

Post-doctoral project

Assessment of the applicability of a ladder-shaped resistivity sensor to monitor the water saturation degree of the filling material in the annular space of high-level radioactive waste disposal cells, in the presence of the steel liner and under the effect of temperature

Host laboratory: Université Gustave Eiffel, Nantes campus (44340 Bouguenais), MAST-LAMES and GERS-GeoEND teams

Duration and start-up: 15 months, start-up between December 2024 and January 2025

Project managers: Géraldine Villain (geraldine.villain@univ-eiffel.fr) and Sérgio Palma Lopes (sergio.palma-lopes@univ-eiffel.fr)

Scientific Steering Committee: Béatrice Yven (beatrice.yven@andra.fr), Xavier Bourbon (xavier.bourbon@andra.fr), Géraldine Villain and Sérgio Palma Lopes

Funding: Collaboration agreement between Andra and Université G. Eiffel

Background and objective of the post-doctoral project

Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) has been developing the Cigéo project for over 25 years. Cigéo is the French deep geological disposal project for long-lived high-level and intermediate-level radioactive waste (HLW and IL-LLW) produced by all current nuclear facilities and by the reprocessing of spent fuel used in French nuclear power plants (<https://www.andra.fr/cigeo>). Among the various types of disposal structures, 100 to 150 m long cells will be dug into the host-rock to house HL waste packages. These packages will be inserted inside a cylindrical steel liner 80 cm in diameter. The annular space between the liner and the host-rock (approximately 8 cm thick) will be filled with a cementitious grout, abbreviated 'MREA' (annular space filling material). During the operating period, maintaining the MREA in a constant state of water saturation, homogeneous and as close as possible to 100%, is an essential condition for ensuring that the liner remains functional in the context of reversibility. This implies to acquire the means and methods to monitor the water saturation level of the MREA with devices compatible with the chemical and thermal conditions. In a previous collaboration (Andra, Université Gustave Eiffel, INSA Toulouse, Cerema), a ladder-shaped embedded resistivity sensor was developed to monitor the hydric state throughout the thickness of concrete structures dedicated to the disposal of MAVL radioactive waste (Badr, 2019; Badr et al., 2019). The aim of the present project is to study the applicability of this technology to monitor the water saturation degree of the MREA intended for HLW cells, in the presence of a passivated steel liner and in the temperature range of the operating conditions (20°C to 80°C).

Post-doctoral project programme

After a short period of familiarisation with the knowledge acquired prior to the project and training on the (experimental and digital) laboratory tools available, the post-doc's project will be broken down into 4 main tasks:

[1.] Study of the sensitivity of the electrical resistivity sensor to the water saturation level of the MREA.

The aim of this first step is to quantify the sensitivity of the technique to the water saturation degree S , in the range $50\% < S < 100\%$. Two MREA formulations will be studied. Test specimens will be cast, instrumented with embedded sensors and conditioned to different saturation degrees. Resistivity measurements will be carried out in order to establish conversion laws (Villain et al., 2018) between saturation degree and electrical resistivity. This step will be carried out on small cylindrical specimens, mainly at room temperature (20°C).

2. Study of the influence of temperature on electrical resistivity measurements by sensors embedded in MREA.

Several previous works have shown the influence of temperature on resistivity measurements by embedded sensors (Badr et al., 2022), in agreement with literature for other sensors. The goal of this task is to study the influence of temperature ($20^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C}$) on resistivity measurements by ladder-shape sensors and to establish the correction functions for the two cementitious grout formulations studied in this project, and on the same cylindrical specimens as previously. At the end of the study, the reliability of the embedded sensor at high temperature ($50^{\circ}\text{C} < T < 80^{\circ}\text{C}$) will be tested.

3. Study of the influence of the steel liner on resistivity measurements by embedded sensors.

The aim of this third step is to evaluate the influence of the presence of a steel liner on the sensor response and to quantify the deterioration of its sensitivity to the saturation degree, when the embedded sensor is close to a significant steel volume. The tests will be carried out for the two MREA formulations, in 2/5 scale test samples, fitted with either a steel liner (conductive) or an insulating liner. Various saturation degrees will be imposed on the test samples. A numerical study of the electrical potential distribution in the MREA to assess the influence of the presence of the steel liner will be carried out on Comsol Multiphysics (Alhaji et al., 2019). The comparison between numerical and experimental results will contribute to the interpretation.

4. Testing the conditions under which sensors are used on site.

The aim here is to install embedded resistivity sensors on a Cigéo project demonstrator in the underground research laboratory, validate their operation and assess their viability for long-term monitoring. Implementation of this stage, the technical design of which must be anticipated, will be subject to a decision by the partners, based on the conclusions of the three previous steps.

Requirements and desired profile

- PhD in engineering sciences, civil engineering or equivalent
- Theoretical and practical knowledge of non-destructive evaluation methods (in particular resistive methods), and of cementitious materials
- Interest in experimental work, organisational skills, rigour, ability to summarise, teamwork skills, oral and written communication skills, scientific and technical English.

References

- Alhaji M. A., Palma Lopes S., Villain G. (2019), Accounting for steel rebar effect on resistivity profiles in view of reinforced concrete structure survey, *Construction and Building Materials*, Vol. 223, 898-909, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.208>
- Badr J. (2019), Conception et validation d'un capteur noyé de résistivité électrique en vue du suivi des profils de teneur en eau dans les bétons, thèse de l'Univ. de Toulouse, 237p, <https://theses.hal.science/tel-02735810>
- Badr J., Fargier Y., Palma Lopes S., Deby F., Balayssac J. P., Delepine-Lesoille S., Cottineau L. M., Villain G. (2019), Design and validation of a multi-electrode embedded sensor to monitor resistivity profiles over depth in concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 223, 310-321, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.226>
- Badr, J., Mahfoud, E., Villain, G.; Balayssac, J.-P.; Palma, Lopes, S.; Fargier, Y.; Yven, B., (2022) Temperature Effect on Electrical Resistivity Measurement Using an Embedded Sensor to Estimate Concrete Water Content. *Appl. Sci.* 2022, 12, 9420. <https://doi.org/10.3390/app12199420>
- 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(2), 40. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1165-4>

Projet post-doctoral

Analyse de l'applicabilité du capteur « échelle » de résistivité pour le suivi du degré de saturation du matériau de remplissage de l'espace annulaire des alvéoles de stockage des déchets haute-activité en présence du chemisage en acier et sous l'effet de la température

Laboratoire d'accueil : Université Gustave Eiffel, campus de Nantes (44340 Bouguenais), équipes MAST-LAMES et GERS-GeoEND

Durée et démarrage : 15 mois, démarrage entre décembre 2024 et janvier 2025

Responsables de projet : Géraldine Villain (geraldine.villain@univ-eiffel.fr) et Sérgio Palma Lopes (sergio.palma-lopes@univ-eiffel.fr)

Comité de suivi scientifique : Béatrice Yven (beatrice.yven@andra.fr), Xavier Bourbon (xavier.bourbon@andra.fr), Géraldine Villain et Sérgio Palma Lopes

Financement : convention de collaboration entre l'Andra et l'Université G. Eiffel

Contexte et objectif du projet de post-doc

L'Andra (Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs) développe depuis plus de 25 ans le projet Cigéo, qui est le projet français de centre de stockage profond de déchets radioactifs de haute et moyenne activité-vie longue (HA et MA-VL) produits par l'ensemble des installations nucléaires actuelles et par le traitement des combustibles usés utilisés dans les centrales nucléaires françaises (<https://www.andra.fr/cigeo>). Parmi les différents types de stockage, des alvéoles de 100 à 150 m de long, creusés dans la roche, doivent accueillir des colis de déchets HA. Ces colis seront glissés à l'intérieur d'un chemisage cylindrique en acier de 80 cm de diamètre. L'espace annulaire entre le chemisage et la roche (environ 8 cm d'épaisseur) sera rempli par un matériau cimentaire dit « MREA » (matériau de remplissage de l'espace annulaire). Au cours de l'exploitation, le maintien du MREA dans un état de saturation constant, homogène et proche de 100%, est une condition essentielle pour assurer le maintien des fonctions du chemisage dans le cadre de la réversibilité. Ceci implique pour l'Andra de se doter de moyens permettant le suivi du taux de saturation du MREA avec des dispositifs compatibles avec les conditions chimiques et thermiques. Lors d'une précédente collaboration (Andra, Université Gustave Eiffel, INSA Toulouse, Cerema), un capteur de résistivité noyé de forme « échelle » a été développé pour suivre l'état hydrique sur toute l'épaisseur d'ouvrages en béton dédiés au stockage de déchets radioactifs MAVL (Badr 2019 ; Badr et al., 2019). L'objectif de ce projet est d'étudier l'applicabilité de cette technologie au suivi du taux de saturation du MREA destiné aux alvéoles HA, en présence du chemisage en acier passivé et dans la gamme de températures d'exploitation des colis (20-80°C).

Programme du projet post-doctoral

Après une courte période d'appropriation des connaissances antérieures au projet et de prise en main des outils de laboratoire mis à disposition (expérimentaux et numériques), le projet de post-doc sera décliné en 4 tâches principales :

1. Etude de la sensibilité du capteur de résistivité électrique au degré de saturation du MREA.

Cette première étape vise à quantifier la sensibilité de la technique au taux de saturation S du MREA, dans la gamme $50\% < S < 100\%$. Deux formulations de MREA seront étudiées. Des éprouvettes seront coulées, instrumentées avec des capteurs noyés et conditionnées à différents taux de saturation. Des mesures de résistivité seront réalisées afin d'établir des lois de conversion (Villain et al. 2018) entre le taux de saturation et la résistivité électrique. Cette étape sera menée sur des éprouvettes cylindriques de petite taille, et principalement à température ambiante (20°C).

2. Etude de l'influence de la température sur les mesures de résistivité électrique par capteurs noyés dans les MREA.

Plusieurs travaux antérieurs ont montré l'influence de la température sur les mesures de résistivité par capteurs noyés (Badr et al. 2022), en accord avec les résultats de la littérature pour d'autres capteurs. L'objectif de cette tâche est d'étudier l'influence de la température ($20^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C}$) sur les mesures de résistivité par capteurs « échelle » et d'établir les fonctions de correction pour les deux formulations de MREA étudiées dans ce projet, et sur les mêmes éprouvettes cylindriques que précédemment. En fin d'étude, la fiabilité du capteur noyé à température élevée ($50^{\circ}\text{C} < T < 80^{\circ}\text{C}$) sera testée.

3. Etude de l'influence du chemisage en acier sur les mesures de résistivité par capteurs noyés.

L'objectif de cette étape est d'évaluer la perturbation de la réponse du capteur et à quantifier la dégradation de sa sensibilité au taux de saturation, lorsqu'il est noyé dans le MREA en présence d'un chemisage en acier. Les essais seront menés pour les deux formulations de MREA, dans des corps d'épreuve à l'échelle 2/5, équipés soit d'un chemisage acier (conducteur) soit d'un chemisage électriquement isolant. Plusieurs taux de saturation seront imposés aux corps d'épreuve. Une étude numérique de la distribution de potentiel électrique dans le MREA en présence du chemisage acier sera réalisée sur Comsol Multiphysics (Alhaji et al., 2019). La comparaison entre résultats numériques et expérimentaux contribuera à l'interprétation.

4. Test de conditions de mises en œuvre des capteurs sur site

L'objectif est ici d'implanter des capteurs de résistivité noyés sur un démonstrateur du projet Cigéo au laboratoire souterrain de recherche, de valider leur fonctionnement et d'estimer leur viabilité pour un monitoring sur le long terme. La mise en œuvre de cette étape, dont la conception technique doit être anticipée, sera soumise à une décision des partenaires, au regard des conclusions des étapes précédentes.

Pré-requis et profil souhaité

- Doctorat en sciences de l'ingénieur, génie civil, ou équivalent
- Connaissances théoriques et pratiques sur les méthodes d'évaluation non destructive (en particulier sur les méthodes résistives), ainsi que sur les matériaux cimentaires
- Attrait pour le travail expérimental, capacité d'organisation, rigueur, esprit de synthèse, aptitudes au travail d'équipe, à la communication orale et écrite, anglais scientifique et technique.

Références

- Alhaji M. A., Palma Lopes S., Villain G. (2019), Accounting for steel rebar effect on resistivity profiles in view of reinforced concrete structure survey, *Construction and Building Materials*, Vol. 223, 898-909, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.208>
- Badr J. (2019), Conception et validation d'un capteur noyé de résistivité électrique en vue du suivi des profils de teneur en eau dans les bétons, thèse de l'Univ. de Toulouse, 237p, <https://theses.hal.science/tel-02735810>
- Badr J., Fargier Y., Palma Lopes S., Deby F., Balayssac J. P., Delepine-Lesoille S., Cottineau L. M., Villain G. (2019), Design and validation of a multi-electrode embedded sensor to monitor resistivity profiles over depth in concrete, *Construction and Building Materials*, Vol. 223, 310-321, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.226>
- Badr, J., Mahfoud, E., Villain, G.; Balayssac, J.-P.; Palma, Lopes, S.; Fargier, Y.; Yven, B., (2022) Temperature Effect on Electrical Resistivity Measurement Using an Embedded Sensor to Estimate Concrete Water Content. *Appl. Sci.* 2022, 12, 9420. <https://doi.org/10.3390/app12199420>
- 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(2), 40. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1165-4>