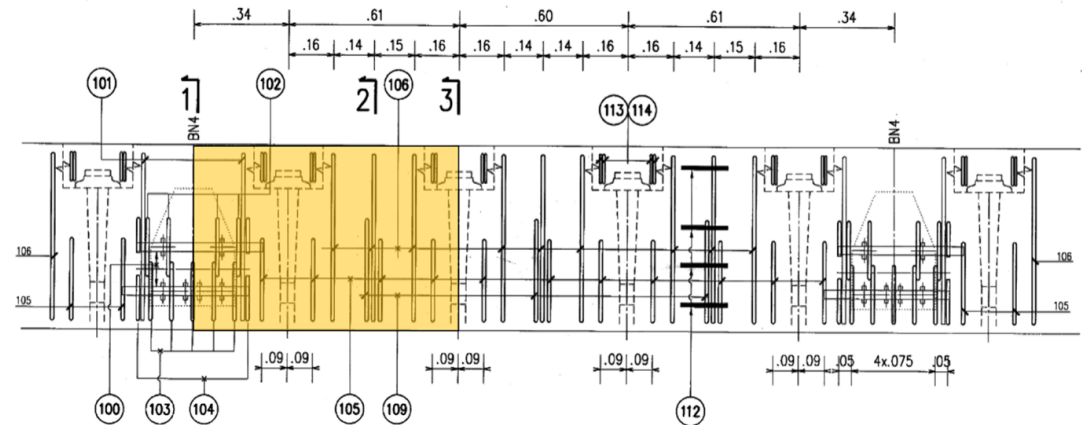
# Application à un cas réel : le viaduc du Chavanon

## Construction du Modèle

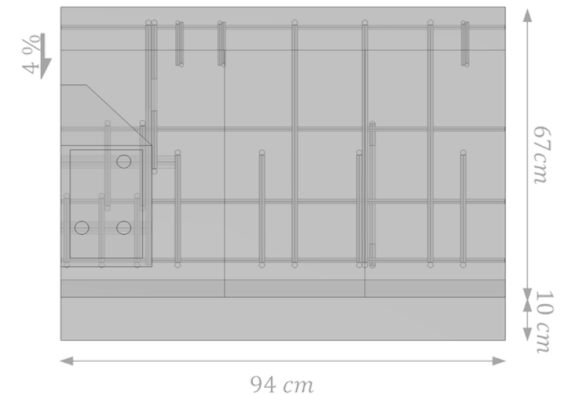


Protection cathodique des longrines par feuilles de zinc

Plan de Ferrailage Longrine



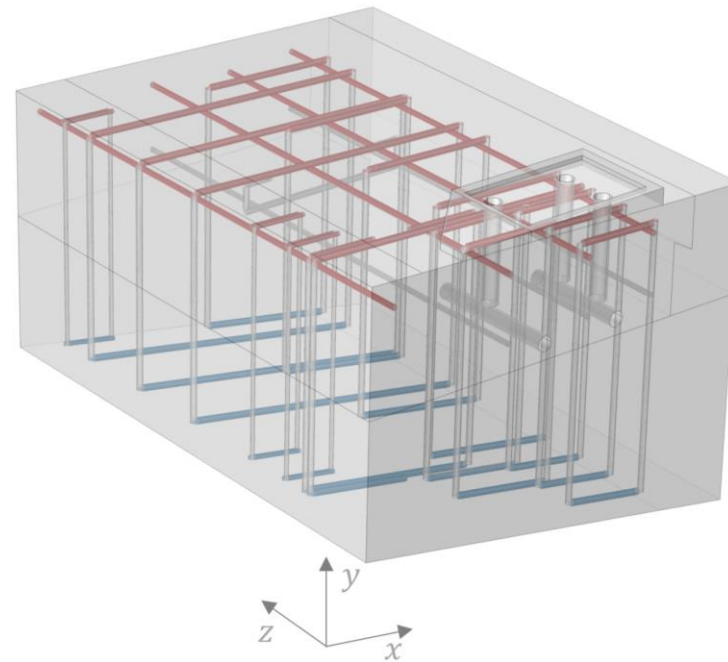
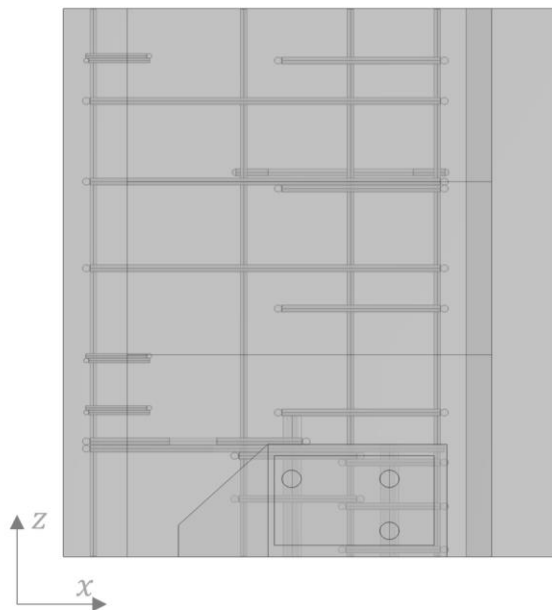
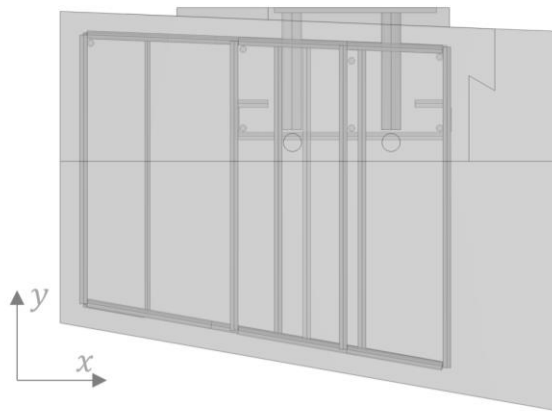
Géométrie du modèle



- Etude des Plans de Ferrailage
- Mise en évidence d'une zone représentative
- Construction du modèle 3D

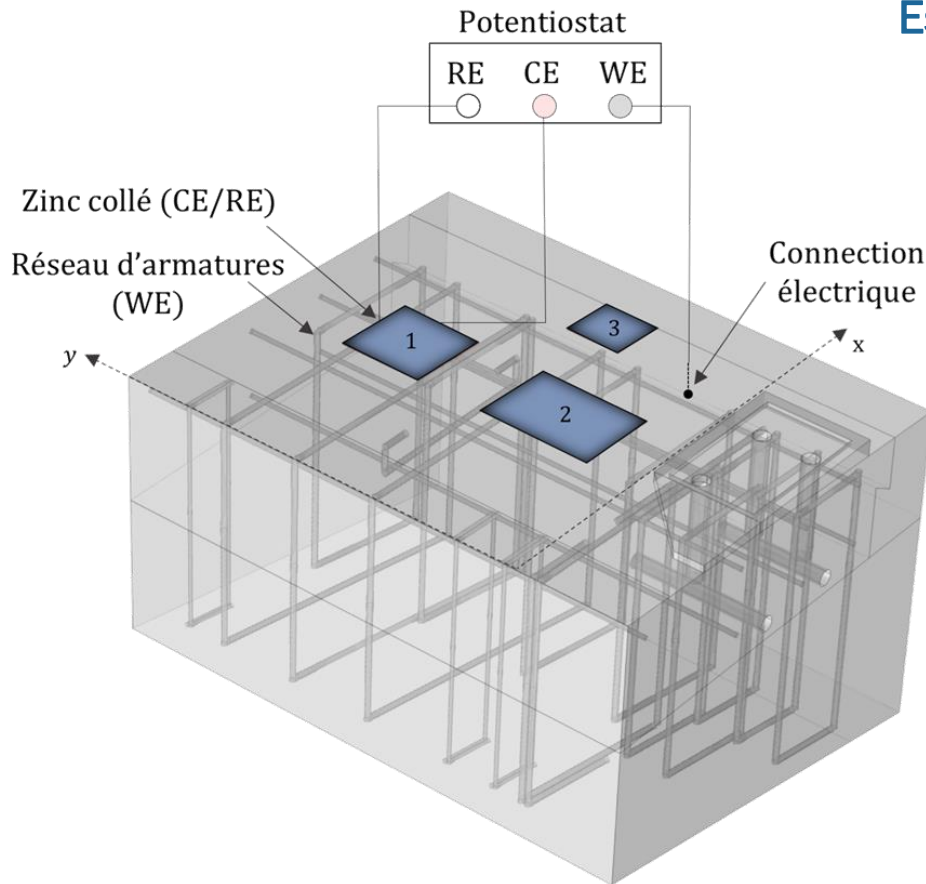
# Application à un cas réel : le viaduc du Chavanon

## Construction du Modèle



# Application à un cas réel : le viaduc du Chavanon

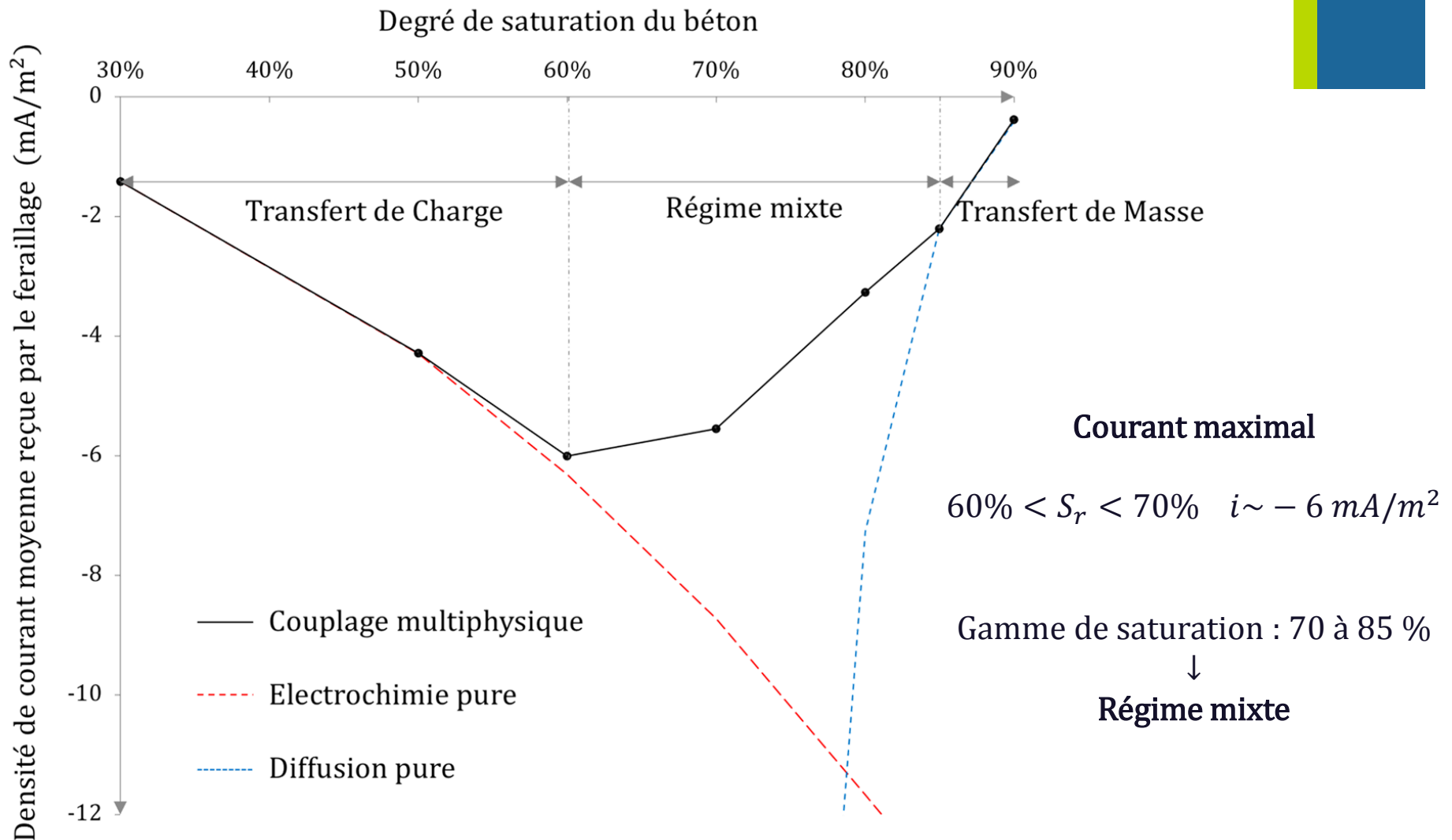
## Estimation du champ de résistivité



- Polarisation du réseau d'armature
- Calcul de la résistivité par analyse inverse basée sur un modèle 3D
- Estimation de la gamme de saturation : 70 à 85 %

# Application à un cas réel : le viaduc du Chavanon

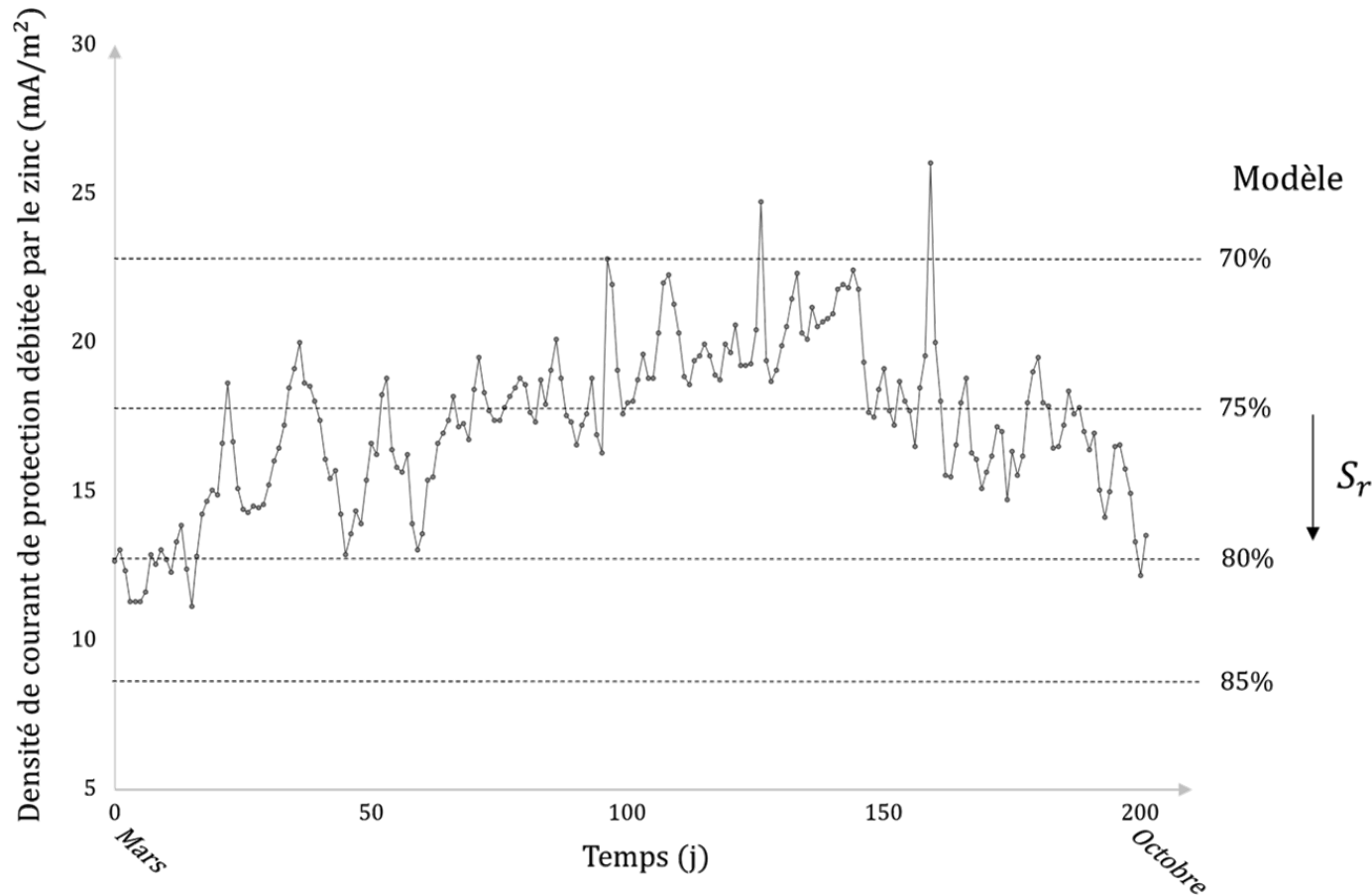
## Prédiction du courant





# Application à un cas réel : le viaduc du Chavanon

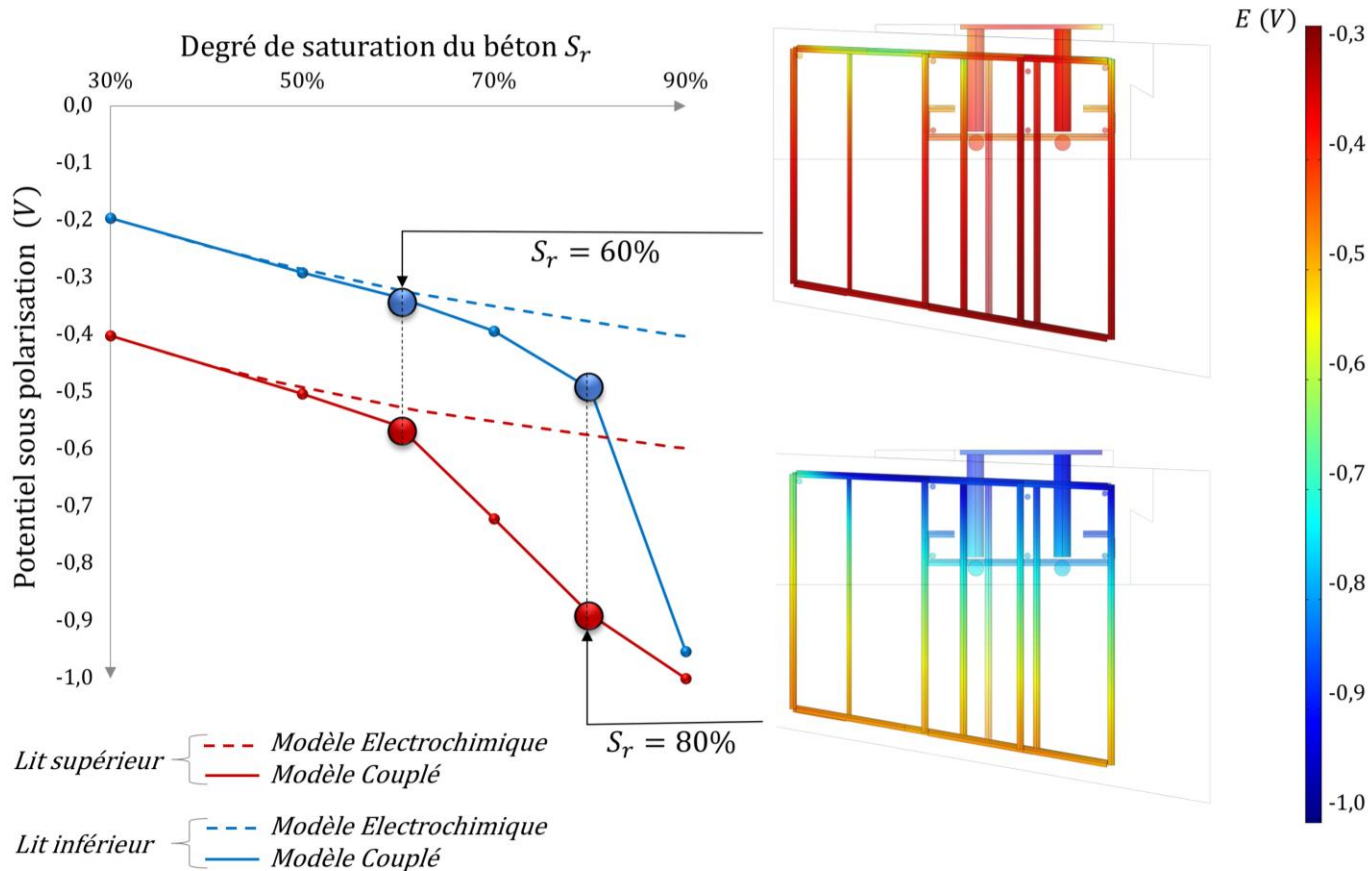
## Suivi du courant de protection débité par le ZLA



- Résistivité in situ : Gamme de saturation mesurée comprise entre 70% et 85%
- Validation In-situ des simulations numériques : robustesse du modèle

# Application à un cas réel : le viaduc du Chavanon

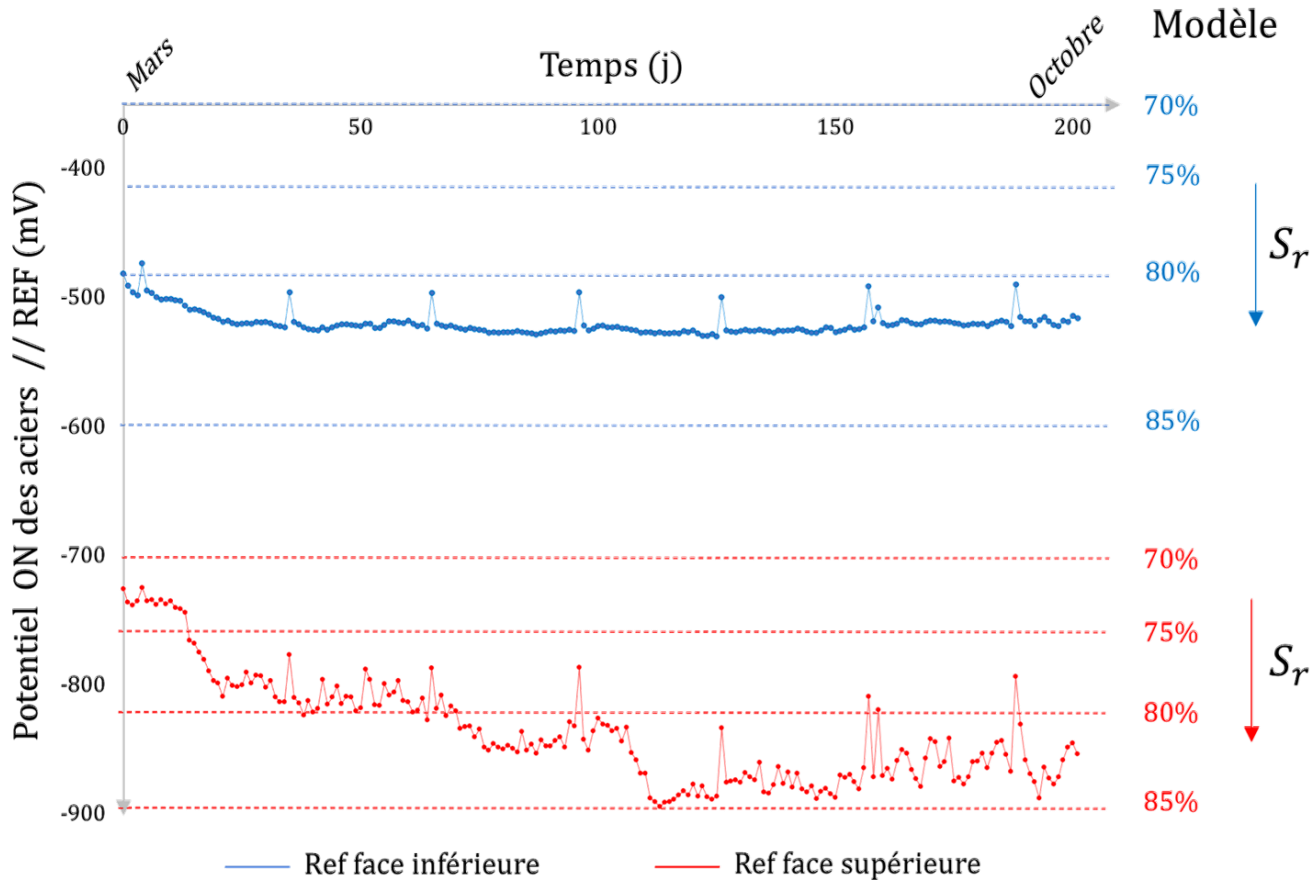
## Champ de potentiel sous polarisation : simulation



- Sous polarisation : champ de potentiel non uniforme
- Influence de la disponibilité en oxygène sur le potentiel mesuré

# Application à un cas réel : le viaduc du Chavanon

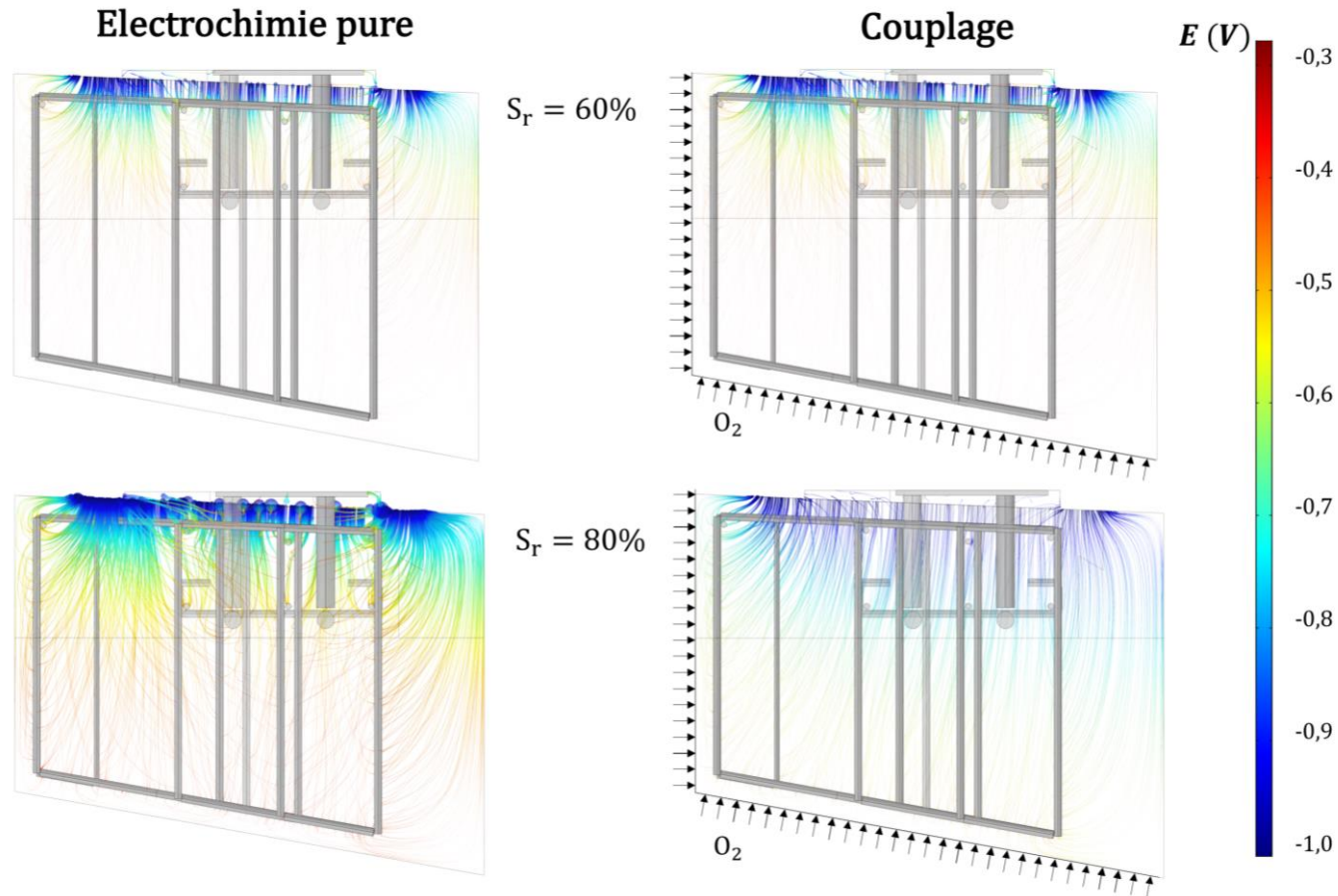
## Champ de potentiel sous polarisation : expérience



- Champ de potentiel sous polarisation non uniforme
- Validation In-situ des simulations numériques : robustesse du modèle

# Application à un cas réel : le viaduc du Chavanon

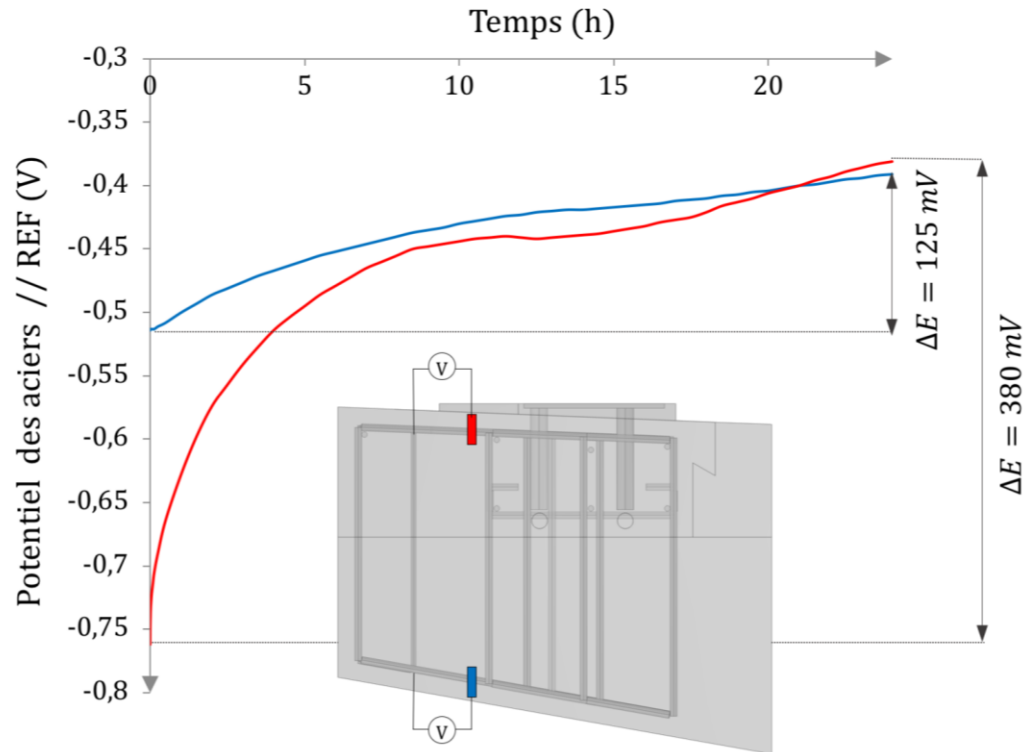
## Distribution du courant de protection dans le volume



- Influence de la disponibilité en oxygène sur la zone d'influence de l'anode
- Redistribution des lignes de courant vers les lits inférieurs

# Application à un cas réel : le viaduc du Chavanon

## Zone d'influence du système anodique



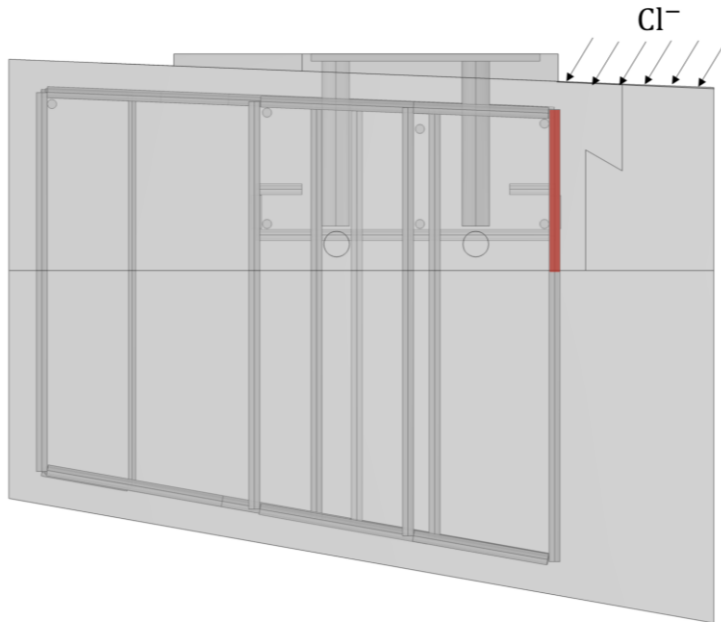
**Critère norme NF EN ISO 12696**  
 $\Delta E = E_{\text{off}}(24\text{h}) - E_{\text{off}}(0) > 100\text{mV}$



**Critère vérifié partout !**

- Polarisation du dernier lit d'armatures : Confirmation des résultats numériques
- Estimation de la surface d'acier polarisé à l'aide d'un outil numérique
- Optimisation de la masse de zinc à installer et de la durée de vie de l'installation





Diagnostic de la structure



Différents scénarios de corrosion

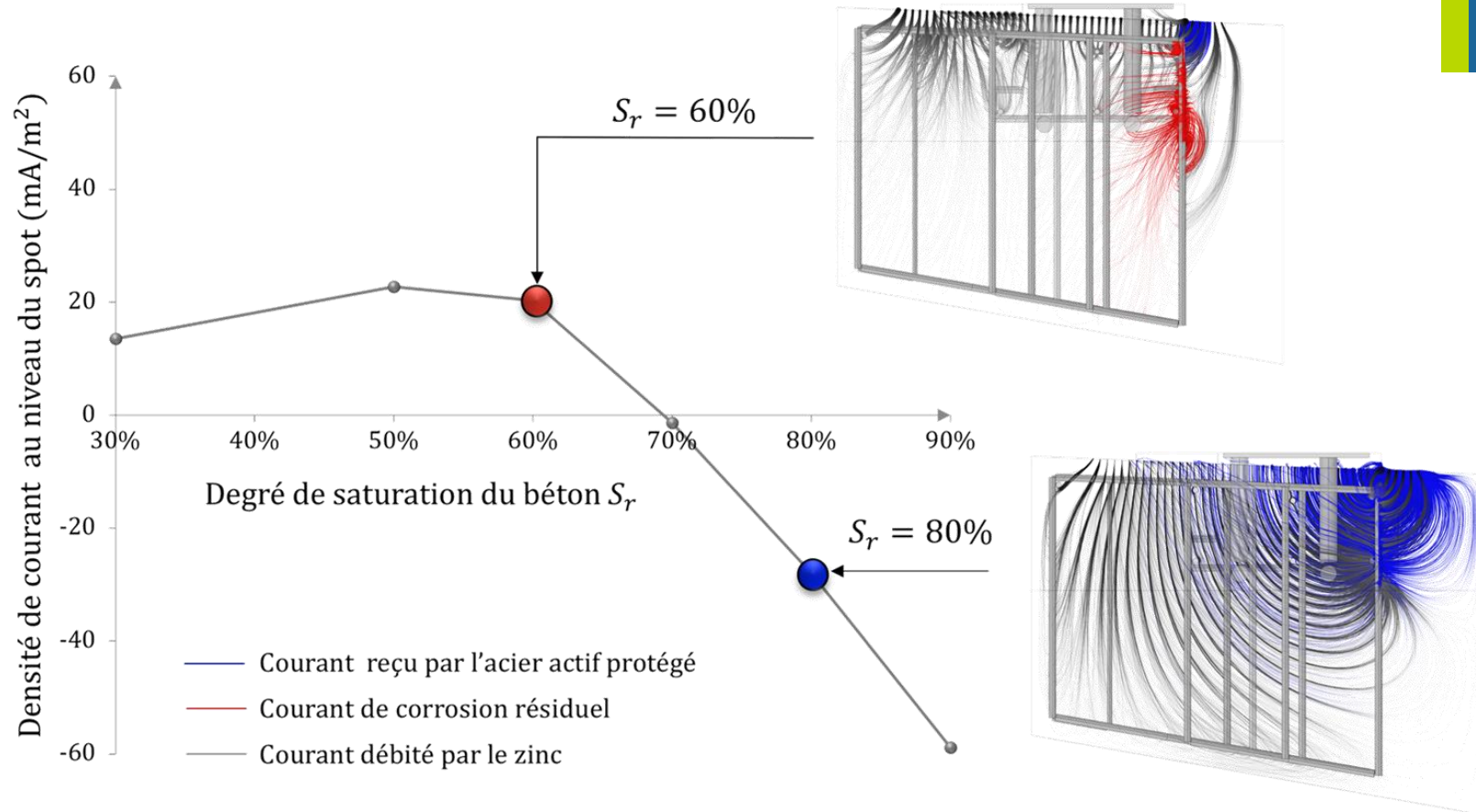


CAO des systèmes de maintenance  
électrochimique

- **Scénario probable : corrosion des armatures à la jonction bordure-longrine**
- **Surface du spot de corrosion : 5% de la surface totale**

# Application à un cas réel : le viaduc du Chavanon

## Scénarios de corrosion

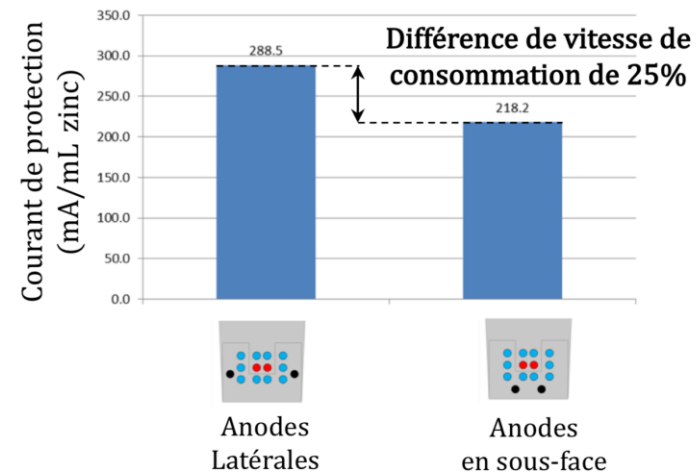
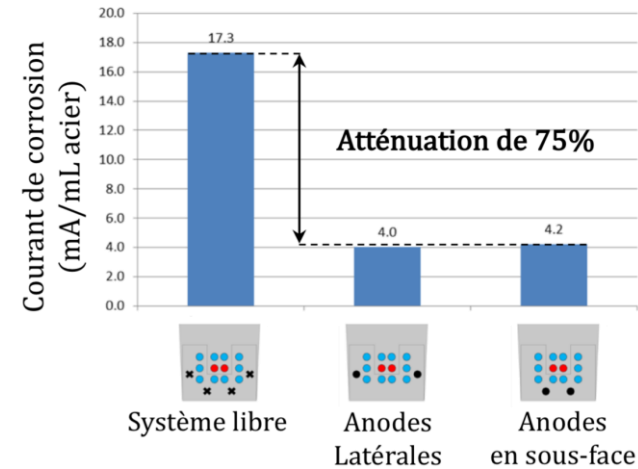
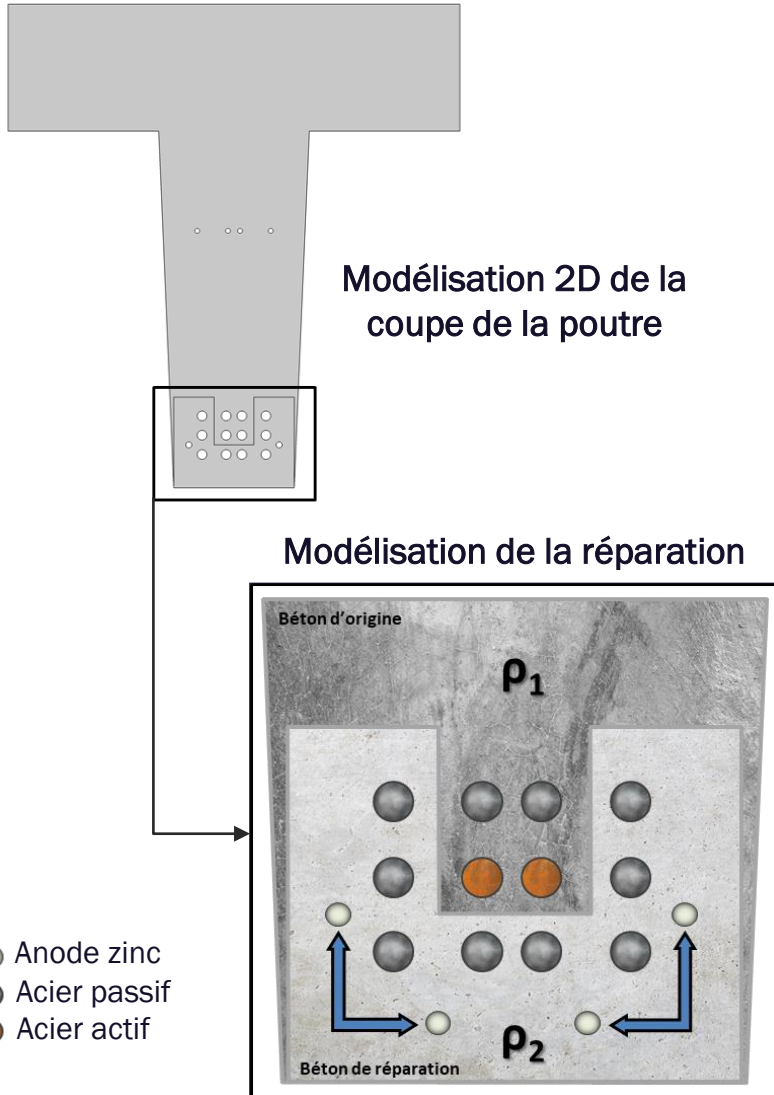


- Influence de la disponibilité en oxygène sur le niveau de protection
- Dimensionnement de l'installation en fonction du scénario de corrosion

# Autre cas d'étude : Quais Forgues – Port de Bayonne

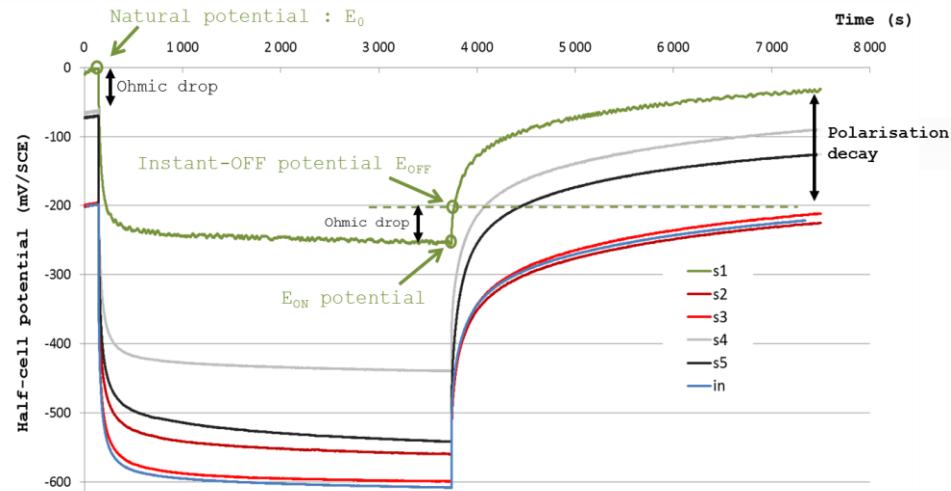
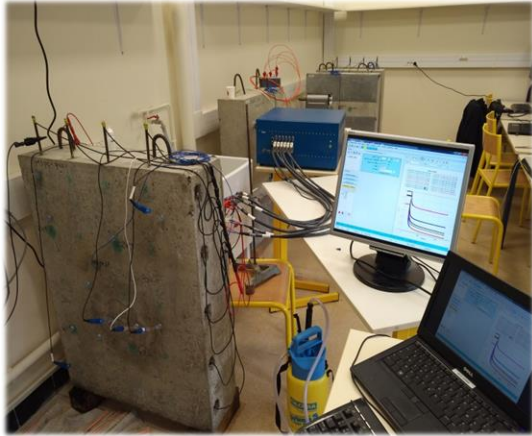
Région Nouvelle Aquitaine

Optimisation du positionnement des anodes



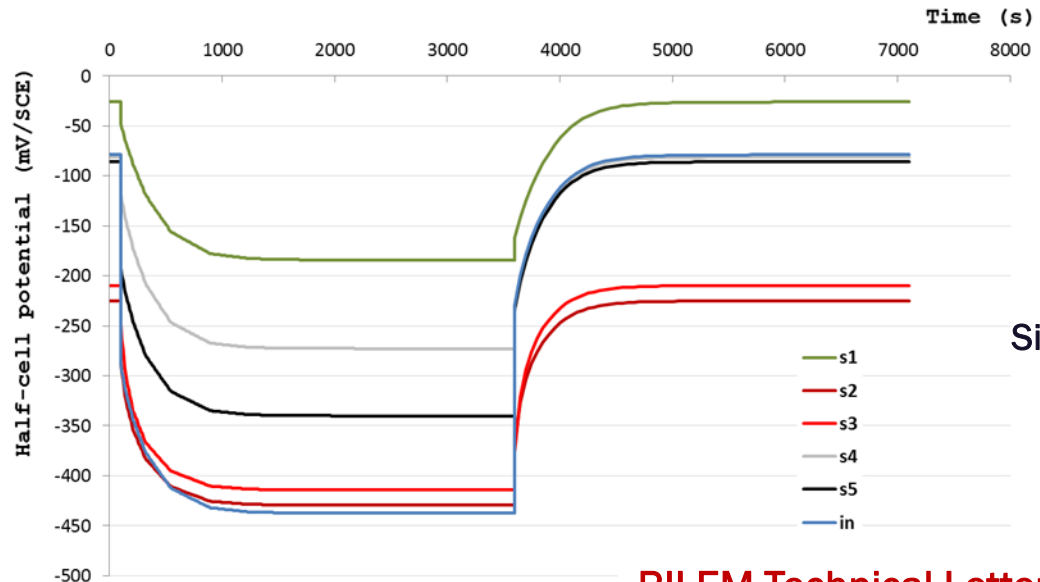
# Tests de dépolarisation : simu en régime transitoire

Essai de dépolarisation en labo :  
6 points de mesure



Expérience

- Réponse différente selon la position de mesure !
- Où mesurer ?
- **Recours à la simulation pour choisir les zones de contrôle**



Simulation

RILEM Technical Letters, 2017

Système de protection cathodique du béton armé  
=  
Vrai problème physique 3D (non réductible 1D)

## Facteurs influents majeurs :

- Transport du dioxygène vers les armatures
- Degré de saturation du béton
- Champ de résistivité électrique
- Géométrie de l'élément et du ferrailage
- Type et positionnement des anodes
- Comportement du système anodique
- Etat de corrosion initial...

## Conséquence principale :

**Protection non uniforme du  
réseau d'armatures**

Orientation nécessaire vers  
la **Conception et le Contrôle Assistés par Ordinateur** des  
systèmes de protection cathodique du béton armé