
Evaluation de Champs de Résistivité Electrique de Matériaux Hygroscopiques : vers le Monitoring et le Diagnostic Hydrique des Structures

W. HAFSA¹, M. D. PHAM^{1,2}, N. ANGELLIER¹, M. TAKARLI¹, L. ULMET¹, I. O. POP¹, T. A. NGUYEN², F. DUBOIS¹

¹ *Université de Limoges, GC2D Laboratoire de Génie Civil, Diagnostic et Durabilité, 17 Boulevard Jacques Derche, F-19300 Egletons – France. nicolas.angellier@unilim.fr,*

² *Université des Transports d'Ho Chi Minh Ville, Vietnam*

RÉSUMÉ. Le laboratoire GC2D-Egletons développe un dispositif expérimental s'appuyant sur des mesures résistives pour déterminer la répartition spatiale du taux d'humidité de matériaux hygroscopiques. Les expérimentations menées participent aussi au développement des outils de modélisation de la diffusion dans ces matériaux.

ABSTRACT. The GC2D Laboratory (Egletons) improves a resistivity measurement device to determine the spatial distribution of moisture content in hygroscopic materials. These measurements should also help to develop numerical tools for diffusion process in these materials.

MOTS-CLÉS : teneur en eau, bois, méthode inverse, résistivité.

KEY WORDS: moisture content, timber, inverse method, resistivity.

1. Introduction

Les matériaux de construction hygroscopiques, comme le bois ou la terre crue, sont particulièrement sensibles à l'humidité. En effet, leurs propriétés physiques et mécaniques dépendent de la teneur en eau. D'autre part, la répartition de l'humidité dans un élément de construction dépend de l'évolution des conditions hygrothermiques de l'air ambiant ainsi que des mécanismes transitoires de diffusion d'eau au cœur du matériau. Il est donc difficile de connaître le profil d'humidité dans les éléments structuraux massifs (exemple de poutres lamellé-collé d'ouvrages d'art). Les teneurs en eau en surface et à cœur peuvent être très variables et hétérogènes. Dans un contexte de diagnostic ou de surveillance d'ouvrage, il est donc nécessaire d'avoir une vision tridimensionnelle de l'état hydrique à des points singuliers.

Cette problématique est un point majeur qui limite aujourd'hui le développement des structures lorsque les matériaux hygroscopiques ont un rôle structurel, et pour lesquelles la question de la durabilité est intimement liée aux variations d'humidité interne [DUB 2012]. Les gestionnaires d'ouvrages proposeront ce type de solutions dès lors que la question de la surveillance de l'humidité interne sera réglée.

Dans ce contexte, il a été développé un dispositif expérimental s'appuyant sur des mesures résistives [LIN 2012] pour déterminer la répartition spatiale du taux d'humidité dans un élément de structure intermédiaire entre le laboratoire et l'in situ. Les expérimentations menées participeront aussi au développement des outils de modélisation de la diffusion dans les matériaux hygroscopiques.

Plus particulièrement, ce papier présente l'approche expérimentale adoptée. Elle est basée sur des mesures électriques effectuées sur des échantillons de Douglas suivant les directions principales d'orthotropie à une teneur en eau donnée. Ces mesures permettent de remonter au champ tridimensionnel de résistivité dans un matériau anisotrope.

2. Approche expérimentale

L'injection de courant électrique dans le matériau bois repose sur l'adaptation d'un résistivimètre utilisé en géophysique. Cette adaptation a concerné la conception de sondes et câbles spécifiques et l'augmentation de la gamme d'injection de courant par le biais d'un module diviseur de courant. Le principe est de transmettre un courant d'intensité I entre 2 électrodes d'injection $C1$ et $C2$ et de mesurer la différence de potentiel ΔV entre 2 électrodes de réception $P1$ et $P2$. La configuration dipôle-dipôle a été choisie grâce à son faible couplage électromagnétique entre les lignes de courant et de potentiel et à une forte densité de points de mesures.

Deux échantillons de Douglas (issus de la même planche) de section $9,5 \times 9,5 \text{ cm}^2$ et de longueurs respectives 32 et 9,5 cm ont été conditionnés jusqu'à l'équilibre dans une enceinte régulée à une humidité relative de 86% et à une température de $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Chaque échantillon a été préalablement équipé d'une ligne d'électrodes espacées de 1,5 cm et enfoncées de 1 cm. Une ligne d'électrode équipe le premier échantillon parallèlement à l'orientation des fibres. Un ceinturage d'électrode équipe le second autour de son périmètre dans le plan Radial-Tangential, Figure 1.

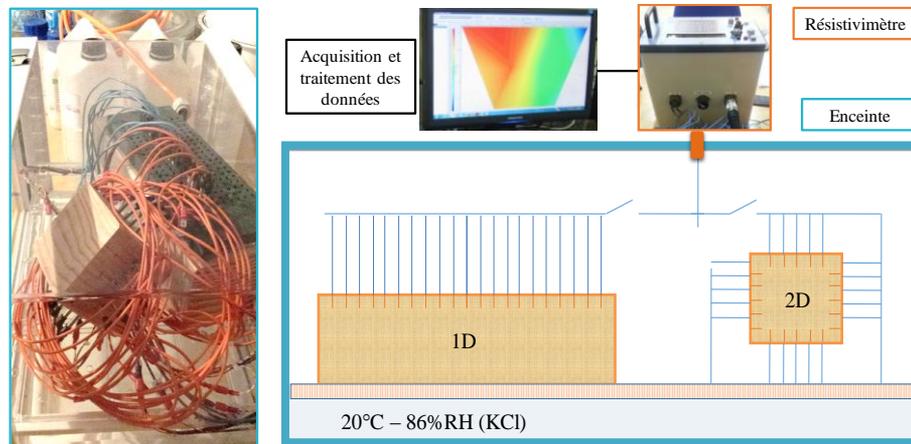


Figure 1. Dispositif expérimental.

Le mode multi-électrodes multiplexé permet d'obtenir une répartition spatiale des mesures du rapport $|\Delta V_{P1P2}/I_{C1C2}|$ pour les deux échantillons, Figure 2. On observe, dans les deux cas, un niveau mesuré relativement constant, quelle que soit la position sur la ligne d'électrodes. Cela est cohérent avec une homogénéité de la teneur en eau dans les échantillons. Les variations locales observées proviennent principalement des contraintes géométriques subies par les lignes de courant, en particulier pour l'échantillon ceinturé. Par ailleurs, on note que le niveau obtenu dans cette deuxième configuration est environ 4 fois plus élevé.

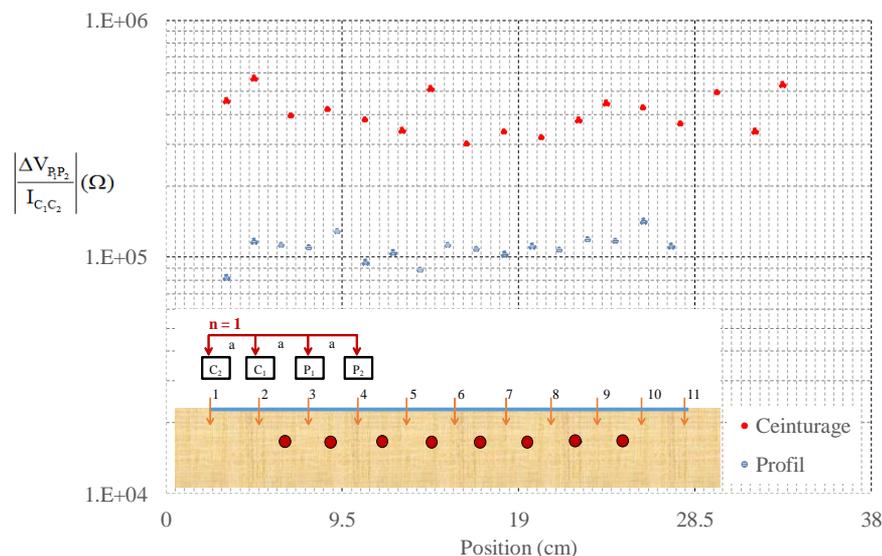


Figure 2. Répartition spatiale des mesures.

3. Détermination et comparaison des résistivités

Afin de déterminer les valeurs de résistivité associées aux mesures obtenues, nous avons eu recours à une méthode inverse de minimisation des écarts [NGU 2014] entre ces mesures et les rapports $|\Delta V_{P1P2}/I_{C1C2}|$ calculés par méthode numérique. Ces valeurs sont issues d'un modèle direct par éléments finis [CAS 2012] d'injection électrique, fidèle aux deux configurations géométriques étudiées, Figure 3.

La résistivité moyenne obtenue après inversion est de $4,55E04 \Omega.m$ pour le profil dans le sens Longitudinal et de $2,00E05 \Omega.m$ pour le ceinturage dans le plan Radial-Tangentiel. Il y a donc un rapport de 4,4 entre les deux directions d'injection, et ce, pour une teneur en eau globale homogène mesurée de 18,1% (double pesée avant et après passage à l'étuve de l'échantillon n°2). Ces résultats sont en accord avec les auteurs qui ont traité de l'effet de l'anisotropie du bois dans la loi d'Ohm généralisée [STA 27], [JAM 63]. En effet, la résistivité dans les directions Radiale et Tangentielle est plus élevée que dans la direction Longitudinale.

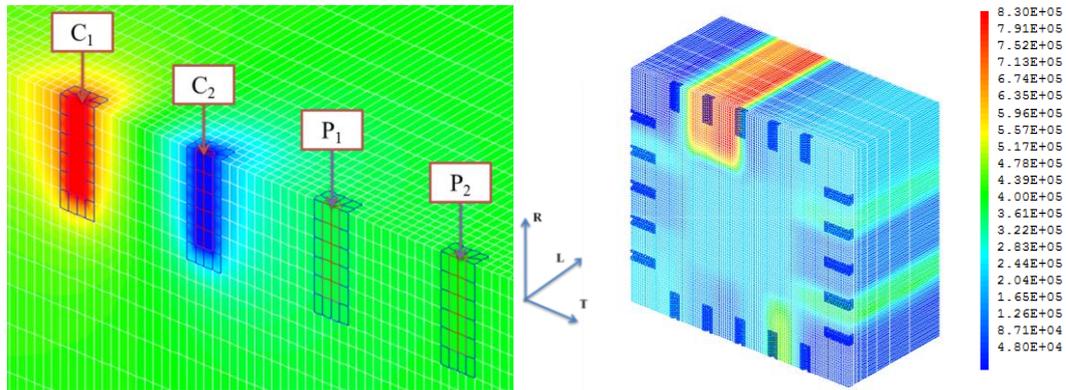


Figure 3. Injection électrique numérique, champ de résistivité identifié ($\Omega.m$) pour le ceinturage.

Il est à noter qu'en moyenne, le meilleur écart relatif entre les $|\Delta V_{P1P2}/I_{C1C2}|$ expérimentaux et numériques est de 7% et est obtenu dans le cas du « profil » Longitudinal. Il est deux fois plus faible que pour le même type d'identification pour une teneur en eau plus faible de 2%. Il est par contre dix fois plus élevé que pour le même type d'identification avec des champs de résistivité numériques connus « parfaits » ayant servis pour la validation du modèle d'injection et de l'algorithme d'inversion. Le challenge est donc de réduire cet écart afin d'affiner les champs de résistivité mesurés. Ils serviront d'indicateurs effectifs des champs de teneur en eau. Cela va passer par une optimisation numérique (maillage et algorithmes d'inversion) et expérimentale (protocole de traitement des données avant inversion).

4. Conclusions et perspectives

Pour des conditions hydriques stabilisées, nous avons montré la capacité de la mesure électrique multiplexée pour dissocier les niveaux de résistivité entre deux directions d'anisotropie d'échantillons de Douglas de dimensions décimétriques. Les approches expérimentale et numérique développées, si elles nécessitent encore d'être optimisées, représentent une voie encourageante pour l'évaluation des champs de résistivité corrélés à une répartition spatiale d'eau liée dans les matériaux hygroscopiques.

De manière plus générale, l'objectif de ces travaux consiste à calibrer l'outil de mesure (recherche expérimentale de la relation de dépendance entre résistivité et teneur en eau) sur des matériaux hygroscopiques comme le bois et la terre crue. A plus long terme des protocoles expérimentaux seront développés afin de promouvoir un outil de diagnostic ou de surveillance des ouvrages en service dans des environnements climatiques variables. Nous pensons, comme développement potentiel, le monitoring des ouvrages d'art en bois.

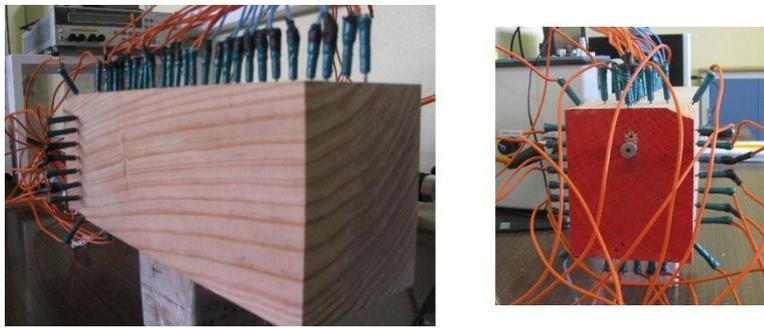


Figure 4. *Nouvelle campagne expérimentale.*

A plus long terme, ces approches devront être complétées par d'autres sources de mesures (mesures plus directes) permettant une auto calibration des cartes résistives mesurées. Les mesures employant les ultrasons ou les ondes électromagnétiques seront étudiées dans le périmètre du projet Nouvelle Aquitaine SouBois.

Egalement le verrou induit par de longues lignes de courant dans un matériau sec peu conducteur devra être levé en développant des relais numériques (modèles par éléments ou différences finies par exemple) pour aboutir, à terme, à des cartographies robustes d'hygrométries dans des éléments massifs.

Cependant, à plus court terme, l'amélioration du protocole expérimental actuel est envisagée selon ces axes principaux, Figure 4. Premièrement, il est nécessaire d'étudier l'effet du type, du nombre et de l'implantation des électrodes. Dans ce contexte, d'autres configurations de quadripôle (traversant, équatorial) seront explorées. Les propriétés diélectriques, telles que la chargeabilité par polarisation provoquée seront évoquées.

5. Bibliographie

- [DUB 2012] DUBOIS F., HUSSON J.M., SAUVAT N., MANFOUMBI N., Modeling of the viscoelastic mechano-sorptive behavior in wood. *Mechanics of Time Dependent Materials*, 2012.
- [LIN 2012] LIN C.J., CHUNG C.H., YANG T.H., LIN F.C., Detection of electric resistivity tomography and evaluation of the sapwood-heartwood demarcation in three Asia gymnosperm species. *Silva Fennica* 46(3), 415-424, 2012.
- [NGU 2014] NGUYEN T.A., Approches expérimentales et numériques pour l'étude des transferts hygroscopiques dans le bois. Génie civil. Université de Limoges, 2014. Français. <NNT : 2014LIMO0034>.<tel-01130828>.
- [CAS 2012] Cast3m, (2012) CAST3M is a research FEM environment; its development is sponsored by the French Atomic Energy Commission. <<http://www-cast3m.cea.fr/>>
- [STA 27] Stamm A. J., The electrical resistance of wood as a measure of its moisture content. *Ind Eng Chem*, 19(9) 1021-1025, 1927.
- [JAM 63] JAMES, W. L., *Electric moisture meters for wood* (Vol. 8). US Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1963.