

8^{èmes} Journées

Fiabilité des
MATÉRIAUX & DES STRUCTURES

Aix-en-Provence,
9 et 10 avril 2014



ECOSYSTEMES CONTINENTAUX
ECCOREV
ET RISQUES ENVIRONNEMENTAUX



Analyse et quantification des incertitudes dans un système d'instrumentation de structures :

Application à la détection de chlorures dans le béton par résistivité

Yann Lecieux, **Franck Schoefs** (équipe SCS / Thème SHM)

Stéphanie Bonnet et Michel Roche



Étude de la corrosion des armatures :

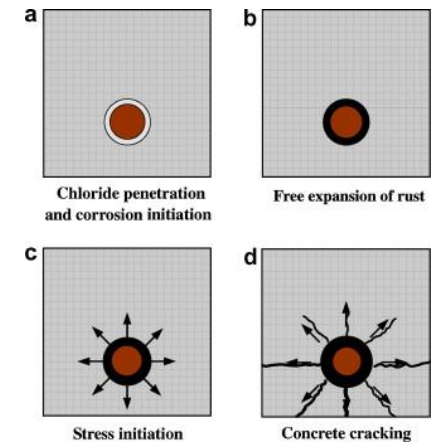
- Cause principale de détérioration des structures.

Causes de la corrosion :

- Liée à la pénétration du CO_2 ;
- Liée à la présence des chlorures.



Corrosion des armatures



Mécanisme de corrosion [Chen]

Le mécanisme de corrosion:

- Phase I : l'initiation de la corrosion (les chlorures pénètrent le béton);
- Phase II : Propagation de la corrosion;
- Phase III : Fissuration.

Profil des ions chlorures (ASTM C1152) :

- Test destructif (carottage).
- Mesure des ions libres par une méthode chimique.

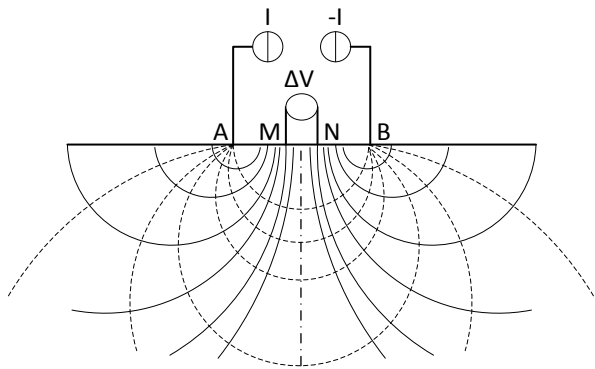
Mesure de résistivité :

- Renseigne sur le risque de corrosion (élevé si $\rho < 100 \Omega.m$) [Polder] ;
- Mesure de laboratoire ;
- Appareil portable pour une mesure ponctuelle ;
- **Limite : dispersion importante des résultats sur des échantillons identiques [Polder] ;**
- **Idée (IFSTTAR: projet FUI MAREO): limiter les contacts par sondage électrique (méthode géophysique): capteur embarqué.**



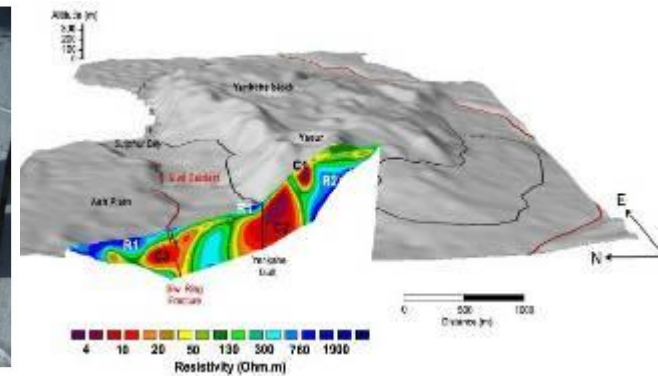
Sonde Wenner portable

- **Evaluer et optimiser les performances d'un capteur intégré de mesure de résistivité compatible avec les méthodes d'interrogations géophysiques.**
 - ✓ Résultats plus riches, (carte de résistivité) compatibles avec le traitement statistique >> **vers une variabilité spatiale (cf Optimization of sensor design for SF assessment, Icosar 2013),**
 - ✓ Tests dans un milieu contrôlé.



— équipotentiellles

- - - lignes de courant



- **Evaluer le seuil de détection des chlorures en procédant à des essais dans du béton contenant des concentrations différentes de ces ions.**

Travail centré sur la **quantification des incertitudes et réduction des erreurs**

TESTS en milieu homogène

Objet: optimiser le protocole par minimisation des erreurs

- Temps d'injection
- Courant d'injection

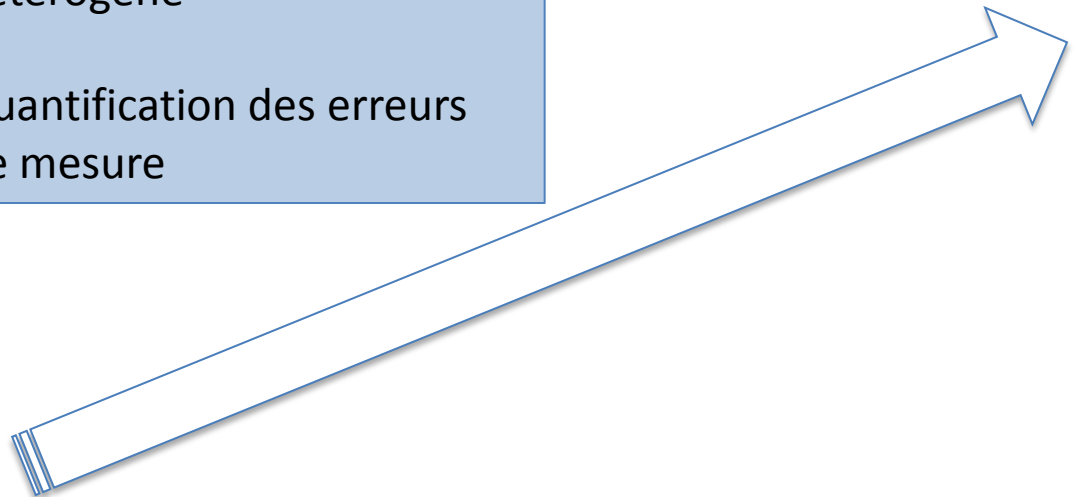
Répétitivité

TESTS en milieu chloruré hétérogène

Quantification des erreurs de mesure

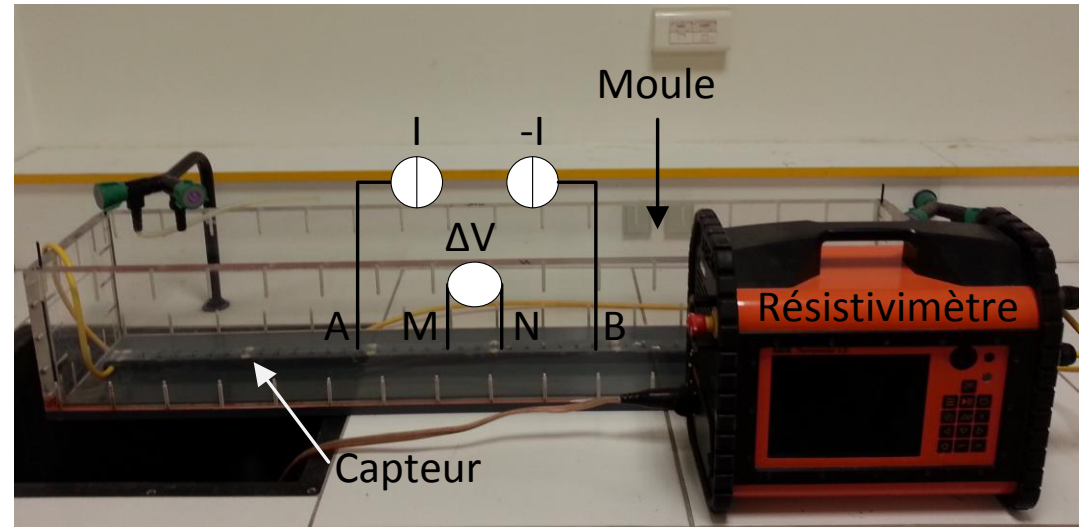
Modélisation des incertitudes

Impact sur l'aide à la décision

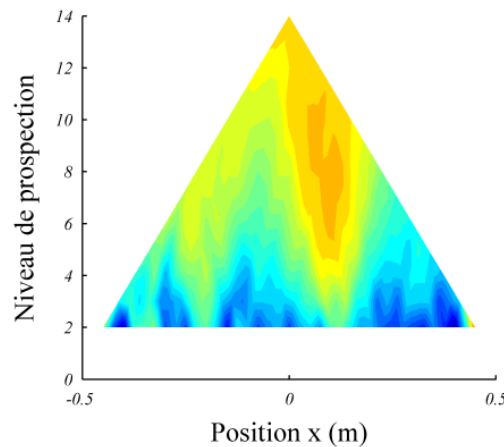


Principe physique :

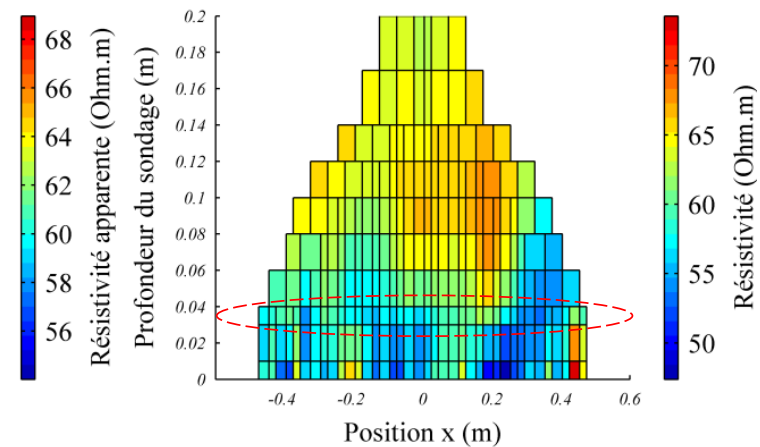
$$\rho = G \frac{\Delta V}{I}$$



Résistivité apparente, résistivité vraie :



a) Pseudo section de résistivité apparente.

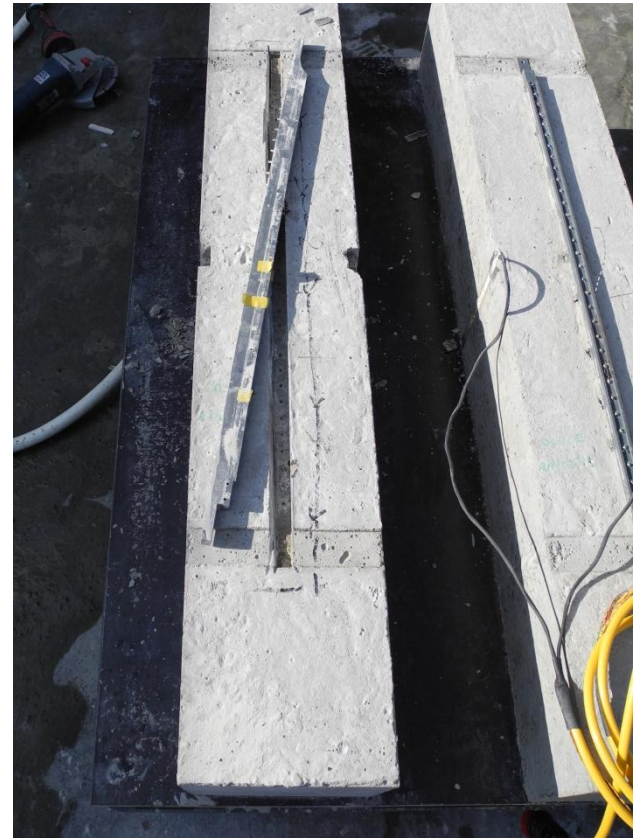


b) Section de résistivité vraie.

Matériel et méthode.

Matériel :

- Appareil de mesure classique utilisé en géophysique
- Echantillon : poutre en « eau » (phase d'optimisation) et en béton (phase d'évaluation) de 1200 mm et de section 200 x 200 mm
- Capteur coulé dans le béton
 - ✓ 43 pointes en inox
 - ✓ Support isolant (PVC)



Éprouvette en béton instrumentée et son capteur

➤ Paramètres à optimiser :

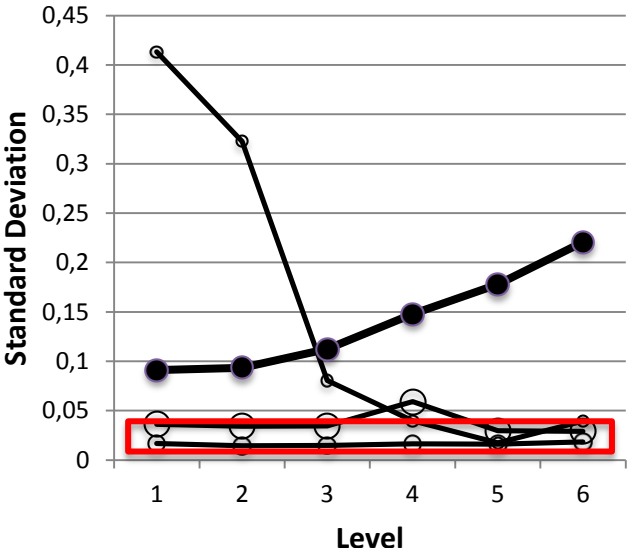
- ✓ Protocoles
- ✓ Courant injecté
- ✓ Géométrie des électrodes

➤ Méthodologie : tests dans l'eau

- ✓ Milieu homogène contrôlé avec une sonde de conductivité
- ✓ Température constante
- ✓ Moule de la poutre en béton



Evaluation et optimisation des performances de notre chaîne de mesure. (Tests dans l'eau)

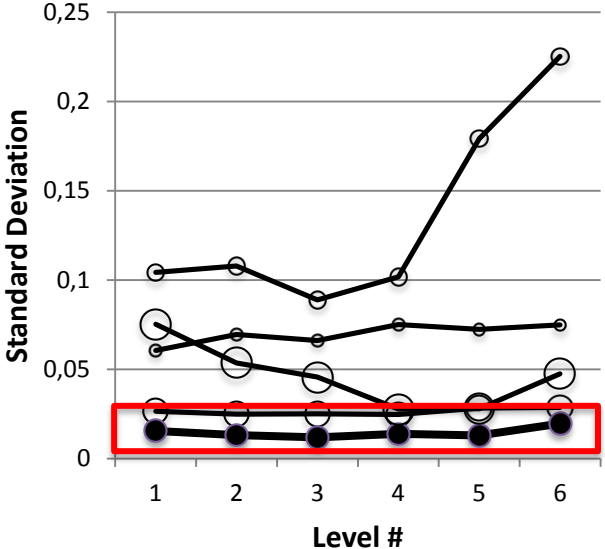


➤ Temps d'injection :

- Ecart Type - 0.1 s
- Ecart Type - 0.2 s
- Ecart Type - 1 s
- Ecart Type - 0.5 s

➤ Intensité injectée

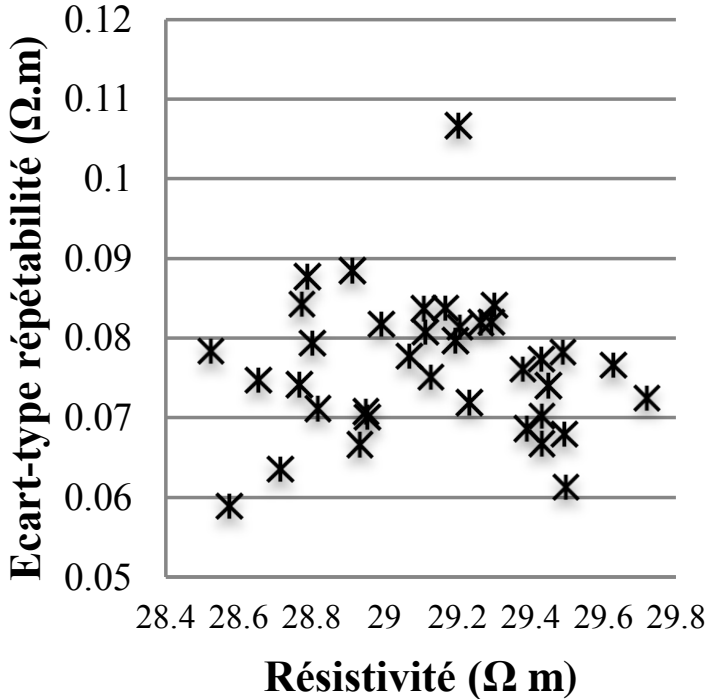
- Ecart Type - 0.5 mA
- Ecart Type - 1 mA
- Ecart Type - 2 mA
- Ecart Type - 5 mA
- Ecart Type - 10 mA



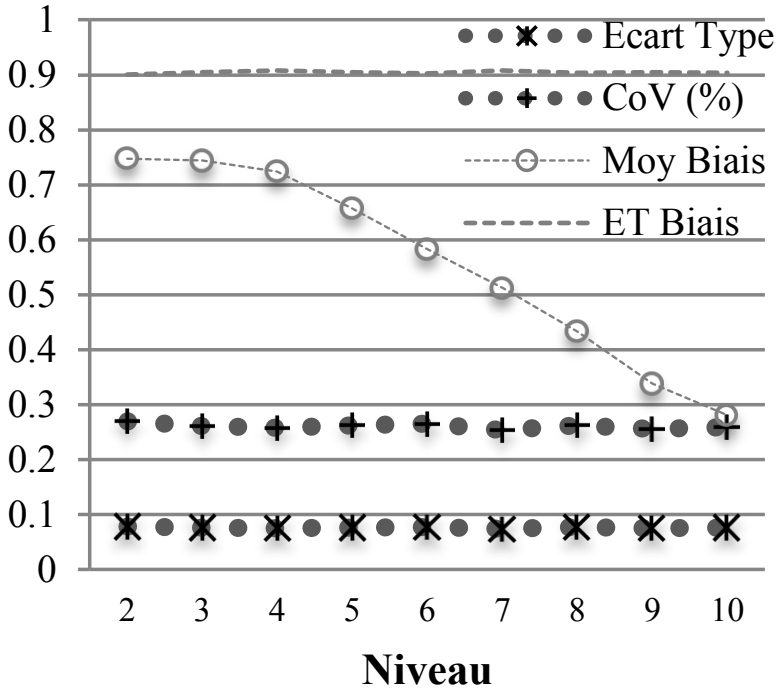
Protocole optimal

- ✓ T=0.2 s
- ✓ I=5mA

Qualification: Biais et répétitivité (tout protocole)/eau



a) Relation erreur-intensité de mesure



b) Evolution de σ (Ω.m) et CoV(%) avec le niveau mesuré

Tests dans le béton : objectifs et protocole.

➤ Objectifs :

- ✓ Effectuer le suivi du durcissement; structural du béton ;
- ✓ Evaluer la pérennité du dispositif dans le temps ;
- ✓ Evaluer la dispersion des mesures ;
- ✓ Evaluer la capacité capteur à détecter la concentration en chlorures (les autres paramètres sont fixés).

➤ Protocole expérimental :

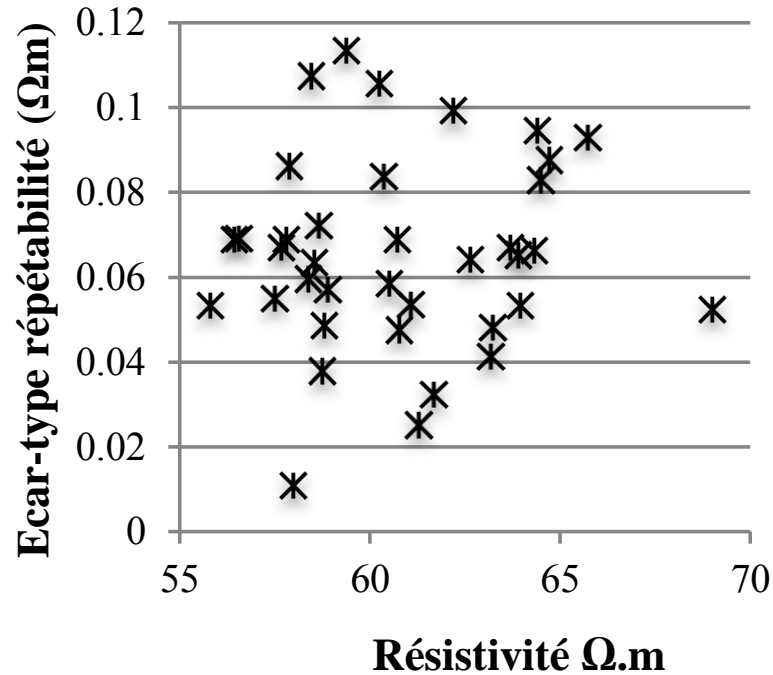
- ✓ Fabrication de 4 poutres contenant des concentrations en NaCl différentes (0 30g 60g et 120g de NaCl/L dans l'eau de gâchage) ;
- ✓ Sondage électrique pendant 6 mois.



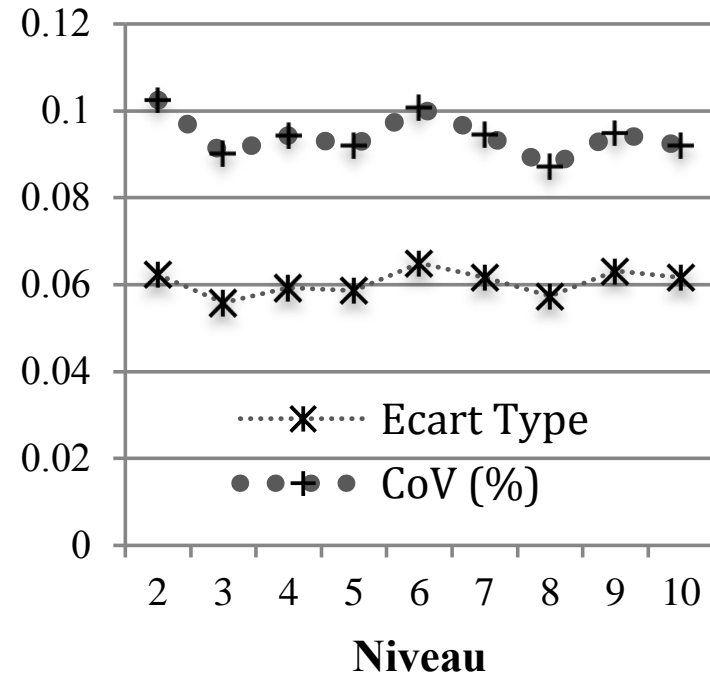
Montage expérimental pour le sondage électrique dans le béton

Test dans le béton : évaluation de la répétabilité de la mesure.

Qualification: Biais et répétabilité (tout protocole)/eau



a) Relation erreur-intensité de mesure

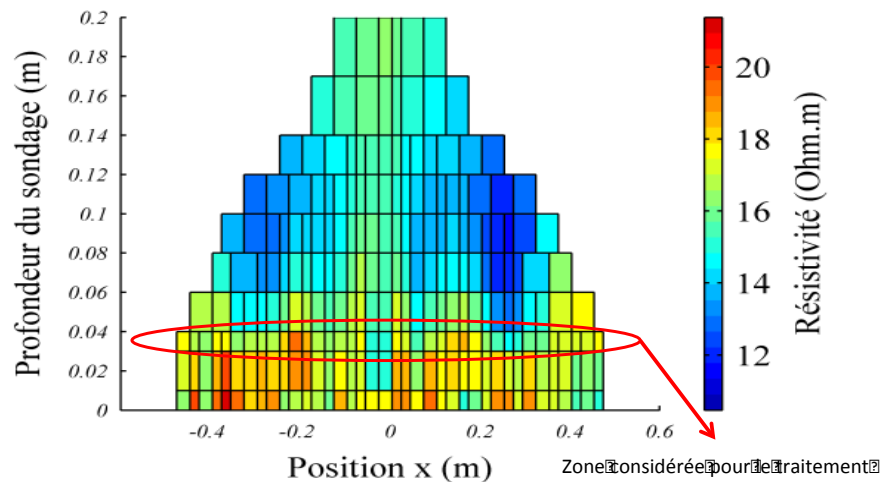


b) Evolution de σ ($\Omega.m$) et CoV (%) avec le niveau mesuré

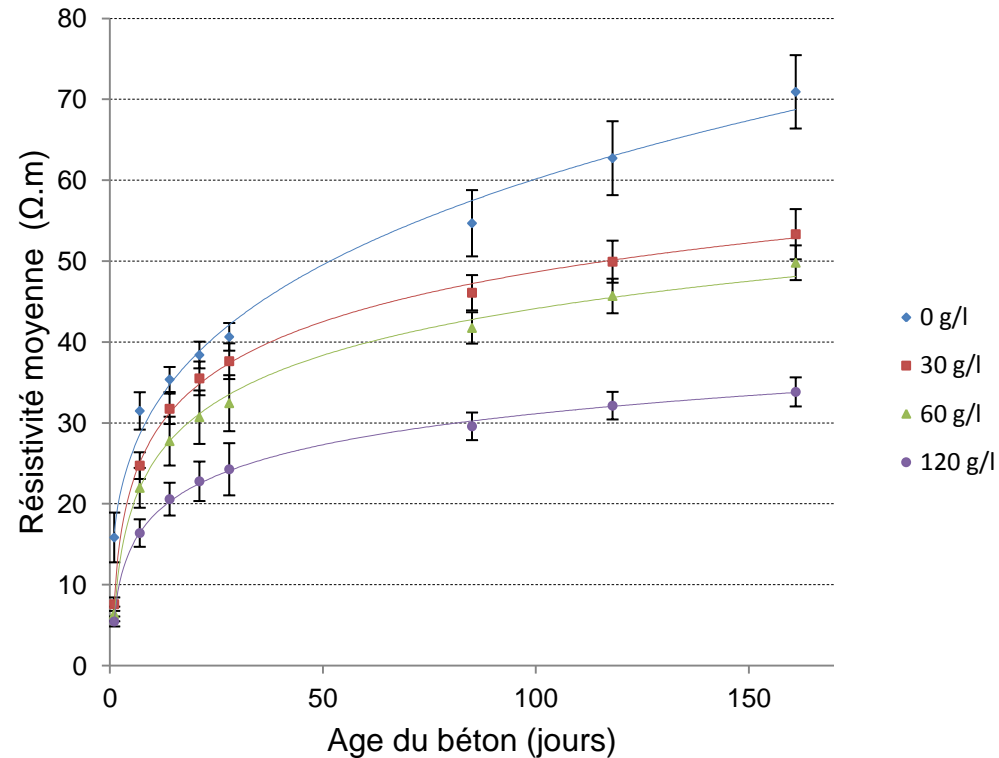
Tests dans le béton : résultats expérimentaux.

➤ Dépouillement des résultats :

- ✓ Les résultats bruts de chaque sondage sont traités pour obtenir la section **des résistivités vraies** ;
- ✓ Un point de la courbe représente la **moyenne des résistivités vraies pour le niveau 3** ;

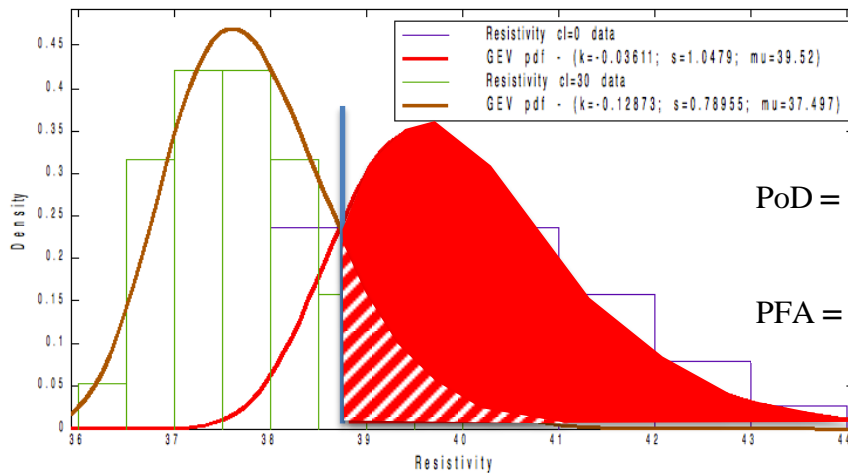


- ✓ La barre d'erreur est l'écart type des résistivités.



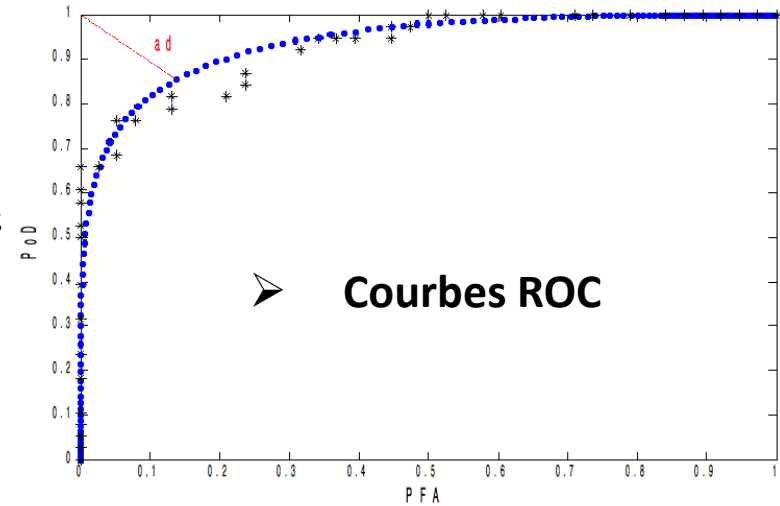
Suivi de durcissement structural du béton.

Qualification: détectabilité à 28j (30g // 0g)



$$PoD = \int_{-\infty}^{a_d} f_{SN}(\hat{d}) d\hat{d}$$

$$PFA = \int_{-\infty}^{a_d} f_N(d) d$$

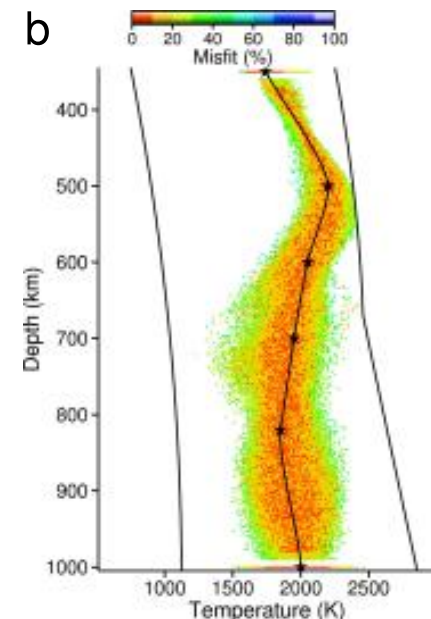
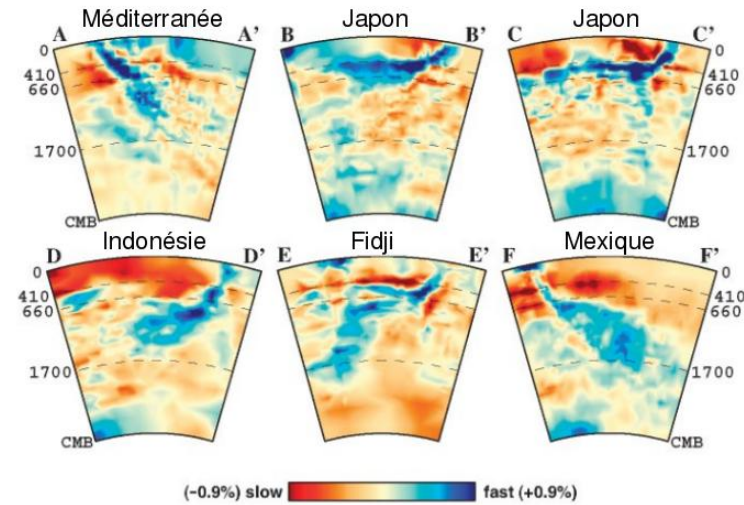


➤ Conclusions:

- ✓ Méthodologie générique pour les capteurs embarqués (SHM)
 >> erreurs de protocole négligeables ici
- ✓ Définition d'un seuil de détection (optimal): $a_d = 37.85$ (Ohm.m)

Tests dans le béton : résultats expérimentaux.

- **Perspectives :**
- ✓ **Amélioration: méthode d'inversion (MCMC + courbes de Bézier (Drilleau et al., 2012) (respect gradient borné + continuité)) + Résolution EFS multi-échelle (Chevreuil et al., 2013)**
 >> simulation et optimisation capteur dans un cadre stochastique (Tran et al., 2013)
 - ✓ **Seuil de détection optimal sur durée de service**
 - ✓ **Tests en présence d'armatures métalliques, Tests in-situ**
 - ✓ **Multi-technique, multi-capteur >> **variabilité spatiale****



Remerciements à Duratinet