



**HAL**  
open science

**Couplage de l'imagerie thermique et du chauffage par  
impulsion EM pour caractérisation de l'hygrométrie du  
bois : mise en évidence de la corrélation entre  
rayonnements thermiques mesurés et simulations du  
DAS**

Annick Pénarier, Sylvie Jarrix, Philippe Nouvel, Hervé Louche, Christophe  
Coillot, Léa de March, Théo Valcke, Bruno Clair, Frederic C. Do

► **To cite this version:**

Annick Pénarier, Sylvie Jarrix, Philippe Nouvel, Hervé Louche, Christophe Coillot, et al.. Couplage de l'imagerie thermique et du chauffage par impulsion EM pour caractérisation de l'hygrométrie du bois : mise en évidence de la corrélation entre rayonnements thermiques mesurés et simulations du DAS. 23ème Journées Nationales Microondes, Jun 2024, Fréjus, France. hal-04796855

**HAL Id: hal-04796855**

**<https://hal.science/hal-04796855v1>**

Submitted on 21 Nov 2024

**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.

# Couplage de l'imagerie thermique et du chauffage par impulsion EM pour caractérisation de l'hygrométrie du bois : mise en évidence de la corrélation entre rayonnements thermiques mesurés et simulations du DAS

A. Penarier<sup>1</sup>, S. Jarrix<sup>1</sup>, P. Nouvel<sup>1</sup>, H. Louche<sup>2</sup>, C. Coillot<sup>3</sup>, Léa de March<sup>2</sup>, Théo Valcke<sup>1</sup>, B. Clair<sup>2</sup>, and F. C. Do<sup>4</sup>

*1 IES, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, FRANCE*

*2 LMGC, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, FRANCE*

*3 L2C, Univ Montpellier, CNRS, Montpellier, FRANCE*

*4 Eco&Sols, Univ Montpellier, CIRAD, INRAE, IRD, Institut Agro, Montpellier France  
sylvie.guenard-jarrix@umontpellier.fr*

**Résumé** – Dans l'optique d'une caractérisation de l'état hydrique du bois, des échantillons de hêtre et de douglas sont chauffés par onde électromagnétique, puis leur rayonnement thermique est mesuré par caméra. Dans le même temps des simulations du Débit d'Absorption Spécifique sont effectuées à l'aide d'un logiciel électromagnétique 3D et comparées au rayonnement thermique pour différentes géométries d'échantillons et différentes teneurs en eau.

## 1. Contexte du travail

Le travail présenté ici est développé au sein du projet « TIMFLOW » [1] issu de l'AAP 2020 du CNRS « Changement Climatique ». Les ressources en eau se font rares et le secteur agricole doit repenser sa gestion de l'eau. Ceci passe par une caractérisation in-situ de l'état hydrique des plantes en temps réel. « TIMFLOW » explore une méthode non invasive d'étude du flux et du contenu en eau dans le bois après chauffe localisée par onde électromagnétique (EM). A terme il s'agit de proposer un appareillage portable complet de chauffe pour détermination de l'état hydrique et du flux de sève. Ce papier se focalise sur la faisabilité du système de caractérisation de l'état hydrique par le Débit d'Absorption Spécifique (DAS). Les résultats sont issus d'expérimentations indoor réalisées sur des échantillons de hêtre. Des simulations EM du DAS sont ensuite implémentées et comparées au rayonnement thermique révélé par une caméra infra-rouge (IR).

Dans cet article la section 2 donne un aperçu des méthodes de chauffe des plantes pour évaluer leur teneur en eau, et place le projet « TIMFLOW » en perspective. Le chapitre 3 décrit la structure macroscopique du bois et montre le lien entre le DAS, la teneur en eau du bois et sa conductivité thermique. Le protocole de test et les mesures sont exposés en section 4. Les DAS simulés et comparés avec les résultats expérimentaux sont donnés section 5. La conclusion souligne la faisabilité de caractérisation hydrique du bois à travers son effet sur le DAS.

## 2. Les méthodes de chauffe du bois

Pour mesurer la teneur en eau  $W$  du bois, l'approche directe consiste à prélever un échantillon pour le peser, le chauffer pour évaporer l'eau, et le peser à nouveau pour avoir sa masse anhydre. Cette méthode destructive longue nécessite l'utilisation de matériel difficile à transporter sur le terrain. Des méthodes « indirectes » se basent sur les propriétés physiques ou électriques du bois. La méthode résistive [2][3] comporte deux électrodes insérées dans un échantillon, pour faire circuler un courant continu et relier la résistance électrique à  $W$ . Cette méthode intrusive ne s'utilise que pour des teneurs en eau  $W$  comprises entre 7% et 30%. Une autre méthode électrique, non destructive, permet de relier la capacité électrique à  $W$  grâce à des plaques de cuivre posées sur le bois[4]. Néanmoins la taille et la pression de collage des plaques influencent la précision de mesure. Une méthode électromagnétique consiste à placer un morceau de bois dans une cavité EM excitée par un signal haute fréquence [5]. Dans ce travail l'évolution des fréquences de résonance permet de déterminer les propriétés du matériau sous test. Toutes ces méthodes ont l'inconvénient majeur d'être invasives, voire destructrices. Enfin les méthodes de thermographie infrarouge associées à une excitation thermique avec de puissantes lampes sont utilisables mais difficiles à implémenter sur site [6].

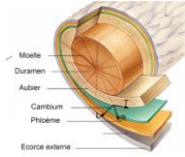
Le projet « TIMFLOW » a l'avantage de proposer une méthode de chauffe par onde EM localisée, non invasive. L'intensité du rayonnement thermique, lié au DAS, mesuré à la surface du bois, pourrait amener des informations précieuses sur son état hydrique.

## 3. Paramètres caractéristiques du bois

### 3.a. Structure macroscopique du bois

Le bois présente un comportement fortement anisotrope [7]. Cette étude concerne ainsi des échantillons d'arbres matures avec une structure interne stable. Sur une coupe transversale d'un tronc [8], cinq couches principales sont observées (cf. Figure 1). L'écorce externe protège l'arbre des agressions extérieures, et l'écorce interne notée « liber » ou « phloème », conduit la sève élaborée. En troisième couche, le cambium, couche de cellules pouvant

se diviser assurant la croissance du tronc, forme soit le phloème, soit la quatrième couche, l'aubier. L'aubier, de couleur plus claire, est poreuse, la sève brute y circule. Enfin le duramen, composé de cellules d'aubier mortes, est dur et dense pour assurer le soutien de l'arbre.



**Figure 1 : Structure macroscopique du bois.**  
Copyright (©) Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings

### 3.b. Liens entre paramètres thermophysiques et teneur en eau

Le bois est hygroscopique, il interagit avec l'eau contenue dans l'air ambiant. On évalue la teneur en eau  $W$  en % [7] dans le bois avec la relation (1).

$$W = \frac{m_{eau}}{m_{anhydre}} = \frac{m_{h\%} - m_{anhydre}}{m_{anhydre}} \quad (1)$$

avec  $m_{h\%}$  masse de l'échantillon,  $m_{eau}$  masse d'eau dans l'échantillon,  $m_{anhydre}$  masse de la matière anhydre.

L'eau contenue dans le bois augmente la chaleur spécifique  $C$  ( $J.kg^{-1}K^{-1}$ ), la conductivité thermique  $\lambda$  ( $W.m^{-1}K^{-1}$ ) et la densité volumique du bois  $\rho$  ( $kg.m^{-3}$ ). La dépendance de ces paramètres avec  $W$  peut être approchée par exemple par la relation suivante [9] :

$$C_{h\%} = \frac{C_{anhydre} + W C_{eau}}{1 + W} \quad (2)$$

$$\lambda_{h\%} = \frac{\lambda_{anhydre} + W \lambda_{eau}}{1 + W} \quad (3)$$

$$\rho_{h\%} = \rho_{anhydre} (1 + W) \quad (4)$$

avec  $C_{h\%}$  la chaleur spécifique pour un  $W$  donné,  $C_{anhydre}$  la chaleur spécifique du bois anhydre,  $C_{eau}$  celle de l'eau. Ces relations montrent une sensibilité des paramètres thermophysiques avec la teneur en eau, ils peuvent donc avoir une influence sur la réponse thermique du système étudié.

### 3.c. Le Débit d'Absorption Spécifique ou DAS

L'objectif est d'avoir un système compact de chauffe localisée par onde EM. La part de l'EM convertie en chaleur dans le bois correspond au Débit d'Absorption Spécifique (DAS) qui constitue donc la source de chaleur de ce problème [10]. Le DAS volumique ( $W/m^3$ ) est défini par :

$$DAS_{volumique} = \frac{\sigma E^2}{2} \quad (5)$$

avec  $E$  le champ EM ( $V.m^{-1}$ ) et  $\sigma$  la conductivité électrique du matériau ( $\Omega^{-1}m^{-1}$ ).

Un bois anhydre a une conductivité électrique de l'ordre de  $\sigma = 10^{-15} \Omega^{-1} m^{-1}$ , mais  $\sigma$  augmente drastiquement avec  $W$  et atteint  $\sigma = 10^{-9} \Omega^{-1}m^{-1}$  pour  $W = 7\%$  [11]. L'augmentation est moins rapide entre 7% et le point de saturation des fibres (PSF) de 30%. C'est dans cette gamme de  $W$  que les appareils de mesure sont les plus efficaces. Au-dessus du PSF,  $\sigma$  est moins sensible [11]. Nous choisissons toutefois de faire des mesures pour des  $W$  allant de 7% à 80% pour voir la faisabilité de caractérisation et le contraste des images.

Pour un matériau d'épaisseur  $e$  (m), surface chauffée  $S$  ( $m^2$ ) et résistance  $R$  ( $\Omega$ ),  $\sigma$  vaut :

$$\sigma = \frac{e}{RS} \quad (6)$$

Un modèle liant  $R$  à  $W$  est défini par [3] comme :

$$\log(\log(R) + 1) = a + Wb \quad (7)$$

avec  $a$  et  $b$  des paramètres dépendant de l'essence du bois étudié et déterminés expérimentalement.

En injectant (5) dans (4) on définit le DAS comme une fonction de la teneur en eau  $W$  comme suit (équation 8) :

$$DAS_{volumique} = \frac{eE^2}{2S 10^{(10aW+b-1)}} \quad (8)$$

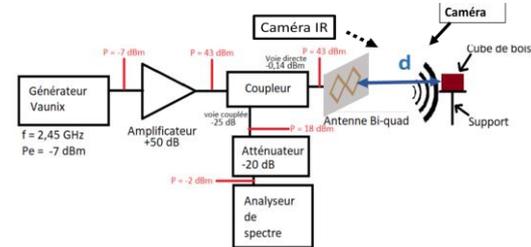
Par la suite le DAS sera directement obtenu par simulations EM.

## 4. Expérimentations et échantillons testés

### 4.a. Banc expérimental

Le banc de mesure est présenté Figure 2. Une onde est envoyée à la fréquence de résonance de l'eau  $f_0 = 2,45$  GHz, pour la chauffer. Le générateur de signal associé à un amplificateur de gain 50 dB donne une puissance émise avant antenne de  $P = 43$  dBm, valeur maximale possible du banc. L'antenne placée sur un support amovible est donc escamotée sans changer les réglages pour la mesure d'échauffement par caméra IR bolométrique (SmartIR640E). Tous les éléments de la chaîne de mesure sont testés séparément afin de déterminer leur atténuation exacte. La puissance en entrée d'antenne est monitorée par l'intermédiaire d'un coupleur directif.

Le protocole est le suivant. La caméra est mise en route et enregistre le rayonnement thermique émis par la surface de l'échantillon de bois pendant 5 s pour avoir une référence. Puis l'échantillon sous test est placé devant l'antenne pour le chauffer pendant une durée de 20 s. Ce temps optimal a été déterminé empiriquement, pour une chauffe détectable par la caméra sans surconsommation électrique. Enfin, l'antenne est basculée pour que la caméra filme l'évolution du rayonnement thermique sur 75s. Ce dernier est donné en niveaux informatiques (NI) sur 16 bits. Avec une loi de calibration il serait possible de convertir ces NI en température mais cela n'a pas été nécessaire dans cette étude.



**Figure 2 : Banc de mesure de chauffe localisée des échantillons de bois.**

### 4.b. Échantillons

Les échantillons de bois testés ont une teneur en eau  $W$  connue. Ils sont mis à l'étuve à 103°C pendant 24 h, en relevant leur masse avant et après, pour déterminer la valeur moyenne de  $W$  des échantillons secs à température ambiante. Avec une pipette d'eau et une balance de

précision on ajoute la masse d'eau pour obtenir la valeur de  $W$  souhaitée. Les échantillons sont conservés dans des tubes fermés pour laisser l'eau s'uniformiser dans le bois en évitant les échanges avec l'air ambiant.

Des échantillons cubiques de hêtre et de douglas sont testés (cf. Figure 3 a). Les épaisseurs  $e$ , le côté  $L$ ,  $W$ , et la distance  $d$  à l'antenne (cf. Figure 3 b) sont indiqués au niveau des résultats par un indice 1 ou 2 selon que la valeur est issue de la 1<sup>ère</sup> ou la 2<sup>ème</sup> colonne du Tableau 1.



Figure 3 : (a) Données géométriques des échantillons. (b) Repère des plans de coupe et distance  $d$  de la surface de l'échantillon au centre de l'antenne

Chaque échantillon est mesuré, remis dans un sac plastique fermé pour garder  $W$  le temps de tester un 2<sup>ème</sup> échantillon équivalent, puis re-mesuré.

N° d'échantillon	1	2
$W$	7 %	80 %
$d$	3 mm	10 mm
$L$	20 mm	40 mm
$e$	10 mm	20 mm

Tableau 1 : Paramètres du plan d'expérience : teneur en eau, distance à l'antenne, côté du cube et épaisseur des échantillons de bois

Les mesures sont répétées cinq fois, pour chaque échantillon. Le temps entre deux mesures d'un même échantillon est au maximum de 10 minutes. Un exemple de résultat expérimental de chauffe est présenté Figure 4 pour des cubes d'épaisseur  $e_1$ , côté  $L_1$  et distances  $d_1$ .

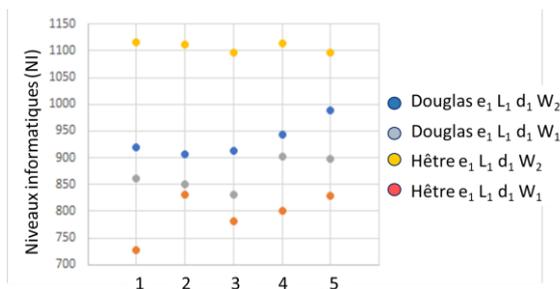


Figure 4 : Niveaux informatiques NI issus des mesures par caméra thermique, représentatifs de la chauffe d'échantillons de bois avec des  $W$  différents et mesurés cinq fois

L'écart type des NI varie entre 10 à 52. Les écarts de NI, pour les deux valeurs testées  $W_1$  et  $W_2$  sont significativement différents pour le hêtre. Pour le douglas les valeurs de NI pour  $W_1$  et  $W_2$  sont proches. Cela provient peut-être de sa structure présentant un fort contraste de cernes. Des mesures sur d'autres types de bois doivent être menées pour analyser ce résultat. Des variations de NI d'un même échantillon peuvent être dues

à la procédure expérimentale qui doit être affinée, dont le temps de repos entre deux mesures, et un contrôle environnemental plus poussé en termes de température et hygrométrie.

## 5. Simulation du DAS

Nous implémentons la faisabilité d'étude de l'état hydrique du bois par simulation du DAS après chauffe par onde EM. Les simulations sont menées avec le logiciel EM 3D CST qui possède une fonction « DAS » prédéfinie. Le matériau est considéré isotrope. Nous présentons ici les résultats pour le hêtre. Le Tableau 2 pour l'eau et le bois anhydre donne les valeurs nécessaires aux calculs des paramètres d'entrée des simulations données Tableau 3.

	Eau	Hêtre anhydre
Densité volumique	1000 (kg / m <sup>3</sup> )	700,9 (kg / m <sup>3</sup> )
Conductivité thermique $\lambda$	0.6 W / m.K	0.191 W / m.K
Diffusivité thermique $\alpha$	1.43 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> / s	1.51 10 <sup>-7</sup> m <sup>2</sup> / s
Chaleur spécifique $C_p$	4185 (J / kg.K)	1804.7 (J / kg.K)

Tableau 2 : Paramètres thermo-physiques issus de la littérature pour l'eau [12] et le hêtre anhydre [13].

$W$	7 %	80 %
Densité volumique	750 (kg / m <sup>3</sup> )	1260 (kg / m <sup>3</sup> )
Conductivité thermique $\lambda$	0.18 W / m.K	0.350 W / m.K
Chaleur spécifique $C_p$	1960 (J / kg.K)	2860 (J / kg.K)
Permittivité $\epsilon$	4+i	14+6i

Tableau 3 : Paramètres thermo-physiques issus de la littérature [9][14][15] pour deux valeurs de  $W$  des échantillons de bois de hêtre

La mesure thermique par caméra IR s'effectue sur la face du cube parallèle au plan  $xOy$ . Les simulations sont faites dans le plan  $xOy$  et dans le plan  $yOz$  selon une coupe à  $x = 0$  (cf. Figure 3 b). L'image de la caméra IR juste après chauffe est comparée au DAS simulé (Figure 5).

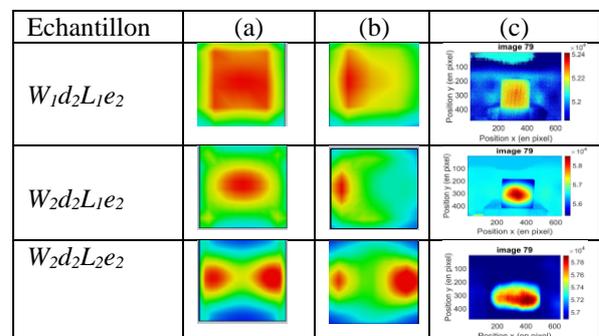
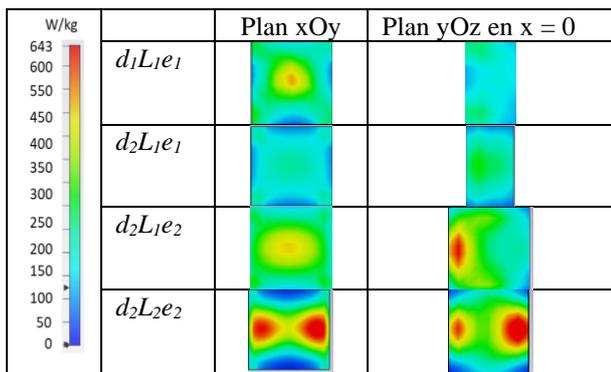


Figure 5 : Valeurs du DAS (a) simulé, face avant plan  $xOy$  (b) simulé, plan  $yOz$ , (c) rayonnement thermique mesuré par la caméra IR, plan  $xOy$ .

Nous constatons Figure 5 une très forte similitude entre la répartition du DAS à la surface de l'échantillon et

le rayonnement thermique mesuré par la caméra (colonnes (a) et (c)). La colonne (b) montre l'apport des simulations du DAS. En effet la coupe montre l'absorption d'énergie EM en profondeur, ce qui permet une caractérisation interne du bois. La caméra IR ne montre qu'un rayonnement thermique en surface. Par exemple, le graphe de la colonne (b) pour l'échantillon  $W_2d_2L_2e_2$ , est particulièrement intéressant puisqu'il montre dans ce cas une excitation plus en arrière du bois.

Des études plus approfondies seront effectuées pour étudier la teneur en eau en profondeur dans les différentes couches du bois. Rappelons ici que nous cherchons d'abord à montrer la similitude des résultats de chauffe par simulations du DAS et par imagerie thermique.



**Figure 6 : Valeurs de DAS simulées pour des échantillons de teneurs en eau  $W_2 = 80\%$**

Sur la Figure 6, les graphes du DAS dans le plan xOy et dans le plan yOz en  $x = 0$  sont normalisés par rapport à la valeur maximale obtenue sur tous les échantillons. Des graphes équivalents sont obtenus pour  $W_1$ , non présentés ici. Comme attendu, les comparaisons des résultats obtenus sur  $d_1L_1e_1$  et  $d_2L_1e_1$  montrent un DAS plus fort pour une distance échantillon-antenne plus courte. En observant les échantillons  $d_2L_1e_1$  et  $d_2L_1e_2$ , un point d'absorption plus grand est obtenu si l'épaisseur est plus grande. Enfin, une surface plus grande entraîne une plus grande absorption vers l'arrière de l'échantillon comme le montre la comparaison entre les cubes  $d_2L_1e_2$  et  $d_2L_2e_2$ .

## 6. Conclusion

Des échantillons de hêtre et de douglas avec une teneur en eau connue sont excités par onde électromagnétique à  $f = 2.4$  GHz. Une caméra IR filme le rayonnement thermique résultant, pour une gamme large de teneurs en eau allant de 7 % à 80 %. En parallèle, des simulations électromagnétiques sont menées pour déterminer le DAS. Une comparaison expérience / simulation confirme la forme des spots de chaleur mesurés par la caméra, et montre l'évolution en fonction de la géométrie des échantillons. Les simulations amènent une caractérisation supplémentaire en mettant en évidence des absorptions en profondeur. Les expérimentations sont à affiner avec un environnement hygrothermique monitoré, et avec des essais réalisés in-situ sur des tiges, branches ou troncs. Néanmoins la faisabilité par l'outil de simulation, de mesures de chauffe par ondes EM pour étudier le lien entre la teneur en eau, est largement validée.

## 7. Remerciements

Les auteurs remercient le CNRS, la Région Occitanie/Pyrénées Méditerranée à travers la plateforme HERMES.

## Références

- [1] A. Penarier et al., « *Thermal Imaging and Microwave for quick and mobile assessment of sap Flow and Water content in woody stems TIMFLOW* » Projet interdisciplinaire CNRS Changement Climatique AAP 2020.
- [2] W. Hafsa, « *Approche expérimentale-numérique basée sur la résistivité électrique pour l'évaluation de l'état hydrique du douglas* », Thèse de doctorat, Limoges, 2021.
- [3] F. Holger Forsén et al., « *Accuracy and functionality of hand held wood* », T.420, Technical Research Centre of Finland Espoo.
- [4] S.S. Irzaman et al., « *Electrical properties of indonesian hardwood* ». International Journal of Basic & Applied Science IJBAS-IJEN vol. 11 n°6, pp. 161-166, 2011.
- [5] H. Sahin, N. Ay, « *Dielectric properties of hardwood species at microwave frequencies* », J Wood Sci 50, pp. 375-380, 2004.
- [6] F.J. Madruga et al., « *Measuring the Water Content in Wood Using Step-Heating Thermography and Speckle Patterns-Preliminary Results* », Sensors, vol. 20, n°1, 2020.
- [7] T.A. Nguyen, « *Approches expérimentales et numériques pour l'étude des transferts hygroscopiques dans le bois* », Thèse de doctorat en Génie civil, Université de Limoges, 2014.
- [8] Guillaume Pot, « *Caractérisation mécanique du bois vert au cours de sa maturation et modélisation de la réaction gravitropique de jeunes peupliers* », Thèse de doctorat en Mécanique du Solide, Clermont-Ferrand 2, 2012.
- [9] N. Ludwig et al., « *Moisture detection in wood and plaster by IR thermography* », Infrared Physics & Technology vol. 46 n°1, pp. 161-166, 2004.
- [10] Y. Ruizhen et al., « *Optically and non-optically excited thermography for composites: A review* », Infrared Physics & Technology 75 pp. 26-50, 2016.
- [11] C. Skaar, « *Wood-water relations* », Springer Science & Business Media, 2012.
- [12] D Thiéry, « *Validation des calculs de transport d'énergie dans le logiciel Marthe* », Note Technique, NT EAU 2011/02, Avril 2012.
- [13] M. Ouakarrouch et al., « *Experimental Study of Thermophysical Properties of Wooden Materials used in Building Construction* » 7<sup>th</sup> International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Morocco, pp. 1-5, 2019.
- [14] G. Torgovnikov, « *Dielectric Properties of Wood and Wood-Based Materials* », 10.1007/978-3-642-77453-9.
- [15] S. Razafindratsima et al., « *Permittivity measurement of wood material over a wide range of moisture content* », Wood Science and Technology. 51, 2017.