

8<sup>èmes</sup> Journées

Fiabilité des  
MATÉRIAUX & DES STRUCTURES

Aix-en-Provence,  
9 et 10 avril 2014



ECOSYSTEMES CONTINENTAUX  
**ECCOREV**  
ET RISQUES ENVIRONNEMENTAUX



Provence-Alpes-Côte d'Azur

# Prévision de la probabilité d'amorçage de la corrosion par réseau bayésien

Frédéric Duprat  
Thomas de Larrard

Université de Toulouse  
Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions

UPS - INSA - Toulouse

<http://www-lmdc.insa-toulouse.fr/>

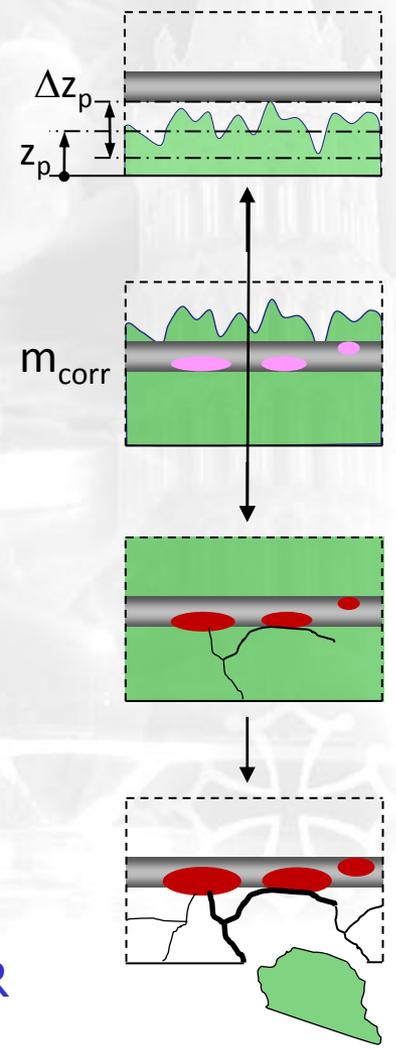
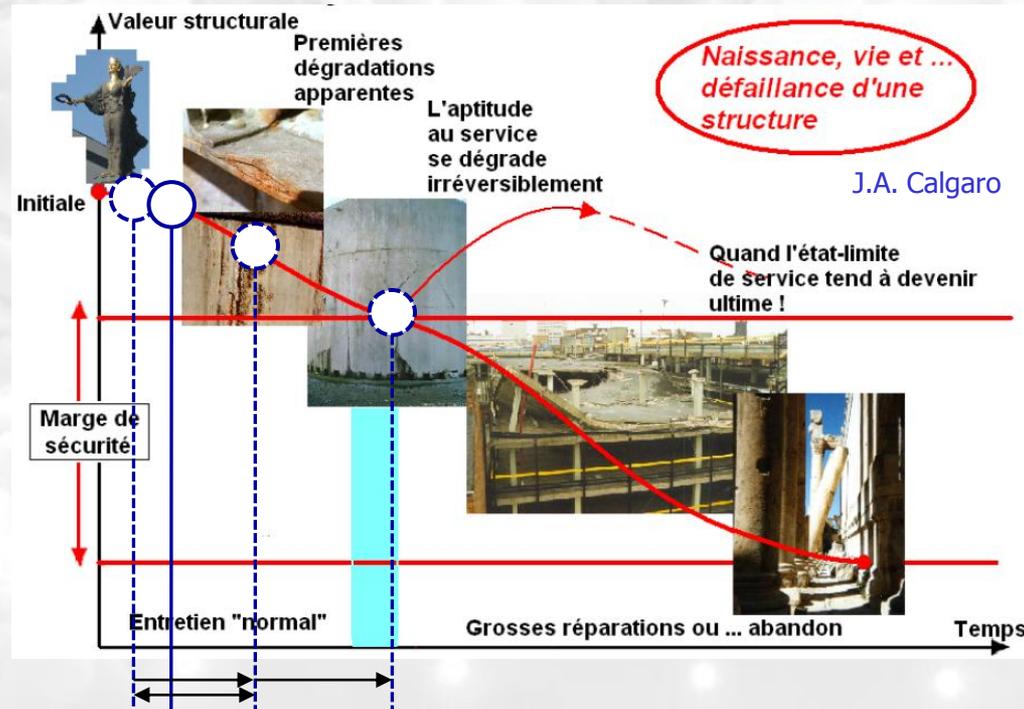


# Plan de la présentation

- Introduction
- Campagne expérimentale
- Réseau de Bayes
- Résultats
- Conclusion

# Démarrage de la corrosion : point clé

- ↪ Introduction
- ↪ Campagne
- ↪ Réseau de Bayes
- ↪ Résultats
- ↪ Conclusion



- ✓ Postérieur à la dépassivation des armatures
- ✓ Antérieur à la propagation de la corrosion
- ✓ Signe précurseur de futures dégradations
- ✓ Balise stratégique pour les opérations d'IMR

Prévision de la corrosion par réseau bayésien



- ↪ Introduction
- ↪ Campagne
- ↪ Réseau de Bayes
- ↪ Résultats
- ↪ Conclusion

# Démarrage de la corrosion : détection par CND

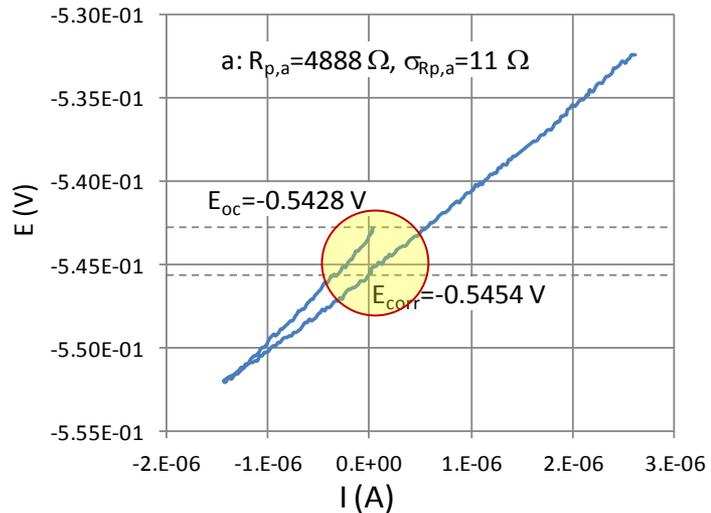
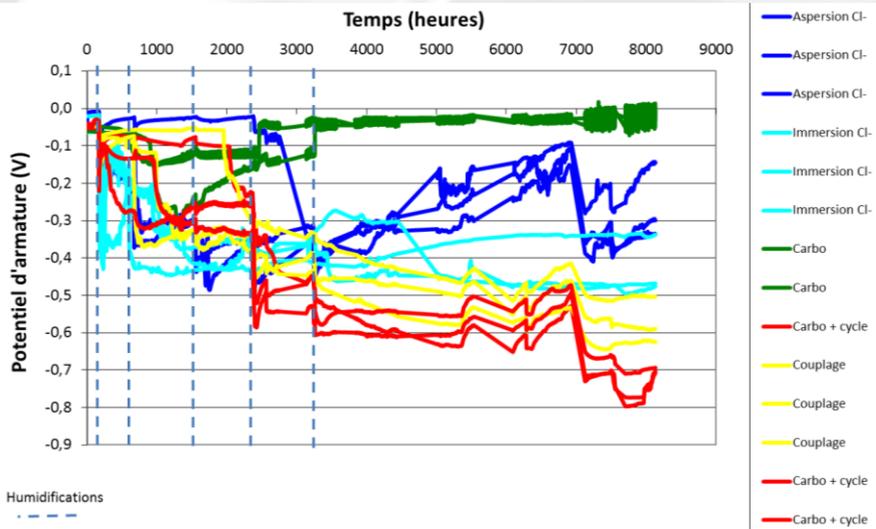
## Paramètres d'état

- ✓ Profondeur carbonatée → dépassivation des armatures
- ✓ Taux de saturation → condition d'activation
- ✓ Résistivité électrique → condition d'activation

## Facteurs de protection

- ✓ Enrobage → barrière

## Mesures électrochimiques



Prévision de la corrosion par réseau bayésien

- ↪ Introduction
- ↪ Campagne
- ↪ Réseau de Bayes
- ↪ Résultats
- ↪ Conclusion

# Démarrage de la corrosion : modélisation

## Modèles couplés transport / formation de la corrosion

- ✓ Transport CO<sub>2</sub> → condition de dépassivation
- ✓ Transport H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub> → entretien de la réaction cathodique
- ✓ Consommation Fe → formation des produits de corrosion

*Pas de dépendance aux grandeurs électrochimiques*

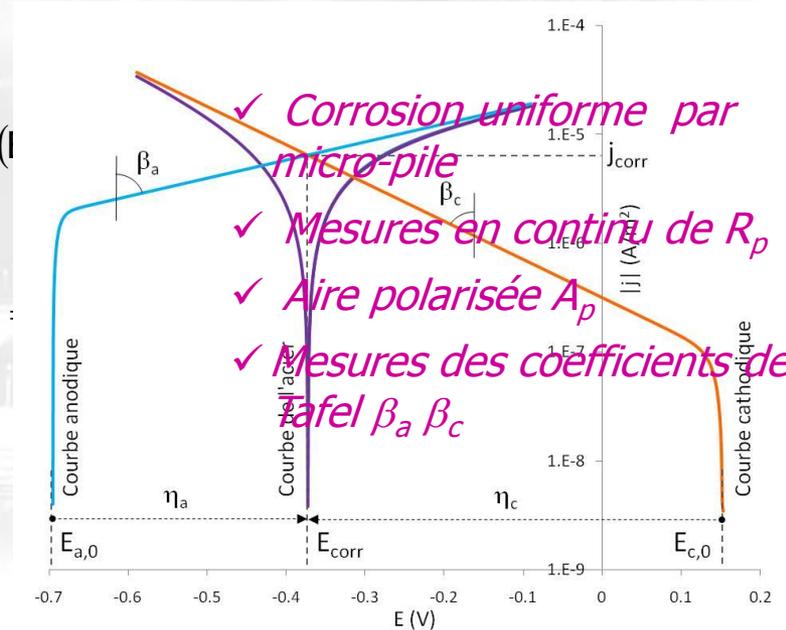
## Modèles électrochimiques

- ✓ Equation de Buttlar-Volmer

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

$$R_p = \left( \frac{1}{A_p} \frac{dE}{dj} \right)_{E=E_{\text{corr}}} = \frac{1}{A_p j_{\text{corr}}} \frac{\beta_a \beta_c}{\ln(10)(\beta_a + \beta_c)}$$

$$m_{\text{corr}} = A_p \frac{M_{\text{Fe}}}{z_a F} \int_{T_{\text{expo}}} j_{\text{corr}}(t) dt$$





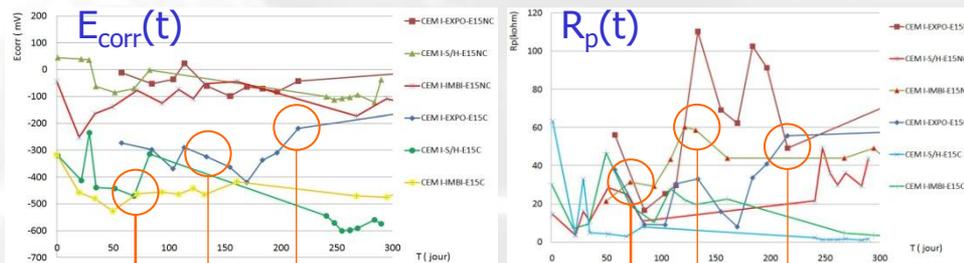
# Probabilité d'allumage de la balise ?

- Pas de modélisation unifiée utilisant les grandeurs mesurables
- Pas de mesures directe CND de la quantité de produits de corrosion

Cependant

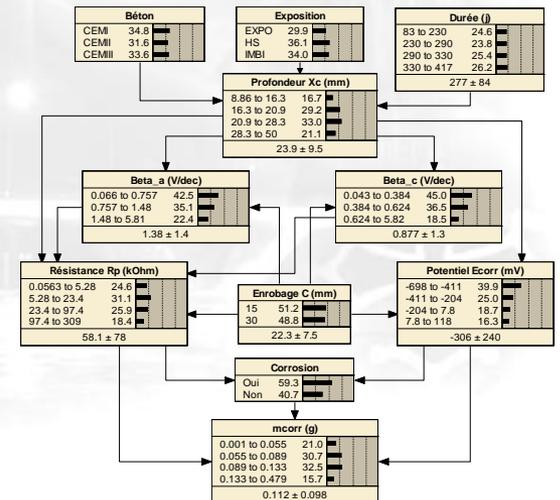
- Possibilité d'établir des liens de dépendance entre les grandeurs mesurables et avec la quantité de produits de corrosion

## Construction d'une BD



$m_{corr}$   
 $X_c$   
 $\beta_a$   $\beta_c$   
 $C$

## Exploitation de la BD

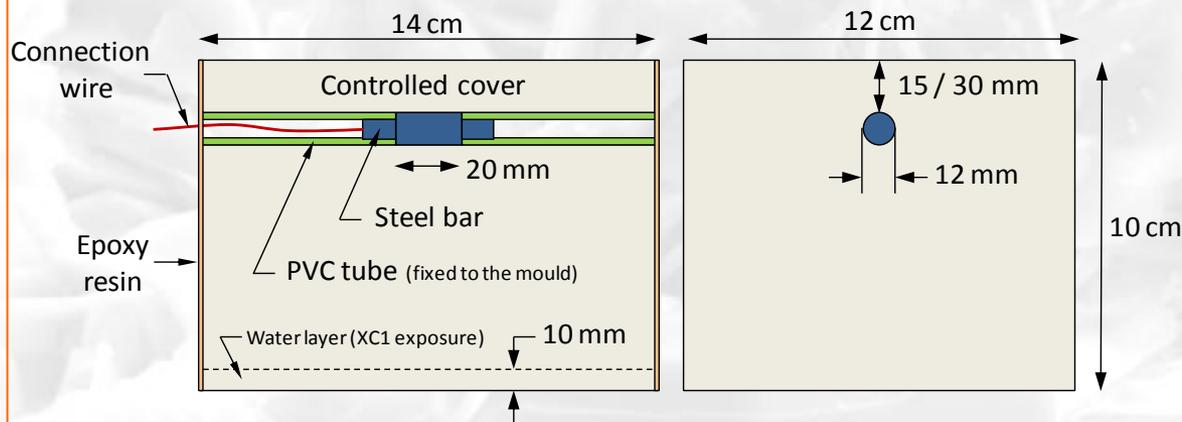


Prévision de la corrosion par réseau bayésien

# Paramètres de la campagne expérimentale

Objectif : couvrir les situations plausibles pour les ouvrages réels

## ✓ Epreuves



↪ Introduction

↪ **Campagne**

↪ Réseau de Bayes

↪ Résultats

↪ Conclusion

## Paramètres de la campagne expérimentale

Objectif : couvrir les situations plausibles pour les ouvrages réels

- ✓ Epreuves
- ✓ Composition des bétons

Constituent / Properties	Units	Concrete reference		
		CI	CII	CIII
Type of cement		CEM I 52.5 R	CEM II 32.5N	CEM III 52.5 N
Cement	kg/m <sup>3</sup>	295	430	355
Sand	kg/m <sup>3</sup>	989	760	957
Gravel	kg/m <sup>3</sup>	792	912	765
Water	kg/m <sup>3</sup>	200	210	199
28-day strength	MPa	40.2	36.3	56.2
Water porosity	%	14.5	16.3	16.0

Prévision de la  
corrosion par  
réseau bayésien

↳ Introduction

↳ **Campagne**

↳ Réseau de Bayes

↳ Résultats

↳ Conclusion

## Paramètres de la campagne expérimentale

Objectif : couvrir les situations plausibles pour les ouvrages réels

- ✓ Epreuves
- ✓ Composition des bétons
- ✓ Conditions d'enrobage
  - $d=15$  mm : pas de carbonatation initiale
  - $d=15$  mm : carbonatation initiale complète avec  $P(z_c \geq d) \geq 95\%$
  - $d=30$  mm : carbonatation initiale partielle avec  $P(z_c \geq d) \approx 50\%$

Prévision de la  
corrosion par  
réseau bayésien

↪ Introduction

↪ **Campagne**

↪ Réseau de Bayes

↪ Résultats

↪ Conclusion

## Paramètres de la campagne expérimentale

Objectif : couvrir les situations plausibles pour les ouvrages réels

- ✓ Eprouvettes
- ✓ Composition des bétons
- ✓ Conditions d'enrobage
- ✓ Conditions d'exposition
  - XC1 : ambiance intérieure à peu près constante
  - XC3 : ambiance extérieure avec parement vertical
  - XC4 : alternance humidification / séchage



Prévision de la  
corrosion par  
réseau bayésien

10

↳ Introduction

↳ **Campagne**

↳ Réseau de Bayes

↳ Résultats

↳ Conclusion

## Paramètres de la campagne expérimentale

Objectif : couvrir les situations plausibles pour les ouvrages réels

- ✓ Epreuves
- ✓ Composition des bétons
- ✓ Conditions d'enrobage
- ✓ Conditions d'exposition
- ✓ Échéances de mesure

$t_i = 80$  jours à  $t_f = 350$  jours

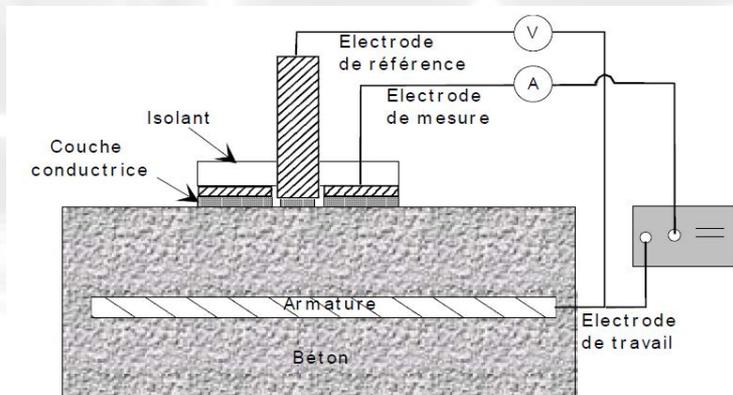
Intervalles entre les mesures : 30 jours

Prévision de la  
corrosion par  
réseau bayésien

# Paramètres de la campagne expérimentale

Objectif : couvrir les situations plausibles pour les ouvrages réels

- ✓ Eprouvettes
- ✓ Composition des bétons
- ✓ Conditions d'enrobage
- ✓ Conditions d'exposition
- ✓ Échéances de mesure
- ✓ Appareillage de mesures électrochimiques



# Construction du réseau bayésien

## Données disponibles par éprouvette (244 éprouvettes)

- ✓ Type de béton
- ✓ Durée d'exposition
- ✓ Type d'exposition
- ✓ Enrobage :  $c$
- ✓ Profondeur carbonatée :  $X_c$
- ✓ Résistance de polarisation :  $R_p$
- ✓ Potentiel de corrosion :  $E_{corr}$
- ✓ Coefficients de Tafel :  $\beta_a, \beta_c$
- ✓ Masse de produits de corrosion :  $m_{corr}$

*Données indépendantes*

	Béton	Durée	Exposition	$c$	$X_c$	$R_p$	$E_{corr}$	$\beta_a \beta_c$
$X_c$								
$R_p$								
$E_{corr}$								
$\beta_a \beta_c$								
$m_{corr}$								

↪ Introduction

↪ Campagne

↪ Réseau de Bayes

↪ Résultats

↪ Conclusion

Prévision de la corrosion par réseau bayésien

# Construction du réseau bayésien

## Discrétisation des variables continues

- ✓ Probabilité significative par état (> 15%)
- ✓ 4 états au maximum

## Noeud informatif sur le démarrage de la corrosion

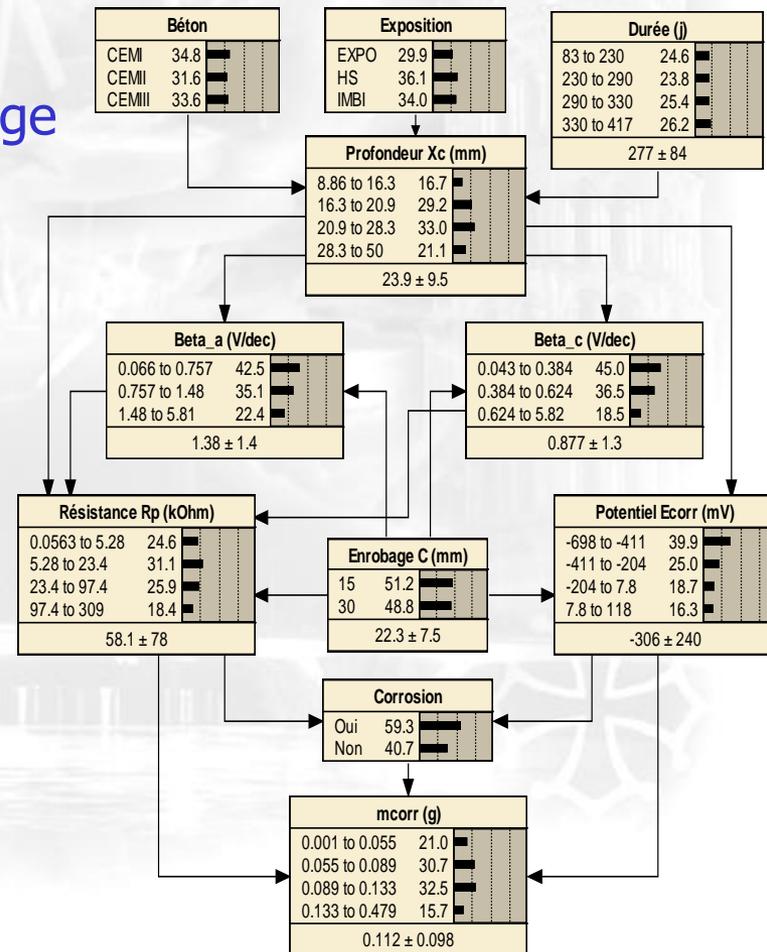
- ✓  $m_{corr} \geq m_{seuil}$
  - ✓  $m_{corr} < m_{seuil}$
- $m_{seuil} = 0.1 \text{ g}$

## Apprentissage du réseau

- ✓ 70% de la BD
- ✓ 2 partitions aléatoires

## Validation du réseau

- ✓ 30% de la BD
- ✓ 2 partitions aléatoires



# Faible incidence des partitions sur les probabilités marginales

Partition 1

Seuil (Indicateur)	
Oui	58.3
Non	41.7

mcorr	
0.001 to 0.055	21.2
0.055 to 0.089	30.3
0.089 to 0.133	32.8
0.133 to 0.479	15.8
$0.112 \pm 0.098$	

Partition 2

Seuil (Indicateur)	
Oui	60.9
Non	39.1

mcorr	
0.001 to 0.055	25.8
0.055 to 0.089	26.6
0.089 to 0.133	30.7
0.133 to 0.479	17.0
$0.112 \pm 0.1$	

- ↳ Introduction
- ↳ Campagne
- ↳ Réseau de Bayes
- ↳ Résultats
- ↳ Conclusion

Prévision de la corrosion par réseau bayésien

# Faible incidence des partitions sur les probabilités marginales

## Procédure de validation des prévisions

Situations considérées : nœuds renseignés

Cas 1	$X_c$	Cas 2
Nœuds indépendants +	$R_p$	Cas 3
	$X_c + R_p$	Cas 4
	$X_c + R_p + \beta_a + \beta_c + E_{corr}$	Cas 5

Critère de validation

$$F(k) = \frac{N_{rd}(P_{rd} \geq k)}{N}$$

*Avec  $k=70%$ , il faut renseigner a minima selon le cas 4 ou 5 pour avoir  $F(k) \geq 50%$*

		Cas	Probabilité k				
			50%	60%	70%	80%	90%
Partition 1	Cas 1	62.5	62.5	17.0	0	0	
	Cas 2	63.6	63.6	23.9	0	0	
	Cas 3	70.4	51.1	47.7	5.7	0	
	Cas 4	65.9	65.9	57.9	9.1	0	
	Cas 5	59.1	59.1	59.1	48.9	6.7	
Partition 2	Cas 1	56.8	47.3	20.3	0	0	
	Cas 2	50.0	33.8	27.0	0	0	
	Cas 3	56.8	48.6	39.2	0	0	
	Cas 4	55.4	55.4	50.0	6.8	0	
	Cas 5	58.1	58.1	58.1	47.3	12.2	

- ↪ Introduction
- ↪ Campagne
- ↪ Réseau de Bayes
- ↪ Résultats
- ↪ Conclusion

- ↪ Introduction
- ↪ Campagne
- ↪ Réseau de Bayes
- ↪ Résultats
- ↪ Conclusion

## Difficulté d'estimer la probabilité de démarrage de la corrosion à partir d'inspections par CND :

- ✓ Pas de modélisation unifiée pour les grandeurs mesurables
- ✓ Pas de détection directe

## Constitution d'une base de données et exploitation par réseau bayésien :

- ✓ Structuration experte limitée par le nombre d'évidences
- ✓ Efficacité mitigée

## Quelques voies d'amélioration :

- ✓ Intégrer le taux de saturation comme donnée CND
- ✓ Multiplier artificiellement le nombre d'évidences par simulations de Monte Carlo des lois marginales des nœuds
- ✓ Utiliser les algorithmes d'apprentissage automatique de structure