

## Qualification *in-situ* de la teneur en eau des structures bois via une approche électrique résistive

HAFSA Wael<sup>1</sup>, ANGELLIER Nicolas<sup>2</sup>, TAKARLI Mokhfi<sup>2</sup>,  
POP Ion Octavian<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aix-Marseille Université, CNRS, IUSTI UMR 7343, Marseille, 13453, France

<sup>2</sup> Univ. Limoges, GC2D, EA 3178, F-19300 Egletons, France  
[wael.hafsa@univ-amu.fr](mailto:wael.hafsa@univ-amu.fr)

**Mots clefs :** CSI ; CND ; méthode inverse ; résistivité électrique ; teneur en eau

### Contexte et objectifs

Face à la demande des maîtres d'ouvrage en techniques de contrôle non destructif (CND) permettant d'établir un diagnostic optimal et fiable de l'état des structures en bois, ce papier décrit une approche électrique basée sur la mesure de la résistivité électrique permettant de qualifier la teneur en eau de ces structures. Simple d'utilisation et relativement peu coûteuse, cette technique présente toutefois quelques verrous liés à la possibilité de réaliser un Contrôle de Santé Intégré (CSI) ou Structural Health Monitoring (SHM) en anglais. Des facteurs expérimentaux, autres que les paramètres explicatifs liés au matériau bois, influencent d'une manière considérable la mesure de la résistance électrique du bois en injectant un courant continu. Des essais préliminaires montrent des difficultés liées aux hautes résistivités, aux grandes lignes de courant et aux problèmes de contact entre les sondes et le matériau bois. Au regard de ces observations, ce papier présente les résultats des travaux effectués pour évaluer certains de ces facteurs expérimentaux, et décrit une analyse bibliographique et une stratégie expérimentale permettant respectivement de calibrer les données mesurées et de développer la tête de mesure. Les performances de cette technique, mixant mesures résistives et inversion numérique, ont été évaluées sur une poutre *in-situ*.

### Type et classification des données bibliographiques : modélisation statistique

Nous présentons une approche statistique qui traite les données de résistance électrique trouvées dans la littérature afin d'identifier les différents paramètres qui affectent la mesure. L'étude bibliographique concerne 82 résineux et 27 feuillus. Les mesures des résistances sont répertoriées selon l'essence du bois, sa famille, son origine géographique, son état thermo-hydrique et la direction d'injection du courant par rapport à l'alignement des fibres (L, R et T). Les mesures collectées et représentées sur la Fig. 1 ont été réalisées sur du bois vert, des éléments en bois *in-situ* ou conditionnés et contrôlés en laboratoire.

Les données couvrent une large gamme de teneurs en eau allant de 2 jusqu'à 260% qui correspondent respectivement à des résistances électriques de  $1.14E+14$  à  $231 \Omega$  avec une lacune de données en dessous de 7%. Cette limite correspond à la limite inférieure définie par la norme EN 13183-2 (2002) décrivant le mode opératoire des humidimètres basés sur la mesure de la résistance électrique. En-dessous du point de saturation des fibres (environ 30%), une relation log-linéaire existe entre la résistance et la teneur en eau. Entre 7 et 30 % et à une température constante, Stamm (1927) a montré que la relation entre le logarithme de la teneur en eau ( $w$ ) et le logarithme de la résistance ( $R$ ) est une relation linéaire qui s'écrit selon **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) où  $k_w$  et  $C_1$  sont deux constantes matériau :

$$\ln R = k_w \ln w + C_1 \quad (1)$$

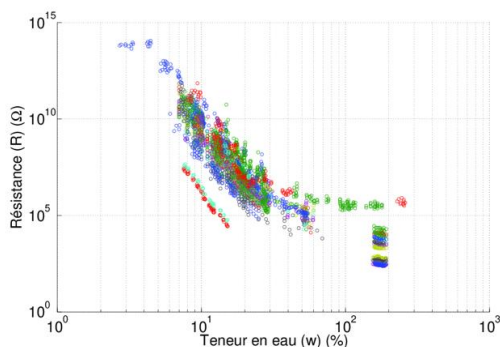


Fig. 1 : Données bibliographiques des essais expérimentaux de la résistance électrique en fonction de la teneur en eau du bois

Afin de modéliser les données bibliographiques et d'évaluer la dispersion des mesures de résistances pour chaque teneur en eau, nous proposons une approche probabiliste. Cette analyse est réalisée dans le but d'identifier le poids des paramètres qui conditionnent la mesure. Pour chaque valeur de teneur en eau, nous supposons que la résistance électrique est une variable aléatoire discrète qui suit une loi de probabilité quelconque caractérisée par des paramètres inconnus. Pour calculer les meilleures estimations des paramètres du modèle à partir de données observées, nous testons plusieurs lois (Normale, Weibull et Gamma) et nous employons la technique du maximum de vraisemblance permettant de mesurer l'adéquation entre la distribution des résistances observées et la loi de probabilité utilisée. Notre choix porte sur la loi Normale qui se caractérise par une symétrie, une nette tendance centrale et une flexibilité pour modéliser des observations issues de plusieurs événements aléatoires indépendants. Ceci est tout à fait en cohérence avec la mesure de la résistance électrique qui se caractérise par plusieurs paramètres explicatifs expérimentaux (Vermaas, 1975). La Fig. 2a montre les résultats pour des teneurs en eau dans le domaine hygroscopique.

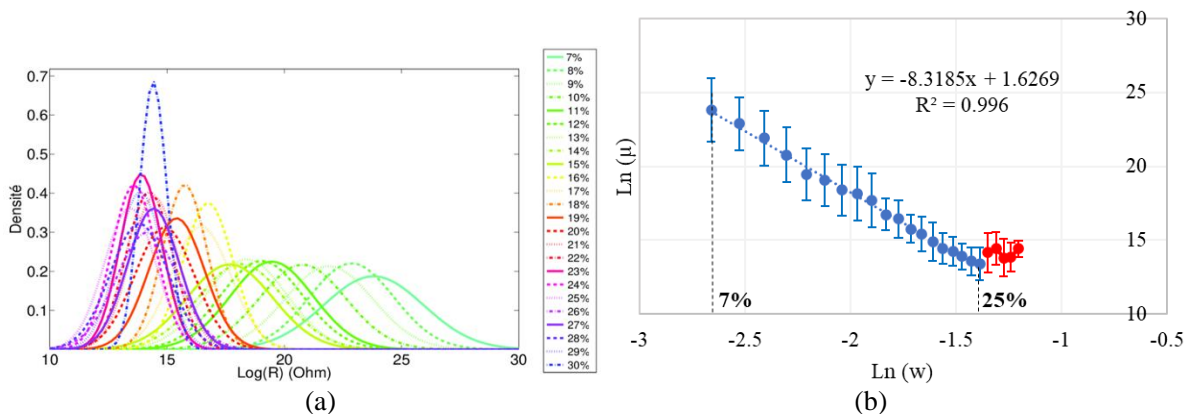


Fig. 2 : a) Fonctions de densité pour les données bibliographiques de résistance électrique : b) Evolution de l'espérance de la loi normale dans le domaine hygroscopique

Les résultats montrent que la dispersion des mesures de résistance diminue lorsque la teneur en eau augmente. Cela est dû aux faibles valeurs de résistances facilitant la circulation du courant électrique et améliorant la qualité de la mesure. De plus, l'influence de certains paramètres (tels que la densité ou l'orthotropie du matériau) sur les mesures de résistances est moins significative à des taux d'humidité élevés. L'espérance de la résistance estimée (notée  $\mu$ ) pour les différentes teneurs en eau dans le domaine hygroscopique, est présentée dans la Figure 2b. La log-linéarité est bien vérifiée jusqu'à 25 %. Au-delà, la perte de cette linéarité peut être expliquée par le fait que certaines essences ont atteint le PSF. Sur la partie linéaire, les deux constantes de l'équation **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ont été identifiées avec  $C_1 = 1.63$  et  $k_w = -8.32$ .

### Etude paramétrique : résistivité homogène et relation avec la teneur en eau

Nous nous intéressons à l'échelle laboratoire où nous utilisons des échantillons homogènes en teneur en eau afin d'identifier l'effet de certains paramètres explicatifs. L'étude paramétrique est réalisée en utilisant 23 échantillons en Douglas-fir cubiques de dimensions 50x50x50 mm<sup>3</sup> usinés selon les directions d'orthotropie et conditionnés à 4 niveaux de teneurs en eau (Fig. 3).

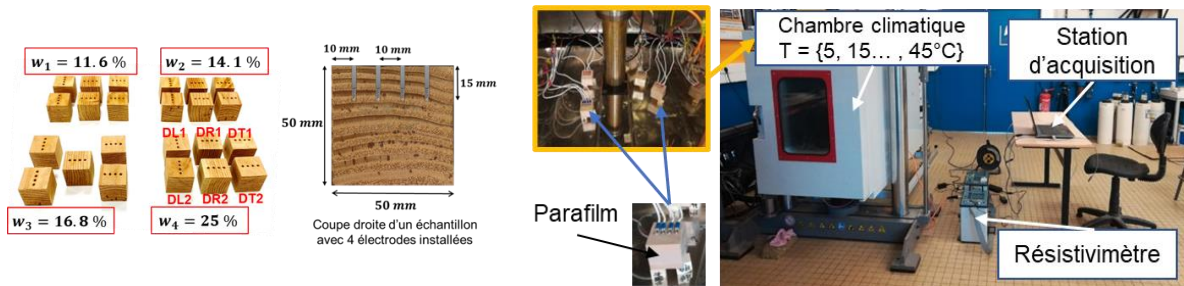


Fig. 3 : Eléments en bois testés et protocole expérimental à l'échelle laboratoire

Ces dimensions spécifiques sont un compromis permettant d'installer 4 électrodes espacées de 10 mm. Ce choix de géométrie ne remettra pas en cause l'application de la méthode proposée à un élément de structure. De plus, afin de minimiser la variabilité entre les échantillons, ils sont extraits de la même planche. Chaque ensemble d'échantillons correspondant à un niveau de teneur en eau, est placé dans la chambre climatique. Les mesures sont effectuées sur les 3 directions d'injection L, R, T, et ce, à 5 niveaux de températures différentes 5, 15, 25, 35 et 45°C. Chaque échantillon est recouvert par un parafilm afin de conserver sa teneur en eau ce qui est vérifié par des pesées effectuées avant et après l'expérience. Trois configurations d'électrodes ( $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ ) sont également testées.

L'approche numérique consiste à développer un modèle direct en prenant en compte la géométrie réelle des électrodes (des cylindres parfaitement conducteurs) et des volumes étudiés. Un modèle isotrope est considéré, cette hypothèse étant une première approche simplifiée pour des échantillons de petites dimensions avec une homogénéité en termes de distribution de la teneur en eau. Cette approche numérique (Fig. 4) repose donc sur deux étapes principales : (i) la modélisation par éléments finis (MEF), et (ii) l'injection électrique s'appuyant sur l'analogie thermique-électrique.

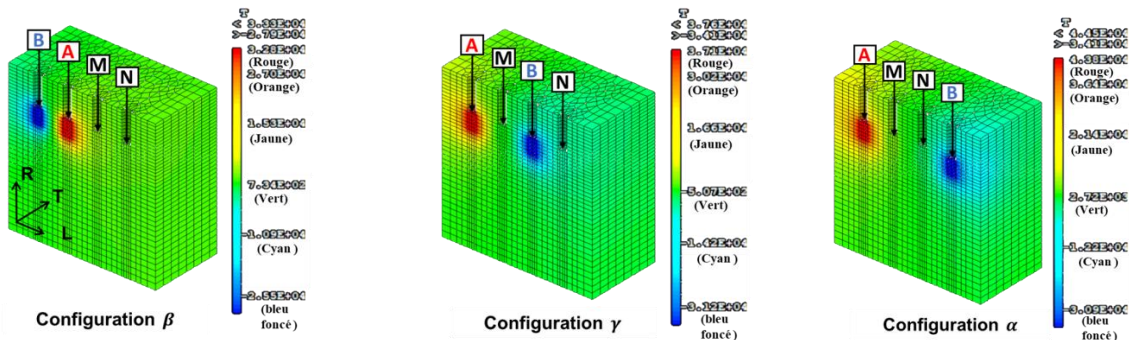


Fig. 4 : Injection électrique et multiplexage pour les configurations  $\beta$ ,  $\gamma$  et  $\alpha$  ( $\rho = 1000 \Omega.m$ )

Afin de remonter aux valeurs des résistivités, les résultats de résistances sont multipliés par le facteur géométrique déterminé numériquement et correspondant à chaque configuration. Les résultats sont présentés dans la Fig. 5. Afin de présenter un modèle empirique (Carll et TenWolde, 1996) sur la base de ces mesures, une loi de passage est établie, définie pour une gamme de teneurs en eau entre 7 et 30 % et calibrée en fonction de la température comme suit :

$$\ln w = -1.66 \cdot 10^{-1} \ln \rho - 5.83 \cdot 10^{-3} T + 2.14 \cdot 10^{-1} \quad (2)$$

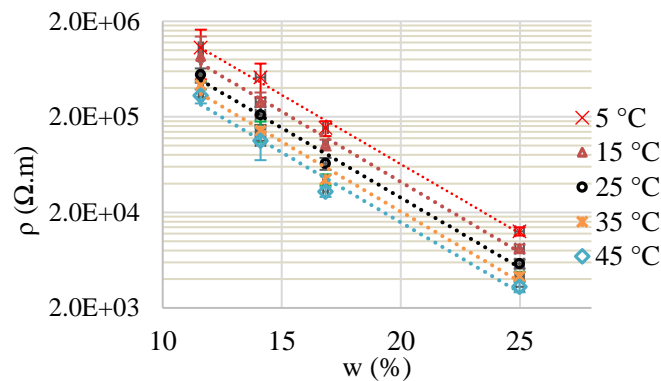


Fig. 5 : Résistivité ( $\rho$ ) en fonction de la teneur en eau ( $w$ ) à différentes températures

### Stratégie pour l'état hydrique in-situ à l'échelle structurale

Dans les structures en bois, nous rencontrons des assemblages mixtes bois-métal. La présence d'un taux d'humidité élevé au niveau de cette zone représente un facteur aggravant qui affecte leur performance. Le retrait gonflement peut également entraîner des fissurations. Par conséquent, la connaissance du taux d'humidité représente un intérêt pour éviter ces désordres. L'étude expérimentale est réalisée sur un poteau intermédiaire « face avant » en Douglas-fir de section 230x310 mm<sup>2</sup>, soutenant une charpente en bois (Fig. 6) **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

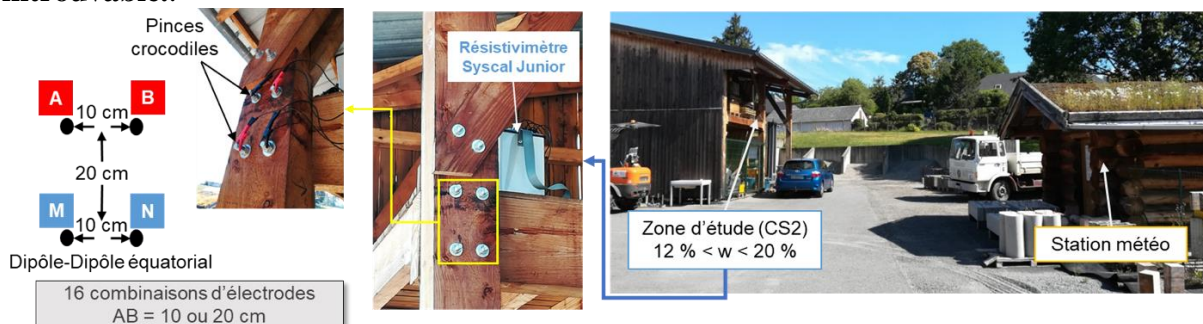


Fig. 6 : Zone d'étude in-situ et station météo

La structure est en classe de service 2 (CS2) avec une teneur en eau variant entre 12 et 20 %. Un suivi des conditions climatiques est assuré pendant un mois via une station météo installée au voisinage de la zone étudiée. En utilisant un résistivimètre Syscal Junior, quatre mesures sont réalisées à 1, 7, 14 et 28 jours. La solution proposée repose sur l'utilisation des 4 organes d'assemblage (diamètre 18 mm) comme électrodes, en installant des pincres crocodiles pour l'injection du courant et la mesure de la tension. Les électrodes sont espacées de 10 cm horizontalement et de 20 cm verticalement. Grâce au multiplexage, 16 combinaisons d'électrodes basées sur le dispositif dipôle-dipôle (DD) équatorial sont testées. Ces combinaisons sont classées en deux catégories en fonction de la distance ( $d$ ) qui sépare les électrodes d'injection : 8 combinaisons avec  $d = 10$  cm ; 8 combinaisons avec  $d = 20$  cm.

La Fig. 7a présente les variations de l'humidité relative (HR) et de la température ( $T$ ) collectées pendant le mois d'étude. Une première analyse de ces données permet de distinguer deux périodes climatiques : une avec HR et  $T$  variables et une autre avec HR élevée et  $T$  faible. Durant ce mois, nous observons une variation importante de la température entre 0.4 et 28.4 °C avec une température moyenne de 11°C. Nous remarquons aussi que HR varie entre 21.4 et 96 % avec une moyenne de 77%. La Fig. 7b présente la répartition des mesures de HR tout au long de la période d'étude et montre que 76 % des valeurs sont supérieures à 70 %.



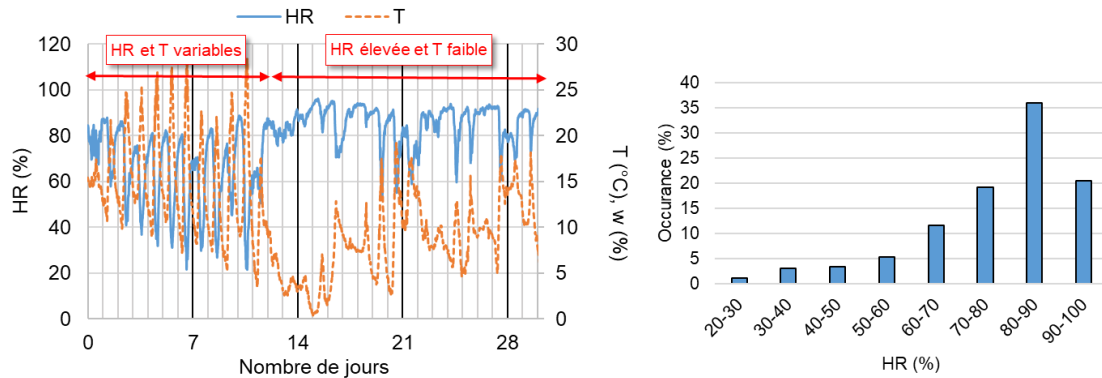


Fig. 7 : a) Suivi des conditions thermohydriques ; b) Répartition des données HR

Un modèle numérique reproduisant la configuration expérimentale est développé en tenant compte de la géométrie des électrodes et du volume du poteau (Fig. 8a). Nous développons deux maillages distincts : un premier qui définit la discrétisation des électrodes et un deuxième qui caractérise le volume du poteau modélisé par un parallélépipède rectangle de dimensions 930x230x310 mm<sup>3</sup>. L'injection électrique est simulée en prenant en compte le multiplexage des électrodes dans différentes configurations. En posant comme hypothèse l'homogénéité de la distribution de la teneur en eau dans la zone investiguée, deux facteurs géométriques sont déterminés :  $k_{10} = 8.07$  m (configurations où  $d=10$  cm) ; et  $k_{20} = 0.45$  m (configurations où  $d=20$  cm).

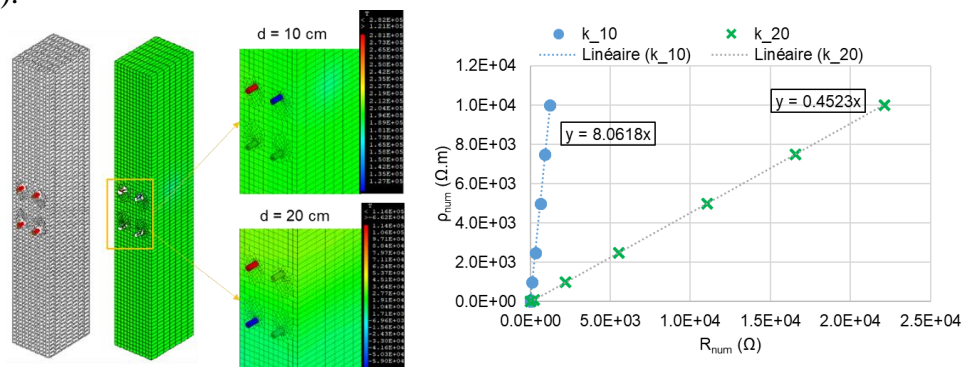


Fig. 8 : (a) Modèle numérique et multiplexage pour le poteau ( $\rho=104$  Ω.m) ; (b) Facteurs géométriques numériques des configurations testées sur le poteau

Après minimisation des écarts entre les résistances expérimentales et numériques, les résultats (Fig. 9) montrent 2 niveaux de mesures cohérents avec les configurations d'électrodes et la capacité du modèle à dissocier ces niveaux liés aux facteurs géométriques évalués numériquement. Cependant, une dispersion des données expérimentales est observée, pouvant être expliquée par l'hétérogénéité du matériau vues les distances entre les électrodes. Pour cela, nous décidons de nous focaliser sur la configuration avec  $d = 10$  cm.

Le Tab. 1 résume les résultats de résistivités calculées, leurs écarts types correspondant aux différentes configurations testées, la moyenne de la température obtenue durant 1h avant la prise de la mesure, et la teneur en eau calculée avec l'équation (2). Afin de calibrer les mesures par rapport à la température, nous avons recours aux résultats de l'étude à l'échelle laboratoire.

Les données climatiques moyennes sont utilisées pour déterminer la teneur en eau à l'équilibre selon les courbes d'équilibre hygroscopique du bois utilisées dans l'Eurocode 5 (EN 1995-1-1/NA 2010). Ces conditions correspondent à une teneur en eau moyenne  $w_{AFNOR} = 16\%$ . Néanmoins, les résultats montrent un niveau supérieur à  $w_{AFNOR}$  (sauf dans le cas de la mesure à 14 jours). Les niveaux élevés de teneurs en eau peuvent être également expliqués par la

répartition des données HR. Nous observons également une dispersion élevée des écarts types des mesures de teneurs en eau due à la résistivité hétérogène dans le poteau, ce qui montre la limite de l'hypothèse de l'homogénéité de la résistivité dans le cas où les électrodes sont éloignées. Cependant, les résultats sont encourageants montrant l'applicabilité, en termes d'évaluation globale de l'état hydrique.

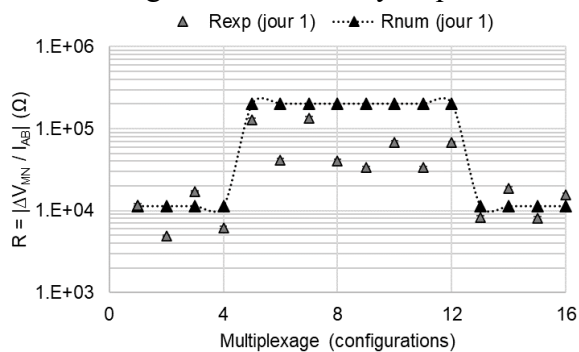


Fig. 9 : Résistances expérimentales et numériques (mesures à 1 jour)

Tab. 1 : Evaluation des résistivités, leurs écarts types, températures et teneurs en eau

Jour	$\rho$ (Ω.m)	$\sigma$ , (%)	T (°C)	w (%)
1	9.15E+04	46.6	23.75	16.1
7	3.20E+04	62.2	18.75	19.8
14	4.17E+05	26.7	4.44	14.04
28	6.13E+04	21	15.39	19.4

## Conclusion et perspectives

L'étude statistique réalisée a permis de traiter et d'analyser les données bibliographiques, afin de distinguer des variables expérimentales telles que la configuration des électrodes, la température et des variables inhérentes liées aux propriétés du matériau telle que l'anisotropie et la teneur en eau. Nous avons mis en place une étude paramétrique pour différents niveaux de températures. Au regard des résultats, une relation a été établie pour évaluer la résistivité électrique en prenant en compte la configuration des électrodes, la variation de la température pour une gamme allant de 5 à 45 °C, et pour des teneurs en eau de 11.6 à 25 %. Un protocole expérimental pour la mesure de la résistivité/teneur en eau a été mis en place sur un poteau assurant la stabilité d'une charpente. L'injection est réalisée cette fois-ci par l'intermédiaire des organes d'assemblage qui jouent le rôle des électrodes. Les résultats obtenus ont montré la capacité des mesures résistives multiplexées à différencier les niveaux de résistance en fonction de l'écartement entre les éléments d'assemblage (les électrodes). Les mesures ont aussi relevé l'impact de la température ambiante sur la résistance électrique. Afin de corriger cette perturbation induite par la température, nous avons utilisé les résultats de l'étude paramétrique réalisée à l'échelle laboratoire. Malgré une courte période d'essai (1 mois), ces résultats ont montré le potentiel de cette stratégie expérimentale pour la surveillance de l'état hydrique des ouvrages en service. Bien entendu, cette stratégie mérite d'être approfondie afin d'aller vers le monitoring pour différentes classes de service.

## Références

- Carll C., TenWolde A. (1996) Accuracy of wood resistance sensors for measurement of humidity. *Journal of Testing and Evaluation* 24 (3): 154-60. <https://doi.org/10.1520/JTE11296J>
- Stamm A.J. (1927) The Electrical Resistance of Wood as a Measure of Its Moisture Content. *Industrial & Engineering Chemistry* 19 (9): 1021–1025.
- Vermaas H.F. (1975) Experimental variables affecting the measurement of the DC resistance of wood. *Holzforschung-International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*, 29(4), 140-144.