



HAL
open science

Caractérisation du taux d'humidité dans les matériaux de construction géosourcés par une approche hyperfréquences

Cédric Bermond, Manon Girerd, Noémie Prime, Maya Hajj Obeid, Lorena Freitas Dutra, Anne-Laure Perrier

► **To cite this version:**

Cédric Bermond, Manon Girerd, Noémie Prime, Maya Hajj Obeid, Lorena Freitas Dutra, et al.. Caractérisation du taux d'humidité dans les matériaux de construction géosourcés par une approche hyperfréquences. JCMM2025 : 18eme Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Mar 2025, Saint-Etienne, France. <hal-05483944>

HAL Id: hal-05483944

<https://hal.science/hal-05483944v1>

Submitted on 29 Jan 2026

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.



HAL Authorization

Caractérisation du taux d'humidité dans les matériaux de construction géosourcés par une approche hyperfréquences

Cédric Bermond¹, Manon Girerd², Noémie Prime², Maya Hajj-Obeid², Lorena Freitas Dutra³ et Anne-Laure Perrier²

¹Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, Grenoble INP, CROMA, 38000 Grenoble, France

²Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, LOClE, 73370 Le Bourget du Lac, France

³Université Picardie Jules Verne, LTI, 80 025 Amiens, France

Cedric.bermond@univ-smb.fr

Résumé — Cet article présente un banc de caractérisation hyperfréquences sans contact pour la mesure de la teneur en eau (TE) des matériaux de construction. Nous présentons des résultats sur différents pisés (terre crue) et sur un isolant constitué de paille de colza et de chaux. L'approche consiste à extraire dans un premier temps la permittivité complexe $\epsilon_r = \epsilon_r' - j \epsilon_r''$ du matériau en fonction de la TE dans la bande X [8 GHz – 14 GHz] afin d'en déduire un modèle théorique. Des échantillons de terre de différente nature (densité, porosité) ont été mesurés afin de trouver le modèle le plus fiable. Dans un second temps un deuxième banc de mesure in-situ a été élaboré afin d'effectuer un monitoring de la TE d'un mur de pisé après construction. Pour chacun des bancs de mesure un protocole spécifique a été mis en place.

I. CONTEXTE DE L'ETUDE

L'émergence de l'écoconstruction a conduit au développement des filières de matériaux biosourcés et géosourcés qui proposent des techniques de construction utilisant la terre crue comme matériau structurel (pisé, bauge, brique de terre compressée) [1]. De plus la rénovation énergétique de l'enveloppe des bâtiments en terre crue passe par l'ajout d'un matériau isolant thermique qui modifie de manière très forte les champs hygrothermiques au sein du mur. Dans des cas extrêmes, une rénovation non adaptée ne laissant pas « respirer » le mur peut conduire à la ruine de l'ouvrage. Par conséquent, la teneur en eau dans les parois en pisé est un paramètre important et crucial qu'il faut savoir évaluer. Actuellement il n'existe pas d'outil non invasif permettant de mesurer la teneur en eau dans l'épaisseur d'un mur. Les outils existants ne permettent que des mesures localisées et sont soit invasifs (sonde TDR (Time Domain Reflectometry)) voir destructifs (mesures par gravimétrie), soit limités à des mesures surfaciques (sonde capacitive ou résistive). L'utilisation de signaux hyperfréquences dans le domaine du bâtiment pour l'évaluation de la TE n'est pas nouvelle. Les outils actuels concernent des sondes de type TDR [2] et des travaux de recherche portent sur l'utilisation de GPR (Ground Penetrating Radar) [3]. Ces deux outils consistent à mesurer le temps d'aller-retour d'une onde électromagnétique et de déduire la permittivité effective du matériau. La présence d'eau avec une permittivité relative proche de 80 influence les matériaux de construction qui présentent une permittivité relative $\epsilon_r < 5$ lorsqu'ils sont secs. De nombreux modèles théoriques ou issus de modèles empiriques traitent de ce phénomène dans la littérature. Nous proposons ici d'explorer une piste complémentaire basée sur l'exploitation de la propagation de signaux hyperfréquences de type CW (Continuous Wave) en espace libre (sans contact) pour la mesure de la teneur en eau.

II. BANC DE MESURE ET PROTOCOLE DE MESURE

Nous avons réalisé deux bancs de mesure. Le premier pour l'extraction de la permittivité complexe en laboratoire sur deux échantillons de pisé et également sur un isolant biosourcé. Le second banc de mesure a été élaboré pour des mesures in-situ dont l'objectif est de déterminer la TE en fonction du temps dans des murs.

A. Banc de mesure en laboratoire

Le premier banc de mesure comme le montre la figure 1 se compose de deux antennes cornets connectées à un VNA (Vector Network Analyzer) mesurant les paramètres S entre 8 GHz et 14 GHz. Des échantillons de forme parallélépipédique d'environ 25 à 30 cm de côté et d'épaisseur 6 à 7 cm sont placés entre les deux antennes, selon un axe vertical pour maintenir un plan de référence identique au calibrage. Les antennes à fort gain permettent de focaliser le champ électromagnétique dans l'échantillon et des absorbeurs disposés sur les parties métalliques permettent de diminuer l'apparition des ondes stationnaires inhérentes à la mesure en espace libre.

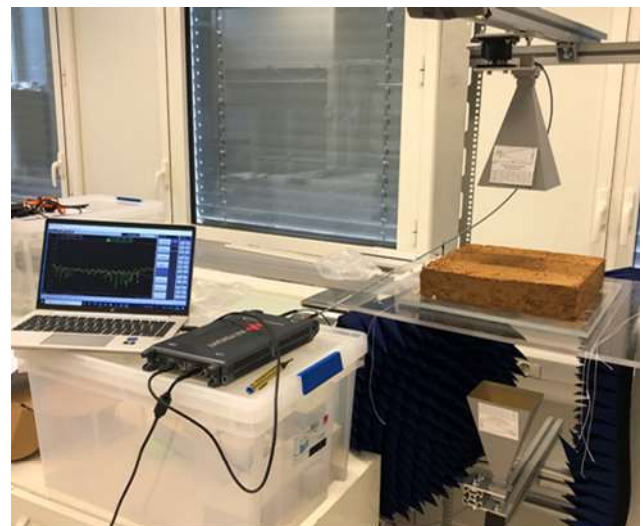


Figure 1 : Banc de mesure des échantillons biosourcés ou géosourcés en laboratoire

Le choix de la bande de fréquence utilisée pour cette caractérisation a été issue d'un compromis entre la taille des antennes cornet (taille du spot qui doit couvrir l'échantillon) et la taille, donc la masse, des échantillons à mesurer. En effet, lors de leur caractérisation les

échantillons doivent pouvoir être facilement manipulés (masse maximale que nous avons limitée à 15 kg), ils doivent pouvoir rentrer dans les fours pendant la phase de séchage et être placés dans des enceintes humides (taille et volume d'eau salée à limiter).

Avant de réaliser chaque mesure, une première étape consiste à calibrer le banc de test. Nous avons choisi un calibrage de type TRL car celui-ci est bien approprié pour une mesure en espace libre. Les standards de calibrage sont facilement réalisables et l'impédance de référence est connue. La deuxième étape consiste à extraire la permittivité complexe de l'échantillon à l'aide de la méthode Ross-Nicholson-Weir. Chaque échantillon est également pesé afin d'extraire sa TEM (teneur en eau massique en %) (voir équation (1)) et/ou sa teneur en eau volumique θ (en $m^3.m^{-3}$) qui sont obtenues à partir de la masse sèche $m_{sèche}$ et de la masse humide m_{humide} du matériau. La masse sèche de chaque échantillon est obtenu en plaçant celui-ci au four et en attendant que sa masse se stabilise. Lorsque la masse est au plus bas et qu'elle n'évolue plus, elle est définie comme la masse sèche du matériau. La TEM et la teneur en eau volumique sont liées par l'équation (2) où ρ est la masse volumique sèche (ou densité sèche) du matériau et ρ_{eau} est la masse volumique de l'eau.

$$TEM (\%) = 100 \times \frac{m_{humide} - m_{sèche}}{m_{humide}} \quad (1)$$

$$\theta (m^3.m^{-3}) = TEM \times \frac{\rho}{\rho_{eau}} \quad (2)$$

B. Banc de mesure in-situ

Le second banc se compose de deux antennes cornet large bande [2 GHz – 18 GHz] connectées à un VNA. Le banc se déplace tout en maintenant une distance constante entre les antennes. L'objectif est de mesurer des murs de 1.5 m de hauteur et de largeur et ayant une épaisseur de 25 cm comme le montre la figure 2. Les mesures sont effectuées sans calibrage et sont ensuite traitées par fenêtrage temporel afin de minimiser les réflexions secondaires sur le banc de mesure [4]. Les mesures effectuées en large bande entre 2 GHz et 14 GHz permettent une très bonne résolution dans le domaine temporel avec un pas de 83 ps. Le protocole de mesures se base sur trois mesures. Une première étape consiste à mesurer les paramètres S dans l'air (S_{air}) sans la présence du mur entre les deux antennes. Puis dans un second temps les paramètres S de réflexion ($S_{reflect}$) sont mesurés avec la présence d'une plaque métallique placée entre les deux antennes. Enfin le banc est déplacé afin de mesurer les paramètres S en présence du mur (S_{mur}). A partir de ces trois séries de mesure les paramètres S du mur en pisé ($S_{mur \text{ calibré}}$) sont corrigés à partir des relations (1) et (2). L'épaisseur « d » de l'échantillon et l'épaisseur « l » de la plaque métallique sont prises en compte dans le protocole de correction. Ces paramètres calibrés permettent ensuite l'extraction de la permittivité complexe à partir de la méthode Ross-Nicholson-Weir.

$$S_{11}^{mur \text{ calibré}} = \frac{S_{11}^{mur} - S_{11}^{air}}{S_{11}^{reflect} - S_{11}^{air}} e^{2j\frac{\omega l}{c}} \quad (3)$$

$$S_{21}^{mur \text{ calibré}} = \frac{S_{21}^{mur} - S_{21}^{reflect}}{S_{21}^{air} - S_{21}^{reflect}} e^{-j\frac{\omega d}{c}} \quad (4)$$



Figure 2 : Banc de mesure « in-situ » des murs en pisé.

III. CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS ET MODELES DE LA TERRE

Nous présentons les caractéristiques de deux échantillons de terre qui ont été étudiées. Le pisé A a été extrait de Saint Quentin Fallavier (Nord Isère) et a été tamisé à 1 cm. Le pisé B provient de la carrière de Oytier Saint-Oblas (Nord Isère) et a été tamisé à 3 cm.

TABLEAU I : CARACTERISTIQUES DES ECHANTILLONS

	Pisé A	Pisé B
Densité sèche (ρ)	1.78	2.04
Densité du sol (ρ_s)	2.65	2.65
Porosité ($\delta = 1 - \rho/\rho_s$)	0.32	0.23

Un grand nombre de modèle empirique ont été établi pour décrire le comportement de la permittivité d'un sol en fonction de sa densité, de sa porosité et de sa teneur en eau [5]. Ces modèles décrivent uniquement la partie réelle de la permittivité. Le modèle de Topp qui est souvent utilisé pour les sondes de mesure TDR ne fait pas intervenir la densité du matériau contrairement aux deux autres modèles. Le modèle de Lichtenecker fait apparaître la permittivité de l'air ϵ_a et de l'eau ϵ_w . La permittivité du sol ϵ_s est donnée par une formule empirique (5) et le paramètre α est compris entre 0.4 et 0.8 [6].

$$\epsilon_s = (1.01 + 0.44 \rho_s)^2 - 0.062 \quad (5)$$

Topp	$\epsilon' = 3.03 + 9.3\theta + 146\theta^2 - 76.7\theta^3$
Malicky	$\sqrt{\epsilon'} = 0.819 + 0.168\rho + 0.159\rho^2 + 7.17\theta + 1.18\theta\rho$
Lichtenecker	$\epsilon'^{\alpha} = (1 - \delta) \epsilon_s^{\alpha} + (\delta - \theta) \epsilon_a^{\alpha} + \theta \epsilon_w^{\alpha}$

Nous avons aussi étudié un échantillon d'isolant biosourcé à base de paille de colza et de chaux. A sa réalisation, cet échantillon était constitué de 7 % de paille de colza, de 44 % d'eau et de 49 % de chaux ; ces valeurs étant exprimées en % massique. La densité sèche ρ de cet isolant est de 0.67.

IV. RESULTATS D'EXTRACTION

Les échantillons de terre ont été pesés durant la phase de séchage qui a suivi leur réalisation. Pour chaque perte de masse significative ils ont été mesurés avec le banc de mesure en laboratoire. Lors de la réalisation du pisé, la TEM optimale se situe autour de 10 % : dans le cas des échantillons de terre présentés la TEM lors de leur fabrication est de 11 % soit des valeurs de teneur en eau volumique θ de $0.19 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ et de $0.22 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ respectivement pour les pisés A et B. Les échantillons ont été également séchés dans un four à une température de 70°C afin de compléter les mesures pour les faibles teneurs en eau et afin d'obtenir leurs masses sèches. La figure 3 montre l'évolution de la permittivité relative complexe en fonction de la fréquence lors de la phase séchage du pisé A. Il est à noter que plusieurs mois de séchage ont permis de tracer ces courbes. On remarque une forte variation de la permittivité relative complexe au cours du temps. Les premières mesures effectuées juste après la réalisation de l'échantillon sont légèrement bruitées car la présence d'eau atténue le signal transmis entre les antennes et dégrade ainsi le rapport signal sur bruit. Ce phénomène diminue lorsque l'échantillon perd de l'eau. Les figures 4 et 5 présentent les résultats d'extraction de la permittivité relative complexe des pisés A et B respectivement. Leurs parties réelles ϵ_r' sont confrontés aux résultats des trois modèles précédents pour une fréquence de 10 GHz.

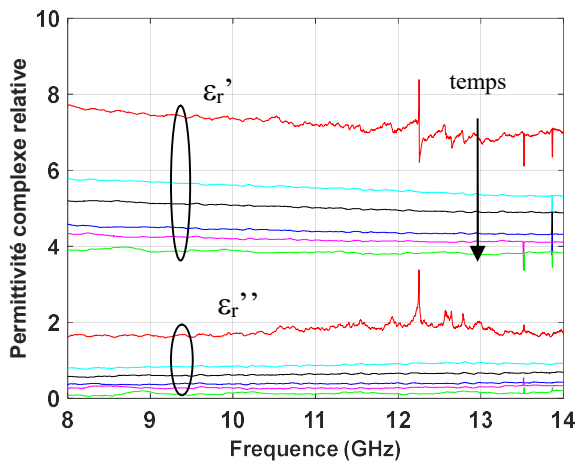


Figure 3 : Evolution de la permittivité complexe au cours de la phase de séchage du pisé A.

Les mesures ont permis de déterminer la valeur du paramètre α du modèle de Lichtenecker. Ce modèle semble le plus cohérent pour décrire le comportement de la permittivité réelle du pisé. Ce modèle prend en compte la valeur de la permittivité relative de l'eau que l'on a choisi à 63 pour une fréquence de 10 GHz. Sur la plage de variation de la teneur en eau volumique on remarque que la

permittivité réelle est divisée par un facteur 2. Ces résultats démontrent que le banc de mesure est sensible pour extraire la teneur en eau du pisé. On note que les points dont les teneurs en eau sont les plus fortes n'ont pas pu être réalisés par le banc de mesure en laboratoire. Ceux-ci pourraient sûrement être obtenus sur des échantillons de plus faible épaisseur afin de compléter les courbes. Nous pouvons voir sur les figures 4 et 5 que la partie imaginaire de la permittivité relative ϵ_r'' varie fortement en fonction de la teneur en eau dans le pisé mais nous n'avons pas trouvés de modèles théoriques pour comparer à nos résultats.

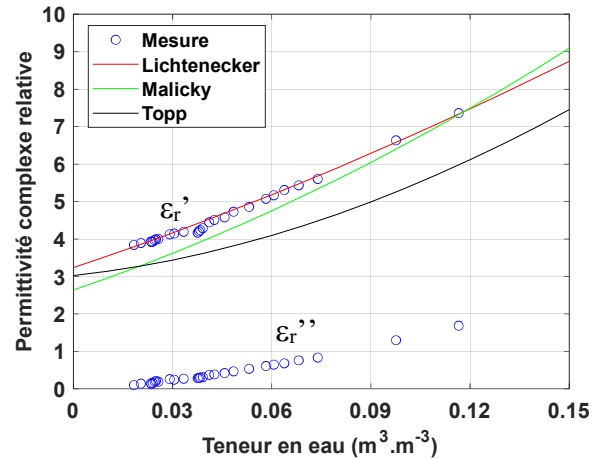


Figure 4 : Extraction de la permittivité complexe en fonction de la teneur en eau volumique pour le pisé A.

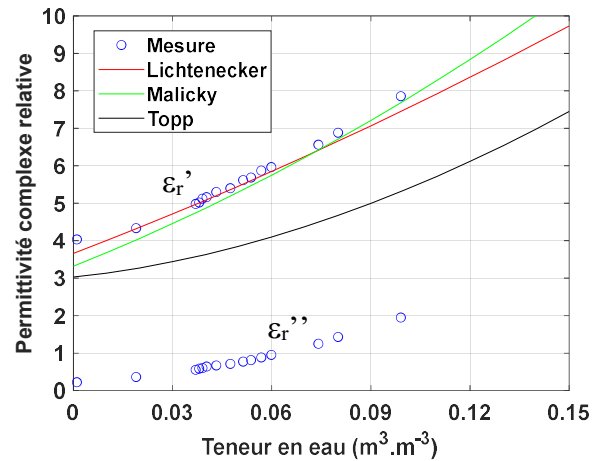


Figure 5 : Extraction de la permittivité complexe en fonction de la teneur en eau volumique pour le pisé B.

La figure 6 montre l'évolution de la permittivité relative complexe de l'isolant de chaux colza en fonction sa teneur en eau volumique. L'échantillon a été placé dans un premier temps dans un four à une température de 60°C pour le caractériser aux faibles teneurs en eau mais aussi pour déterminer sa masse sèche. Il a ensuite été placé dans une enceinte humide ayant une humidité relative de 98 % afin de faire varier sa teneur en eau. Pour réaliser cette humidité relative de 98%, environ 900 g de sulfate de potassium (K_2SO_4), ayant une solubilité de 12 g/100 mL à 25°C , est mélangé à 6 litres d'eau distillée créant une solution saline saturée. Cette solution saline est placée au

fond de l'enceinte contenant l'échantillon et permet de générer l'ambiance humide souhaitée. Pendant un an l'échantillon a été pesé puis mesuré à l'aide du banc de mesure en laboratoire, permettant d'obtenir les résultats de la figure 6. La variation de la permittivité réelle est moins importante que pour les échantillons de terre avec de nombreux points autour de $\epsilon_r' = 2.2$ sur la première partie de la courbe. Ce phénomène peut s'expliquer par l'interaction des molécules d'eau avec la chaux. Il est à noter que la courbe pour cet échantillon est complète car la teneur en eau maximale est atteinte avec une masse stable de l'échantillon pendant plus d'un mois et demi pour le dernier point de la courbe (à $\theta = 0.12 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$). Le tableau II quantifie le taux de croissance de la permittivité relative complexe par rapport à une variation de la teneur en eau de $0.12 \text{ m}^3.\text{m}^{-3}$ dans le matériau. L'approche envisagée de déterminer la teneur en eau par une mesure en espace libre semble compromise pour des matériaux à base de chaux ; seules les fortes teneurs en eau peuvent être détectées. La sensibilité de mesure est fortement dégradée. Dans le cas des deux échantillons de pisé cette forte variation sera exploitée pour extraire la teneur en eau avec une grande précision. Ces différentes extractions ont permis de démontrer les possibilités et les limites du banc de mesure hyperfréquences mis en place.

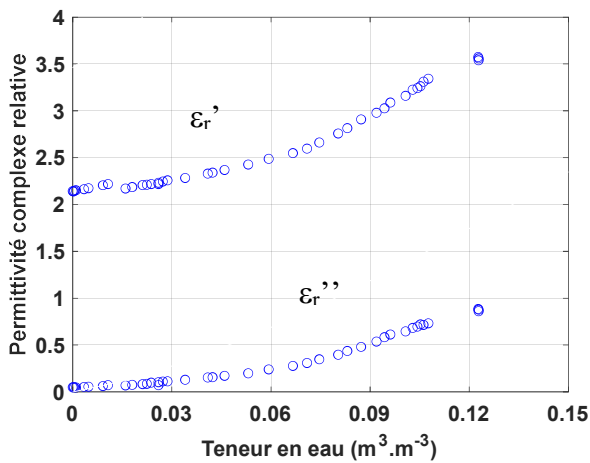


Figure 6 : Extraction de la permittivité complexe en fonction de la teneur en eau volumique de l'isolant de chaux colza.

TABLEAU II : VARIATION DE LA PERMITTIVITE RELATIVE COMPLEXE

Pisé A	Pisé B	Chaux-colza
134 %	115 %	63 %

V. MONITORING DE MUR EN PISE

Suite aux mesures en laboratoire, nous nous sommes intéressés à la mesure de la permittivité complexe du pisé après la fabrication d'un mur. Cette tentative de mesure in-situ s'est déroulée pendant 6 semaines et les résultats d'extraction ont permis de déterminer la teneur en eau grâce au modèle choisi lors de l'étude en laboratoire. L'épaisseur du mur et la forte teneur en eau engendrent une forte atténuation du signal ainsi qu'un coefficient de réflexion important. Ces deux facteurs ont contribué à

rendre les signaux inexploitable pour l'extraction de la permittivité complexe juste après la réalisation du mur. Les mesures présentées sur la figure 7 ont pu être exploitées lorsque la teneur en eau a diminué. Une solution sera d'effectuer les mesures à partir d'une fréquence inférieure à 2 GHz pour minimiser l'atténuation à l'aide de nouvelles antennes. Ces premiers résultats sont très encourageants pour l'évolution du banc de mesure et seront confrontés à des mesures effectuées à l'aide d'une sonde TDR.

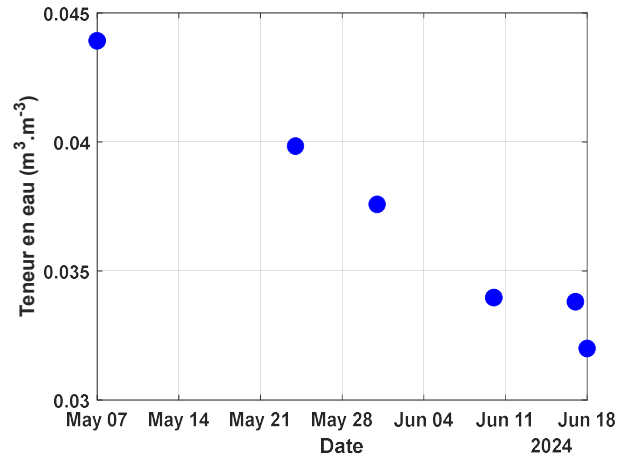


Figure 7 : Mesure in-situ de la teneur en eau en fonction du temps d'un mur en pisé.

VI. CONCLUSION

Nous avons développé et réalisé deux bancs de caractérisation pour mesurer la permittivité complexe de matériaux biosourcés et géosourcés en bande X. Les mesures effectuées en laboratoire sur des échantillons ont permis de déterminer les limites de l'approche hyperfréquences pour l'extraction de la teneur en eau selon la nature des matériaux. Dans le cas du pisé, la teneur en eau impacte fortement la permittivité complexe. Ainsi un second banc de mesure a permis les premières mesures in-situ de la teneur en eau d'un mur de 25 cm d'épaisseur.

REFERENCES

- [1] D. Muheise-Araalia, "Properties of unfired, illitic-clay bricks for sustainable construction" Constr. Build. Mater., 268 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121118>
- [2] K. Noborio, "Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry : a review", IEEE, Computers and Electronics in Agriculture 31, 213–237 [https://doi.org/10.1016/S0168-1699\(00\)00184-8](https://doi.org/10.1016/S0168-1699(00)00184-8)
- [3] W.L; Lai, T. Kind, H, Wiggerhauser, "Using penetrating radar and time-frequency analysis to characterize construction materials", NDT & E International, vol. 44, Issue 1, January 2011, Pages 111-120, <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2010.10.002>
- [4] F. J. F. Goncalves, "Free-Space Materials Characterization by Reflection and Transmission Measurements using Frequency-by-Frequency and Multi-Frequency Algorithms", electronics, 2018, <https://doi.org/10.3390/electronics7100260>
- [5] R. L. Van Dam, "Calibration Functions for Estimating Soil Moisture from GPR Dielectric Constant Measurement", Communication in Soil Science and Plant Analysis, vol 45, 2014, Issue 3, <https://doi.org/10.1080/00103624.2013.854805>
- [6] Tarik Zakri, Jean-Paul Laurent and Michel Vauclin, "Theoretical evidence for 'Lichtenecker's mixture formulae' based on the effective medium theory", J. Phys. D: Appl. Phys. 31 (1998) 1589–1594