

Méthodes de mesure de la résistivité électrique... ...pour déterminer les gradients dans le béton

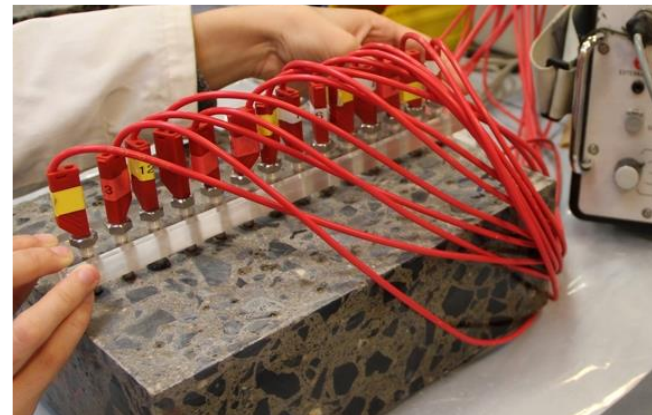
Géraldine VILLAIN
Sergio PALMA LOPES

MAST-LAMES, Campus de Nantes
GERS-GeoEND, Campus de Nantes

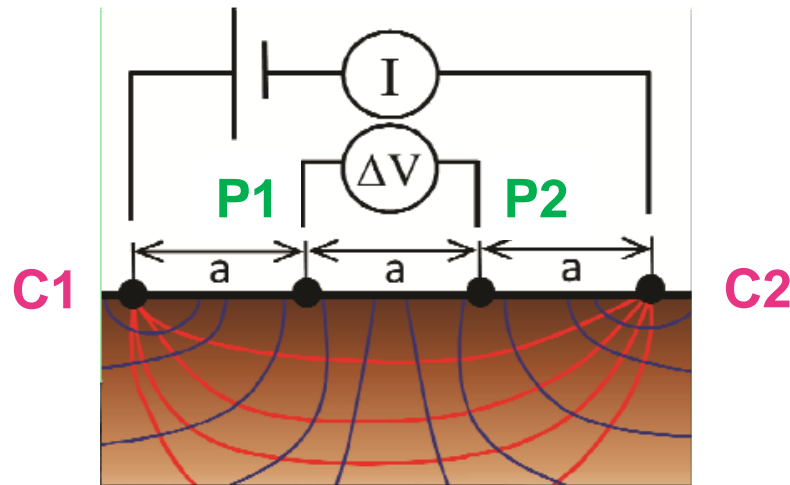
1 – Objectifs de la présentation

- Présenter des méthodes de mesure de la résistivité électrique
 - Utilisées pour l'auscultation et la surveillance des structures en BA
 - Pour déterminer des gradients de teneur en eau ou degré de saturation S , de teneur en chlorures $[Cl^-]$, ...
2. Dispositif Wenner et principe de la méthode
 3. Auscultation multiélectrodes en surface et ERT
 4. Dispositif échelle multiélectrodes pour instrumenter les structures et suivre les profils de S et $[Cl^-]$
 5. Cellule de calibration sur carottes

ERT on a concrete slab
[Fares et al. 2018]



2 – Dispositif Wenner et principe de la méthode quadripôle



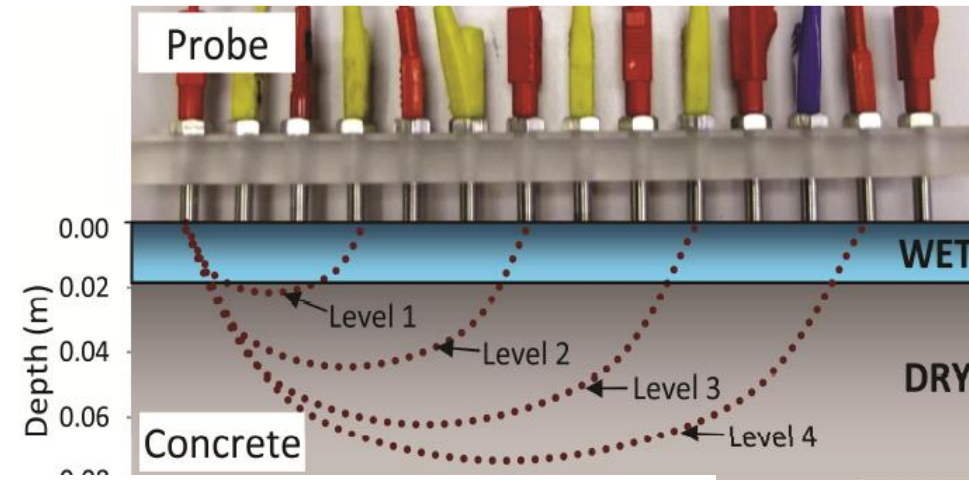
Wenner probes / quadripole
with constant a

$$\rho_{app} = G \frac{\Delta V}{I}$$

- Measure ΔV and I
- Geometrical coefficient G calculated by FEM for homogeneous concrete structure
- Mesure de la résistivité apparente
- Sur un volume donné de la surface à une profondeur inférieure à a

3 – Mesure de la résistivité électrique du béton en surface et Tomographie de Résistivité Electrique (ERT)

Resistivity tomography (ERT)
with $a = 20, 40, 60$ and 80 mm



- For each level i measure ΔV_i and I_i
- Geometrical coefficients G_i calculated by FEM

[Du Plooy et al. 2013]

[Marescot et al. 2006,
Palma Lopes et al. 2023]

$$\rho_{app,i} = G_i \frac{\Delta V_i}{I_i}$$

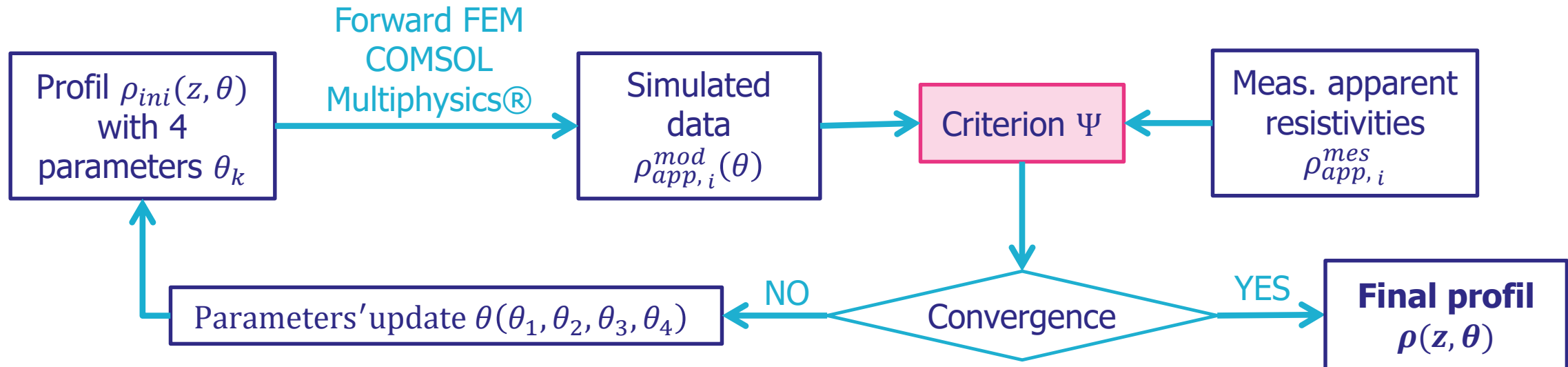
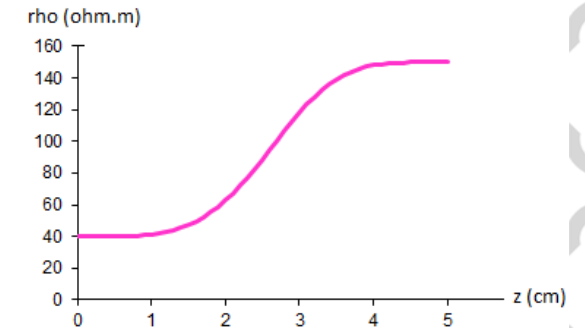
- Inversion required to get the “true” resistivity profile

3 – Processus d'inversion de l'ERT

Inversion par couches [Loke et al. 2000, 2015] **RES1D**

Inversion continue / CERIS2 [Alhajj et al. 21, Fargier et al. 21]

- * fonction continue de Weibull
- * algorithme de Levenberg-Marquardt



$$\Psi(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (\rho_{a_i}^{mes} - \rho_{a_i}^{mod}(\theta))^2 \leq \varepsilon$$

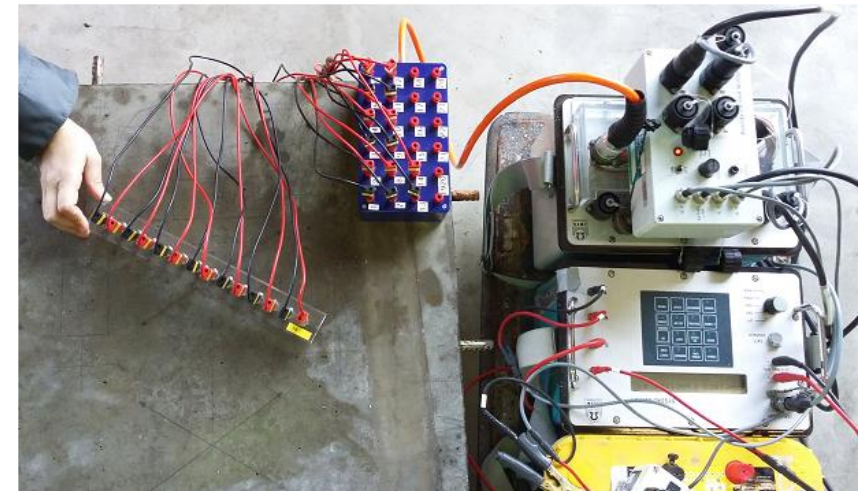
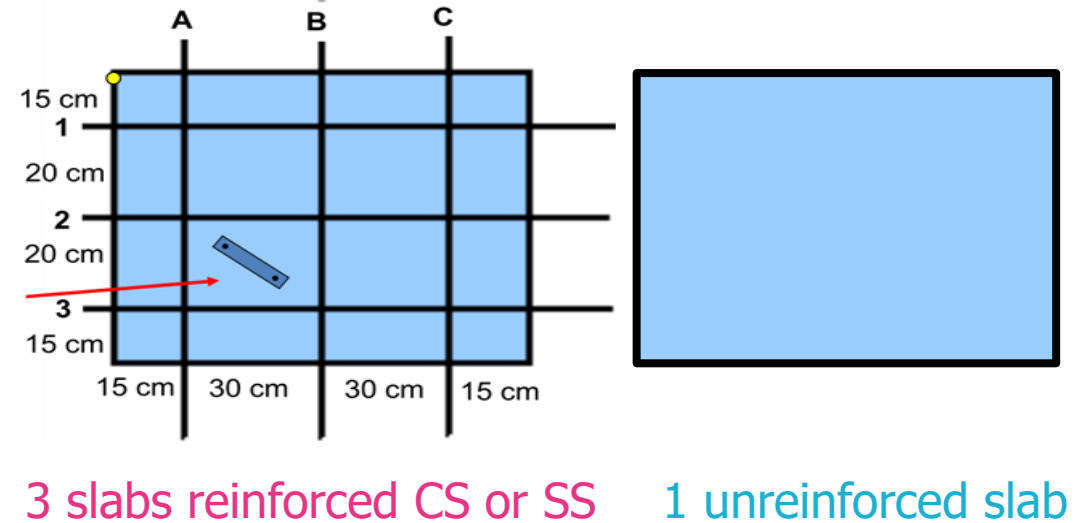
3.1 – Exemple de résultats du projet APOS

- IFSTTAR-CEREMA-LRMH research project [//www.ifsttar.fr/collections/ActesInteractifs/AII1/](http://www.ifsttar.fr/collections/ActesInteractifs/AII1/)
- 20 slabs of 2 concretes
- Slab size 90x75x13 cm
- 1 single bed of rebars placed at 3 cm of depth
- 4 meshes of 20x30 cm

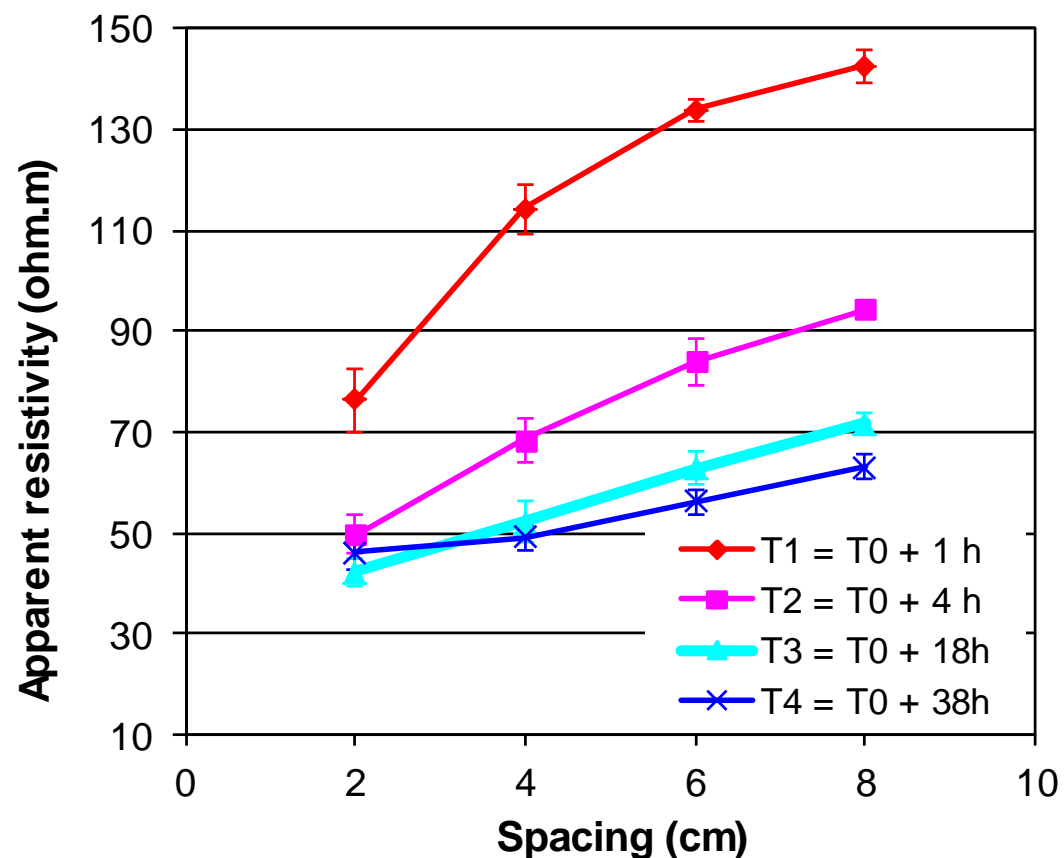
Concrete C1		
Cement CEM I 52.5N CE CP2 NF	(kg/m ³)	305
Water to cement ratio	W_{eff}/C (-)	0.58
Compressive strength at 28 days	$R_{c_{sat}}$ (MPa)	36.3 ± 0.9
Porosity (water saturation)	ϕ (%)	15.9 ± 0.7



Imbibition in salt solution [NaCl] = 35 g/L
 ERT at T1 = T0+1h, T2=T0+4h, T3=T0+18h, T4=T0+38h

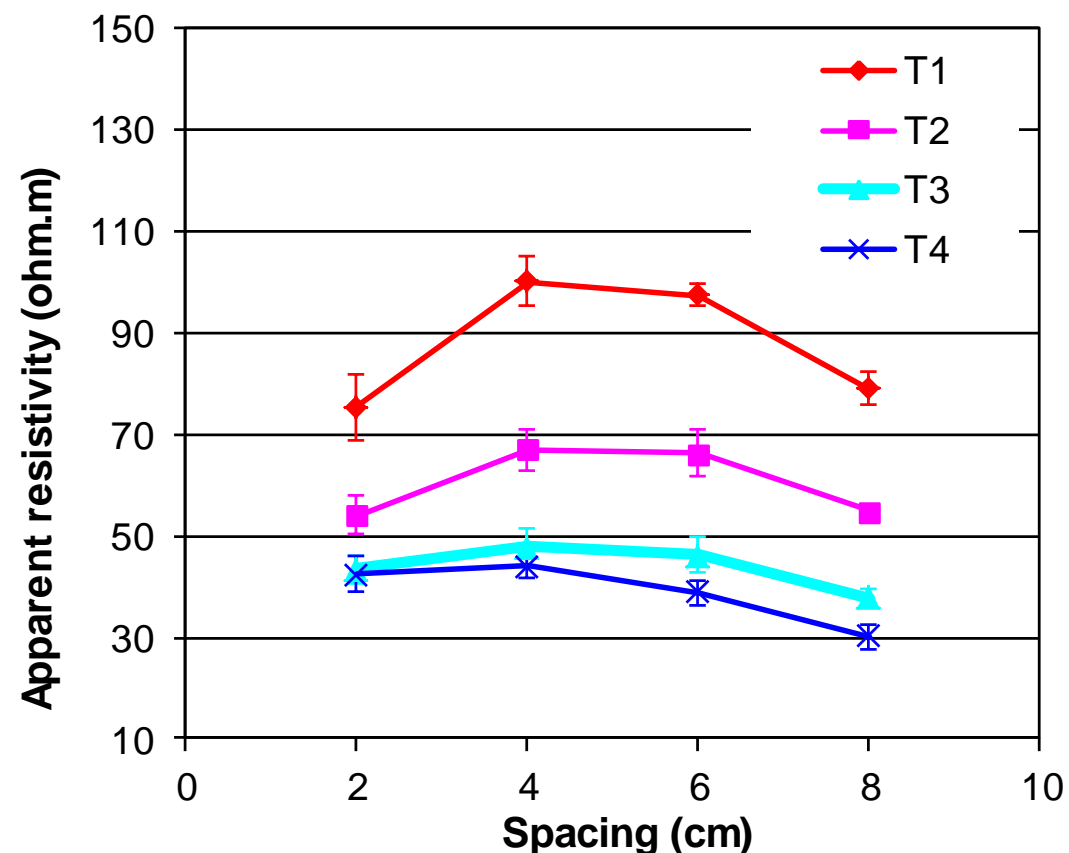


Raw results: Influence of steel rebars on apparent resistivity



Unreinforced slab

- Impossible measurement at T0
- Decrease of ρ_{app} due to saline solution ingress



Reinforced slab

- Influence of steel on ρ_{app}
- Increase with spacing
- Quantified by forward modelling [Alhajj et al. 2019]

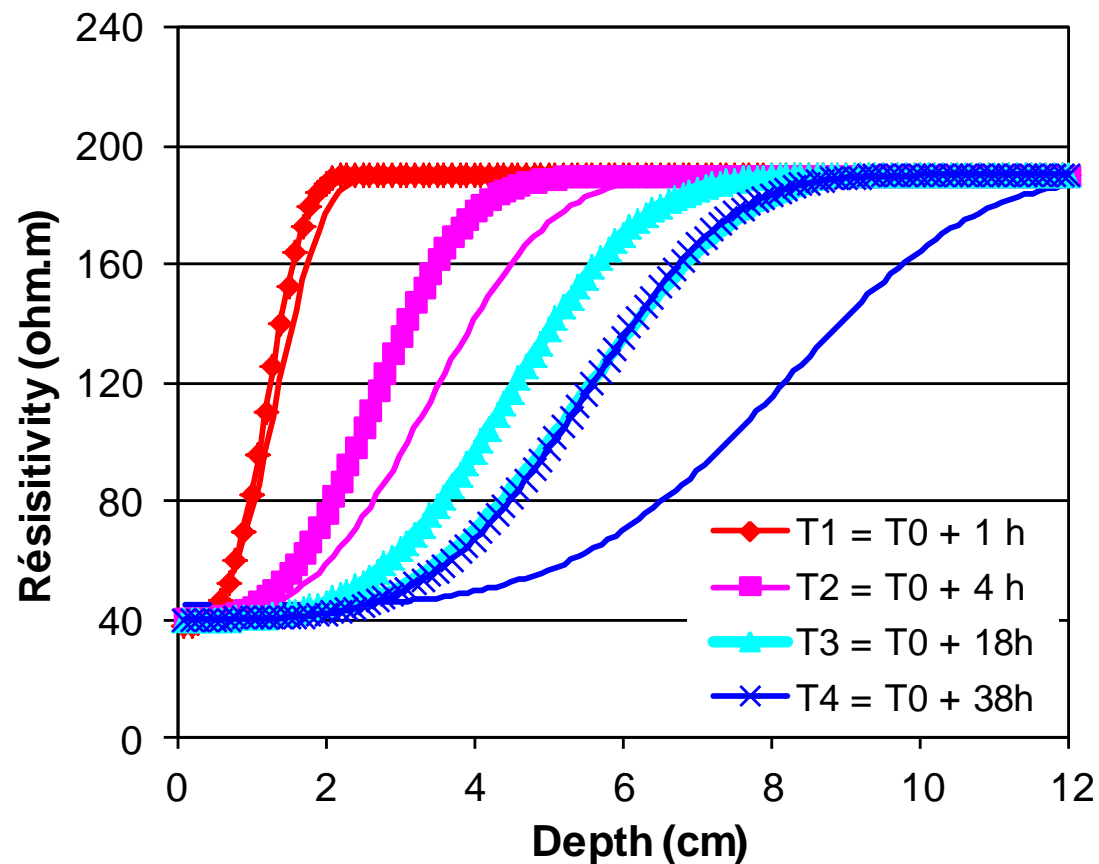
Inversion results: Resistivity profiles

Unreinforced slab

➤ Plain lines

RC slab with HA carbon steel

➤ Lines with marks

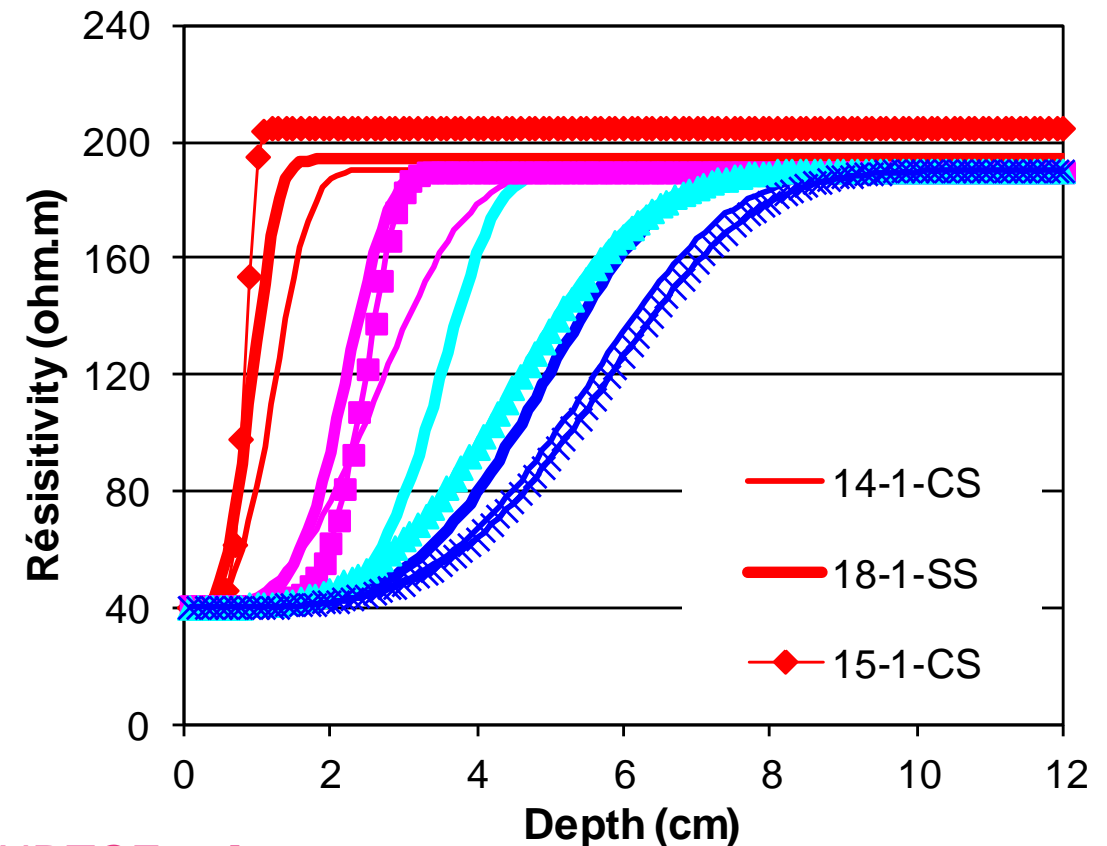


RC slab with stainless steel

➤ Thick lines

2 RC slabs with HA carbon steel

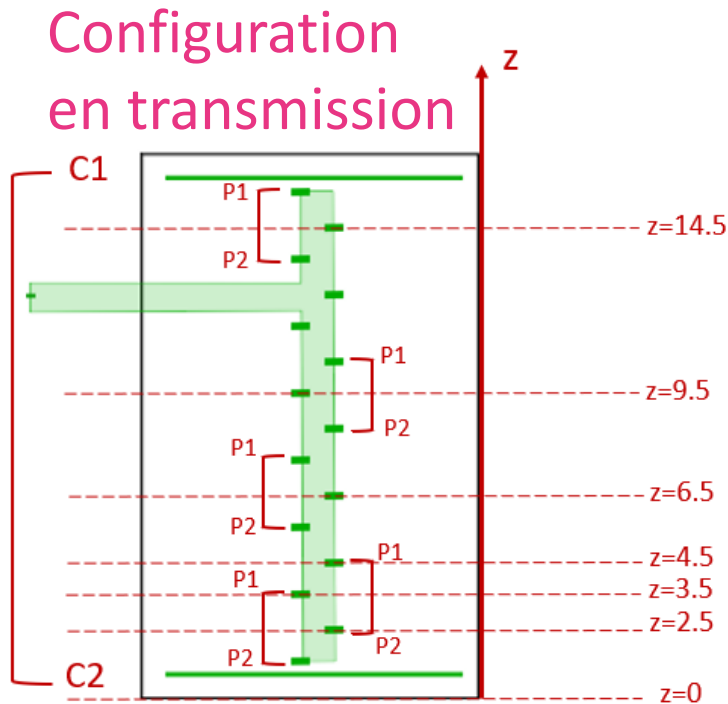
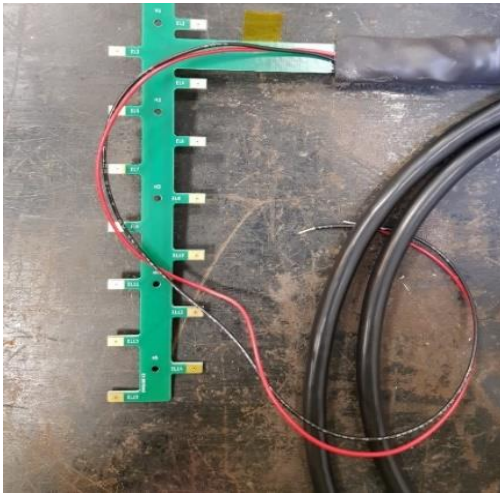
➤ Thin lines with marks



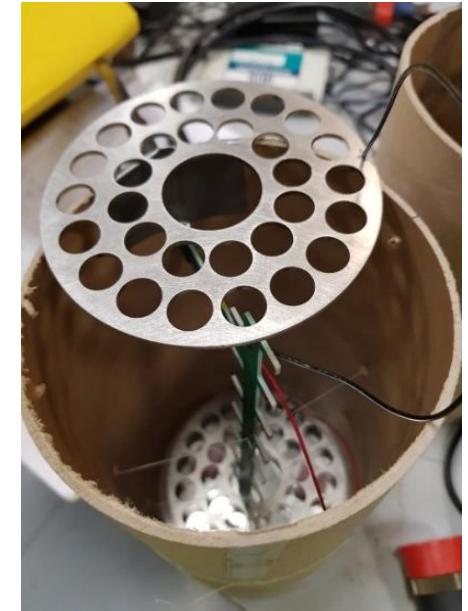
4 – Mesure de la résistivité électrique par des capteurs noyés : Développement du capteur echelle en circuit imprimé

- Projet de recherche entre l'Univ Eiffel, le LMDC et l'ANDRA
- Mesure de profils de résistivité sur toute l'épaisseur d'une structure épaisse
- Résolution centimétrique et précision
- Cout de fabrication réduit, géométrie (longueur) adaptable

Capteur à 15 électrodes
[Badr et al., 2019]



[Eid et al., 2025]



En configuration Transmission, Fargier et Badr mq zone d'investigation entre P1 et P2

➔ $\rho_{app} \approx \rho_{vraie} = \rho$ [Badr, 2019]

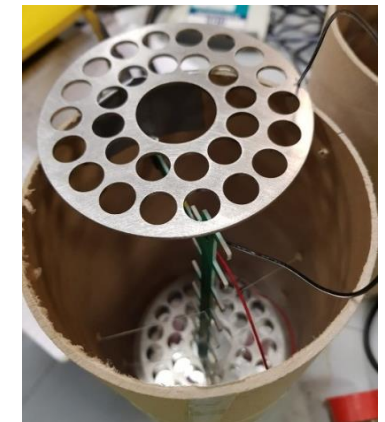
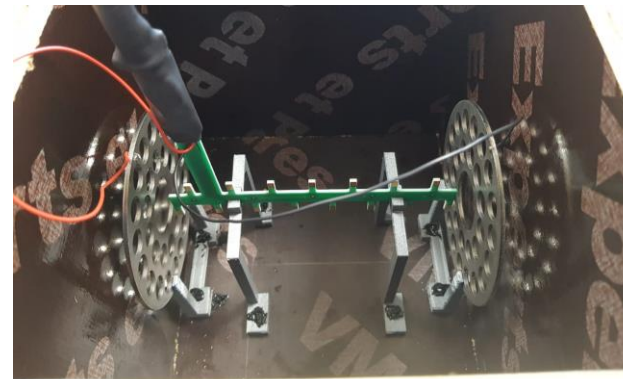
4.3 – Exemple de résultats du projet ANR-DEMCOM

- Projet de recherche Nantes Univ-Univ Eiffel et Bouygues piloté par S. Bonnet
- Suivre l'évolution des gradients de teneurs en eau et en chlorures par des capteurs noyés de résistivité électrique
- Extraction des paramètres de transport = entrées des modèles de durabilité

Phénomènes étudiés

- Séchage des 3 bétons
- Diffusion des chlorures des 3 bétons en conditions saturées
- **Imbibition d'eau douce et d'eau salée dans des bétons non saturés**
- Imbibition et séchage lors de cycles de marnage de blocs instrumentés

Capteur noyé de résistivité à 15 électrodes [Badr et al., 2019]



$$\rho_{app} \simeq \rho = G \frac{\Delta V}{I} \quad (\Omega.m)$$

Modélisation 3D et calculs de G sur Comsol Multiphysics
[Palma Lopes, Eid et al., 2023]

3.3 – Exemple de résultats du projet ANR-DEMCOM

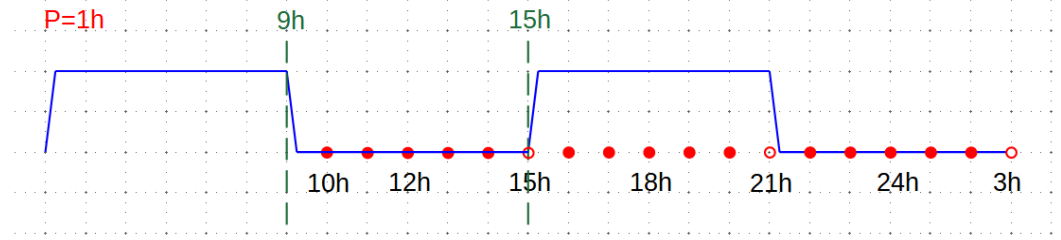
Imbibition d'eau douce et eau salée : $SI(z)$ et $[Cl^-](z)$ de l'éprouvette C70-30_M2 [Eid et al., 2023]

- Suivi de $\rho(z,t)$ lors du séchage, de l'imbibition et du marnage par capteurs noyés
- Effet du laitier sur $\rho(z,t)$
- Conversion en profils hydriques et ioniques / Calibration pour chaque béton C100-0, C70-30 et C50-50
 - Suivi de $SI(z)$ lors du séchage et l'imbibition d'eau douce
 - Suivi de $[Cl^-](z)$ pendant l'imbibition d'eau salée.
- Estimation des propriétés de transport pour les 3 bétons [Eid et al., 2025]
 - $SI(z) \rightarrow K_I \quad 10^{-19} \text{ m}^2 < K_I < 10^{-21} \text{ m}^2$
 - $[Cl^-](z) \rightarrow D_{eff} \quad D_{eff} \approx 10^{-10} \text{ m}^2/\text{s}$

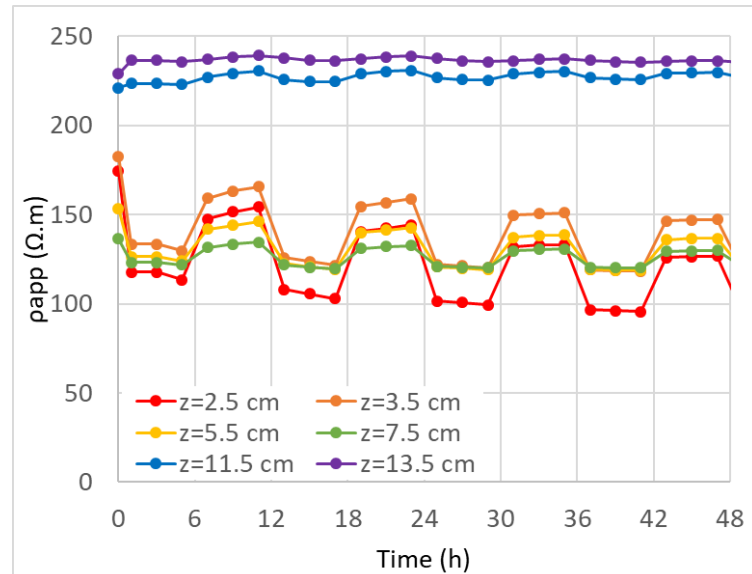
3.3 – Exemple de résultats du projet ANR-DEMCOM

[Eid et al., 2025]

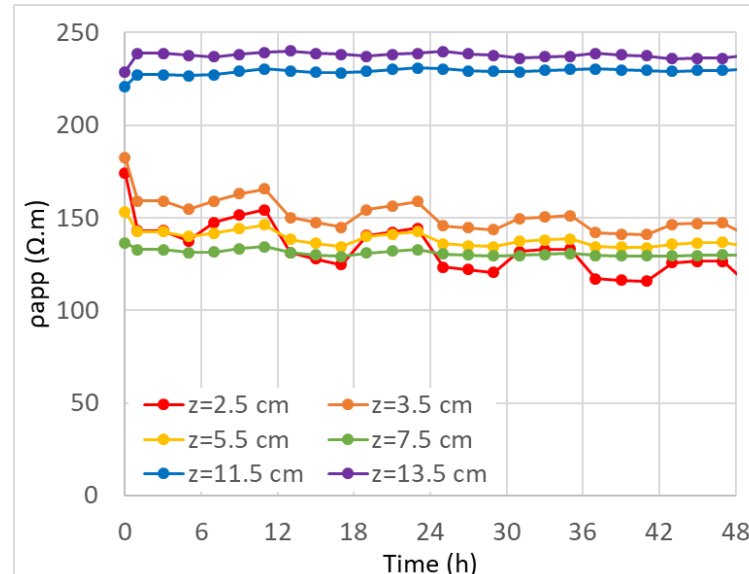
- Bassin de marnage : 1m de large, 4m de long et 2m de profondeur
- Bassin situé à l'IUT de Saint Nazaire
- Marnage avec eau salée [NaCl]=35 g/L



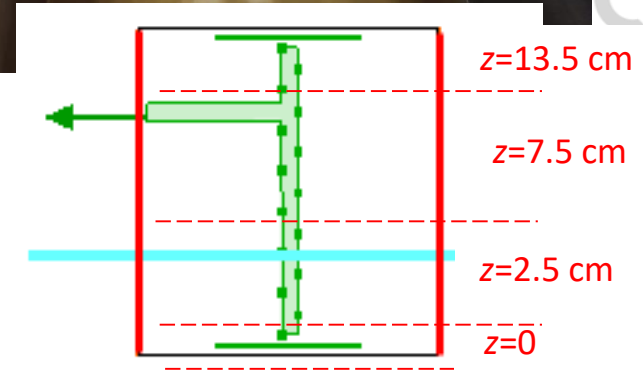
- Evolution de ρ_{app} à court terme phase I : C100-0 / Config. 1 [Palma Lopes et al. 23]



G non corrigé à MH



G corrigé à MH



4 – Cellule cylindrique de calibration sur carottes Ø75x70 mm

Saturation des
carottes $\phi 75 \times 70$
(0, 35 et 90 g/L)

$S_i = 100\%$
Mesure ρ

Séchage 50°C

$S_i = 75\%$
Mesure ρ

Séchage 50°C

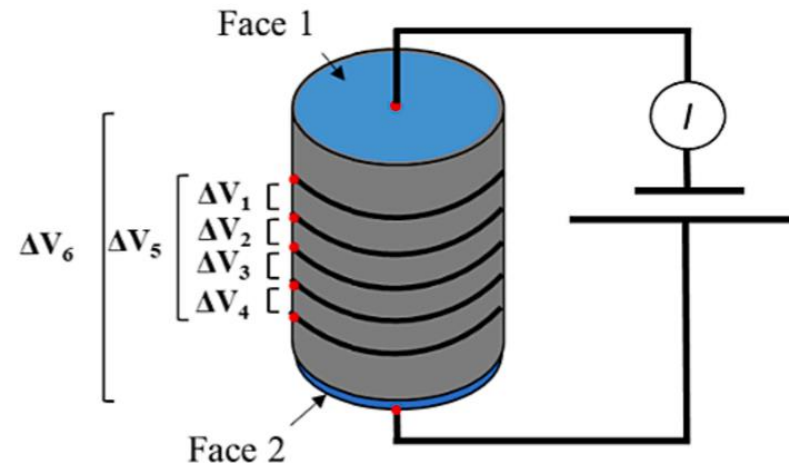
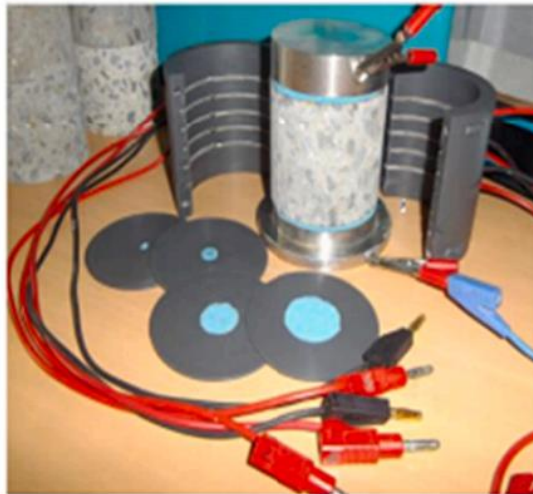
$S_i = 50\%$
Mesure ρ

Séchage 105°C

S_i vraie

[Villain et al., 2018,
Fares et al., 2018]

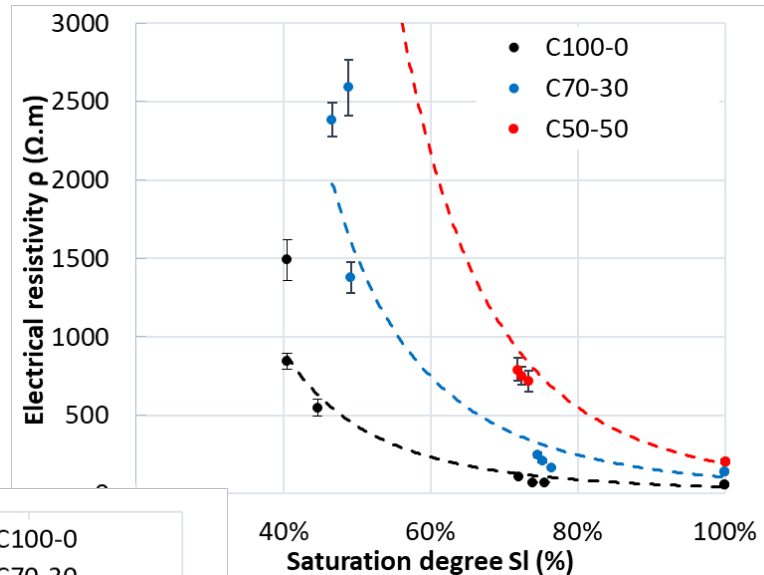
Concentration réelle
en chlorures par ED



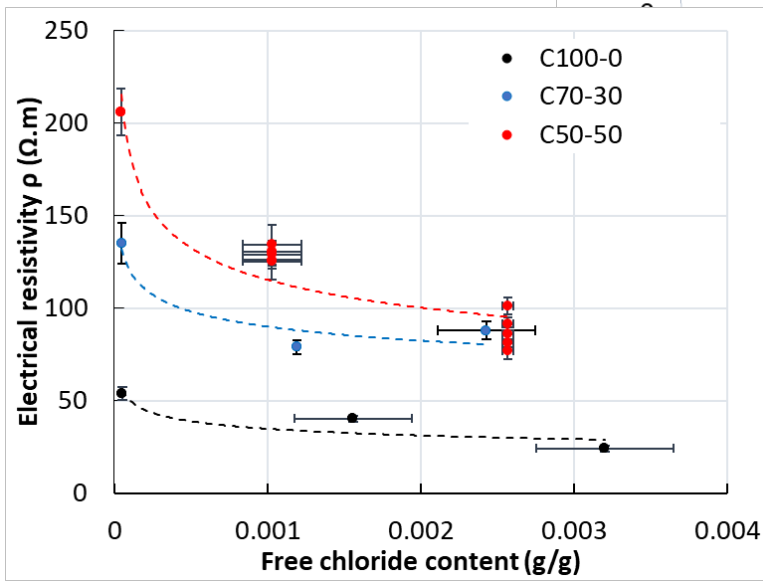
Cellule de résistivité [Du Plooy et al., 2013]

4.2 – Exemple de résultats : projet ANR-DEMCOM + thèse K. El Achrafi

Courbes de calibration
 $\rho(S_I)$ [NaCl] = 0 g/L



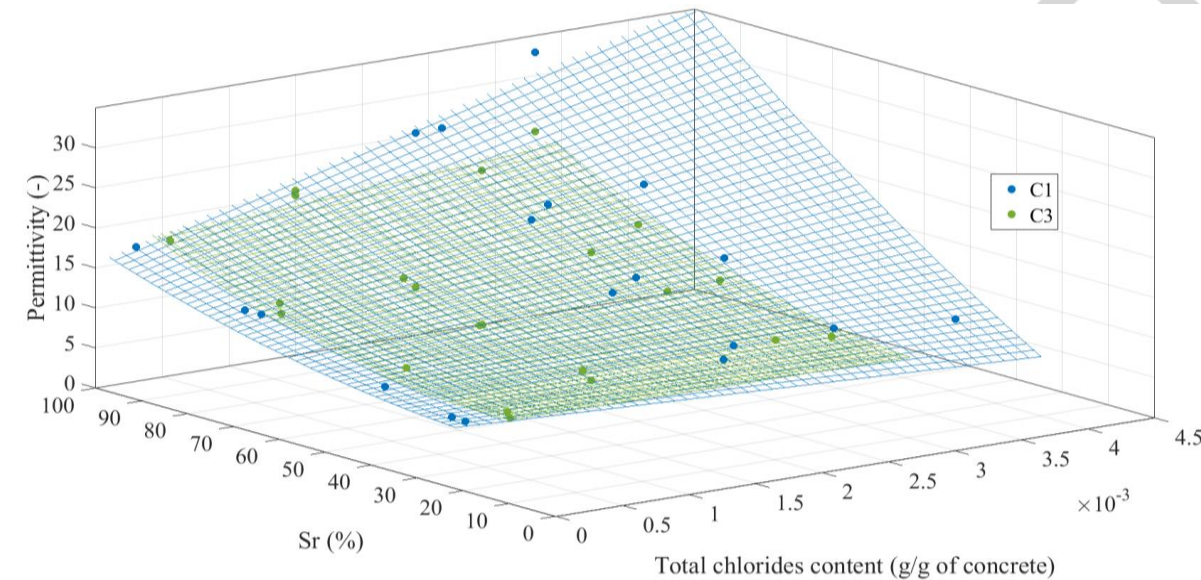
Courbes de calibration
 $\rho([Cl^-])$ $S_I = 100\%$



[Eid et al., 2025]

[El Achrafi et al., 2024]

Surfaces de calibration
 $\rho(S_I, [Cl^-])$



5 – Conclusions et perspectives

- Mesures de la résistivité apparente en surface
- Dispositifs multi-électrodes permettant d'ausculter en profondeur
- ERT inversion pour déterminer les résistivités "varies" en fonction de la hauteur → **Profils de ρ**
- Influence des armatures en acier sur les résistivités apparentes
 - Présence des **armatures passives, passivées corrigées** lors de l'inversion
- Courbes/Surfaces de calibration nécessaires pour
 - Conversion des profils de ρ en **profils de S ou de $[Cl^-]$**
- Variations de S et $[Cl^-]$ concomitantes : profils de S ou de $[Cl^-]$ à séparer
 - Soit 2 phénomènes étudiés séparément sur une même éprouvette,
 - Soit **combinaison des mesures** : dans le projet ANR-SCaNING développement d'échelles de permittivité, sensible à S et $[Cl^-]$...
- Besoin des **modèles de durabilité pour extraire les coefficients de transport**

5 – Références bibliographiques des diapos

- Fares, M., Villain, G., Bonnet, S., Lopes, S. P., Thauvin, B., & Thiery, M. (2018). Determining chloride content profiles in concrete using an electrical resistivity tomography device. *Cement and concrete composites*, 94, 315-326. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.08.001>.
- Alhajj, M. A., Bourguignon, S., Palma-Lopes, S., & Villain, G. (2021). Joint inversion of electromagnetic measurements for the determination of water saturation profiles in concrete structures. *Cement and Concrete Research*, 147, 106500. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2021.106500>.
- Fargier, Y., Villain, G., Lopes, S. P., & Fares, M. (2021). Optimized retrieval of 1D-resistivity profiles in cover concrete by electrical sounding measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 193, 104413. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2021.104413>.
- Loke, M. H. (2000). *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys. RES2DINV Manual*. IRIS Instruments.
- Badr, Joanna, Yannick Fargier, Sérgio Palma-Lopes, Fabrice Deby, Jean-Paul Balayssac, Sylvie Delepine-Lesoille, Louis-Marie Cottineau and Géraldine Villain 2019. "Design and validation of a multi-electrode embedded sensor to monitor resistivity profiles over depth in concrete." *Construction and Building Materials* 223:310–321.
- S. Palma Lopes, M-A. Eid, H. Ibrahim, G. Villain, S. Bonnet, Estimation de facteurs géométriques pour des mesures de résistivité avec des géométries de complexité croissante dans le béton. *Academic Journal of Civil Engineering*, 2023, *Diagnobéton 2023*, special issue, 41 (4), pp.194-201. [10.26168/ajce.41.4.23](https://doi.org/10.26168/ajce.41.4.23) [hal-04283263v1](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-04283263v1)
- Eid, Marie-Ange, Nicolas Reuge, Géraldine Villain, Stéphanie Bonnet and Sérgio Palma Lopes 2025. "Monitoring of drying and imbibition of concrete using embedded resistivity sensors for the estimation of permeability." *Cement and Concrete Composites* 157, 105900. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105900>
- Villain, G., Garnier, V., Sbartai, Z. M., Derobert, X., & Balayssac, J. P. (2018). Development of a calibration methodology to improve the on-site non-destructive evaluation of concrete durability indicators. *Materials and structures*, 51, 1-14. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1165-4>.
- El Achrafi, M. K., Villain, G., & Bonnet, S. (2024). Surface calibration of electromagnetic properties to simultaneously consider water and chloride contents in concrete both with and without slag. *Construction and Building Materials*, 417, 135176. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135176>.

Thank you for your attention
See you next year in Nantes...

ANR-DEMCOM Journée de restitution

le 30 septembre 2025

Nantes Université, IUT de Saint Nazaire

ANR-SCaNING Journée de restitution

le 20 novembre 2025

Univ Eiffel, Campus de Nantes-Bouguenais

Géraldine Villain

geraldine.villain@univ-eiffel.fr

Sergio Palma Lopes

sergio.palma-lopes@univ-eiffel.fr

Stéphanie Bonnet

stephanie.bonnet@univ-nantes.fr