



HAL
open science

Usage de la méthode résistive pour l'évaluation de l'état hydrique des éléments de structure en bois

Wael Hafsa, Nicolas Angellier, Mokhfi Takarli, Octavian Pop

► To cite this version:

Wael Hafsa, Nicolas Angellier, Mokhfi Takarli, Octavian Pop. Usage de la méthode résistive pour l'évaluation de l'état hydrique des éléments de structure en bois. 24ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2019, Brest, France. <hal-04059375>

HAL Id: hal-04059375

<https://hal.science/hal-04059375v1>

Submitted on 5 Apr 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.



Copyright - All rights reserved

Usage de la méthode résistive pour l'évaluation de l'état hydrique des éléments de structure en bois

W. HAFSA, N. ANGELLIER, M. TAKARLI, I. O. POP

Laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité (GC2D)

Université de Limoges : EA3178 – France

(wael.hafsa, nicolas.angellier, mokhfi.takarli, ion-octavian.pop)@unilim.fr

Résumé :

La gestion des structures en bois nécessite une politique de maintenance associée à des stratégies d'inspection compte tenu de leur vieillissement et de leur dégradation sous les agressions de l'environnement. 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 hydrique des structures en bois, ce travail vise à présenter une démarche expérimentale et numérique visant à optimiser l'usage des mesures de résistivité électrique pour la surveillance in-situ de la teneur en eau dans des structures en bois. Une étude paramétrique est présentée afin de définir les limites d'usage liées à la fois aux propriétés du matériau bois et des capacités de l'outil de mesure. Les résultats sont argumentés et analysés afin de mettre en valeur l'apport réel du dispositif développé dans la mesure des champs hydriques. Cette étude a été adaptée et développée, notamment vis-à-vis du tri des données expérimentales et de la problématique d'échelle.

Abstract:

The management of wooden structures can be quite complicated when there is a lack in inspection strategies. To establish an optimal and reliable diagnostic of the health state of timber elements, the professional community is interested in Non-Destructive Testing (NDT) techniques for in-situ monitoring of moisture content. One of the most common and most easily applicable methods is electrical resistivity measurement. This study aims to present an experimental and numerical approach to evaluate resistivity measurements reliability. Therefore, a parametric study was set up to analyze the effect of some experimental variables on resistance measurements. The results of this research also define the tool limits related to both operational tool capacities and wood properties. Data sorting algorithm was implemented to exploit an extensive database and to optimize the numerical inversion procedure. First insights will be derived concerning in-situ monitoring.

Mots clefs : contrôle non destructif, résistivité électrique, teneur en eau, bois

1 Introduction

Le bois a toujours occupé une place de choix dans la construction. Dans un contexte de rénovation et de polyvalence, ce matériau présente des avantages considérables vis-à-vis des défis écologiques et grâce à sa légèreté et la facilité de sa mise en œuvre. L'histoire récente a connu des conceptions hors norme utilisant le bois comme matériau principal de structure [1], [2]. Ces structures peuvent présenter aujourd'hui des signes d'altération, d'endommagement, qui nécessitent une politique de maintenance associée à des stratégies d'inspection et de monitoring compte tenu de leur vieillissement et de leur dégradation sous les agressions de l'environnement. Cependant, le bois, par sa variabilité naturelle, son hétérogénéité, son anisotropie et sa forte sensibilité aux conditions climatiques (humidité et température), complique souvent la détermination de l'état de santé d'un bâti qui en est constitué. Cette problématique limite aujourd'hui le développement des constructions lorsqu'un tel matériau hygroscopique a un rôle structurel, et pour lequel la question de la durabilité est intimement liée au chargement mécanique mais également au chargement hydrique [3]. Dans ce dernier cas, les maîtres d'ouvrage sont à la recherche de nouvelles techniques de contrôle non destructif (CND) leur permettant d'établir un diagnostic optimal et fiable de l'état des structures en bois qui nécessite la connaissance du niveau d'humidité interne. Les méthodes électriques représentent une des méthodes les plus courantes et les plus faciles à appliquer. Généralement, des électrodes sont implantés dans le matériau et mesurent la résistance électrique entre les capteurs. La résistance peut être utilisée pour calculer la teneur en eau grâce à une relation logarithmique [4]. Aujourd'hui, seules des mesures ponctuelles via l'utilisation d'hygromètres (mesure électrique directe), donnent une information du niveau de la teneur en eau souvent limitée à la surface des éléments. Björngrim et al. [5] ont présenté un exemple d'un pont équipé d'un tel système. Cette méthode a été utilisée par ailleurs afin de réaliser une étude comparative entre des structures en différentes classes de service [6]. Cependant, cette mesure demeure insuffisante et ne permet pas de donner une information complète afin d'aboutir à une évaluation de l'état hydrique dans des sections massives importantes. Dans ce contexte, un dispositif expérimental s'appuyant sur des mesures résistives a été développé pour déterminer la répartition spatiale du taux d'humidité [7]. Il repose principalement sur l'adaptation des méthodes multiplexées utilisées habituellement pour des mesures de prospection électrique en géophysique. Cet outil est essentiellement un mégohmmètre qui mesure la résistance entre des électrodes groupées par paires et enfoncées dans le bois. Les mesures conduisent à identifier le champ de résistivité relié à la teneur en eau à l'aide des lignes de courant injecté par les électrodes connectées à la surface de l'élément en bois étudié. Un algorithme d'inversion est implémenté dans un code aux éléments finis (Cast3m) afin de minimiser l'erreur entre la simulation numérique et les mesures expérimentales.

Cette méthode mixant mesures électriques et inversion numérique a montré une bonne applicabilité en termes de profil hydrique. Simple d'utilisation et relativement peu coûteuse, elle présente toutefois quelques verrous liés à la possibilité de réaliser un contrôle de santé intégré CSI (ou SHM en anglais pour Structural Health Monitoring). Les essais préliminaires montrent des difficultés liées aux hautes résistivités, aux grandes lignes de courant et aux problèmes de contact entre les électrodes et le matériau bois [4] [8]. Ce papier présente une étude paramétrique qui nous permet de définir les limites d'usage liées à la fois aux propriétés du matériau bois et aux capacités de l'outil de mesure. En effet, l'étude de la résistance électrique du bois nécessite la prise en compte des variables expérimentales telles que les dimensions de l'échantillon, les électrodes, le courant injecté, la durée d'injection, l'essence de bois etc. [9]. Ces facteurs affectent directement les valeurs de la résistance électrique. L'étude de l'effet de ces paramètres nous a permis ainsi d'évaluer et d'optimiser les mesures électriques notamment vis-à-vis de la problématique d'échelle.

2 Etude paramétrique : échelle laboratoire

2.1 Protocole expérimental

Le dispositif expérimental, mis au point au laboratoire, est composé d'un dessiccateur de conditionnement et d'un résistivimètre connecté à un ordinateur via une liaison série permettant le transfert des données. Les essais ont été réalisés sur deux éprouvettes de Douglas (D1) et de Hêtre (H1), extraites à partir de deux échantillons mères (D0 et H0) conditionnés pendant plusieurs mois dans une enceinte régulée à une humidité relative $HR = 72 \pm 2\%$ pour garantir un équilibre hygroscopique (Fig. 1). Chaque éprouvette de dimensions $50 \times 50 \times 50 \text{ mm}^3$ a été instrumentée par une ligne de 4 électrodes espacées de 10mm parallèlement à la direction des fibres (Fig. 2). Le résistivimètre, utilisé généralement en géophysique, a été adapté pour assurer l'injection de courant électrique dans le bois. Son principe repose sur la transmission d'un courant I_{AB} entre deux électrodes d'injection A et B et la mesure de la différence de potentiel (d.d.p.) ΔV_{MN} entre deux électrodes de réception M et N.

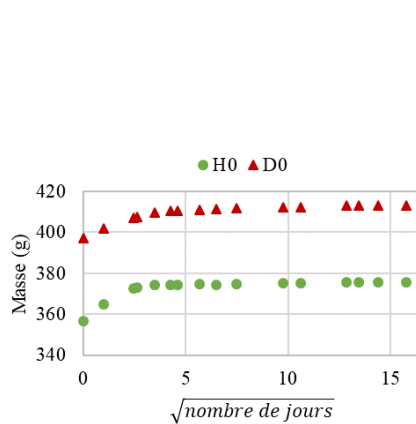


Fig. 1. Stabilisation de la masse des éprouvettes mères

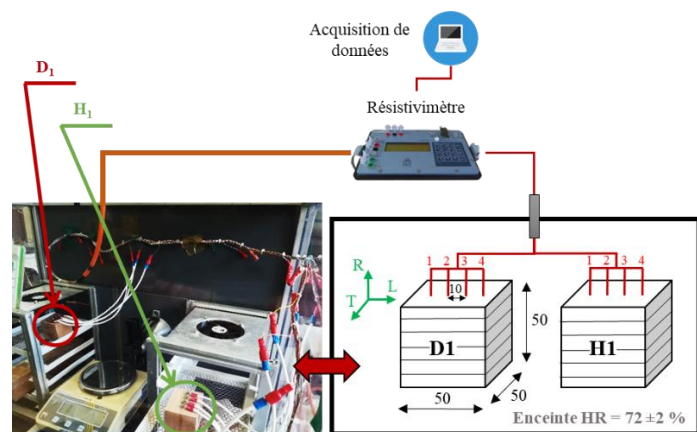


Fig. 2. Protocole expérimental (échelle laboratoire)

2.2 Effet de la configuration des électrodes

Selon le placement des électrodes A, B, M et N, trois dispositifs de mesure ont été réalisés : Wenner Alpha et Wenner Beta qui représentent respectivement des cas particuliers des dispositifs Wenner-Schlumberger et Dipôle-Dipôle, et le dispositif Wenner Gamma (Fig. 3). L'écartement entre les électrodes a étant ici égal à 10mm et k représentant le facteur géométrique correspondant à chaque configuration dans le cas d'un milieu semi-infini. En effet, dans le cas d'un milieu hétérogène, la résistivité apparente est mesurée grâce à une relation qui dépend de deux paramètres inversement proportionnels R et k , qui représentent la nature du milieu et la dimension du dispositif utilisé, respectivement :

$$\rho (\Omega . m) = k . R = k \left| \frac{\Delta V_{MN}}{I_{AB}} \right| \quad (\text{Eq. 1})$$

Les différents dipôles d'injection et de mesure de d.d.p. ont été intervertis pour définir les deux sens de multiplexage : SN « sens normal » et SR « sens reverse » (Tab. 1).

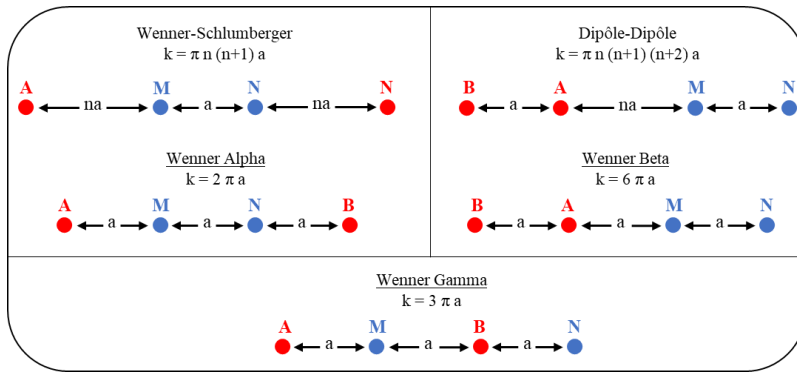


Fig. 3. Les dispositifs de mesure

Tab. 1. Le sens normal SN et le sens reverse SR

	Dispositifs de mesure	N° de l'électrode			
		1	2	3	4
Sens Normal « SN »	α	A	M	N	B
	β	B	A	M	N
	γ	A	M	B	N
Sens Reverse « SR »	α	B	N	M	A
	β	N	M	A	B
	γ	N	B	M	A

Les résultats expérimentaux pour le Douglas (Fig. 4) montrent une symétrie entre les résistances $R = |\Delta V_{MN}/I_{AB}|$ dans les sens SN et SR. On observe aussi trois niveaux de résistances cohérents avec les différents niveaux de facteurs géométriques. Il serait possible de calculer les valeurs vraies de ces derniers (pour un milieu fini) à l'aide d'un modèle numérique direct : ce travail ne fait pas l'objet de la présente étude, mais cela ne modifie pas leur ordre de classement.

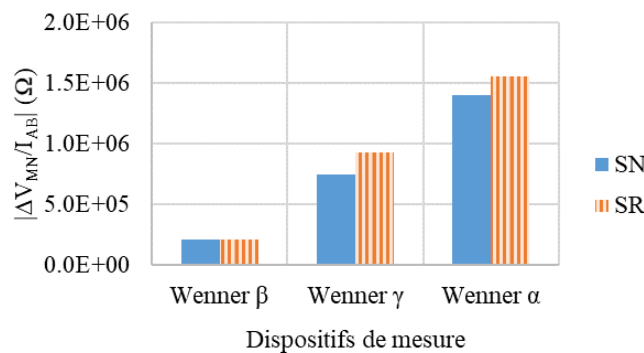


Fig. 4. La résistance pour les différents dispositifs de mesure et les deux sens SN et SR (Douglas)

2.3 Comparaison entre deux essences

Le facteur de déviation standard Q nous permet d'estimer la qualité des mesures de résistance expérimentale R_i et d'évaluer leur dispersion autour de la valeur moyenne \bar{R} pendant la réalisation de S mesures. Le nombre des mesures S dépend de la mise à jour de la valeur de Q :

$$Q [\%] = 100 \times \sqrt{\frac{1}{S-1} \sum_{i=0}^S (R_i - \bar{R})^2} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$\text{avec} \quad \bar{R} = \frac{1}{S} \sum_{i=0}^S R_i \quad \text{et} \quad S = \begin{cases} 3 & \text{si } Q \leq 5\% \\ 6 & \text{si } Q > 5\% \end{cases}$$

Le Tab. 2 décrit les résultats de la déviation standard des mesures pour les deux essences en fonction des différents dispositifs de mesure. Certaines configurations peuvent être mises en défaut en fonction de l'essence du bois pour ce même chargement hydrique. La configuration β présente moins de difficulté d'injection par rapport aux autres dispositifs. En effet, les dispositifs γ et α présentent une erreur

significative de répétabilité des mesures pour le Hêtre. Cela semble dû à la faible valeur de courant électrique I_{AB} atteignant peut-être une limite d'injection de l'outil de mesure ($I_s = 0.002\text{mA}$) (Fig. 5).

Tab. 2. La déviation standard pour les différents dispositifs

Dispositifs de mesure		Q (%)	
		H1	D1
β	SN	1	1
	SR	3	2
γ	SN	999	2
	SR	999	2
α	SN	999	5
	SR	999	0

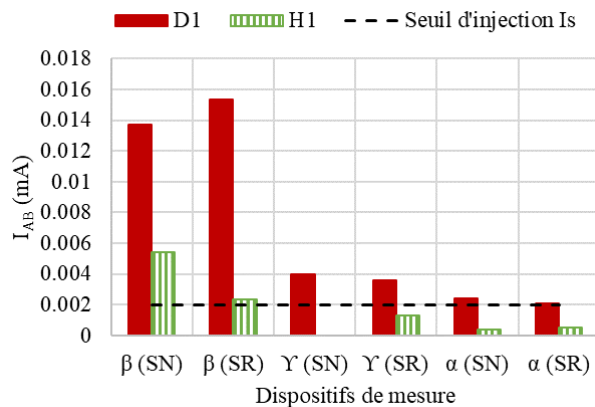


Fig. 5. Le courant I_{AB} pour le Douglas et le Hêtre

3 Algorithme de tri de données : échelle intermédiaire

3.1 Protocole expérimental et inversion numérique

Un échantillon de Douglas de dimensions $320 \times 95 \times 95 \text{ mm}^3$ a été conditionné dans une enceinte régulée à une humidité relative de 86%. Il a été instrumenté d'une ligne de 21 électrodes espacées de 15 mm et enfoncées de 10 mm parallèlement à l'orientation des fibres. Afin de construire une cartographie de résistances, un multiplexage a été effectué : un balayage horizontal en maintenant constante la distance entre A, B, M, et N, l'ensemble se déplaçant le long d'un profil de l'échantillon, et un balayage vertical avec trois niveaux de profondeurs d'investigation $n = \{1, 2, 3\}$ (Fig. 6). La configuration Dipôle-Dipôle a été choisie de par son faible couplage électromagnétique entre les lignes de courant et de potentiel et sa forte densité de points de mesures. Ce protocole expérimental a été proposé pour l'évaluation d'un gradient d'humidité unidirectionnel [7]. Dans cette étude, les résultats expérimentaux des mesures prises après 1033 jours de conditionnement sont traités. Cette période est supposée suffisante pour garantir une teneur en eau homogène quelle que soit la position du quadripôle. Les mesures ont été effectuées dans les deux sens SN et SR (en inversant le faisceau des électrodes d'une façon manuelle pour ce dernier).

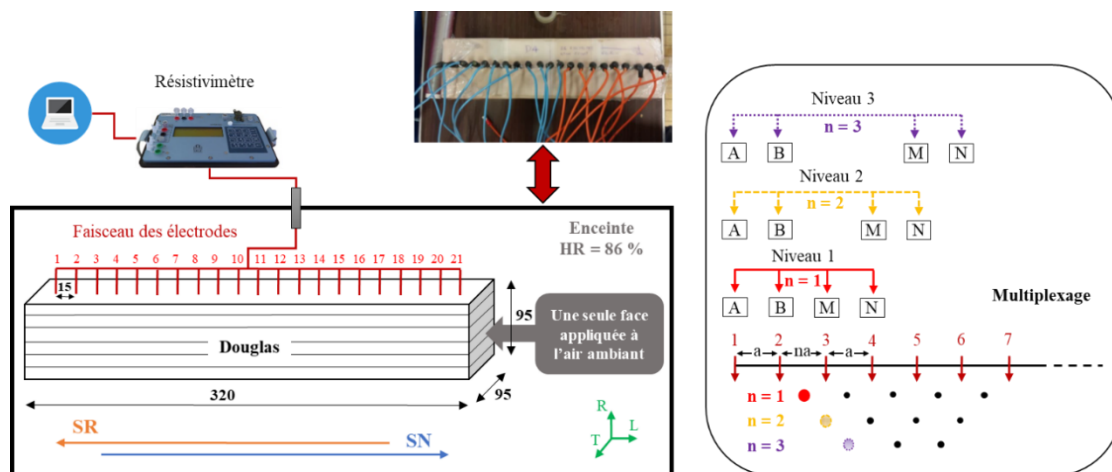


Fig. 6. Protocole expérimental (échelle intermédiaire)

Afin de déterminer les valeurs de résistivité associées aux mesures de résistances obtenues, nous avons eu recours à l'approche d'inversion numérique proposée par Nguyen [7] [8] qui repose sur la minimisation des écarts entre ces mesures et les résistances calculées par méthode numérique. Les valeurs de ces derniers sont issues d'un modèle direct par éléments finis d'injection électrique, fidèle à la configuration géométrique étudiée. La discrétisation de l'échantillon en 10 tranches de largeurs variables (plus épaissées aux bords et en particulier à celui correspondant à la face sèche) a présenté l'écart le plus faible entre les résistances mesurées et calculées numériquement (Fig. 7).

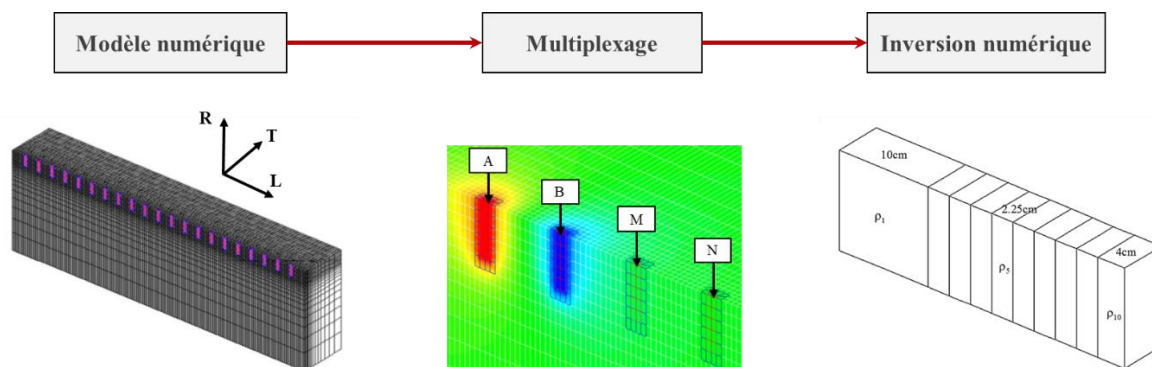


Fig. 7. Modèle direct, multiplexage et discrétisation numérique de l'échantillon

3.2 Tri de données

3.2.1 Intérêt et Principe

Suite au multiplexage, 51 points de mesures expérimentales sont possibles dans chaque sens. A cause d'un défaut de manipulation, les mesures incluant l'électrode 21 n'ont pas été effectuées dans le sens SN, ce qui réduit le nombre de données à 48. Dans un premier temps, l'ensemble des 48 données expérimentales sont introduites dans l'algorithme d'inversion. Ensuite, un tri est réalisé afin d'éliminer les mesures de résistances présentant une déviation standard élevée et/ou un seuil d'injection de courant dépassé. Les points sélectionnés seront éliminés avant une seconde inversion numérique. Le tri effectué réduit le nombre de quadripôles de 48 à 42. Un premier diagnostic révèle un problème au niveau de l'électrode 15 quand elle est impliquée dans l'injection au moment de la prise de mesures (Tab. 3). Cela est dû peut-être à un mauvais contact ou une mauvaise mise en place des électrodes (défaut d'enfoncement) au moment de la première mesure dans le sens SN. En outre, les mesures obtenues dans le sens SR présentent une déviation standard très faible pour les différents quadripôles ($Q < 5\%$). Cela est dû probablement à un meilleur contact au moment de la prise de mesures.

Tab. 3. Les quadripôles présentant une déviation standard élevée dans le sens SN

A	B	M	N
14	15	16	17
14	15	17	18
14	15	18	19
15	16	17	18
15	16	18	19
15	16	19	20

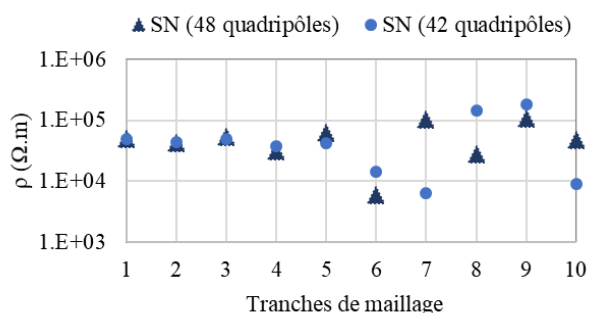


Fig. 8. Les résultats d'inversion pour le sens SN

Les résultats de l'inversion numérique montrent une différence significative au niveau de certaines valeurs de résistivités obtenues après le tri sur l'ensemble des quadripôles obtenus dans le sens SN. Cette différence touche particulièrement les 5 dernières tranches du maillage dans lesquelles l'électrode 15 est impliquée. En effet, la zone d'influence dépend de la position des quadripôles éliminés. Par conséquent, la nécessité d'un tri de données expérimentales apparaît fondamentale afin de corriger les données et améliorer donc, la qualité de l'inversion numérique.

Nous proposons par la suite un algorithme de tri pré-inversion prenant en compte les données expérimentales obtenues par les deux chemins de multiplexage SN et SR (Fig. 9). L'idée est d'utiliser les données de SR, présentant une déviation minimale, pour valider notre algorithme. L'algorithme est basé sur l'hypothèse de symétrie entre les sens de multiplexage SN et SR, Il prend en compte aussi le seuil d'injection de l'outil de mesure et évalue la qualité des mesures (probablement dû au contact électrode-bois) grâce au facteur qualitatif de leur déviation standard (paragraphe 2.3). Son objectif est de maximiser de nombre de données fiables qui seront introduites dans l'algorithme d'inversion.

Avec :

- $R(i)$: les mesures de résistances pour les différents quadripôles, $R = |\Delta V_{MN}/I_{AB}|$;
- I_{AB} : le courant injecté entre les dipôles A et B ;
- I_s : le seuil d'injection du courant (limite matériel), $I_s = 0.002$ mA ;
- Q_s : le seuil de la déviation standard fixé par l'opérateur, $Q_s = 5\%$;
- SN, SR : sens normal et sens reverse, respectivement.

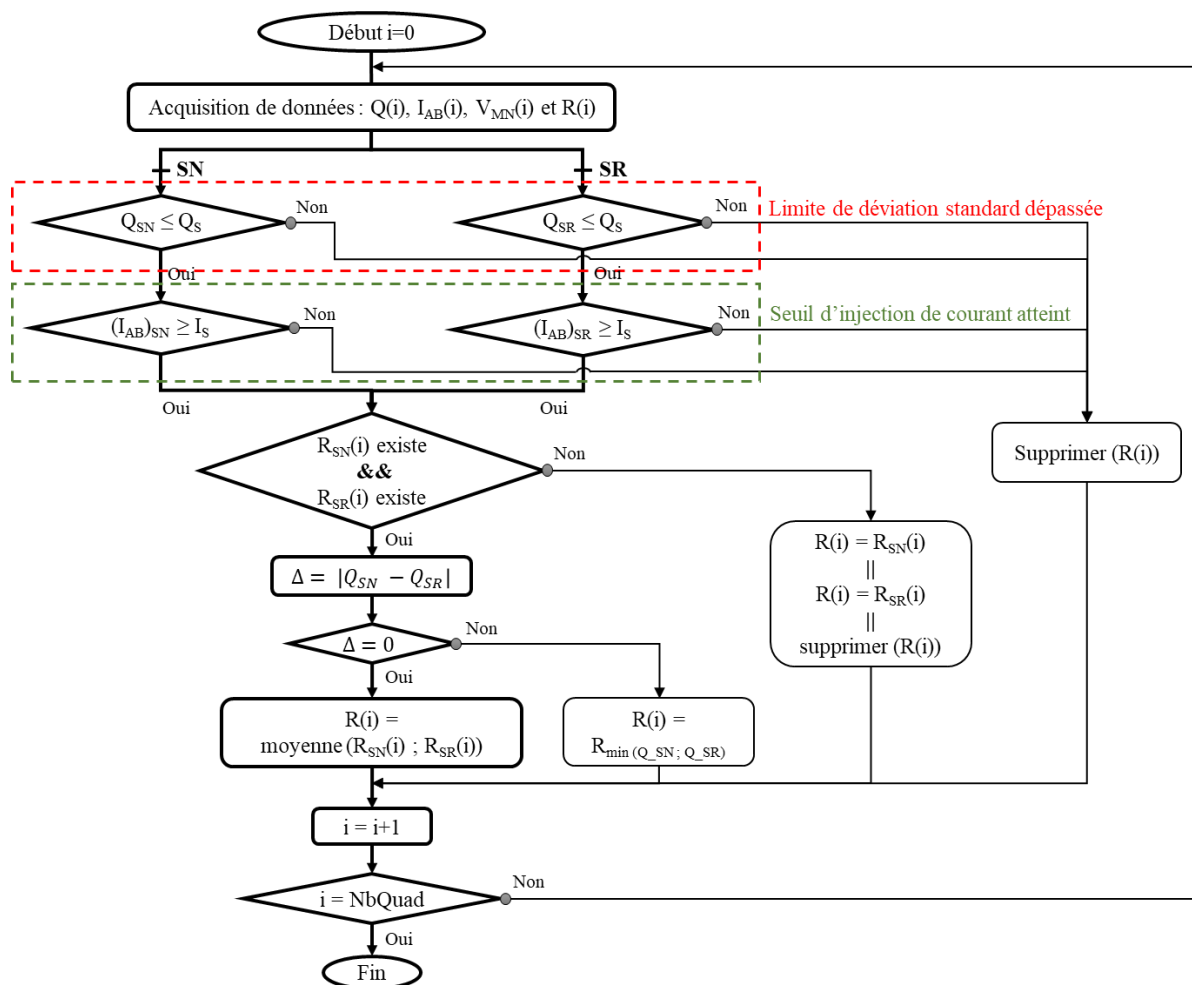


Fig. 9. Principe de l'algorithme de tri de données

3.2.2 Résultats de l'application de l'algorithme de tri

Le champ de l'humidité interne est défini grâce à une loi de passage qui relie le profil de résistivité au profil de teneur en eau correspondant (Eq. 3). L'identification des constantes « matériau » E et F a été effectuée en comparaison avec des résultats issus de mesures gamma-densimétriques [10].

$$\ln(\rho) = E + F \cdot \ln(w) \quad \text{avec} \quad \begin{cases} E = -4.53 \\ F = -7.87 \end{cases} \quad (\text{Eq. 3})$$

La Fig. 10 présente les résultats de la teneur en eau dans l'échantillon dans le sens SN, le sens SR et après l'application du tri de données proposée dans la Fig.9. L'algorithme nous a permis de récupérer les données manquantes de l'électrode 21 grâce au sens SR, par la suite, 51 points de mesures ont alimenté l'inversion numérique. Dans le sens SN, les niveaux de teneur en eau très variables obtenus ne sont pas cohérents avec l'homogénéité attendue dans l'échantillon. Dans le sens SR, le niveau de la teneur en eau est bien relativement constant, quelle que soit la position sur l'échantillon. Les résultats obtenus après tri sont similaires à ceux du sens inverse, corrigent dans le bon sens ceux du sens normal et nous montrent un gradient en cohérence avec l'homogénéité de la teneur en eau.

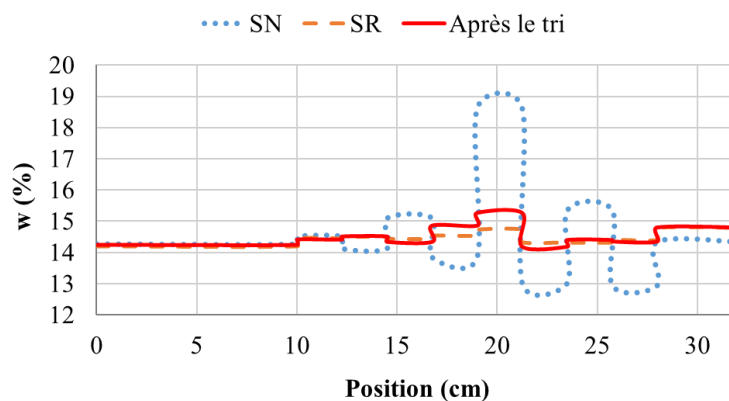


Fig. 10. Les résultats du tri de données expérimentales

4 Applications pour des éléments de structure : échelle in-situ

Dans le cas du monitoring in-situ à long terme, deux problématiques sont à résoudre : l'entrée de l'eau dans les interstices capillaires tout au long de l'électrode, et la diminution de la pression de contact entre le bois et l'électrode entraînant le desserrage de cette dernière. En effet, les électrodes ne maintiennent pas le contact électrique en raison du phénomène de retrait-gonflement du bois et de l'incapacité du métal à produire une adhérence mécanique durable avec les cellules du bois. Afin de remédier à ces problématiques, nous proposons un couplage des solutions éprouvées par Kosch et al. [11] et Brischke et al. [12] (Fig. 11). Des électrodes à base de vis en acier inoxydable ont été choisies grâce à leur simple manipulation et à la disponibilité des différentes longueurs. L'absorption d'eau capillaire peut être évitée à l'aide d'un joint d'étanchéité et en collant la partie supérieure de l'électrode. Pour assurer la profondeur d'investigation requise, le corps de l'électrode est isolé à son tour par une gaine thermo-rétractable. Une connexion durable et conductrice entre la tête de mesure et le matériau est assurée grâce à une colle conductrice caractérisée par une résistivité inférieure à $0.01 \Omega \cdot m$. Les résultats de cette démarche sont tout à fait encourageants montrant une bonne applicabilité à l'échelle laboratoire suite aux essais effectués sur les échantillons de Douglas et de Hêtre et présentés dans le paragraphe 2.

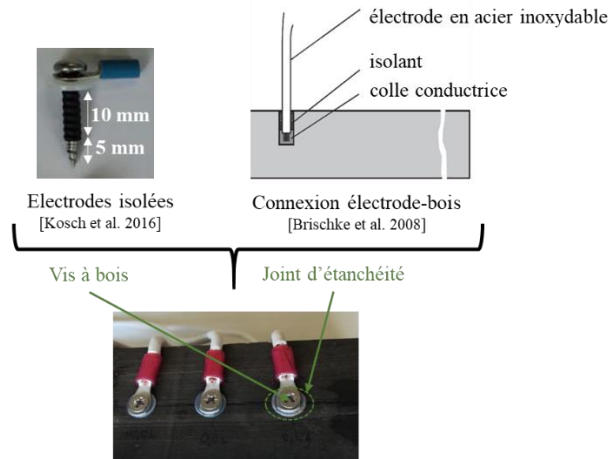


Fig. 11. Stratégie expérimentale pour les électrodes

Par ailleurs, pour des applications expérimentales in-situ, une solution basée sur l'utilisation des organes des assemblages comme électrodes de mesure est proposée. Plusieurs configurations ont été testées, tenons l'exemple de la configuration « équatorial » (Fig. 12) qui a présenté des mesures stables en termes de déviation standard et de seuil d'injection de courant. Les résultats d'une première étude de faisabilité ont montré leur dépendance à la température (Fig. 13). En effet, la température représente probablement le facteur explicatif le plus important dans le cas d'une application in-situ. Une étude de l'impact de la température sur la résistivité électrique sera donc nécessaire.

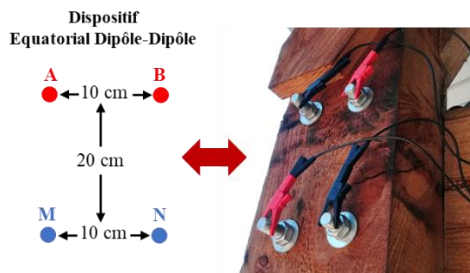


Fig. 12. Monitoring in-situ à l'aide des éléments d'assemblage

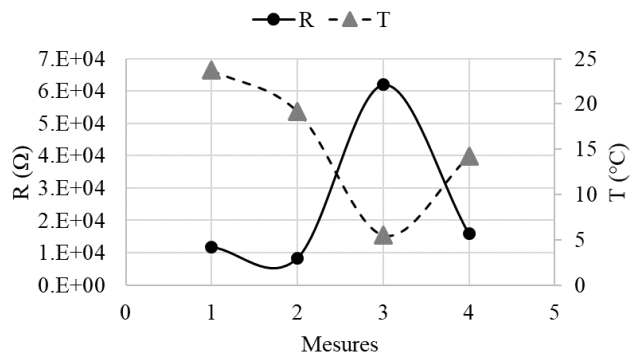


Fig. 13. Impact de la température sur la résistance électrique

5 Conclusion et perspectives

Pour des conditions hydriques stabilisées, nous avons montré la capacité de la mesure électrique multiplexée à dissocier les niveaux de résistances entre les différents dispositifs et deux essences (un résineux et un feuillu). Cette étude nous a servi à calibrer l'outil de mesure et à développer un algorithme de tri de données pré-inversion appliqué pour la détermination de la teneur en eau d'un échantillon de Douglas de dimensions décimétriques. Ce tri de données, qui est basé sur la symétrie des mesures dans les deux sens de multiplexage, nous a conduit à corriger des mesures, et ce, avec une diminution de leur déviation standard. A l'échelle structurale, les verrous induits par l'entrée de l'eau capillaire et le problème de contact électrode-bois devront être levés grâce à la stratégie expérimentale proposée.

A plus long terme, l'étude paramétrique nous permettra d'alimenter le modèle d'inversion avec des données plus précises en combinant 3 configurations différentes (α , β et γ) dans 2 sens de multiplexage (SN, SR). Des protocoles expérimentaux seront développés aussi afin de promouvoir un outil de surveillance des ouvrages d'art en bois en service dans des environnements climatiques variables, en tenant compte des effets de la température en particulier. Cela est indispensable pour aboutir, à terme, à des cartographies robustes d'hygrométries dans des éléments massifs.

Remerciements

Les auteurs remercient les étudiants Alexis Brindeau et Romain Robache pour leur contribution au développement de ce travail dans le cadre de leur projet master 2 au sein de la Faculté des Sciences & Techniques d'Egletons.

Références

- [1] M. Green, & J.E. Karsh, Tall Wood - The case for tall wood buildings. Report prepared for the Canadian Wood Council on behalf of the Wood Enterprise Coalition and Forest Innovation Investment, Vancouver, BC (2012).
- [2] H. Cruz, D. Yeomans, E. Tsakanika et al., Guidelines for on-site assessment of historic timber structures. *International Journal of Architectural Heritage*, 9(3), 277-289 (2015).
- [3] F. Dubois, J.M. Husson, N. Sauvat & N. Manfoumbi, Modeling of the viscoelastic mechano-sorptive behavior in wood. *Mechanics of Time-Dependent Materials*, 16(4), 439-460 (2012).
- [4] W. Hafsa, N. Angellier, M. Takarli & I.O. Pop, Vers la qualification in-situ de la teneur en eau des structures bois via une approche électrique résistive, 7^{èmes} journées du GDR 3544 Sciences du bois, Cluny (2018).
- [5] N. Björngrim, O. Hagman & X.A. Wang, Moisture content monitoring of a timber footbridge. *BioResources*, 11(2), 3904-3913 (2016).
- [6] P. Dietsch, A. Gamper, M. Merk, & S. Winter, Monitoring building climate and timber moisture gradient in large-span timber structures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 5(2), 153-165, (2015).
- [7] T. A. Nguyen, Approches expérimentales et numériques pour l'étude des transferts hygroscopiques dans le bois, Thèse, Université de Limoges (2014).
- [8] M.D. Pham, T.A. Nguyen, W. Hafsa et al., Experimental-numerical resistivity measurements approach for characterization in structural timber. In international conference on Collaboration in Research and Education for Sustainable Transport development (CoREST), Vietnam (2018).
- [9] H. F. Vermaas, 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 (1975).
- [10] T. A. Nguyen, N. Angellier, S. Caré, L. Ulmet, & F. Dubois, Numerical and experimental approaches to characterize the mass transfer process in wood elements. *Wood Science and Technology*, 51(4), 811-830 (2017).
- [11] J. Koch, A. Simon & R.W. Arndt, Monitoring of moisture content of protected timber bridges. In World Conference on Timber Engineering (p. 8) (2016).
- [12] C. Brischke, A.O. Rapp & R. Bayerbach, Measurement system for long-term recording of wood moisture content with internal conductively glued electrodes. *Building and Environment*, 43(10), 1566-1574 (2008).