

Comparaison fréquentielle d'une sonde et d'une cellule électromagnétiques à différents états hydriques et salins de deux bétons à base de CEM I et de CEM III

Myriam Bouichou ^{1,2*}, Géraldine Villain ³, Elisabeth Marie-Victoire ^{1,2}, Khodor El Achrafi ³, Xavier Dérobert ⁴, Véronique Bouteiller ⁵

¹ *Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques (LRMH), Ministère de la Culture, 29 rue de Paris, 77420 Champs-sur-Marne, France*

² *Sorbonne Universités, Centre de Recherche sur la Conservation (CRC, UAR 3224), Museum national d'Histoire naturelle, Ministère de la Culture, CNRS; CP21, 36 rue Geoffroy-Saint-Hilaire, 75005 Paris, France*

³ *Univ Gustave Eiffel, MAST-LAMES, Campus de Nantes, F-44344 Bouguenais, France*

⁴ *Univ Gustave Eiffel, GERS-GéoEND, Campus de Nantes, F-44344 Bouguenais, France*

⁵ *Univ Gustave Eiffel, MAST-EMGCU, F-77454 Marne - la- Vallée, France*

RESUME

La corrosion des armatures est la principale pathologie rencontrée dans les structures en béton armé, qu'elles soient Ouvrage d'Art (pont, viaduc) ou Monument Historique. Si le suivi usuel de corrosion des armatures dans les bétons est assuré par des techniques électrochimiques, l'apport des techniques d'auscultation non destructives électromagnétiques est moins connu. Or ces dernières sont sensibles aux deux paramètres clés dans les processus de corrosion, le taux de saturation et la teneur en ions chlorure du béton. Dans le cadre d'une étude prospective en laboratoire, les informations issues de mesures réalisées avec deux techniques électromagnétiques sur des corps d'épreuves de différents bétons (à base de ciment CEM I et CEM III), en faisant varier le taux de saturation et la solution d'imbibition (eau douce et eau chlorurée à 35g/L), ont été comparées sur une gamme de fréquence entre 0.7 et 1.6 GHz. Les résultats complémentaires obtenus avec une sonde diélectrométrique SUSI-R® et avec une cellule électromagnétique coaxiale cylindrique sont cohérents. Ils montrent l'évolution proportionnelle des fréquences de résonance des deux techniques selon le taux de saturation, mais également un élargissement des pics de résonance dans le cas d'une eau chlorurée.

Mots-clefs Evaluation Non Destructive, Durabilité, Chlorures, Béton, Electromagnétisme.

Key-words Non-Destructive evaluation, Durability, Chlorides, Concrete, Electromagnetism.

I. INTRODUCTION

Le mécanisme de dégradation majoritaire observée sur les structures en béton armé est la corrosion des armatures. Outre le coût considérable des réparations, dans le domaine du patrimoine, la corrosion des armatures dans le béton induit des pertes irrémédiables de matière originelle. La détection précoce de la corrosion, mais aussi le diagnostic *in situ* constituent donc des enjeux à la fois économiques et culturels. Le diagnostic usuel de la corrosion met en œuvre des techniques électrochimiques permettant une mesure directe de la vitesse de corrosion (résistance à la polarisation), ou d'évaluer des risques de corrosion au travers de mesures telles que la résistivité ou le potentiel de corrosion. Deux paramètres clés dans le processus de corrosion des armatures sont le taux de saturation en eau du béton et sa teneur en ions chlorures. Pouvoir quantifier ces deux paramètres par des techniques non destructives *in situ*, afin de proposer des indicateurs indirects de la corrosion, présente donc un intérêt majeur en complément des résultats directs du diagnostic usuel de la corrosion des armatures en acier.

Les techniques électromagnétiques sont très intéressantes pour cette application car elles sont sensibles à la présence d'eau et de chlorures [Sbartai et al., 2006 ; Hugenschmidt et Loser, 2008 ; Dérobert et Villain, 2017].

L'objectif de cette étude prospective est de comparer les performances de deux techniques électromagnétiques : une sonde SUSI-R®, basée sur la diélectrométrie à champs évanescent [Olmi et al., 2006] et une cellule électromagnétique coaxiale cylindrique, appliquées à deux types de béton à base de ciment CEM I et CEM III, en considérant différents taux de saturation et deux teneurs en ions chlorure.

Ces deux techniques ont été utilisées de façon concomitante, *in situ* pour la sonde SUSI-R® et en calibration de techniques *in situ* pour la cellule électromagnétique, dans la cadre du projet APOS [Bouichou et al, 2016 et 2018 ; Bouteiller et al., 2019], lors de plusieurs campagnes de mesures réalisées sur des dalles en béton armé.

Dans cet article, les résultats obtenus en laboratoire, lors des étapes de calibrations en saturation d'eau des deux techniques, sur des prismes de béton à taux de saturation contrôlé, sont présentés.

II. MATERIAUX ET METHODES DE MESURE

A. Formulations et caractérisation des bétons C1 et C3

Deux types de béton ont été étudiés : le béton C1 qui est à base de ciment CEM I 52,5 N CP2 NF (composé de clinker), et le béton C3 qui est à base de ciment CEMIII/A 52,5L PMES CP1 NF (composé de clinker, de gypse et de laitier). Les granulats utilisés sont silicatés et leur diamètre est compris entre 0.1 et 22.4 mm. La teneur en ciment est de 290 kg/m³, et le rapport E/C de 0.6. Les principales caractéristiques des deux bétons sont données dans le tableau 1, les modes opératoires utilisés sont ceux recommandés par l'AFPC-AFREM [Arliguie et al., 2007].

Différents types d'éprouvettes ont été confectionnés : prismes, dalles et cylindres. Le décoffrage a été effectué 7 jours après le coulage. Après une période de cure standard, les éprouvettes ont subi un pré-conditionnement durant 6 mois (séchage).

La calibration de la sonde SUSI-R® a été effectuée sur des éprouvettes de dimensions 5x5x10cm, obtenues par sciage de prismes de 10x10x40 cm. Pour la cellule coaxiale électromagnétique (EM), des éprouvettes cylindriques de diamètre 70 mm et de hauteur 75 mm ont été carottées dans des dalles de 90x60x13 cm, puis sciées. Six éprouvettes par type de béton ont été utilisées pour l'étude de calibration en cellule coaxiale EM.

La nomenclature des éprouvettes utilisées pour les mesures SUSI-R® et avec la cellule coaxiale EM, et dont les mesures sont données dans cet article, est synthétisée dans le tableau 2.

TABLEAU 1. Principales caractéristiques des bétons C1 et C3

Caractéristiques et indicateurs de durabilité	Béton C1	Béton C3
Coefficient de diffusion apparent aux chlorures ($10^{-12}m^2.s^{-1}$)	28,3 (23,3/29,3/32,3)	5,8 (5,5/5,3/6,7)
Porosité à l'eau (%)	16,2 (17,7/14,8/16,1)	16 (15,6/15,9/16,4)
Densité (kg/m^3)	2320,4 (2264,5/ 2368/2328,7)	2322,7 (2331,4/2319,9/2316,7)
W – Perméabilité à l'eau ($kg.m^{-2}.s^{-0.5}$)	1,44 (1,63/1,32/1,37)	0,67 (0,76/0,64/0,60)
24h – coefficient d'absorption capillaire (kg/m^2)	6,87 (7,71/6,18/6,71)	3,31 (3,17/2,99/3,77)

TABLEAU 2. Nomenclatures des éprouvettes.

Nomenclatures	Béton C1		Béton C3	
	[Cl]=0g/L	[Cl]=35g/L	[Cl]=0g/L	[Cl]=35g/l
SUSI-R®*	C1-E3d/C1-E1e	C1-S1e	C3-E2d	C3-S2d
Cellule EM**	C1-18-1/C1-18-4	C1-18-4	C3-8-1/C3-8-4	C3-8-4

* SUSI-R® : E=eau douce/S=eau salée/1 -2 -3 = numéro d'éprouvettes/ d ou e =zone de mesure face coffrée

** Cellule EM : 18 = numéro de dalle C1/ 8 : = numéro de dalle C3/ 1 -3 -4 = numéro d'éprouvettes

B. Sonde diélectrométrique SUSI-R®

La sonde SUSI-R® utilise la technique de diélectrométrie à champ évanescent. Elle permet d'évaluer *in situ*, une teneur en eau et un indice de salinité dans le béton, dans un volume d'investigation correspondant à une demi-sphère de 2cm de rayon au contact de la sonde. Ces deux grandeurs sont calculées directement à partir des propriétés de résonance (fréquence de résonance et facteur de qualité) de la sonde (Fig. 1-a) qui fonctionne dans la gamme des micro-ondes, entre 1 et 1.5 GHz [Olm et al., 2006, Riminesi et al, 2017, Bouichou et al, 2018].

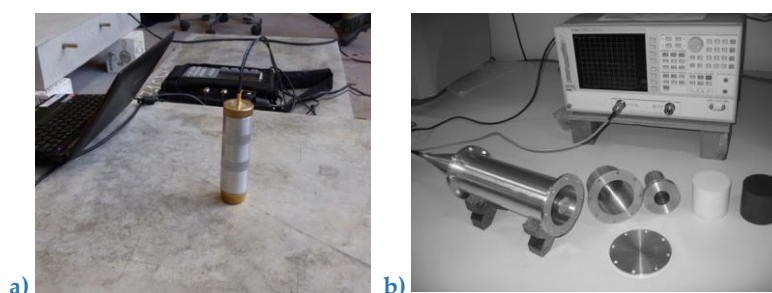


FIGURE 1. Méthodes d'END – a) Sonde SUSI-R® – b) Cellule coaxiale cylindrique [Adous et al. 2006]

La calibration de SUSI-R® [Bouichou et al, 2018] utilisait un protocole de saturation sous vide puis de séchage, mis en place pour seize éprouvettes (8 éprouvettes par type de béton) de dimensions 5x5x10 cm, selon la méthode de saturation du protocole de mesure de la porosité ouverte à l'eau recommandé par l'AFREM [Arliquie et al., 2007]. Deux solutions ont été utilisées pour saturer les éprouvettes : soit de l'eau douce, soit de l'eau additionnée de NaCl (35 g/L) : (salinité équivalente à de l'eau de mer). Les éprouvettes ont ensuite été séchées à 50°C dans une étuve, puis stockées dans un dessiccateur jusqu'à ce que le béton soit à température ambiante (environ 20°C), puis pesées. Les éprouvettes ont ensuite été replacées dans l'étuve pour diminuer le temps de séchage. Ce protocole a été reproduit jusqu'à obtenir une masse constante des éprouvettes (matériau sec). Les mesures avec SUSI-R® ont été effectuées à saturation puis à différentes échéances de séchage. Trois mesures ont été effectuées par face (a, b, c coffrée et d, e, f non coffrée), soit 6 mesures par prisme au total. Pour chaque mesure avec SUSI-R®, une courbe est obtenue représentant le paramètre de diffusion S21 en fonction de la fréquence.

C. Cellule électromagnétique coaxiale cylindrique

La seconde technique de cette étude utilise une cellule électromagnétique coaxiale cylindrique [Adous et al. 2006], qui est employée en laboratoire pour calibrer certaines techniques électromagnétiques utilisées *in situ* comme les radars GPR (Ground Penetrating Radar) équipés d'une antenne bi-statique (dans le béton, fréquence du signal centrée autour de 950 MHz) ou les sondes capacitives (autour de 33 MHz). Les coefficients de réflexion sont mesurés sur tout le volume de l'éprouvette de béton de 75 mm de diamètre et de 70 mm de hauteur, placée dans un porte échantillon métallique (Fig. 1-b). La courbe de dispersion de la permittivité diélectrique complexe de 50 MHz à 1.6 GHz est calculée par inversion de l'admittance issue des coefficients de réflexion.

Chaque éprouvette de béton est conditionnée pour que les différents taux de saturation S_r (resp. la teneur en chlorures [Cl-]) soient homogènes dans l'éprouvette. Ainsi, elles sont séchées à 45°C jusqu'à atteindre une masse visée, puis emballées de manière étanche et replacées dans l'étuve pour une durée au moins égale à la durée de séchage (voire double pour les bétons peu poreux). Après refroidissement à 20°C, elles sont de nouveau pesées et les essais END sont réalisés. Ce protocole est répété pour chaque S_r visé, avant de les sécher à 105°C, pour pouvoir calculer *a posteriori* le degré réel de saturation à chaque étape. [Villain et al. 2018]. Les éprouvettes utilisées pour la teneur en chlorures ne sont que partiellement séchées et saturées sous vide avec la solution de [NaCl]=35 g/L. Les mesures sont réalisées à différents S_r (resp. [Cl-]). Ainsi, la courbe de calibration, qui est caractéristique d'une formulation donnée de béton et qui relie le taux de saturation S_r (resp. [Cl-]) à la permittivité complexe (constante diélectrique et pertes diélectriques), est déterminée. Dans cet article, c'est la partie réelle de l'admittance, issue de la mesure d'un coefficient de réflexion S11, qui sera étudiée puisqu'elle présente des formes de pics de résonance similaires à ceux obtenus avec la sonde SUSI-R®.

III. RESULTATS

A. Sonde diélectrométrique SUSI-R®

Les figures 2 et 3 présentent les courbes de résonance (paramètres de diffusion S_{21} normalisés en fonction de la fréquence) obtenus avec la sonde SUSI-R® sur les bétons C1 et C3, respectivement pour différents taux de saturation en eau douce, et pour deux concentrations en ions chlorure dans les solutions d'imbibition. Il est important de préciser que les taux de saturation de 80 et 50%, n'ont pas été mesurés pour le béton C3, ce qui explique qu'ils n'ont pu être tracés. Les mesures à 25% ont cependant été obtenues pour C3.

Sur la figure 2 (C1-E3d et C3E2d), le pic du paramètre de diffusion se décale vers de plus hautes fréquences quand le degré de saturation des bétons C1 et C3 diminue, en accord avec les résultats de la littérature obtenus pour des monuments historiques [Olimi et al. 2006]. On note également que, pour de faibles taux de saturation, les variations fréquentielles sont très faibles. En effet, sur la figure 2-b (béton C3), les deux courbes à 25 et 10% de taux de saturation sont très proches. Sur la figure 3, les échantillons sont saturés en eau douce ou en eau salée. Le décalage des pics vers les basses fréquences est très léger autour 1.24 GHz quand la salinité augmente. On observe également un élargissement du pic de résonance pour les deux types de béton. La littérature confirme [Riminesi et al., 2017] un élargissement du pic de résonance quand la conductivité de la solution d'imbibition augmente.

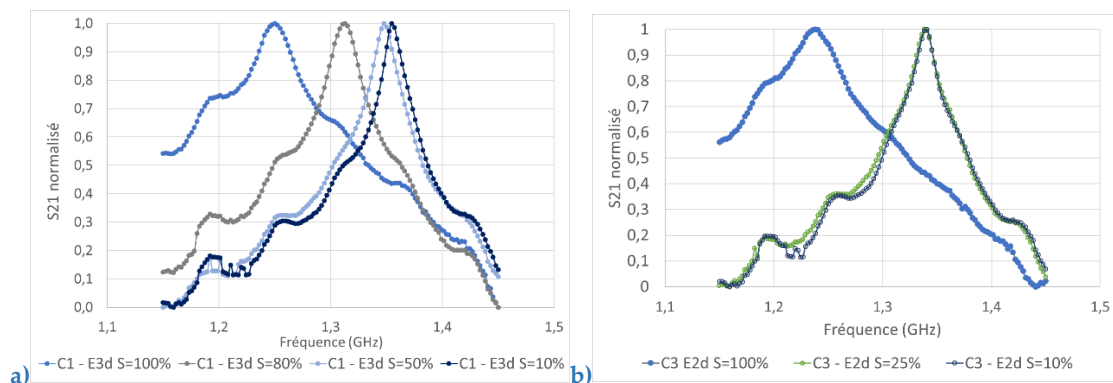


FIGURE 2. SUSI-R® : effet du taux de saturation S_r sur le paramètre de diffusion entre 0.7 et 1.7 GHz –
a) Béton C1 – b) Béton C3

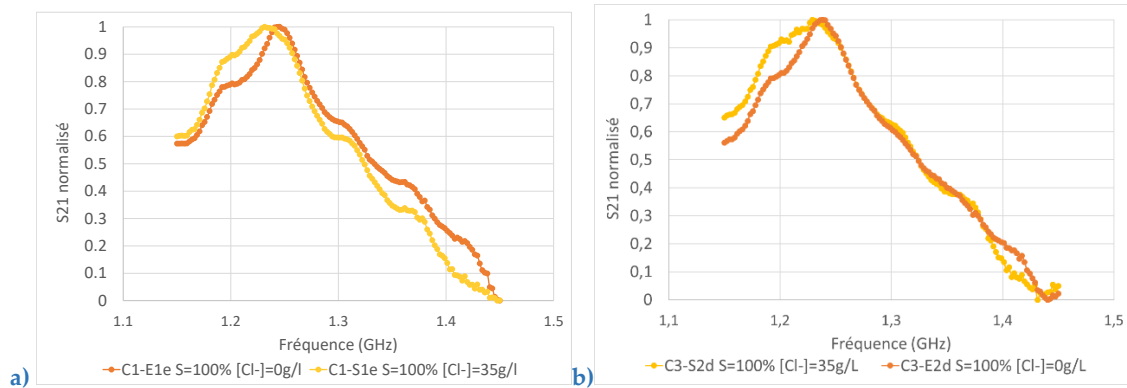


FIGURE 3. SUSI-R® : effet de la teneur en chlorures [Cl⁻] sur le paramètre de diffusion entre 0.7 et 1.7 GHz – a) Béton C1 – b) Béton C3

B. Cellule électromagnétique coaxiale cylindrique

Les premières études réalisées avec la cellule coaxiale-cylindrique sur différents mélanges de béton [Ihamouten et al, 2011 ; Dérobert et Villain, 2017] ne se sont intéressées qu'aux valeurs de permittivités complexes de mélanges dans des bandes de fréquence allant de 50 MHz jusqu'à des fréquences restant sous des pics de résonance, comme ceux présentés en Figure 4. Ils ont été assimilés à l'époque soit à des phénomènes de résonance dans la cellule, soit à des imprécisions de mesures. Par conséquent, il n'en a pas été tenu compte pour remonter par inversion à la permittivité complexe. La présente étude montre que ces pics de résonance ne sont pas aléatoires et qu'ils se corrélient très bien aux paramètres d'état des bétons (degré de saturation et teneur en chlorures). Les figures 4 et 5 présentent les résultats obtenus avec la cellule coaxiale-cylindrique : deux pics apparaissent pour chacune des courbes. Les pics présentés en Figure 4 sont associés à des fréquences de résonance dont les longueurs d'onde en $\lambda/4$ et $\lambda/2$ correspondent à la longueur des échantillons. Ces longueurs d'onde étant inversement proportionnelles à la permittivité diélectrique, donc au taux de saturation des deux bétons, on note logiquement un décalage des pics de résonance vers les basses fréquences lorsque le taux de saturation augmente.

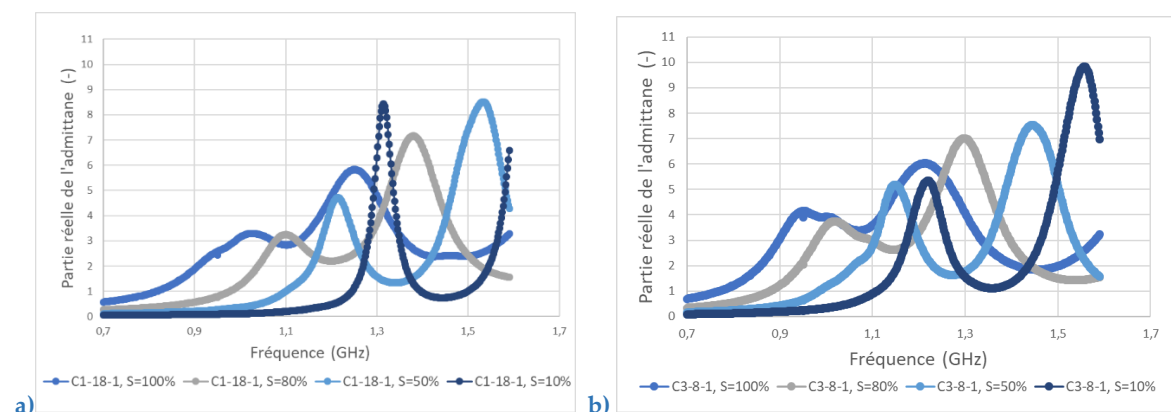


FIGURE 4. Cellule électromagnétique coaxiale cylindrique : effet du taux de saturation S_r sur la partie réelle de l'admittance entre 0.7 et 1.7 GHz – a) Béton C1 – b) Béton C3

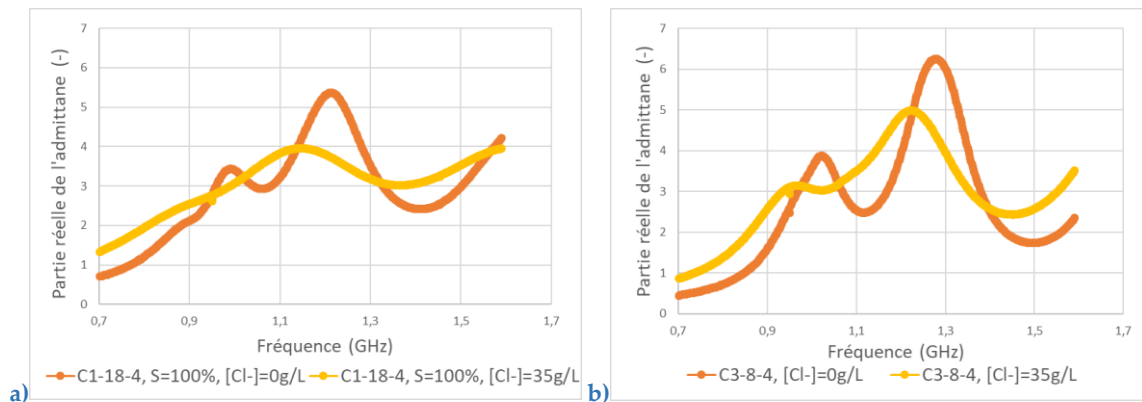


FIGURE 5. Cellule électromagnétique coaxiale cylindrique : effet de la teneur en chlorures [Cl⁻] sur la partie réelle de l'admittance entre 0.7 et 1.7 MHz – a) Béton C1 – b) Béton C3

Dans la figure 5, on observe de nouveau un léger décalage vers les basses fréquences. Les pics sont atténués lorsque les bétons sont saturés en eau salée à 35 g/. En effet, l'atténuation de l'admittance (Fig. 5) est directement liée à l'atténuation des ondes radar dans les matériaux.

IV. DISCUSSIONS

La figure 6 présente la fréquence des pics de résonance suivant les taux de saturation en eau douce, pour les bétons C1 et C3 avec la cellule électromagnétique coaxiale, et uniquement pour le béton C1 avec SUSI-R® (les données étant manquantes pour C3 sur des taux de saturation intermédiaires entre 25 et 100%). Le 2^{ième} pic de résonance de la cellule électromagnétique pour le taux de saturation à 10% n'est pas indiqué car il n'est pas inclus dans la gamme de fréquences mesurées. Pour la cellule électromagnétique, les fréquences des pics de résonance sont proportionnelles aux taux de saturation. Concernant SUSI-R®, pour le béton C1, la sensibilité de la technique diminue en même temps que le taux de saturation en eau. Des mesures supplémentaires avec de plus nombreux taux de saturation (avec des pas de 5%), permettraient d'affiner les traitements et en particulier la gamme de sensibilité des techniques.

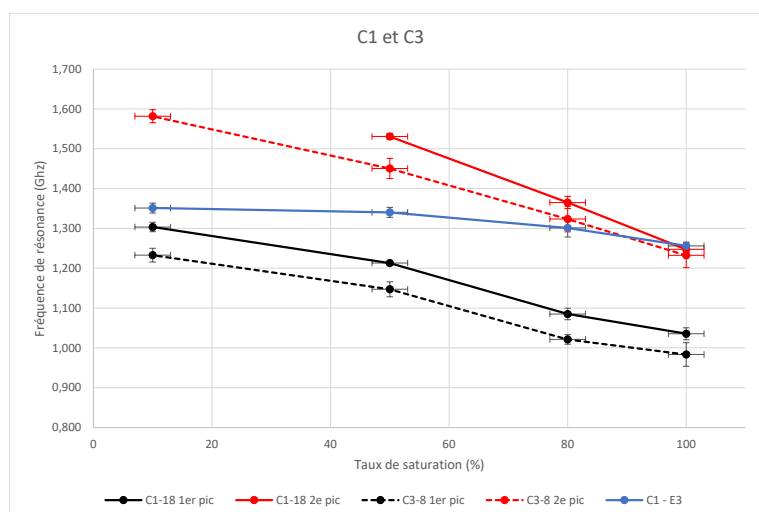


FIGURE 6. Pics de résonance des mesures en sonde SUSI-R® et cellule coaxiale-cylindrique des deux bétons en fonction de leurs taux de saturation.

Comme les pics de résonance sont moins clairement dessinés pour l'admittance mesurée par la cellule coaxiale cylindrique, une loi normale a été ajustée sur le sommet du pic, pour pouvoir calculer la largeur du pic L_w à -3dB. Les valeurs obtenues sont reportées dans le tableau 3. Il apparaît clairement que le pic s'étale quand la concentration en ions chlorure augmente et que cet effet est moins marqué pour le béton C3 que pour le béton C1. Pour la sonde SUSI-R®, la largeur du pic calculée à 3dB augmente avec la salinité, sans différence notable entre les deux types de béton (6MHz pour C1 et 8MHz pour C2). Ceci est en accord avec les résultats obtenus avec la sonde SUSI dans [Olmi et al. 2006].

TABLEAU 3. Effet de la concentration en ions chlorure sur la largeur du pic de résonance L_w pour les bétons C1 et C3 à l'état saturé

	Cellule coaxiale cylindrique	Sonde SUSI
C1 [Cl ⁻] = 0 g/L	232 MHz	74 MHz
C1 [Cl ⁻] = 35 g/L	475 MHz	81 MHz
C3 [Cl ⁻] = 0 g/L	215 MHz	76 MHz
C3 [Cl ⁻] = 35 g/L	285 MHz	84 MHz

V. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Bien que les volumes d'investigation des deux techniques électromagnétiques utilisées dans cette étude soient différents, les résultats obtenus sont très cohérents. En effet, le paramètre de diffusion (lié à S21) de la méthode SUSI-R® et l'admittance (liée à S11) de la cellule coaxiale-cylindrique sont liés à la permittivité diélectrique des bétons aux fréquences radar.

La cellule coaxiale cylindrique est déjà utilisée pour calibrer les mesures des sondes capacitives basses fréquences du radar GPR (autour de 950-1000 MHz). Pour obtenir les courbes de calibration reliant les paramètres d'état des bétons (degré de saturation, et teneur en ions chlorure pour la cellule électromagnétique), le plus long est le pré-conditionnement très contrôlé des échantillons pour s'assurer de l'homogénéité à cœur de ces paramètres. En termes de perspective, il serait pertinent d'étendre cette étude pour déterminer si la cellule coaxiale-cylindrique pourrait permettre de calibrer une 3e méthode d'évaluation non destructive : SUSI-R®, afin d'améliorer sa fiabilité. Facile d'utilisation sur site, la sonde SUSI-R® est d'autant plus intéressante qu'elle permet d'accéder rapidement à une teneur en eau et à indice de salinité, en distinguant les deux paramètres, ce qui n'est pas le cas avec les techniques usuelles de suivi des processus de corrosion dans les bétons armés, telles que les mesures de résistivité.

De même, pour approfondir cette étude, d'autres teneurs en chlorures seront étudiées pour les deux techniques (sonde et cellule) sur les deux types de béton à base de CEM I et de CEMIII, ce qui permettra d'évaluer de façon plus fine l'influence de la teneur en chlorures et du type de ciment sur la réponse des courbes de résonance.

REFERENCES

- Adous, M., Queffelec, P., Laguerre, L. (2006). Coaxial/cylindrical transition line for broadband permittivity measurement of civil engineering materials: *Measurement Science and Technology*, 177, 2241–2246. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/8/026>
- Arliguie G., Hornain H. (sous la direction de), (2007). GranDuBé, Mode opératoire recommandée par le groupe AFREM Détermination de la masse volumique apparente et de la porosité accessible à l'eau, *Presses de l'école nationale des Ponts et Chaussées*, 2007.
- Bouichou, M. Marie-Victoire, E., Jourdan, H., Thauvin, B., Queguiner, R., Olmi, R., Riminesi, C. (2016) Mesures de la teneur en eau et de l'indice de salinité dans les bétons : application de la diélectrométrie résonante ou méthode SUSI-R® , 6e édition du colloque francophone sur l'auscultation des ouvrages de génie civil, Diagnobéton 2016, Marrakech (Maroc), 24-25 mars 2016
- Bouichou, M. Marie-Victoire, E., Jourdan, H., Thauvin, B., Queguiner, R., Olmi, R., Riminesi, C. (2018) Measurement of water content and salinity index in concrete by evanescent field dielectrometry, *Journal of Cultural Heritage*, <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.07.003>
- Bouteiller, V., Villain, G., Thauvin, B., Marie-Victoire, E., Bouichou, M. (2019). Evaluation de la durabilité du béton armé vis-à-vis des ions chlorure à l'aide de capteurs noyés dans le béton versus des auscultations en parement, In *Proceedings of AFGC'2019*, Cachan, France, 20 et 21 mars 2019, 8p.
- Dérobot, X., Villain, G. (2017). EM characterization of concretes, focused on water and chloride contents and carbonation, using multi-linear experimental designs in the radar frequency-band: *Non Destructive Testing & Evaluation International*, 92, 187-198. [/10.1016/j.ndteint.2017.09.001](https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2017.09.001)
- El Achrafi, M.K. (2022). Détermination des indicateurs de durabilité du béton en utilisant des observables d'évaluation non destructives : Application aux ouvrages maritimes, PhD Thesis, Nantes Université, 2022, 212p.
- Hugenschmidt J., Loser R. (2008). Detection of chlorides and moisture in concrete structures with Ground penetrating radar, *Mat Struct*, 41, 785-92.
- Ihamouten A., Chahine K., Baltazart V., Villain G., Dérobot X. (2011). On variants of the frequency power law for the electromagnetic characterization of hydraulic concrete, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 60(11), pp. 3658-3668.
- Olmi, R., Bini, M., Ignesti, A., Priori S., Riminesi, C., Felici, A. (2006). Diagnostics and monitoring of frescoes using evanescent-field dielectrometry, *Meas. Sci. Technol.* 17 (2006) 2281–2288. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/17/8/032>
- Riminesi C., Marie-Victoire É., Bouichou M., Olmi R. (2017). Moisture and salt monitor in concrete by evanescent field dielectrometry, *Meas. Sci. Technol.* 28(1). [doi:10.1088/1361-6501/28/1/014002](https://doi.org/10.1088/1361-6501/28/1/014002)
- Sbartai, ZM, Laurens S, Balayssac JP, Arliguie G, Ballivy G. (2006). Ability of the direct wave of radar ground-coupled antenna for NDT of concrete structures. *NDT&E Int.* 39, 400-7.
- Villain, G., Orcesi, A., Gaillet, L., Thauvin, B. (Eds) (2015). *Résultats des opérations de recherche APOS et MCV*, IFSTTAR & CEREMA, IFSTTAR, Marne-la-Vallée, 2015 Actes Interactifs, AIII. website: Site internet APOS : <http://www.ifsttar.fr/collections/ActesInteractifs/AIII/index.html>

Villain, G., Garnier, V., Sbartai, M., Dérobert, X., Balayssac, J.-P. (2018). Development of a calibration methodology to improve the on-site non-destructive evaluation of concrete durability indicators., *Mater. Struct.* 51–40. <https://doi.org/10.1617/s11527-018-1165-4>