



HAL
open science

Maquette instrumentée et systèmes de pilotage et communication pour le monitoring de durabilité du béton armé

Géraldine Villain, Narintsoa Ranaivomanana, Quentin Bossard, Jean-Philippe Garros, Thibaud Devie, Olivier Durand, Denis Vautrin, Laurent Lemarchand, Jean-Luc Manceau, Vincent Le Cam

► To cite this version:

Géraldine Villain, Narintsoa Ranaivomanana, Quentin Bossard, Jean-Philippe Garros, Thibaud Devie, et al.. Maquette instrumentée et systèmes de pilotage et communication pour le monitoring de durabilité du béton armé. *Diagnobéton*, 2023, Nantes, France. pp.159-168, 10.26168/ajce.41.4.19 . hal-04276921

HAL Id: hal-04276921

<https://univ-eiffel.hal.science/hal-04276921>

Submitted on 9 Nov 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0 International License

Maquette instrumentée et systèmes de pilotage et communication pour le monitoring de durabilité du béton armé

Géraldine Villain¹, Narintsoa Ranaivomanana², Quentin Bossard¹, Jean-Philippe Garros¹, Thibaud Devie³, Olivier Durand³, Denis Vautrin⁴, Laurent Lemarchand⁵, Jean-Luc Manceau⁵, Vincent Le Cam⁵

¹ Univ Gustave Eiffel, MAST-LAMES, Campus de Nantes, F-44344 Bouguenais, France

² Université Paul Sabatier, LMDC, 133c Avenue de Rangueil, F-31077 Toulouse cedex 04, France

³ Univ Gustave Eiffel, GERS-GEOEND, Campus de Nantes, F-44344 Bouguenais, France

⁴ EDF R&D, PRISME, 6 quai Watier, F-78400 Chatou, France

⁵ Univ Gustave Eiffel, COSYS-SII, Campus de Nantes, F-44344 Bouguenais, France

RESUME : Les travaux menés dans le cadre du projet ANR-SCaNING visent à développer des capteurs noyés dans le béton afin de suivre l'évolution d'indicateurs de durabilité du béton dans le temps. En effet, pour évaluer les indicateurs avec précision, il est nécessaire de combiner des mesures ultrasonores, résistives et électromagnétiques, ce qui implique une organisation complexe dans la structure et des systèmes de pilotage différents. L'objectif de cet article n'est pas de décrire les capteurs mais de présenter l'architecture de la maquette en béton armé instrumentée et pilotée à distance en justifiant les choix par rapport aux besoins de l'évaluation non destructive des indicateurs de performance du matériau (résistance et porosité) et des profils de suivi de l'état du béton notamment de teneur en eau. Tout d'abord, la maquette est dimensionnée et chaque type de capteur positionné. Ensuite, les systèmes de génération, pilotage des mesures et communication avec le serveur de contrôle sont détaillés. Enfin, les recommandations des projets de recherche précédents relatives à l'évaluation non destructive des indicateurs de durabilité du béton ouvriront vers une discussion sur les besoins spécifiques du suivi en continu de ces indicateurs pour les structures en béton armé.

Mots-clefs : durabilité du béton, capteurs noyés, monitoring, Evaluation Non Destructive, SHM

Key-words: concrete durability, embedded sensors, monitoring, Non Destructive Evaluation, SHM

I. INTRODUCTION

Le projet ANR-SCaNING vise au suivi en continu d'indicateurs de performance et d'état du béton de structures en béton armé, au moyen de capteurs noyés à différentes profondeurs. Les indicateurs choisis sont la résistance à la compression, le module d'Young, la porosité et le degré de saturation. Pour les auscultations non destructives en surface, il a été démontré qu'une combinaison d'observables complémentaires issues de mesures non destructives ultrasonores, électromagnétiques et électriques permettait d'évaluer ces indicateurs avec une incertitude réduite [Soshiroda et al. 2006, Breysse, 2012, Sbartaï et al. 2012, Balayssac et al. 2018]. En effet, les mesures ultrasonores sont plus sensibles aux propriétés mécaniques des béton tandis que les mesures

électromagnétiques et électriques sont plus sensibles à la teneur en eau. Il s'agit dans ce projet de combiner ces mesures pour obtenir les profils des indicateurs de la surface jusqu'au cœur de la structure en béton. Outre le développement des capteurs et leur positionnement à la même profondeur, il est nécessaire de développer des chaînes de mesures spécifiques pour chaque type de capteurs, de les doter d'une même référence temporelle pour pouvoir les combiner. En effet, même si les évolutions des propriétés mécaniques et des indicateurs de durabilité du béton sont lentes, les mesures sont influencées par la température du matériau qui varie de manière plus rapide (cycles jour-nuit, gradient en profondeur).

L'objectif de cet article est donc de présenter le démonstrateur qui a été conçu et construit : il comporte la structure en béton armé, instrumentée par des systèmes ultrasonores, électromagnétiques et électriques mais aussi des capteurs thermohygrométriques, les chaînes de mesure, d'alimentation, de génération de signal et de pilotage mais aussi de communication et de stockage sur un serveur national.

Tout d'abord, sont présentés les corps d'épreuve. En effet, la fabrication d'une maquette complète en béton armé est très complexe donc très coûteuse en matériaux, capteurs et systèmes de monitoring. C'est pourquoi, une seule maquette de grande taille (1m × 1m × 0.3m) a été coulée en béton B40¹. Des blocs instrumentés de plus petites dimensions (0.3m × 0.3m × 0.3m) avec un plus petit nombre de capteurs ont été fabriqués avec les bétons B30, B40 et B60. Ensuite, les différentes chaînes de mesure sont détaillées avant de conclure sur les apports de ce travail.

II. MAQUETTE ET BLOCS EN BETON ARME

II.1. Formulation des bétons

Trois formulations de béton sont étudiées dans le projet afin de pouvoir faire varier la résistance à la compression, le module d'Young et la porosité des matériaux. Ils sont nommés B30, B40 et B60. Le béton B60 est la formulation étudiée par l'Andra [Badr et al. 2019]. Les formules B40 et B30 sont des formules pour lesquelles on a ajouté de l'eau donc augmenté le rapport eau sur ciment afin d'élargir la gamme d'étude des porosités et résistances mécaniques.

La composition des bétons est présentée dans le tableau 1. Leurs caractéristiques mécaniques et propriétés de durabilité sont données dans le tableau 2.

TABLEAU 1. Formulation des bétons

Constituants (kg/m ³)	B30	B40	B60
Sable, 0-4 mm (Boulonnais)	985	890	858
Gravillons, 4-12 mm (Boulonnais)	985	984	945
CEM I 52,5 N – Val d'Azergues (Lafarge)	280	350	400
Superplastifiant MasterGlenium sky 537	0	0	3
Eau efficace	207	206	171
Rapport eau sur ciment E/C	0.74	0.589	0.428

¹Au niveau de l'appellation des bétons, B40 signifie que la résistance moyenne en compression à 28j du béton exprimée en MPa de l'ordre de 40 MPa. Il en est de même pour B30 et B60.

TABLEAU 2. Caractérisation des bétons constitutifs des corps d'épreuve

	B30	B40	B60
Résistance à la compression à 28 jours (MPa) des blocs	34.35 ± 0.47	47.61 ± 3.27	64.22 ± 3.36
Résistance à la compression à 28 j (MPa) de la dalle BA	-	46.90 ± 1.07	-
Module d'Young à 28 jours (GPa) des blocs	35.72 ± 0.40	39.25 ± 0.05	43.28 ± 0.69
Module d'Young à 28 jours (GPa) de la dalle BA	-	37.32 ± 0.27	-
Porosité accessible à l'eau à 28 jours (%) des blocs	16.2 ± 0.2	15.2 ± 0.2	12.8 ± 0.2
Porosité accessible à l'eau à 28 jours (%) de la dalle BA	-	15.6 ± 0.1	-

II.2. Instrumentation des corps d'épreuve

Des blocs cubiques de 30 × 30 × 30 cm instrumentés ou non, non armés, des éprouvettes de caractérisation de Ø11 × 22 cm et la dalle en béton armé de 100 × 100 × 30 cm ont été coulés au LMDC.

Blocs : Deux blocs de 30 × 30 × 30 cm par béton ont été instrumentés : le 1^{er} par une échelle de résistivité et deux paires de capteurs ultrasonores, le 2nd par une échelle capacitive et deux paires de capteurs ultrasonores. En effet, les capteurs électromagnétiques (résistifs et capacitifs) sont plus sensibles à la teneur en eau et les capteurs ultrasonores, mettant en jeu des ondes mécaniques, sont plus sensibles aux propriétés mécaniques (Rc et E) et à la porosité. L'objectif est de tester les combinaisons de méthodes END 2 à 2 sur l'ensemble des 3 formulations en vue de déterminer les indicateurs recherchés. Notons que les différentes courbes de calibration par formulation doivent être établies pour convertir les observables en indicateurs.

Ces blocs sont aussi utiles à la détermination des fonctions de correction en température qui pourront être appliquées in situ sur chaque type de mesure [Hariri et al, 2023, Ibrahim et al. 2023].

Ils ont été coulés en février 2023.

Dalle en B40 : La dalle de 100 × 100 × 30 cm est armée par des armatures en acier HA12, la cage comprenant un double lit d'armature constitué de 9 mailles de 30 × 30 cm². En mars 2023, elle a été coulée verticalement au LMDC en utilisant 5 gâchées successives dont la reproductibilité a été contrôlée par des tests au cône d'Abrams sur béton frais (16, 18, 18, 18, 18 cm). Selon le plan schématique de la figure 1.a :

- les 3 mailles du bas sont instrumentées avec un système de capteurs indépendants par maille (US, rési et capa),
- les 3 mailles centrales ne sont pas instrumentées afin de pouvoir réaliser des mesures d'auscultation de surface,
- les 3 mailles du haut sont instrumentées par l'ensemble des 3 systèmes (US, rési et capa) pour la 1^e, les sondes T/FDR pour la 2^e et la 3^e, les sondes THR pour la 3^e et la zone d'enrobage.

Les systèmes THR (thermo hygrométriques) et T/FDR (Time/Frequency Domain Reflexometry) sont d'autres moyens de mesure des gradients de teneur en eau si la dalle sera soumise au séchage.

L'objectif est de combiner les mesures (US, rési et capa) sur le même volume de béton (même maille) tout en vérifiant que les capteurs et leurs supports ne créent pas des biais indésirables, en comparant les gradients obtenus par les systèmes de capteurs indépendants et par les 3 systèmes situés dans la même maille.

Enfin, les éprouvettes cylindriques $\varnothing 11 \times 22$ cm ont été utilisées pour la caractérisation mécanique des différentes gâchées et formulations dont les résultats sont présentés dans le tableau 2. Les blocs non instrumentés seront carottés et sont destinés à différents types de calibration pour établir les fonctions de conversion des observables END en indicateurs recherchés.

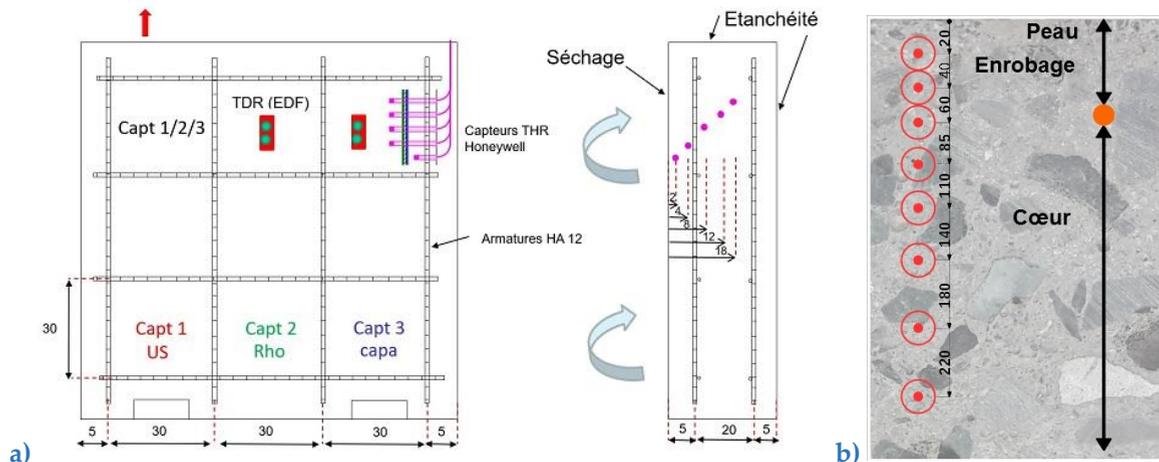


FIGURE 1. Implantation des différents systèmes de capteurs dans la dalle B40 en béton armé - a) Schéma d'ensemble - b) Hauteurs centrales moyennes choisies pour l'ensemble des systèmes

II.3. Conditions de cure puis de séchage à 20°C

Après le coulage, les corps d'épreuve ont été protégés pas des chiffons humides jusqu'au démoulage à l'âge de 48 heures. Les blocs et la dalle était emballés par du film plastique alimentaire et 2 couches de papier d'aluminium adhésif afin que le béton s'hydrate en conditions endogènes. Par souci de représentativité, le même mode de conservation a été adopté pour les éprouvettes cylindriques de caractérisation.

Après 2 mois de cure, les blocs ont été déballés et plongés dans l'eau douce sur la moitié de leur hauteur afin de s'approcher de la saturation par un processus d'imbibition. Au bout de 2 mois d'imbibition, ils ont été emballés de nouveau dans du film alimentaire et de l'aluminium adhésif pour conserver un degré de saturation proche de 100%.

La dalle a été transportée de Toulouse à Nantes pendant la cure endogène. L'ensemble des systèmes de monitoring a été remis en route. Après 2 mois et demi de cure, la face avant de la dalle a été découverte et soumise à un séchage en laboratoire climatisé à $T=20^{\circ}\text{C}$. Le séchage est en cours. L'objectif est de mesurer des variations des observables ultrasonores, résistives et capacitives puis les combiner et en extraire la porosité locale et les profils de degré de saturation.

III. SYSTEMES DE MONITORING

Ce paragraphe présente les systèmes de monitoring et de communication propres à chaque type de méthode de mesure : les mesures thermohygro-métriques (THR), ultrasonores (US), résistives (rés), capacitives (capa) et électromagnétiques par sondes T/FDR. Les mesures ont toutes la même référence temporelle universelle (TimeStamp) et peuvent être enregistrées en décalage de quelques minutes ou secondes ou quasi simultanément au regard de la vie d'une structure en béton armé.

III.1. Température et humidité relative

Pour suivre les gradients de température et d'humidité relative, des capteurs THR de marque Honeywell, éprouvés dans de précédentes études [Villain et al. 2015], ont été placés dans des réservations après 2 mois de cure afin d'éviter que de l'eau liquide n'endommage les capteurs. Six capteurs sont placés à 2.0, 3.5, 6.4, 8.0, 12.0 et 17.9 cm de profondeur et le 7^e capteur, posé sur le dessus de la dalle permet de suivre les conditions d'exposition de la dalle.

La chaîne de mesure (Figure 2.a) est constituée des capteurs, d'une carte « fille » basse fréquence à 16 voies, d'une carte fille de conditionnement et d'une carte mère de type PEGASE 3 [Le Cam et al., 2016, Pallier et al. 2021] qui assure le pilotage et la communication sans fil avec le serveur en réseau STOCO. Le logiciel de recueil, de sauvegarde et de pré-traitement des données est nommé STOCO, a été développé par COSYS-SII et est distribué sous licence par une société tierce [STOCO, 2016]. Les données brutes (mV) et pré-traitées converties en T (°C) et HR (%) sont accessibles par tous les partenaires autorisés du projet ANR-SCaNING et ce, en temps réel.

Les apports spécifiques au projet SCaNING sont le développement des 2 cartes filles, l'assemblage avec la carte mère PEGASE 3, la mise en boîtier (Figure 2.b) et l'étalonnage des sondes et de la chaîne complète dans une étuve contrôlée en T et HR par le service métrologie de l'Univ Eiffel.

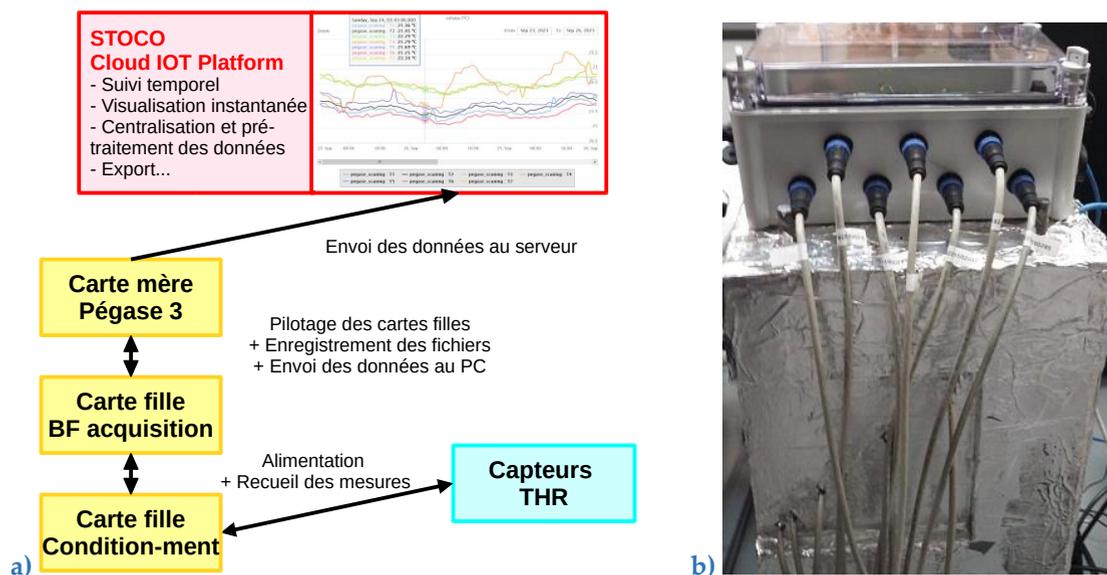


FIGURE 2. Instrumentation par sondes THR -
a) Schéma de la chaîne de mesure - (b) Boîtier de monitoring

III.2. Chaîne de mesure de la résistivité

Les capteurs de résistivité choisis ont été développés par Badr et al. [2019]. La position des électrodes de l'échelle de résistivité a été adaptée pour correspondre aux profondeurs communes aux différents systèmes de mesures, choisis au début du projet ANR-SCaNING (Figure 1.b). Les grilles d'injection du courant ont un diamètre égal à 10 cm.

La chaîne de mesure (Figure 3.a) est constituée du capteur de résistivité (grille + échelle), d'un résistivimètre Syscal Junior72 (voire Syscal Pro) de Iris Instrument qui assure l'alimentation et la mesure puis communique le fichier de données à un ordinateur PC portable via un câble USB. L'ordinateur équipé d'un logiciel ProSys de Iris Instrument permet de paramétrer le monitoring.

Les données en sortie de mesure du logiciel Prosys ne sont pas directement exploitables. Un autre logiciel sélectionne les données désirées dans les fichiers générés par le logiciel Prosys, les traite et les mets en forme (Fichier format csv). Puis ce même logiciel envoie les données de mesures pré-traitées sur le serveur géré par le logiciel STOCO.

L'objectif a été atteint lorsque les données de résistivités, référencées à l'heure universelle correspondant à leur enregistrement (TimeStamp), ont été disponibles pour tous les acteurs du projet sur le réseau via STOCO.

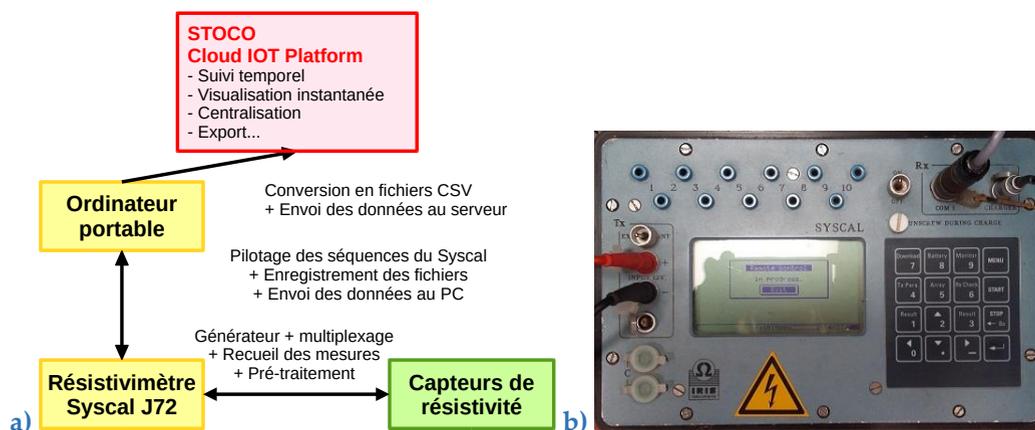


FIGURE 3. Instrumentation par échelle de résistivité -
a) Schéma de la chaîne de mesure - b) Résistivimètre Syscal Pro

III.3. Chaîne de mesure capacitive

Les capteurs capacitifs sont en cours de développement par Ibrahim et al. [2023a et b]. De même que pour les autres systèmes de mesure, les profondeurs communes choisies sont indiquées sur la Figure 1.b.

La chaîne de mesure (Figure 4.a) est constituée du capteur capacitif relié à un multiplexeur de marque Keysight, d'un capacimètre SyMECC MLPC développé par le Céréma (Figure 4.b) qui assure l'alimentation et la mesure puis communique chaque donnée à un ordinateur PC portable (Linux ou Windows) par liaison bluetooth sans fil. L'ordinateur permet de paramétrer le multiplexage et l'enregistrement des mesures brutes. L'objectif, à terme, est également de piloter le monitoring, ainsi que l'envoi des données brutes sur le serveur pour qu'elles soient accessibles à tous quasiment en temps réel. En effet, l'intervalle de scrutation des répertoires pour envoi sur serveur peut être réglé à la convenance de l'utilisateur : par exemple toutes les 15 minutes.

L'apport de SCAING est la programmation par Quentin Bossard du multiplexage en lien avec le pilotage du SyMECC pour recueillir les mesures brutes référencées (TimeStamp) à intervalles réguliers choisis par l'utilisateur. La programmation de l'envoi sur serveur est en cours.

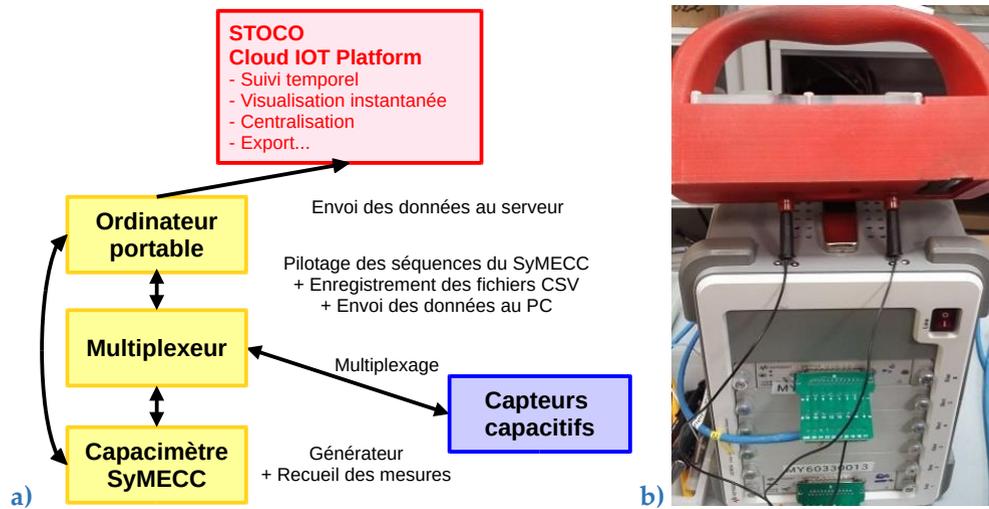


FIGURE 4. Instrumentation par capteurs capacitifs -
 a) Schéma de la chaîne de mesure - b) Capacimètre SyMECC et multiplexeur

III.4. Chaîne de mesure des T/FDR

Les capteur T/FDR (Time/Frequency Domain Reflexometry), pouvant être utilisés dans le domaine temporel comme dans le domaine fréquentiel [Vautrin et al. 2023], ont été implantés dans deux mailles voisines (Figure 1.a). Ils sont reliés à un analyseur de réseau vectoriel de marque Anritsu pouvant balayer des fréquences jusqu'à 6 GHz, par l'intermédiaire d'un multiplexeur hautes fréquences (Mini-Circuits 1-8GHz). Le pilotage du monitoring, la sauvegarde des données ainsi que l'envoi des observables et des données brutes sur le serveur STOCO sont programmés sur un PC portable (Figure 5). Le logiciel gérant ces actions a été fourni et développé par EDF. En premier lieu, il va lire les paramètres, modifiables à distance, de pilotage du monitoring sur le serveur STOCO puis il réalise la mesure. Ensuite, les mesures sont directement envoyées sur le serveur STOCO pour qu'elles soient accessibles à tous.

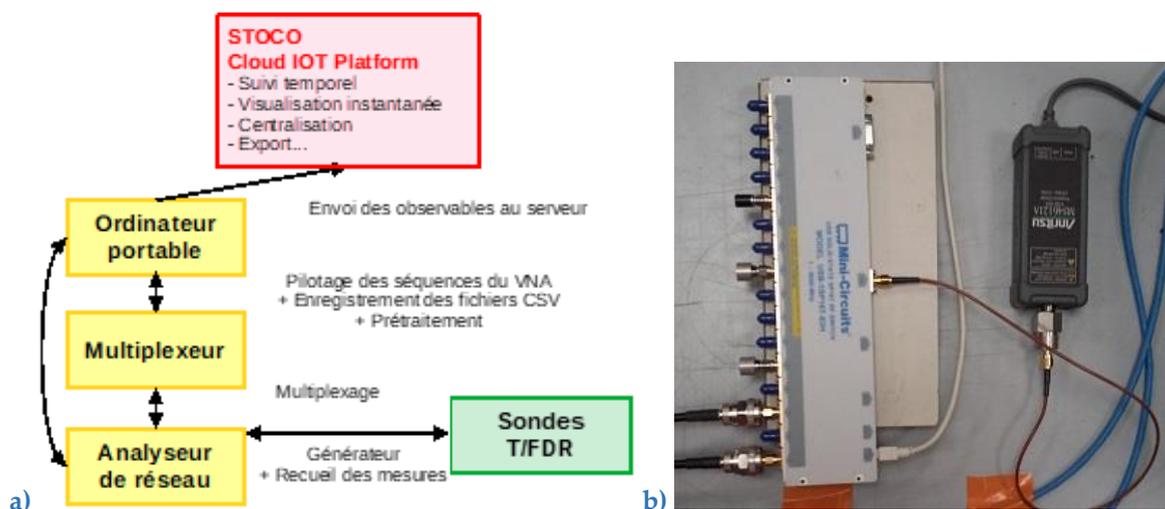


FIGURE 5. Instrumentation par sondes T/FDR -
 a) Schéma de la chaîne de mesure - b) Analyseur de réseau vectoriel Anritsu et multiplexeur

III.4. Chaîne de mesure ultrasonore

Les systèmes de capteurs ultrasonores ont été développés par Hariri et al. [2023a et b]. Les profondeurs communes choisies sont celles de la Figure 1.b.

Selon les cas (blocs ou dalle), plusieurs types de chaîne de mesure sont utilisées. La Figure 6.a est le schéma fonctionnel sur lequel se fondent les développements actuels [Deraemaeker et al. 2019, Hariri et al. 2023]. Un ordinateur permet de piloter le monitoring et le générateur de signaux raccordé à un amplificateur de signal. Les capteurs ultrasonores servent tour à tour d'émetteur et de récepteurs. Différents systèmes sont mis en œuvre pour la dalle et les blocs. L'ordinateur permet un traitement avancé des données [Hariri et al., 2023] et seules les observables extraites sont envoyées sur STOCO.

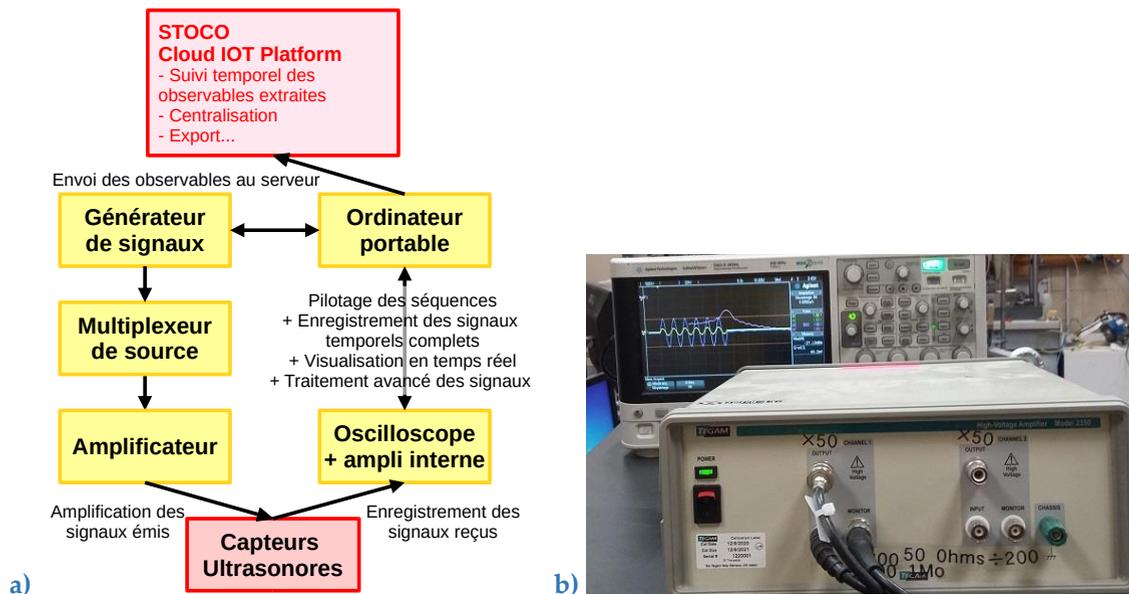


FIGURE 6. Instrumentation par capteurs US - a) Schéma de la chaîne de mesure - b) Eléments de la chaîne de mesure : oscilloscope et amplificateur

IV. PREMIERS RESULTATS



FIGURE 7. Exemple de suivi des mesures pré-traitées dans le logiciel STOCO - a) Températures (T4 extérieure) - b) Permittivité des TDR

La figure 7 présente deux exemples des premiers résultats obtenus et téléchargeables par tous les acteurs du projet ANR-SCaNING quasiment en temps réel. Les courbes d'étalonnage spécifiques à chaque capteur doivent être déterminés indépendamment. Le suivi en température par la sonde externe (T4) ainsi que par les 6 sondes noyées vont permettre de pouvoir corriger dans l'avenir les mesures non destructives des biais de température.

IV. CONCLUSIONS

Un des résultats majeurs du projet ANR-SCaNING est la construction d'un démonstrateur en béton armé, instrumenté par des capteurs noyés complémentaires. Le suivi en continu, pilotable à distance, est assuré par différents systèmes de recueil de données et de communication sans fil (Wifi ou Bluetooth). Les données brutes ou pré-traitées, au choix des ingénieurs ou chercheurs chargés de la surveillance de la structure, sont sauvegardées sur un serveur géré par le logiciel STOCO.

Dans l'avenir, ce démonstrateur sera soumis à différentes conditions thermiques et hydriques en environnement contrôlé en laboratoire puis, si possible, en environnement naturel.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) pour le financement du projet ANR-2020-CE22-0015 SCaNING ainsi que la région Pays-de-la-Loire pour le financement du CDD d'ingénieur d'études en électronique et informatique industrielle de Quentin Bossard dans le cadre du projet SCaNING. Les auteurs tiennent à remercier la division transfert de technologie ainsi que les techniciens du service mécanique du LMDC pour la confection des corps d'épreuves, l'instrumentation des moules ainsi que la caractérisation des bétons.

REFERENCES

Badr, J., Fargier, Y., Palma-Lopes, S., Deby, F., Balayssac, J., 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*, 223, 310-321. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.226>

Balayssac J-P., Garnier V (Eds). (2018). Évaluation non destructive des ouvrages en génie civil, ISTE Press Ltd. London. Mai 2018, 418p. ISBN: 978-1-78405-414-4.

Breysse D. (2012). Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods. *Construction and Building Materials*, 33, 139-163, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.103>

Deraemaeker, A., Dumoulin, C. (2019). Embedding ultrasonic transducers in concrete: A lifelong monitoring technology, *Construction and Building Materials*, 194, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.013>

Hariri, R., Garnier, V., Chaix, J-F., Muret, C., Boudierlique, F., Durand, O., Abraham, O. (2023). Transducteurs ultrasonores noyés pour l'évaluation non destructive du béton, *8^e Int. Conf. Francophone Diagnostics 2023*, 24-26 octobre, Nantes, France, 4p.

Hariri, R., Garnier, V., Chaix, J-F., Abraham, O. (2023). Monitoring of concrete property gradients by embedded ultrasonic sensors, *Int. Conf. on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications NDE-NucCon 2023*, Jan. 25-27, Espoo, Finland. <https://www.ndt.net/?id=27834>

Ibrahim H., Villain G., Balayssac J.P., Dérobert X., Palma Lopes S., Fauchard C., Guihard V., (2023). Calibration process of a capacitive probe for monitoring of reinforced concrete nuclear structures, *Int. Conf. on Non-destructive Evaluation of Concrete in Nuclear Applications NDE - NucCon 2023*, Jan. 25-27, Espoo, Finland. <https://www.ndt.net/?id=27806>

Ibrahim H., Villain G., Palma Lopes S., Ranaivomanana N., Balayssac J.P., Dérobert X., (2023), Etude des possibles biais influant sur les mesures par capteur capacitif noyé, 8^e *Int. Conf. Francophone Diagnostics 2023*, 24-26 octobre, Nantes, France, *Academic Journal of Civil Engineering*, 2023, 41(4), 133-141. <https://doi.org/10.26168/ajce.41.4.16>

Le Cam, V., Döhler, M., Le Pen, M., Gueguen, I., & Mevel, L. (2016). Embedded subspace-based modal analysis and uncertainty quantification on wireless sensor platform PEGASE. *8th European Workshop on Structural Health Monitoring (EWSHM 2016)*, July 5-8, 2016 in Bilbao, Spain. *e-Journal of Nondestructive Testing*, 21(8). <http://www.ndt.net/?id=20081>

Pallier, D., Le Cam, V., Pillement, S. (2021). Energy-efficient GPS synchronization for wireless nodes. *IEEE Sensors Journal*, 21 (4), 5221-5229. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3031350>

Sbartai Z.M, Laurens S, Elachachi S-M, Payan C. (2012). Concrete properties evaluation by statistical fusion of NDT techniques. *Construction and Building Materials*, 37, 943–950. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.064>

Soshiroda T, Voraputhaporn K, Nozaki Y. Early-stage inspection of concrete quality in structures by combined nondestructive method. (2006). *Materials and Structures*, 39, 149:160. <https://doi.org/10.1617/s11527-005-9007-6>

[STOCO 2016] Logiciel commercial « STOCO », propriété Université Gustave Eiffel, diffusé par licence de diffusion via la société Power-Lan (<https://www.power-lan.com>) du produit de la recherche « Superviseur Générique d'instrumentation » déposé à l'IDDN sous le numéro IDDN.FR.001.280022.000.S.P.2016.000.10000

Vautrin D., Guihard V., Leite E., Taillade F., Courtois A., Galan M., (2023), Operating experience from containment VerCoRs mock-up. Part 2: use of Frequency Domain Reflectometry approach to improve water content monitoring of prestressed concrete structures, *Technical Innovation in Nuclear Civil Engineering (TINCE)*, Oct. 23-25, 2023, Paris-Saclay, France

Villain, G., Sbartai, Z., Lataste, J., Garnier, V., Dérobert, X., Abraham, O., Bonnet, S., Balayssac, J., Nguyen, N., Fares, M. (2015). Characterization of Water Gradients in Concrete by Complementary NDT Methods. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDTCE 2015)*, 15-17 Sep 2015, Berlin, Germany. <https://www.ndt.net/?id=18297>

Villain, G., Balayssac, J.-P., Garnier, V., Sbartai, M., Yven, B., Hénault, J.-M., Dérobert, X., Chaix, J.-F., Le Cam, V., Palma Lopes, S., Abraham, O. (2021). Projet SCanING : Suivi des infrastructures neuves et existantes par Capteurs Noyés pour évaluer les Indicateurs Nécessaires à leur Gestion durable. *Academic Journal of Civil Engineering*, 2021, 38(2), 94-98. <https://doi.org/10.26168/ajce.38.2.22>