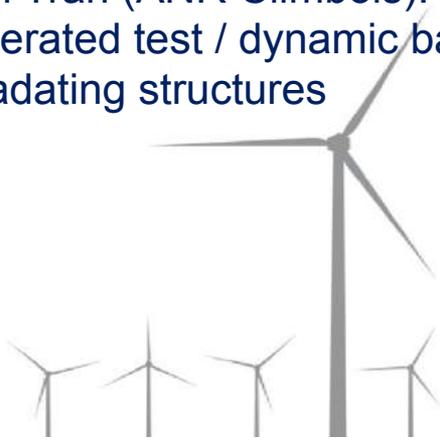


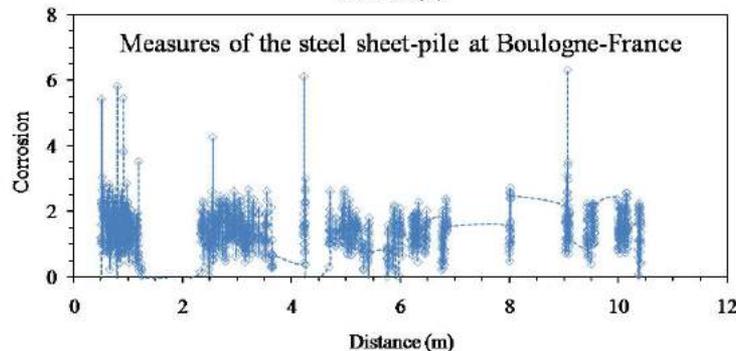
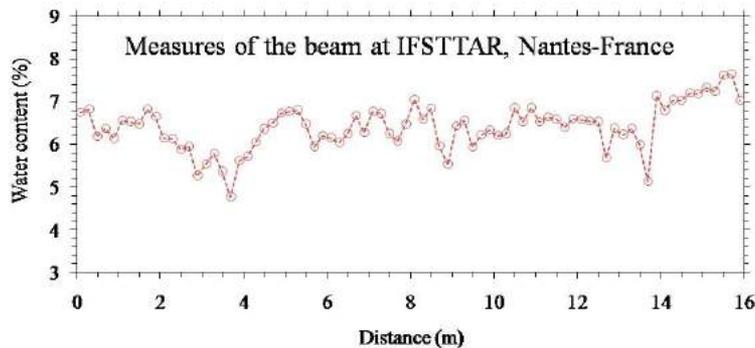
## Probabilistic degradation processes in Marine environnement:

- Mark Stewart: actual works and future trends
- Mestapha Oumouni (projet SI3M): modeling time and spatial dependence of degradation processes through gamma processes
- Franck Schoefs (projet SI3M et ANR Evadeos): assessing spatial variability from on site measurements
- Lara Hawchard (thèse ministère): new methods for time-variant reliability assessment of degradating structures
- Binh Tran (ANR Climbois): bayesian network for degradation identification from accelerated test / dynamic bayesian networks for reliability assessment of degradating structures



# Why assessing spatial variability of infrastructures?

- That is an existing phenomena: spatial variability of concrete during building + spatial variability of degradation processes acting on steel and concrete (environment on large structures)



(Schoefs, Bastidas Tran , 2016)

# Why assessing spatial variability of infrastructures?

- That is an existing phenomena: spatial variability of concrete during building + spatial variability of degradation processes acting on steel and concrete (environment on large structures)
- That affects the structural reliability assessment (less conservative) – [Der Kiureghian 1996, Stewart 2004, ....]



## How to assess spatial variability?

- Have a lot of money or **have a pre-defined model** (a priori – epistemic uncertainty)
  - Stationarity
  - Ergodicity
- Define a procedure for NDT, SDT or SHM [Breysse et al. 2015, Schoefs et al. 2016]
- Get data (few projects)



# How to assess spatial variability?

- Have a lot of money or **have a pre-defined model** (a priori – epistemic uncertainty)
  - Stationarity
  - Ergodicity – piece wise ergodicity [Schoefs et al., 2004]

And an inference model through a mathematical expression [Karhunen Loeve, Shinozuka, ...]

- Define a procedure for NDT, SDT or SHM [Breysse et al. 2015, Schoefs et al. 2016]
- Get data (few projects)

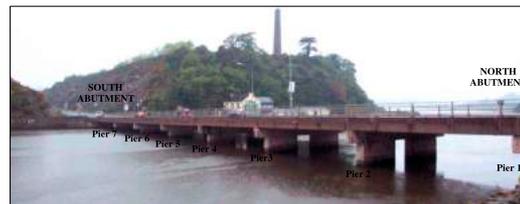


Fig. 1. Ferrycarrig Bridge (image by the authors)

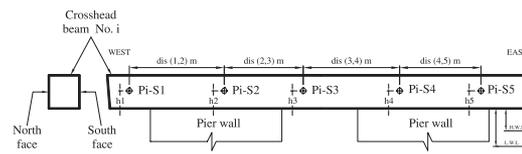
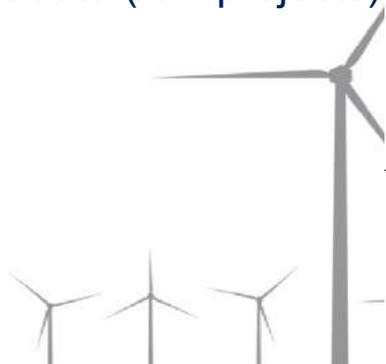


Fig. 2. Location of cores

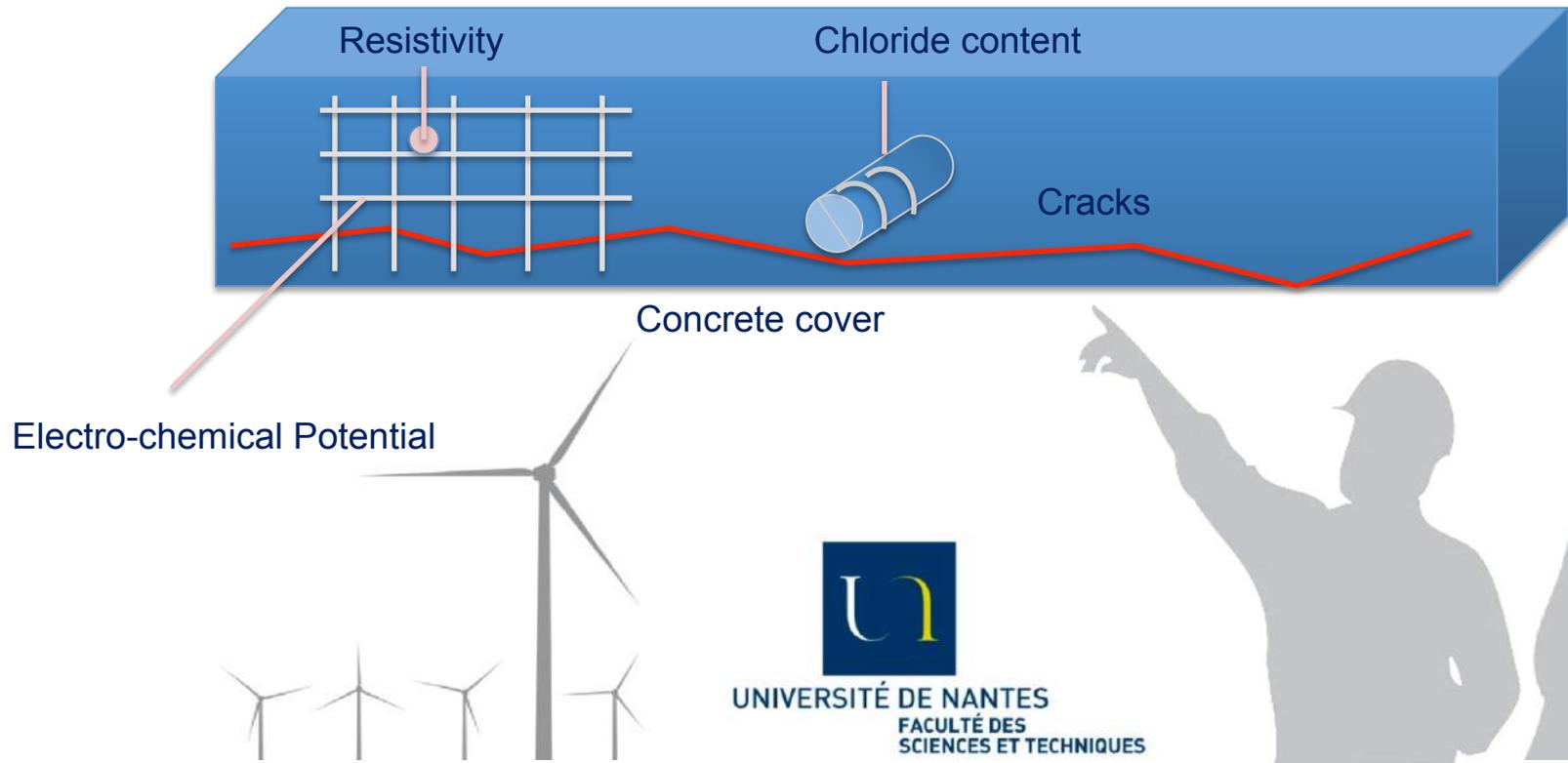
(O'Connor, Kenshel, , 2013)



# Spatial variability of what?

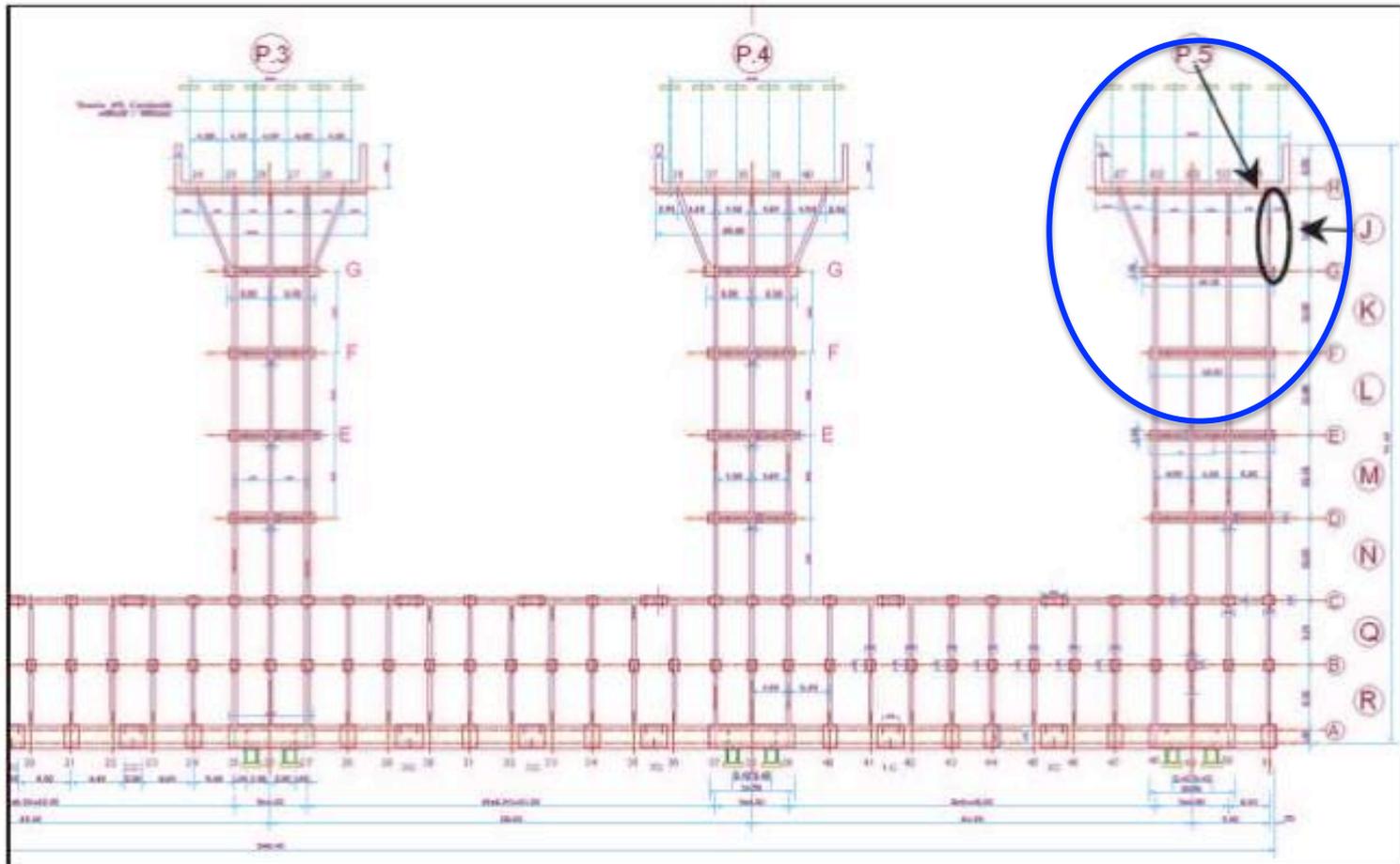
- Degradation indicator?
- Physical property?
- **Model parameter?**

Duprat et al. 2016 (under review)



# Presentation of the project

plus en amont de l'ouvrage.



# Présentation de la structure



- Poutre J fissurée

=> Essai d'une nouvelle méthode de réparation

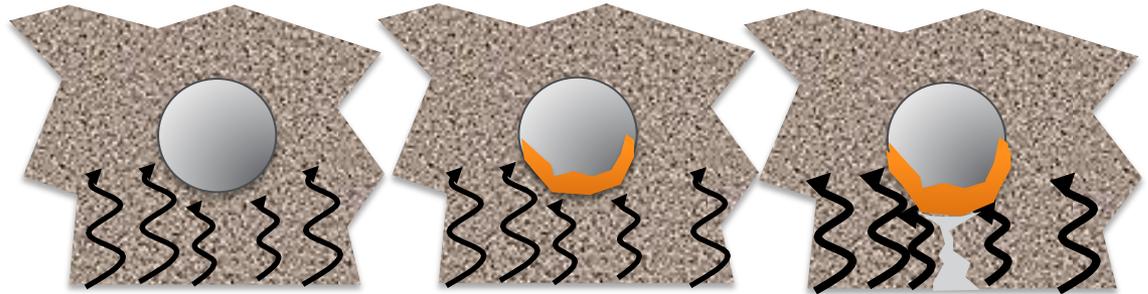


# Mesures

**Objectif:** suivi dans le temps et analyse statistique pour comprendre la variabilité et  
A terme: optimisation du dimensionnement de la procatho en zone de marnage

## Mesures amont:

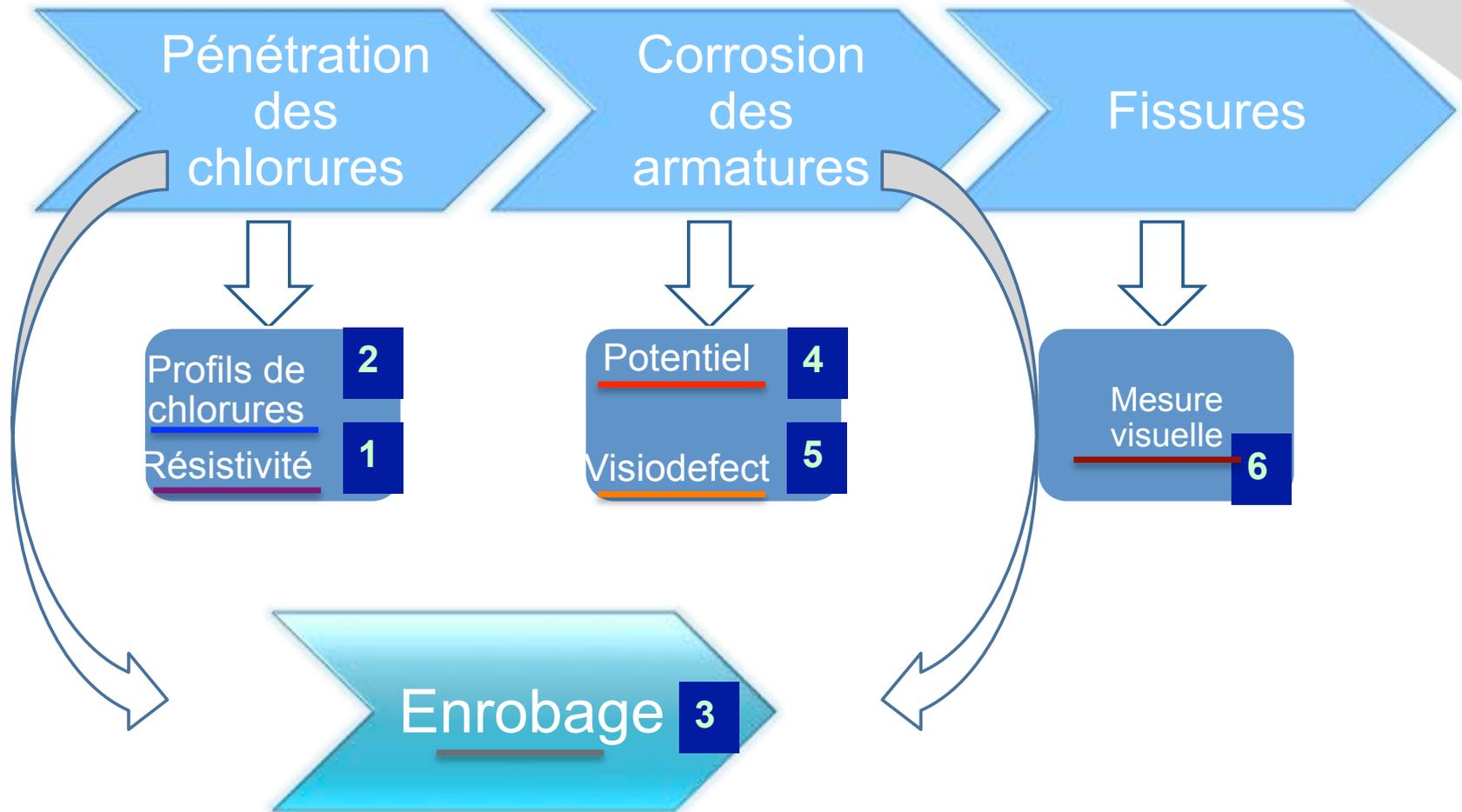
- ouverture de fissure
- résistivité
- enrobage
- profils de chlorure
- potentiel de corrosion
- épaisseur résiduelle des aciers



On les présentera dans l'ordre du mécanisme de dégradation comme présenté sur la figure ci-dessous :

- propriétés de transfert du béton évaluable par Contrôle Non Destructif (CND : résistivité)
- quantité de chlorures par Essai Semi Destructif (ESD : carottages)
- corrosion par CND (enrobage + modèle, potentiel), Essai Destructif (ED : mesure épaisseur résiduelle)
- fissuration par CND (télécontrôle)

# Mesures



# Mesures: Résistivité

Les photos ci-dessous illustrent parfaitement ces variations d'humidité sur la poutre entre les deux extrémités.

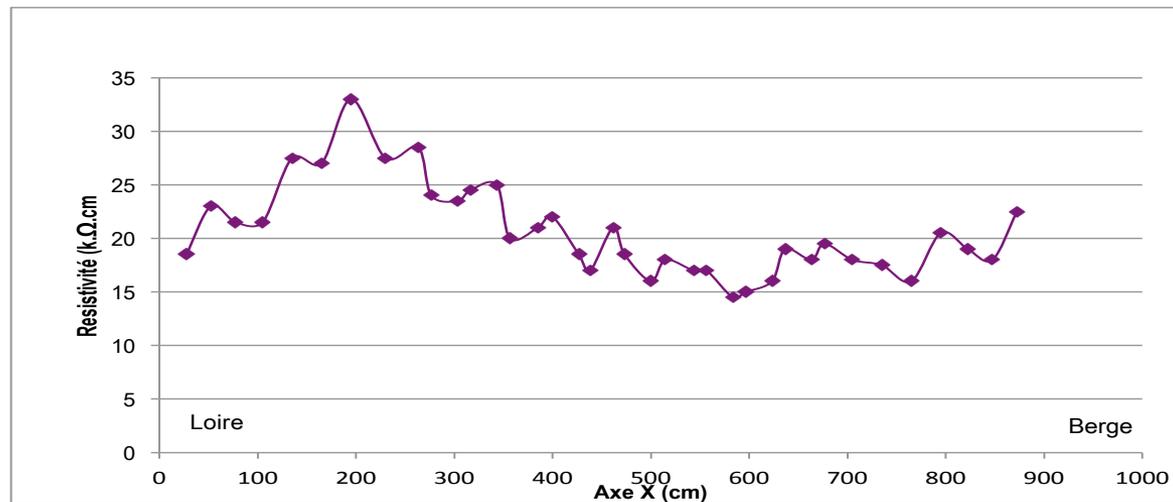


Figure 1 : résistivité de la poutre

CETE de l'Ouest

Département  
Laboratoire  
de Saint-Briec

PORT  
ATLANTIQUE  
Nantes Saint-Nazaire

**PAREXLANKO**  
ENDUITS-COLLES-MORTIERS



**IXEAD**

**IXEAD**

# Mesures: Potentiel

Les photos ci-dessous illustrent parfaitement ces variations d'humidité sur la poutre entre les deux extrémités.

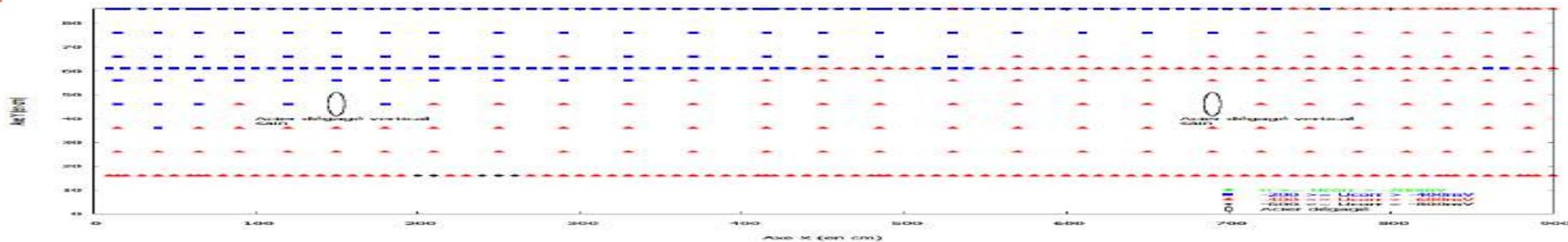
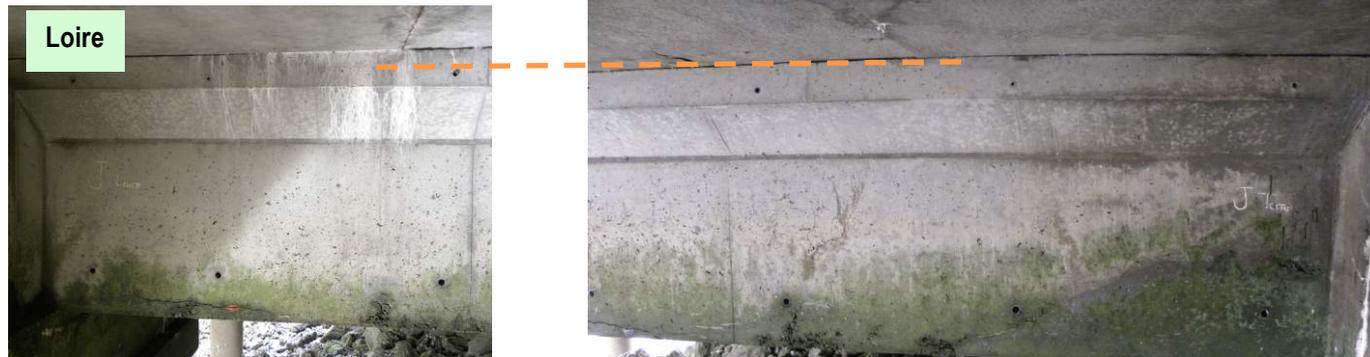
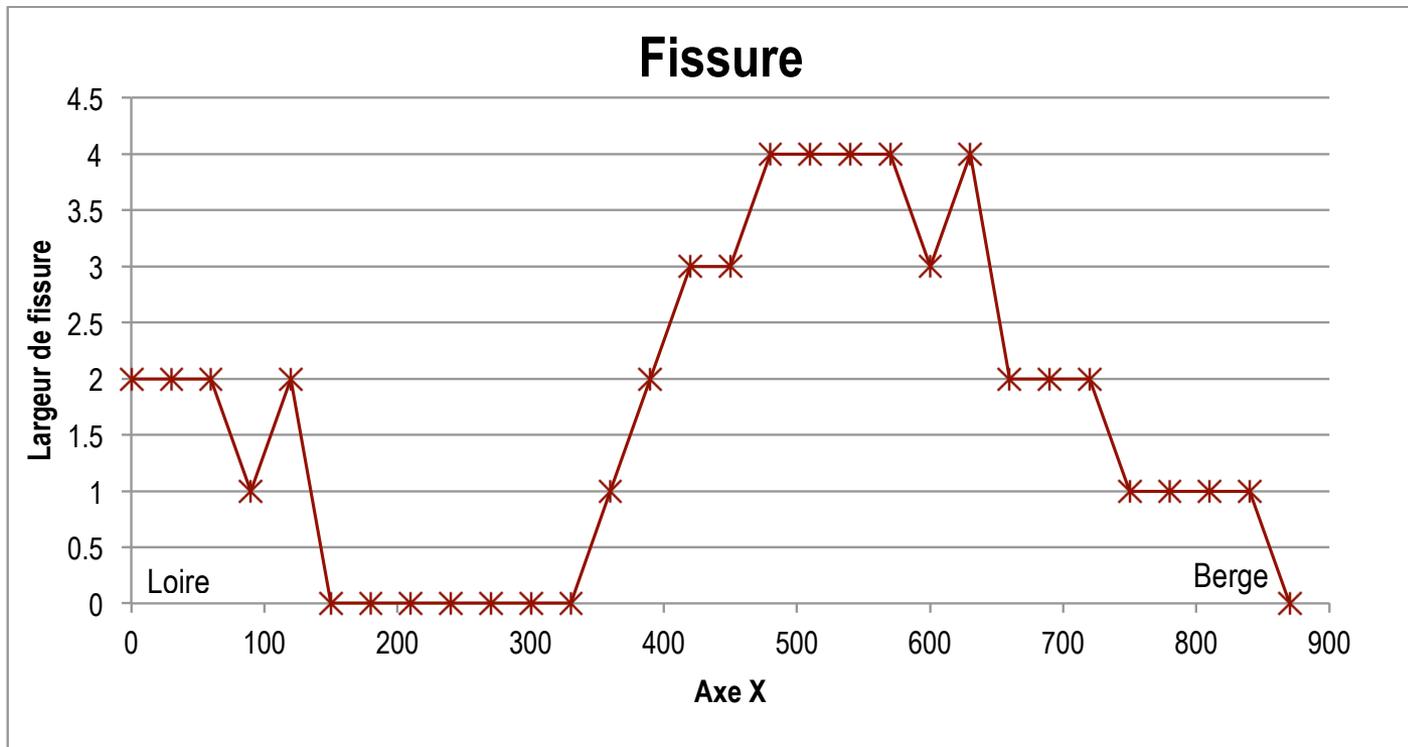


Figure 10 : potentiel de corrosion de la poutre

# Mesures: Fissure



# Analyse stat/ Modélisation Stochastique

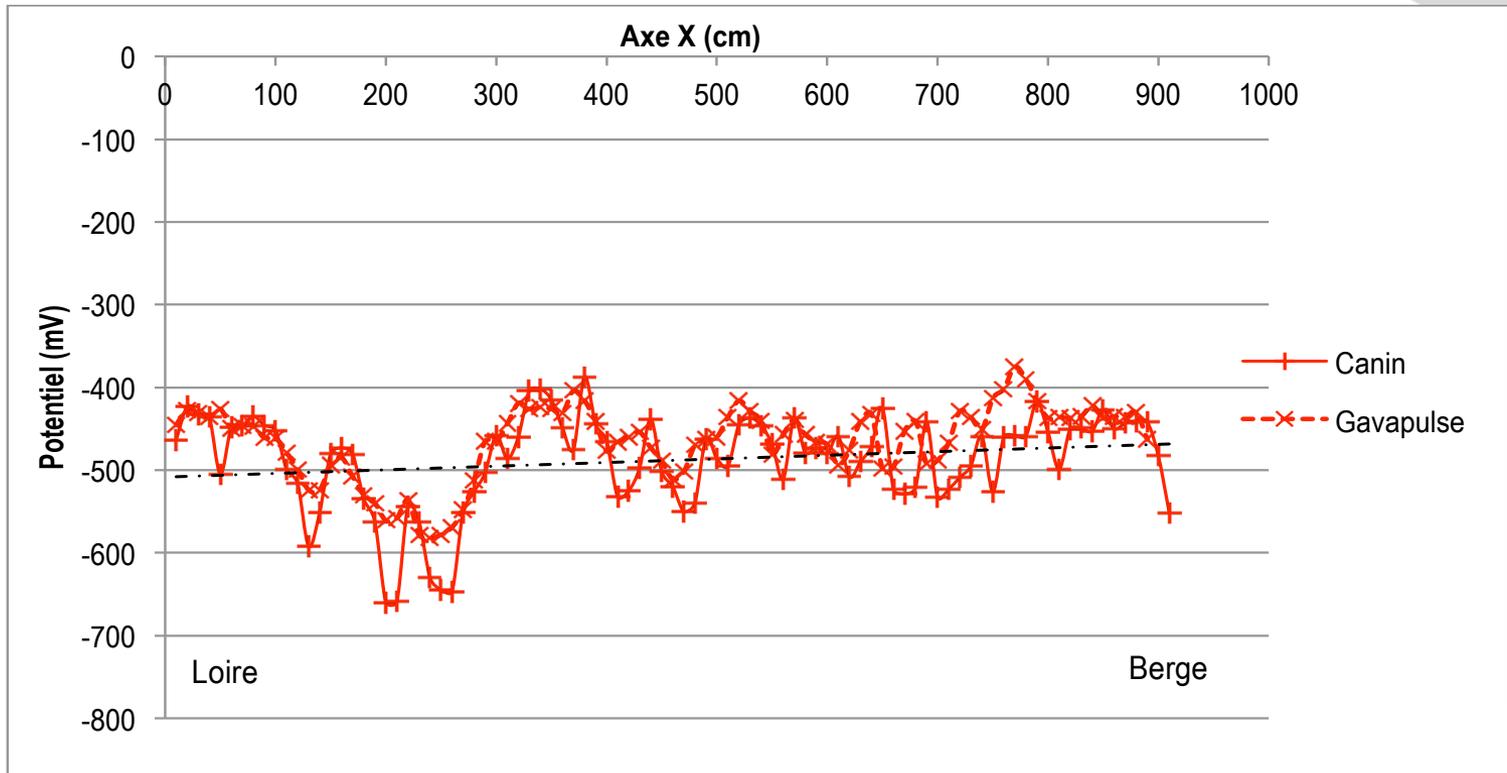


Figure 12 : potentiel de corrosion du lit intérieur d'armatures longitudinales inférieures

Analyse stat/Ecart et erreur de mesure >> labo?

# Analyse stat

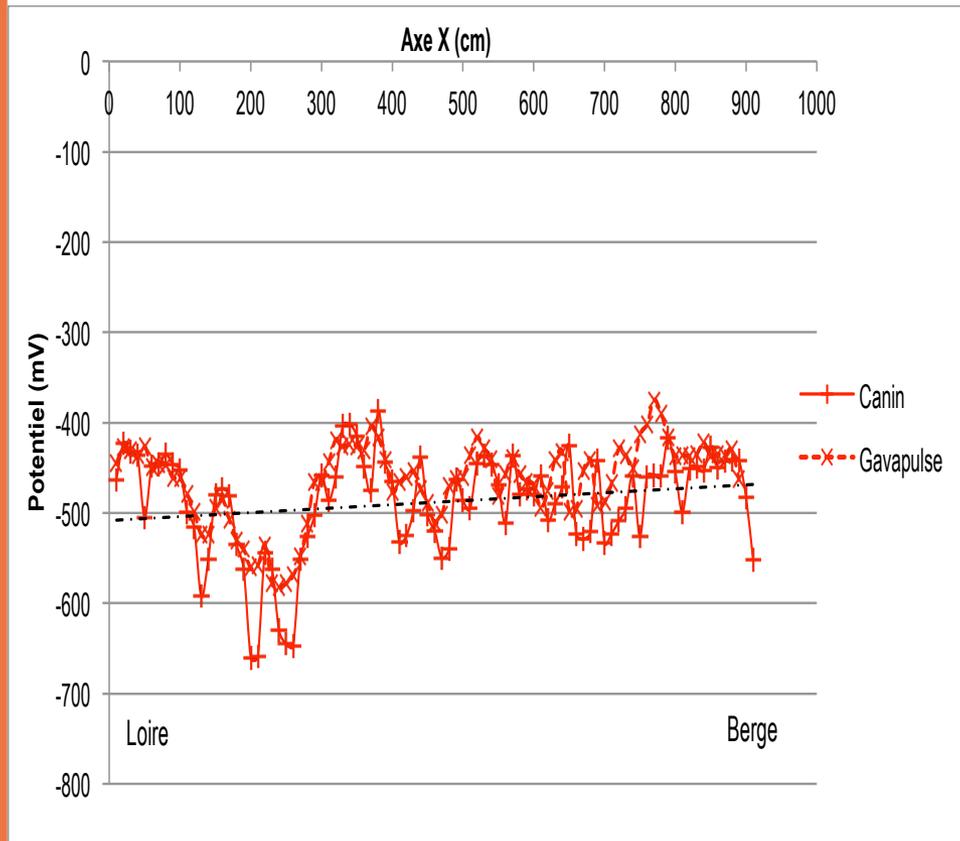
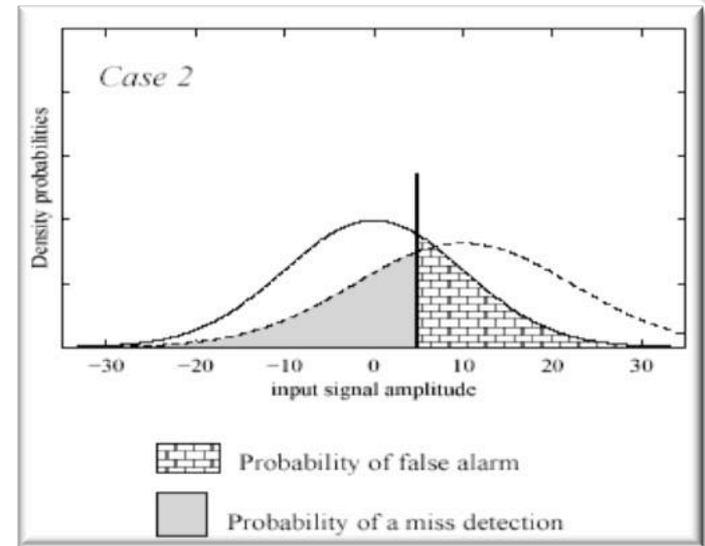


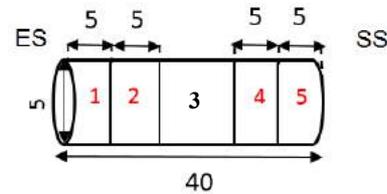
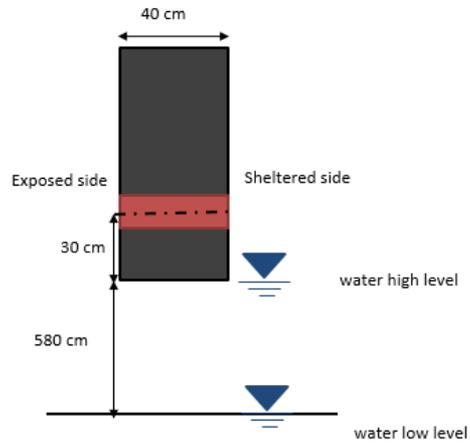
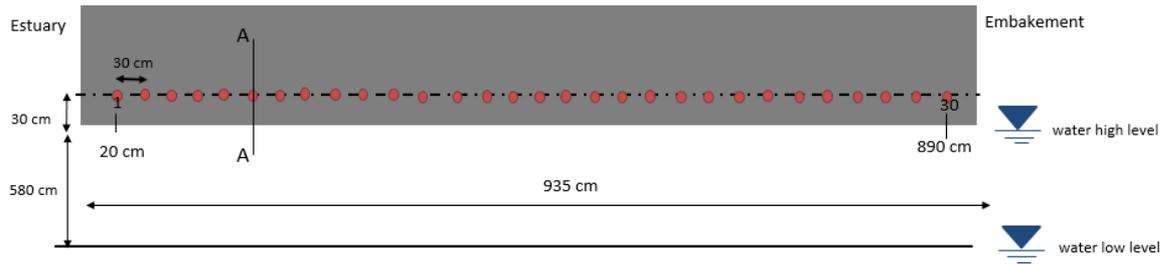
Figure 12 : potentiel de corrosion du lit intérieur d'armatures longitudinales inférieures



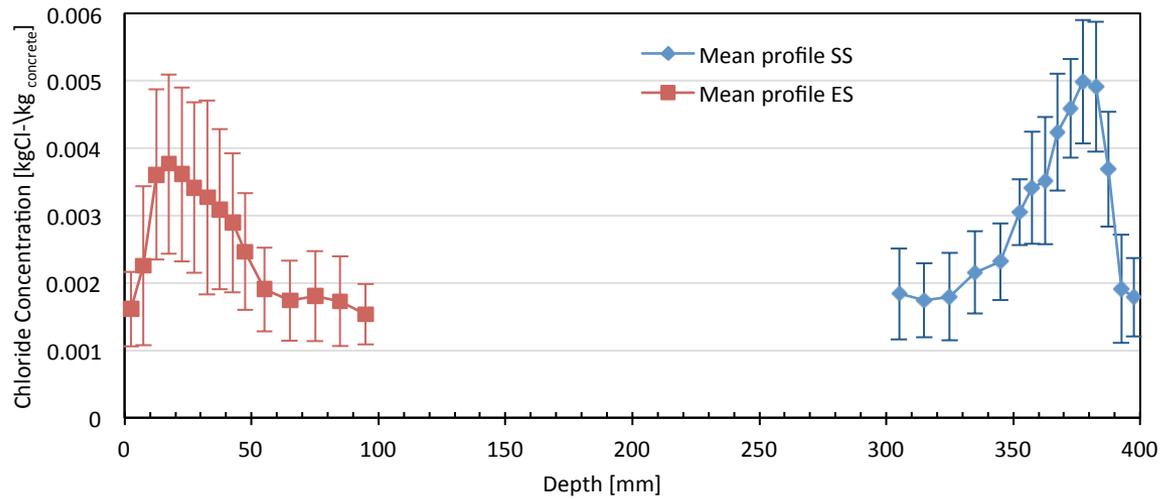
## Applications actuelles:

- Fissuration / Offshore
- Corrosion / CND US
- Chlorures / CSD
- Détection vides / CND IE
- Divers / Analyse d'images

# First results

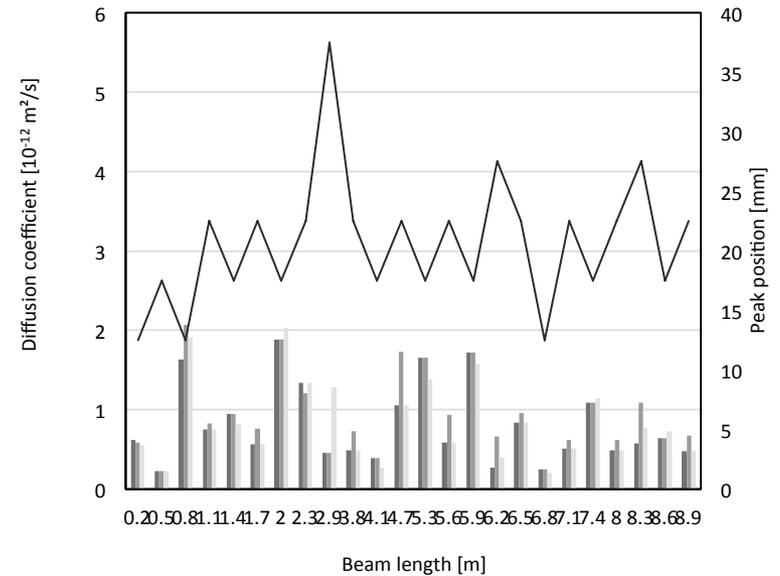
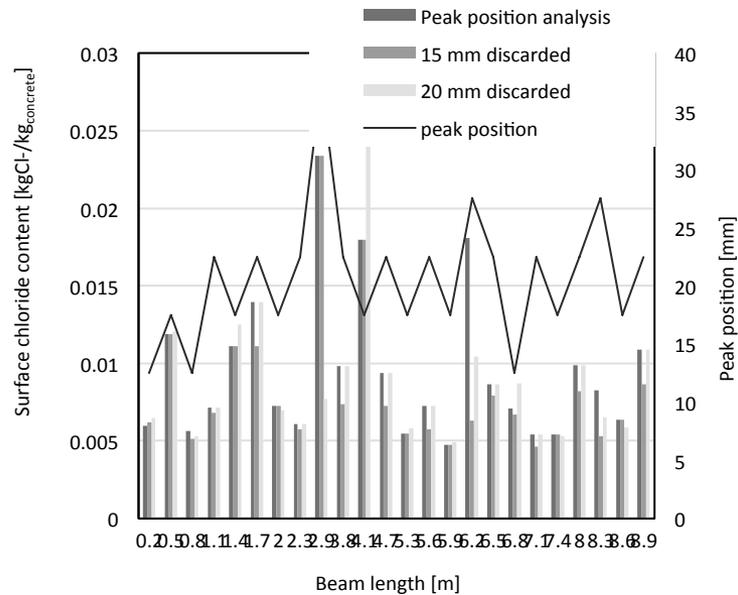


# First results



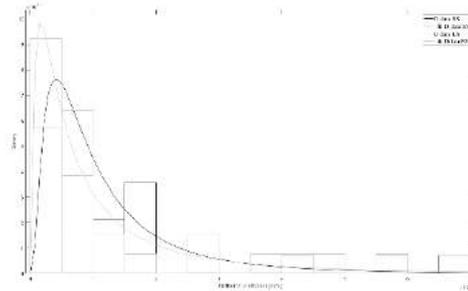
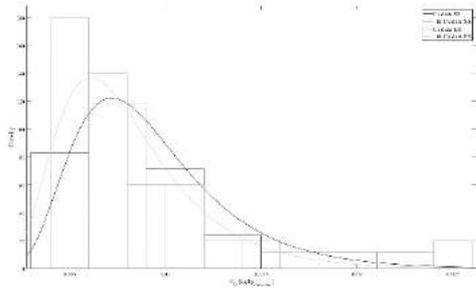
# First results

Which post-treatment of the chloride profile / Fick model ?



# First results

Which post-treatment of the chloride profile / Fick model ?



Cs (mean value, std variation)      D (mean value, std variation)

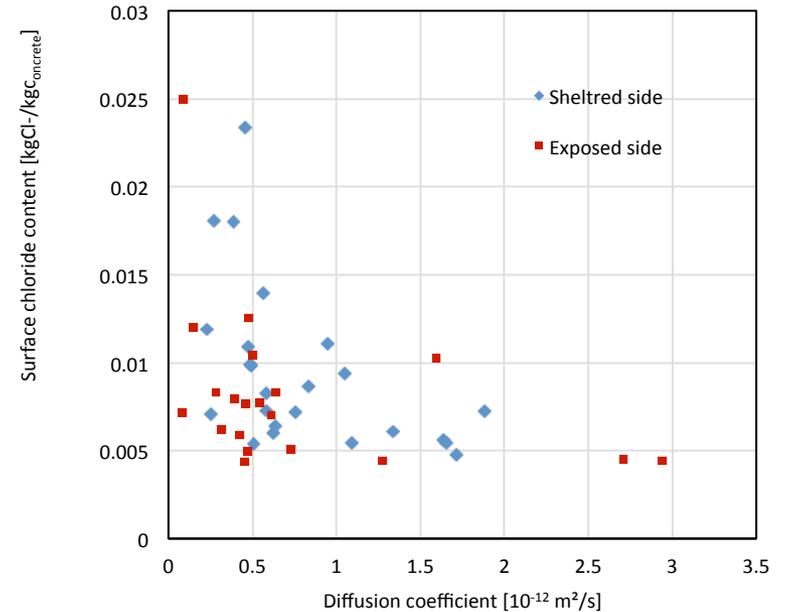
kg/kg<sub>concrete</sub>

10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s

Sheltered side      (0.0093, 1.63E<sup>-05</sup>)      (1.28, 1.8E<sup>-12</sup>)

Exposed side      (0.0081, 1.35E<sup>-05</sup>)      (1.43, 6.7E<sup>-12</sup>)

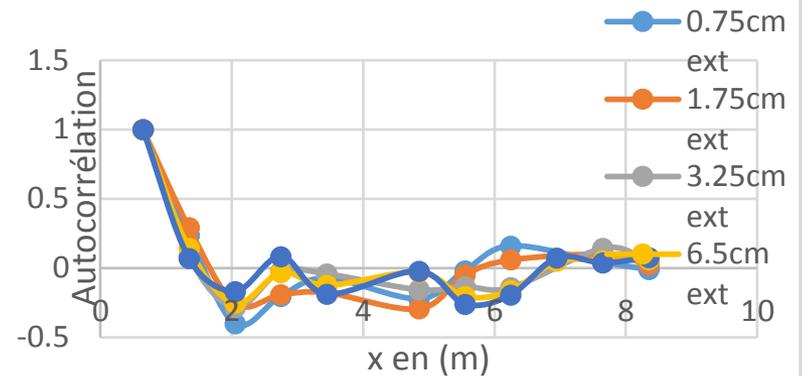
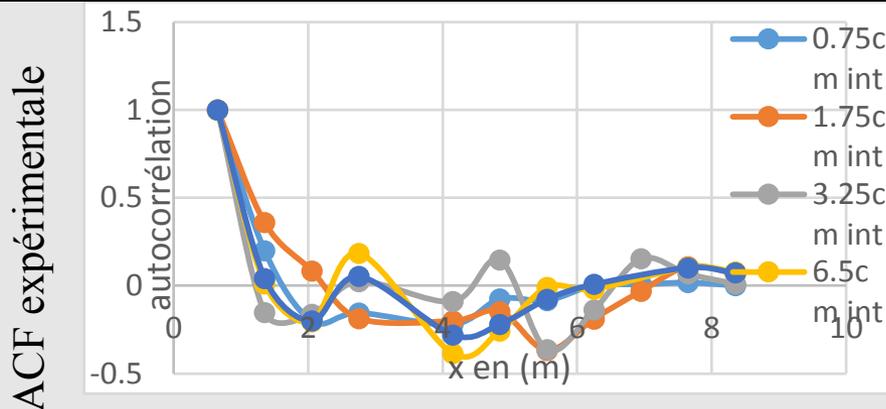
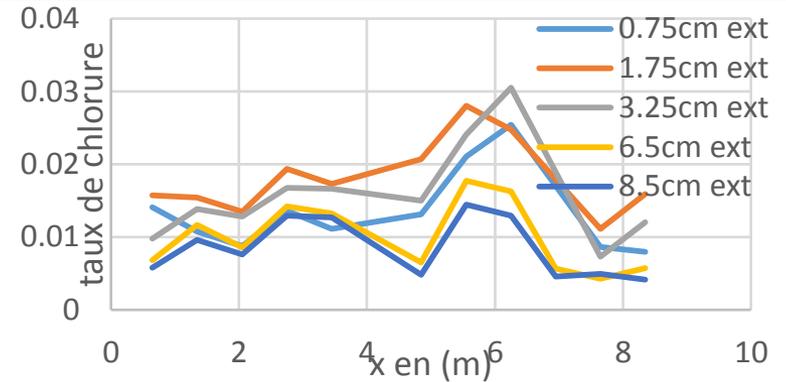
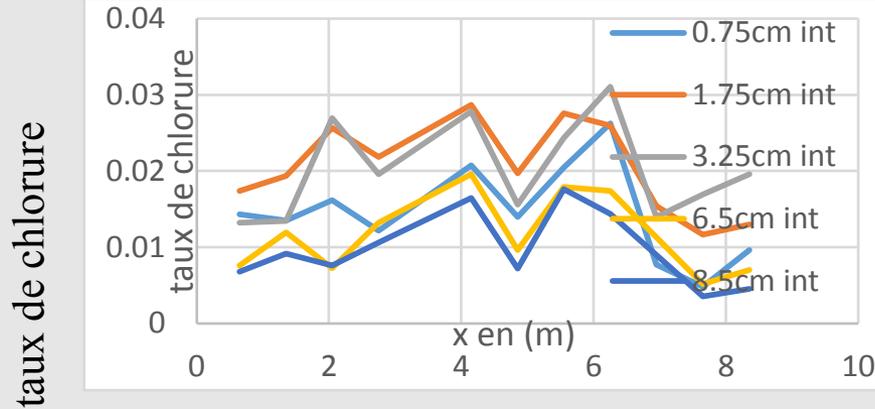
Global (both sides)      (0.0087, 1.51E<sup>-05</sup>)      (1.34, 3.5E<sup>-12</sup>)



# Data in 2015 (every 60 cm): promizing

Profil interne

Profil externe

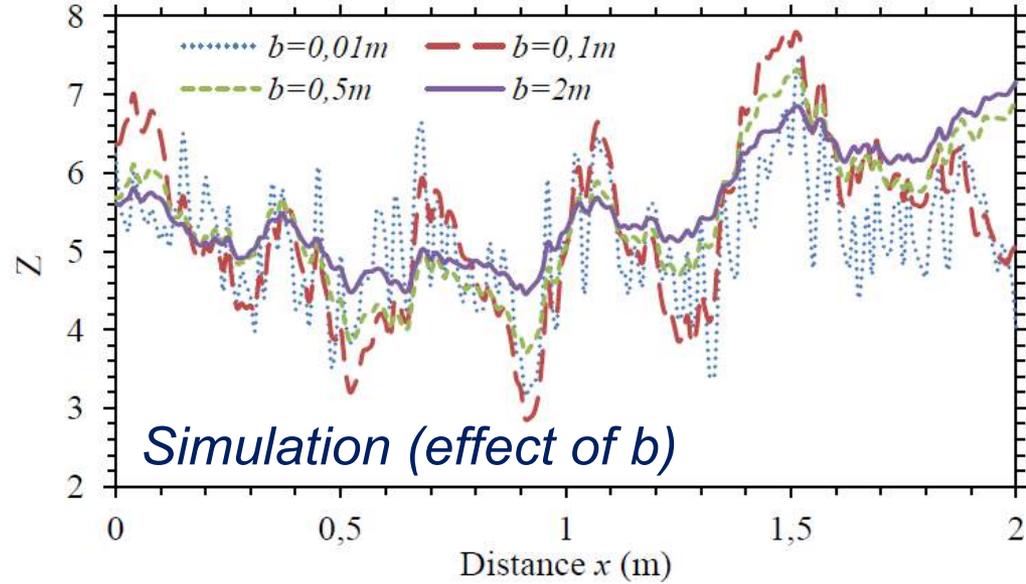


# Modeling and first analysis

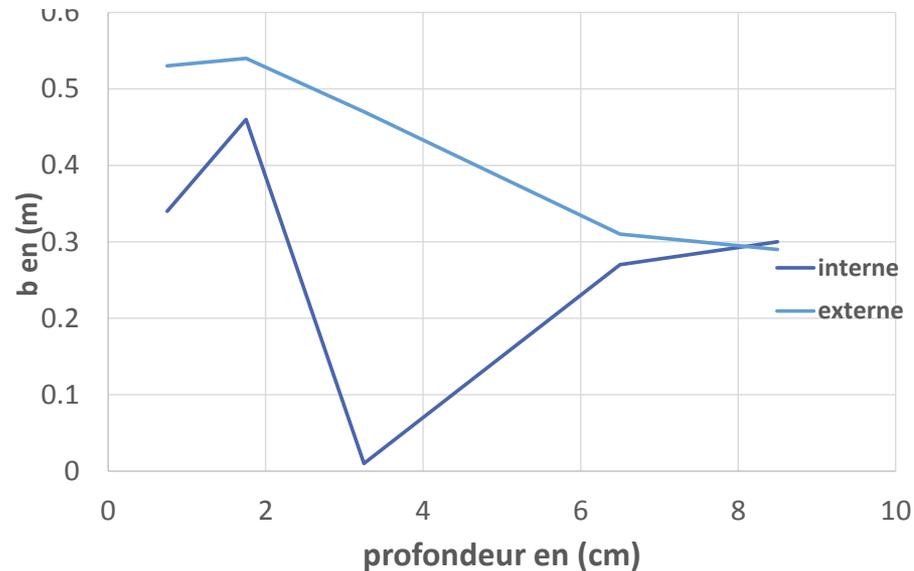
Le champ s'écrit sous la forme :

$$F(\mathbf{x}, \boldsymbol{\theta}) = \boldsymbol{\mu}_z(\mathbf{x}) + \boldsymbol{\sigma}_z(\mathbf{x}) \sum_{j=1}^N \sqrt{\lambda_j} \xi_j(\boldsymbol{\theta}) f_j(\mathbf{x})$$

- $\boldsymbol{\mu}_z$  et  $\boldsymbol{\sigma}_z$  sont la moyenne et l'écart-type du champ aléatoire
- $\lambda_j$  et  $f_j$  sont les valeurs et les fonctions propres
- $\xi_j$  sont des variables aléatoires non corrélées



- En surface : Porosité du surface + Diffusion des ions chlorures
- Dans l'enrobage : Dégradation du béton + Transfert des ions chlorures
- En profondeur : Béton sain



## Next step

- Detailed analysis
- Effect of environment / material



Nouvelle étape (2010): cas de champs aléatoires (stochastiques)

Mesurer aux bons endroits avec le bon outil (au bon moment – saison - programmation)

# Initiation du travail: thèse ECND-PdL



➤ PÔLE DE COMPÉTENCE ECND-PdL

([ecndpdl.fr](http://ecndpdl.fr))

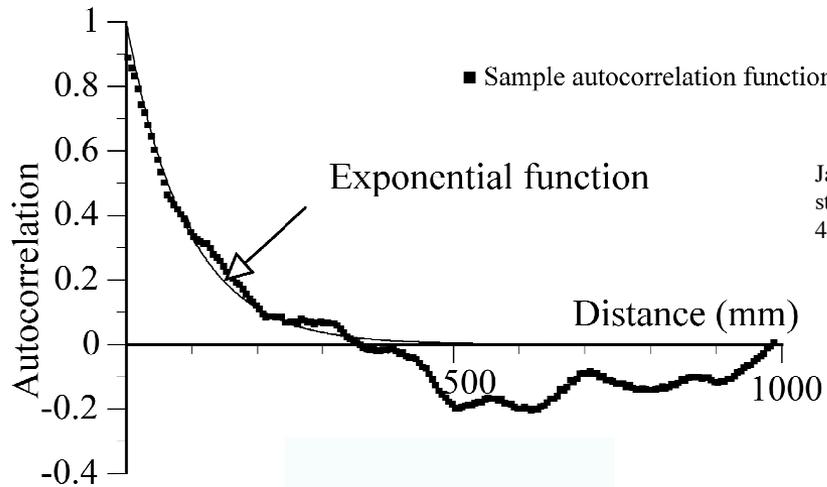
GeM / Ifsttar / IRCCyN

Idée: un champ de dégradation dans un matériau n'est pas du bruit

Structuré au niveau probabiliste:

- Stationnaire (variance constante + corrélation spatiale)
- Stationnaire par Morceaux

-> **Connaissance a priori** + Modèle



Jaksa MB, Kaggwa WS, Brooker PI. Experimental evaluation of the scale of fluctuation of a stiff clay, in: Appl. Stochastics Probab., Melcher an, Sydney Balkema, Rotterdam: 2000: pp. 415–422.

Figure 2. Spatial correlation of cone tip resistance in a clay (adapted from [29]).

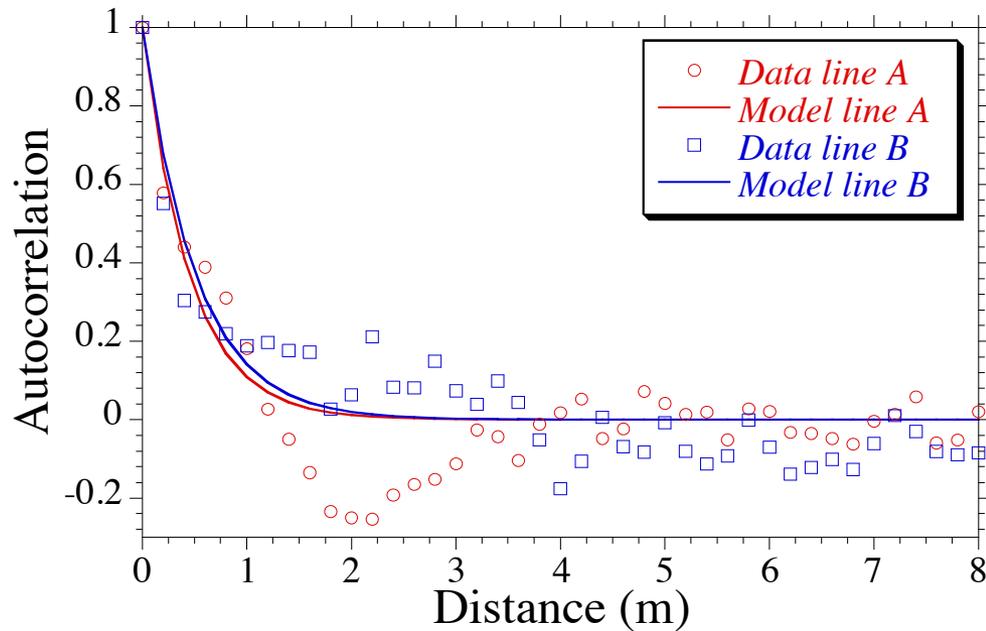


Figure 12. Auto-correlation data and fitted functions for  $W$ .

## Stochastic Characterization of Random Fields From ND Measurements: a Two Stages Procedure

F. Schoefs<sup>1</sup>, T.V. Tran<sup>1</sup>, E. Bastidas-Arteaga<sup>1</sup>, G. Villain G.<sup>2</sup>, X. Derober

*First stage:*  
spatial variability  
characterization and  
RF modeling

*Input data:* measurement of  $N_{sl}$   
spatially correlated points on a single  
component. Precision and confidence  
on the expected estimates

Assessment of the scale of  
fluctuation parameter ( $b$ ) and first  
estimates of  $\mu$  and  $\sigma$  of  $Z(x, \theta)$

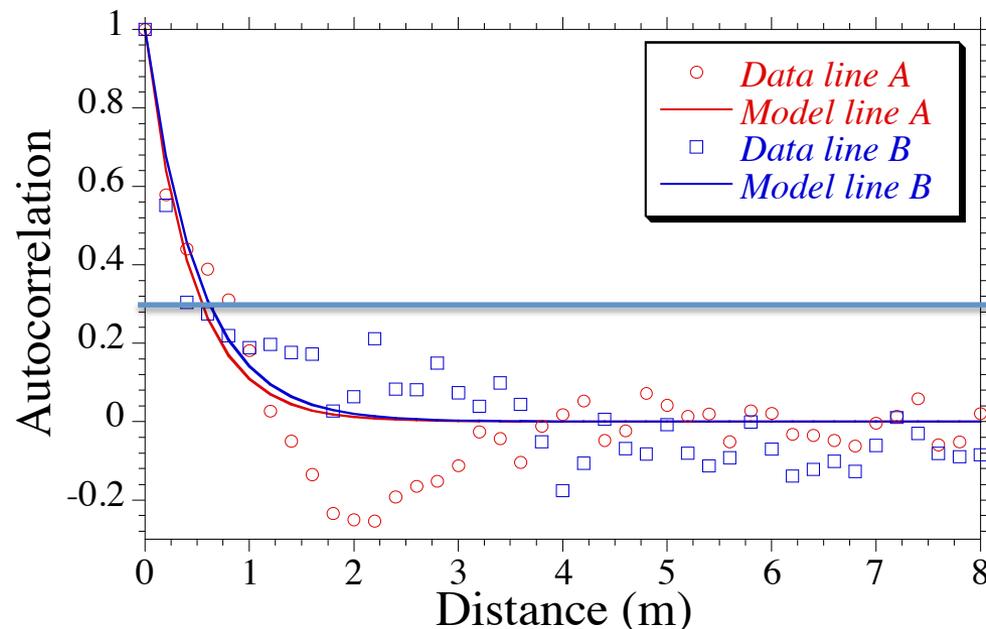
Optimization of the number of  
measures by using Monte Carlo  
simulations

*Second stage:*  
statistical characterization

*Input data:* measurement of  $N_s$  points  
separated by a distance  $L_c$  on  $N_t$   
components

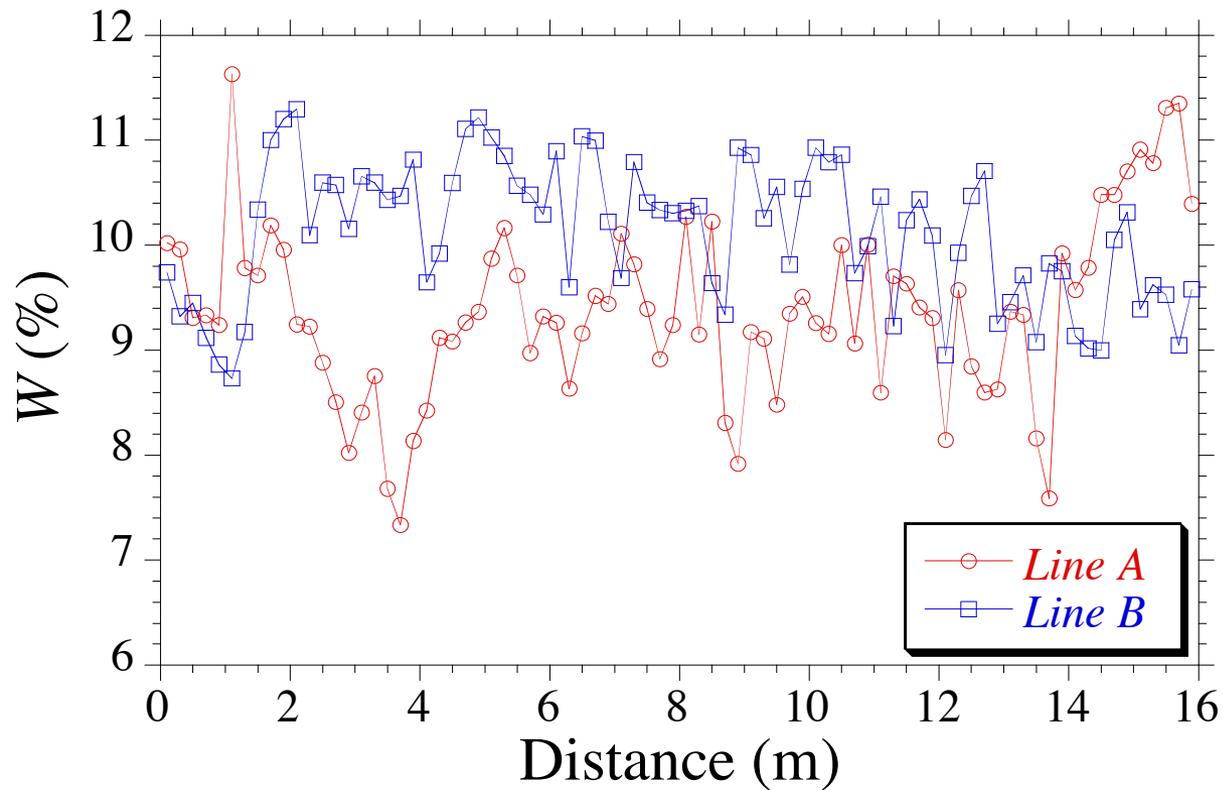
Final assessment of the statistical  
parameters of  $Z$  ( $\mu_Z$  and  $\sigma_Z$ )

Élément clé: à partir de quel moment autocorrélation faible? >> mesures indépendantes > localisation de zones faibles / fortes

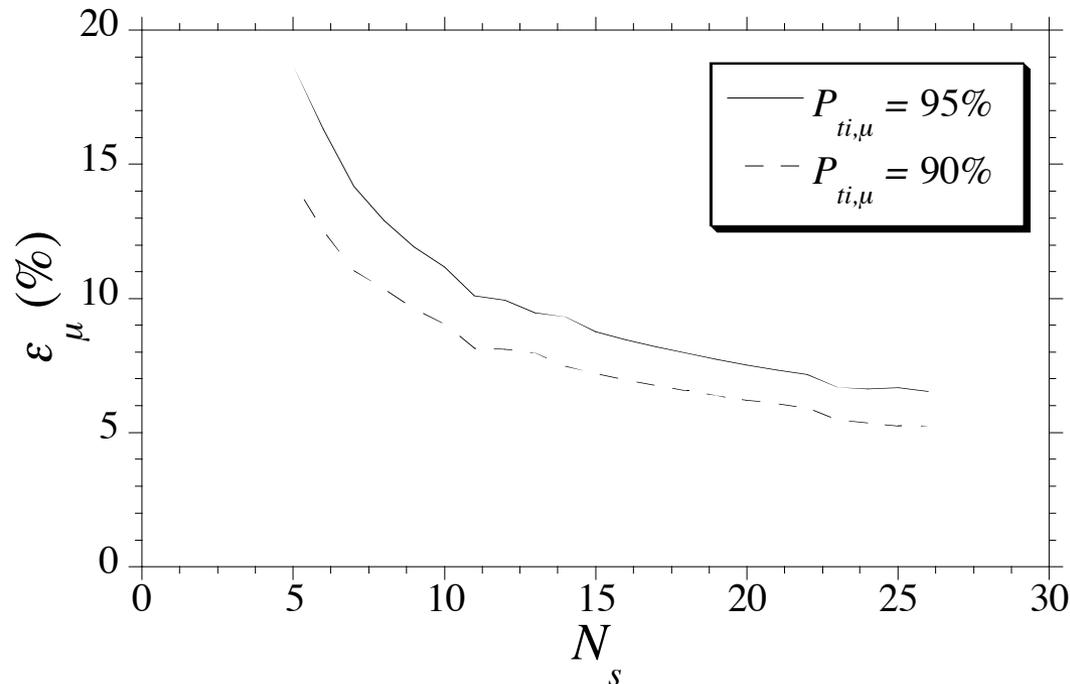


0.3

# Modélisation possible de trajectoires



Objectif final: optimiser (minimum pour **objectif de diagnostic Précision / Confiance**)



# Application

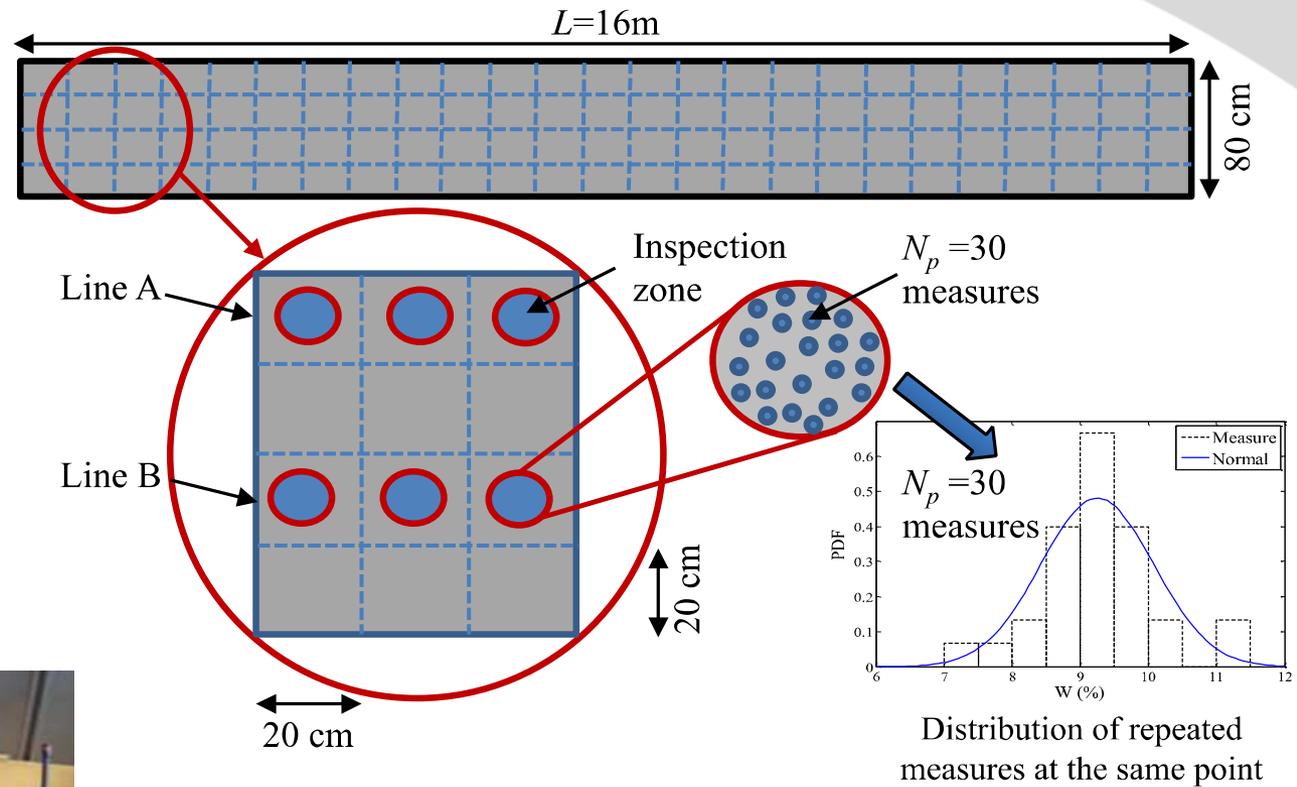


Figure 10. Devices used for obtaining the NDT data.

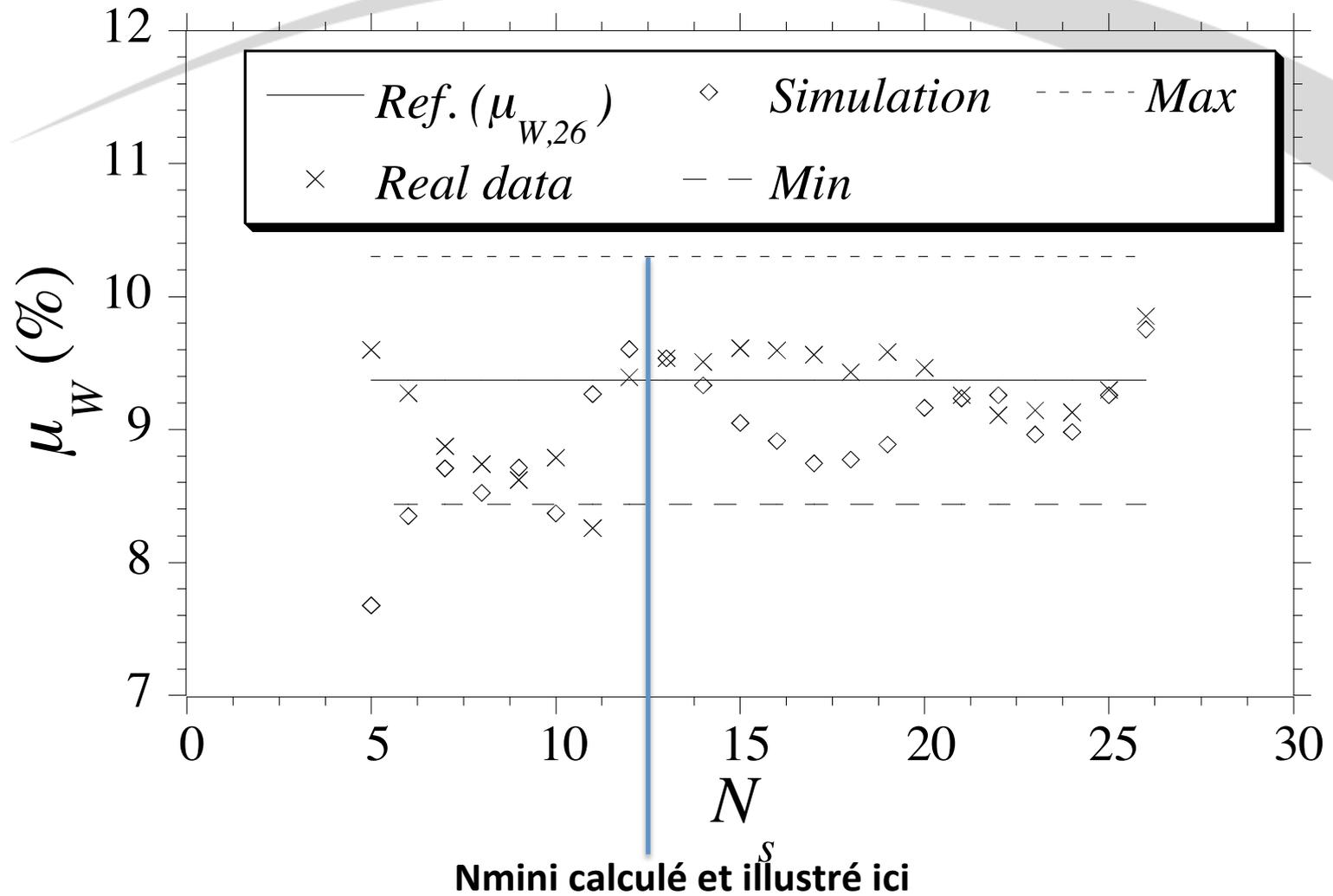


Figure 15. Comparison between modeling and real results in the case of  $\varepsilon_\mu=10\%$  and  $P_{ti,\mu}=95\%$ .

*Next work*

# **Diagnosis and data analysis for the survey of a new cathodic protection placed in the Coal terminal of Montoir de Bretagne**





*Vous accompagner dans vos projets de réingénierie.*

Cellule de compétences rattachée au GEM et **spécialisée dans le suivi et la maintenance des ouvrages du génie civil et industriel.**

**Une expertise basée sur trois logiciels issus de la Recherche**

**VisioDefect®**



- Mesurer précisément le diamètre des armatures corrodés afin de prendre des décisions de réparations et de maintenance adaptées.

**VisioControl®**



- Mesurer avec précision l'épaisseur d'enrobage de béton mise en œuvre lors de travaux de réparation, notamment par projection.

**ChlorePredict®**



- Prédire la date d'initiation de la corrosion par les ions chlorures dans les structures en béton armé

**Applications possibles**

**Ouvrage d'art et Génie civil**

- Diagnostic et contrôle non destructif
- Choix de maintenance
- Instrumentation pour suivi de la corrosion

**Éolien inshore et offshore**

- Suivi d'endommagement
- Instrumentation pour suivi fouling
- Détection et suivi de la corrosion

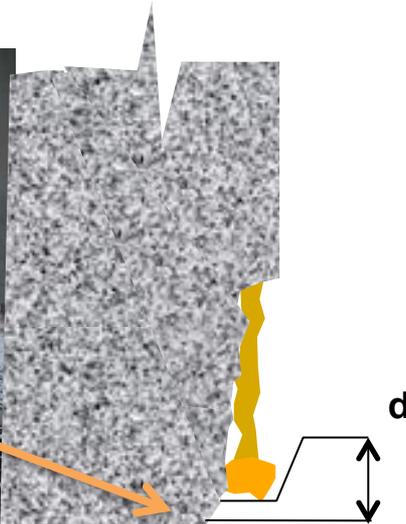
**Prestations :**

- essais de vieillissement accéléré dans l'eau salée
- Calculs statistiques / profils de chlorures

*« La Recherche pour innover et vous différencier »*



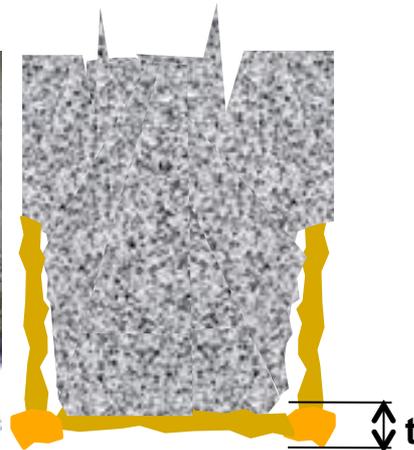
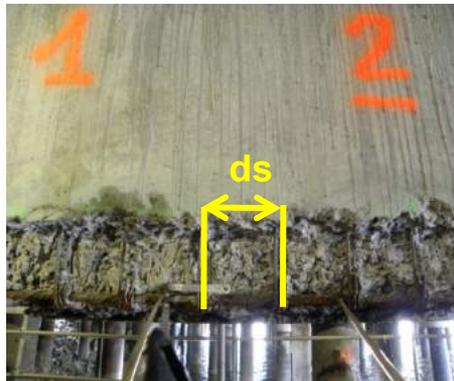
# Grandeurs recherchées par analyse d'images pour la réingénierie



***d** = épaisseur d'enrobage initiale  
et /ou après réparations*

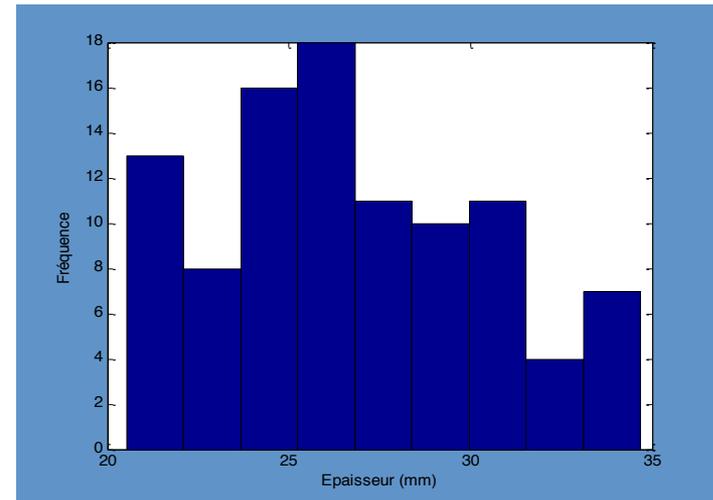
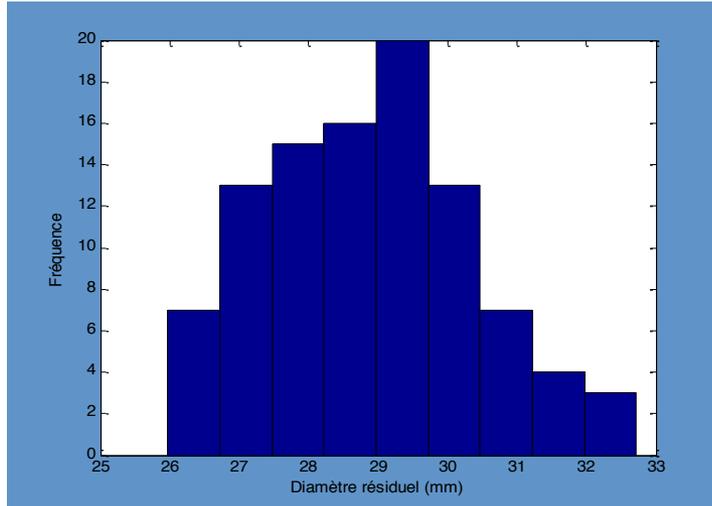
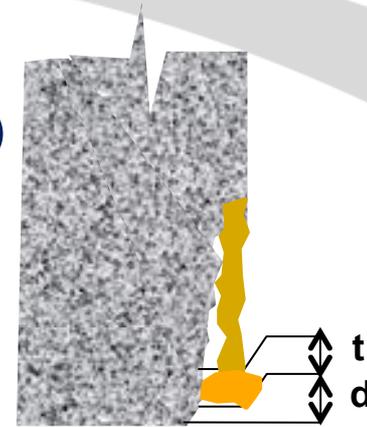
***ds** = écart entre les armatures  
longitudinales*

***t** = épaisseur des armatures  
(niveau de corrosion )*



# VisioDefect®

*Génération des résultats poutres par poutres permettant d'appuyer un diagnostic et d'aider à la prise de décision.*



|           |      |      |
|-----------|------|------|
| Min       | 26   | 20,5 |
| Max       | 32,2 | 34,7 |
| Moy       | 29   | 26   |
| Quant 10% | 27   | 21,5 |

# ChlorePredict®

**Objectif :** apporter un outil de contrôle non destructif pour la prévision d'introduction des ions chlorures dans les structures en béton armé.



## Un constat :

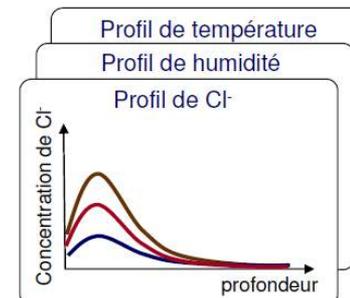
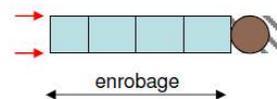
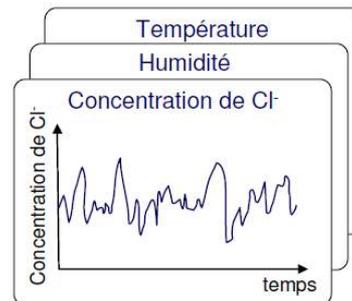
- Pas de possibilités de connaître la propagation d'ions chlorures dans une structure sans avoir recours à des méthodes destructives

## Une réponse:

- Modéliser la propagation d'ions chlorures en intégrant toutes les incertitudes sur les paramètres

Le logiciel intègre tous les paramètres (et leurs incertitudes) entrant en compte dans la diffusion des ions chlorures, notamment en zone de marnage :

- La quantité de chlorures;
- La qualité du béton;
- La température;
- L'exposition;
- L'humidité.



- Ces logiciels, reposant sur des données statistiques globales, apportent aux décideurs des données essentielles à des prises de décision contrôlées



- **Essais vieillissement accéléré**
- Permet de reproduire un vieillissement de structure en béton de manière accélérée.
- Détection de la teneur en chlorure dans les dalles par barrettes d'instrumentation ou par carottages.
- Mesure en continu de la salinité, de la température, de l'humidité et de l'air pour reproduire les phases de séchage/mouillage des conditions de vie réelles des ouvrages.
- **Réalisation de profils de chlorures**
- **Traitement statistique de données**
- **Détermination du facteur d'échelle en temps**

### Using real data in BN:

*Cuve de marnage à l'eau de mer avec*

|                      |    |     |     |
|----------------------|----|-----|-----|
| Natural test         | T1 | T2  | T3  |
| Exposure time (days) | 65 | 207 | 320 |
| Number of profiles   | 3  | 3   | 3   |

|                    |          |          |          |
|--------------------|----------|----------|----------|
| Real exposure time | 725.246  | 935.9721 | 1050.286 |
| Scale factor       | 11.15763 | 4.414963 | 2.40893  |

Bayesian network

$$\text{Scale factor} = \frac{\text{Real exposure time}}{\text{Exposure time in lab}}$$

|                             |    |     |     |
|-----------------------------|----|-----|-----|
| Accelerated test            | T1 | T2  | T3  |
| Exposure time in lab (days) | 65 | 212 | 436 |
| Number of profiles          | 6  | 6   | 6   |

