

Relation entre les propriétés hygrothermiques et acoustiques des bétons de chanvre et de moelle

Mohamed Said ABBAS

Univ Lyon, ENTPE, LTDS UMR CNRS 5513, Vaulx-en-Velin Cedex, F-69518, France

RESUME Les bétons biosourcés ont un pouvoir isolant généralement supérieur à celui des matériaux classiques, mais qui peut être altéré par leur caractère hygroscopique fort. Dans ce contexte, l'étude de leurs propriétés hygrothermiques est une partie incontournable de leur développement et démocratisation. Cette caractérisation est souvent chronophage et demande des équipements qui peuvent être très coûteux. Cet article présente une démarche dont le but est de déterminer les propriétés hygrothermiques des bétons biosourcés à partir de mesures acoustiques au tube de Kundt, un essai qui prend quelques minutes. A partir de cet essai, il est possible de calculer des paramètres de la géométrie du réseau poreux grâce à l'inversion de modèles acoustiques. Une étude croisée entre les paramètres géométriques et les propriétés hygrothermiques de plusieurs bétons de moelle de tournesol et de chanvre a été menée. Une possible corrélation a été trouvée entre la porosité intergranulaire et la conductivité thermique, ainsi qu'entre la perméabilité à l'air et la perméabilité à la vapeur. Elles devront être confirmées par une campagne expérimentale plus vaste avec des matériaux plus variés. Les résultats semblent indiquer que seuls les phénomènes régis par les caractéristiques des macropores peuvent être reliés au domaine acoustique.

Mots-clés Bétons biosourcés, moelle de tournesol, propriétés hygrothermiques, propriétés acoustiques, tube de Kundt

I. INTRODUCTION

Le secteur du bâtiment vit depuis quelques décennies une transformation profonde. La communauté scientifique a pris conscience de l'empreinte environnementale du secteur, qui est responsable de 35 % de la consommation d'énergie finale et de 38 % des émissions de CO₂ équivalent dans le monde (International Energy Agency and UN Environment Programme, 2020). Dans le cas de la France, les bâtiments représentent 44 % de la consommation d'énergie et 24 % des émissions de gaz à effet de serre (ADEME, 2018). Cet impact environnemental est lié à la phase de construction, qui prend en compte l'énergie grise associée à la fabrication des différents matériaux, ainsi qu'à la consommation énergétique pendant la vie utile des bâtiments, dont l'énergie dédiée à la régulation de la température constitue 39 %, et à la phase de démolition.

Les matériaux biosourcés participent à la diminution de l’empreinte carbone des bâtiments du fait de leur origine naturelle et de la faible quantité d’énergie requise pour leur extraction et fabrication. Utilisés comme produits de construction, ils renforcent l’efficacité énergétique des bâtiments grâce à leurs faibles valeurs de conductivité thermique – inférieures à celles des matériaux de construction classiques – mais aussi leurs propriétés hygroscopiques, qui améliorent le confort de l’usager et qui peuvent, dans certains cas, contribuer à la régulation de la température (Amziane et al., 2017; Lagouin et al., 2019). Par conséquent, l’étude des propriétés thermiques est essentielle dans le développement de nouveaux matériaux biosourcés, mais cette caractérisation peut prendre plusieurs jours (comme l’étude de la valeur tampon hygrique), voire plusieurs mois (comme les isothermes de sorption). Leur détermination demande des équipements spécifiques et coûteux, comme les enceintes thermiques ou le Dynamic Vapor Sorption (DVS).

Le but de cette étude est de proposer des voies alternatives pour la détermination des propriétés hygrothermiques des matériaux biosourcés. Etant donné que les propriétés hygrothermiques dépendent de l’interaction d’une phase aqueuse gazeuse ou liquide avec la matrice solide du milieu poreux, on peut supposer qu’elles dépendent des propriétés du milieu poreux. D’autre part, les mesures acoustiques au tube de Kundt permettent de déterminer les paramètres géométriques du réseau poreux à travers l’inversion de modèles acoustiques, comme expliqué dans (Chabriac et al., 2016; Glé, 2013). Les modèles acoustiques ont pour vocation de déterminer les propriétés acoustiques à partir des paramètres géométriques de la matrice poreuse. Avec cette démarche d’*inversion*, on détermine les propriétés acoustiques avec le tube de Kundt, puis on remonte aux paramètres géométriques grâce aux équations des modèles. L’essai au tube de Kundt ne prend que quelques minutes, nécessite un dispositif relativement peu coûteux et sert à caractériser le comportement acoustique des matériaux, qui est un facteur clé du confort des occupants. Une étude croisée a été menée entre les propriétés hygrothermiques et les paramètres géométriques déterminés par la voie acoustique.

Cette étude se focalise sur deux types de matériau : le béton de chanvre, qui est le béton biosourcé le plus répandu et qui constitue la référence dans le domaine, et le béton de moelle de tournesol, qui est un matériau innovant qui permet de valoriser un sous-produit bien plus abondant que le chanvre et qui présente des propriétés mécaniques et hygrothermiques très proches de celles du béton de chanvre (Abbas et al., 2020).

II. MATERIAUX

Cinq types d’agrégats végétaux font l’objet de cette étude : une moelle de tournesol (S) provenant de la coopérative Groupe Dauphinoise située dans l’Isère, et quatre types de chanvre provenant du nord et de l’est de la France (F et H), d’Allemagne (G) et du Royaume Uni (UK).

Quatre liants ont été utilisés. Le premier est le liant C2, dont le nom commercial est « Calco » et qui est principalement composé de chaux hydraulique et de charges calcaires. Le deuxième liant, appelé H98, est une chaux aérienne pure à 95%. Le troisième, appelé CLIN, est un ciment Portland sans aluminat tricalcique C₃A et très peu d’oxyde d’aluminium A. Enfin, le liant C1 est un mélange de chaux aérienne, hydraulique et pouzzolanique.



FIGURE 1. Bétons biosourcés étudiés

Le mélange des agrégats et des bétons présentés a donné lieu à neuf formulations de composites (avec trois échantillons par formulation), représentées dans la **Figure 1** : C2-H*, C2-S, C2-H+S, H98-G, H98-UK, H98-F, CLIN-UK, CLIN-G et C1-F. Les trois premiers matériaux ont été développés dans le cadre de ma thèse de doctorat, qui visait à développer des matériaux de construction à impact écologique réduit, d'où l'utilisation de la chaux. Les trois matériaux ont été sélectionnés afin de comparer le comportement de la moelle de tournesol à celui du chanvre, ainsi que le comportement des matériaux qui contiennent les deux types d'agrégat. Les six derniers appartiennent au projet de thèse de P. Glé (Glé, 2013). Le but de ce projet était d'étudier le comportement acoustique d'une large gamme de bétons de chanvre, avec notamment des agrégats de différentes origines géographiques et des liants de natures différentes. Ils ont été intégrés à l'étude dans le but d'enrichir la discussion. La composition précise des liants, ainsi que la formulation et les caractéristiques physiques des différents bétons, sont détaillées dans (Abbas, 2021). Tous les échantillons ont un diamètre de 10 cm et une épaisseur de 5 cm et ont été stockés dans une atmosphère contrôlée de 23°C et 50%HR.

III. METHODES

Les propriétés hygrothermiques dépendent de l'interaction d'une phase aqueuse, gazeuse ou liquide avec la matrice solide du milieu poreux. Par conséquent, on peut en déduire que ces propriétés sont intrinsèquement liées aux propriétés internes du milieu poreux. Pour explorer cette possible relation, une étude croisée a été menée entre les propriétés hygrothermiques des matériaux et les paramètres géométriques de leur microstructure.

Les paramètres géométriques des bétons et des agrégats ont été déterminés à partir des propriétés acoustiques des matériaux. L'inversion de modèles acoustiques permet de remonter aux paramètres géométriques en partant des propriétés acoustiques comme le coefficient d'absorption (α) ou le coefficient d'affaiblissement (TL). L'intérêt de cette étude est d'explorer des voies rapides et peu coûteuses de caractérisation des propriétés hygrothermiques des matériaux.

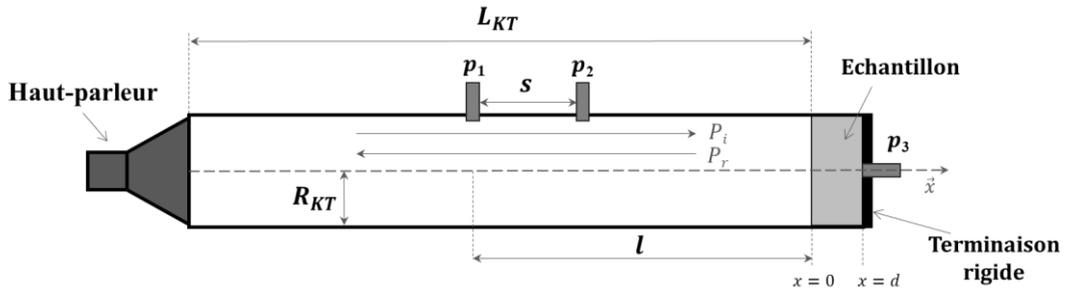


FIGURE 2. Tube de Kundt avec configuration trois microphones et sans cavité

Pour ceci, la méthode du tube de Kundt avec 3 microphones et sans cavité (Iwase et al., 1998), représentée dans la **Figure 2**, a été utilisée pour déterminer le coefficient d'absorption acoustique (α), qui représente le rapport entre l'énergie absorbée (qui est la différence entre l'énergie de l'onde sonore incidente et l'énergie réfléchi) et l'énergie de l'onde sonore incidente, et le coefficient d'affaiblissement acoustique (TL), qui représente le rapport entre l'énergie de l'onde incidente et celle de l'onde transmise. Ensuite, les modèles de JCA (Champoux and Allard, 1991; Johnson et al., 1987), de Panneton & Olny (Panneton and Olny, 2006), d'Olny & Panneton (Olny and Panneton, 2008) et de Zwicker & Kosten (Zwicker and Kosten, 1949) permettent de déduire les paramètres géométriques des bétons et des agrégats : la porosité intergranulaire ϕ_{inter} , la résistivité au passage de l'air σ (définie comme la capacité d'un matériau à freiner l'écoulement d'un fluide à travers sa structure par unité d'épaisseur), la tortuosité α_∞ (qui est l'élongation de la trajectoire du fluide ou de l'onde par rapport à la trajectoire rectiligne théorique), et les longueurs caractéristiques associées aux phénomènes visqueux Λ et thermiques Λ' (qui représentent le rayon des interconnexions entre pores et le rayon de la section maximale des pores, respectivement). Cette méthode est expliquée dans la **Figure 3**, où k représente le nombre d'onde et Z_c , l'impédance caractéristique du milieu. Ces deux paramètres sont déterminés directement à partir de la mesure au tube de Kundt. D'autre part, ρ représente la densité dynamique et K , le module d'incompressibilité dynamique. ρ et K peuvent être déduits à partir de k et Z_c , comme expliqué dans (Abbas, 2021).

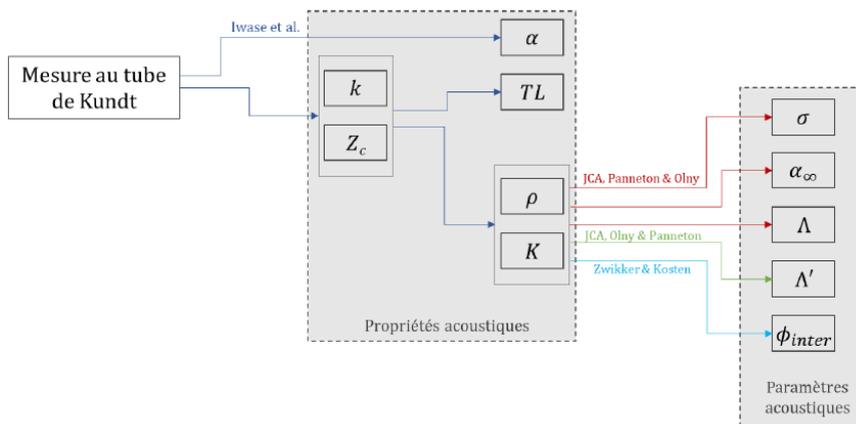


FIGURE 3. Représentation de la méthode d'inversion acoustique

Le tube utilisé est un B&K Type 4106 de diamètre 100 mm. Un amplificateur B&K type 2706, une carte National Instruments NI PXI-1031 et un amplificateur conditionneur B&K type 2690 sont également nécessaires pour générer les signaux sonores et traiter les signaux des microphones. Enfin, un support en plexiglas situé à l'extrémité opposée au haut-parleur permet de loger le troisième microphone.

En outre, la conductivité thermique a été mesurée à l'aide d'un fil chaud FP2C en suivant la norme ISO 8894-2:2007 (International Organization for Standardization, 2007). La perméabilité à la vapeur a été déterminée par la méthode de la coupelle humide selon la norme ISO 12572:2016 (International Organization for Standardization, 2016), avec une humidité de 85%HR à l'intérieur de la coupelle et de 50% à l'extérieur. La porosité totale a été déterminée par la méthode développée par (Beranek, 1942) et optimisée par (Champoux et al., 1991). La porosité intragranulaire a été déduite à partir de cette mesure et de la porosité intergranulaire déterminée par la méthode acoustique. Tous les échantillons ont été testés 100 jours après fabrication.

IV. RESULTATS ET DISCUSSION

Relation entre les propriétés thermiques et acoustiques

La porosité est le paramètre qui a le plus d'impact sur la conductivité thermique (λ) (Ouali, 2009; Progelhof et al., 1976). Par conséquent, le lien entre la conductivité et trois types de porosité a été évalué. Dans un matériau composite formé par un agrégat et un liant, les trois porosités sont la porosité intergranulaire (ϕ_{inter}), qui représente les vides laissés entre les particules d'agrégat ou entre l'agrégat et le liant et qui est donc une porosité de grande échelle ; la porosité intragranulaire (ϕ_{intra}), qui correspond à la porosité de petite échelle qui est à l'intérieur des particules d'agrégat et à l'intérieur du liant ; et la porosité totale (ϕ_{totale}), qui est la somme des deux précédentes.

Les résultats des paramètres géométriques obtenus avec le tube de Kundt peuvent être consultés dans (Abbas et al., 2021). Dans un premier temps, il est constaté que les agrégats et les bétons ne peuvent pas être étudiés conjointement puisque la conductivité des agrégats varie à peine malgré la différence de porosité. En étudiant la relation entre les trois porosités et la conductivité des bétons, on conclut qu'il n'y a pas de relation apparente avec la porosité totale et avec la porosité intragranulaire. En contrepartie, une tendance semble apparaître entre la conductivité et la porosité intergranulaire, comme le montre la **Figure 4**. L'écart type n'a pas été représenté pour une meilleure lisibilité.

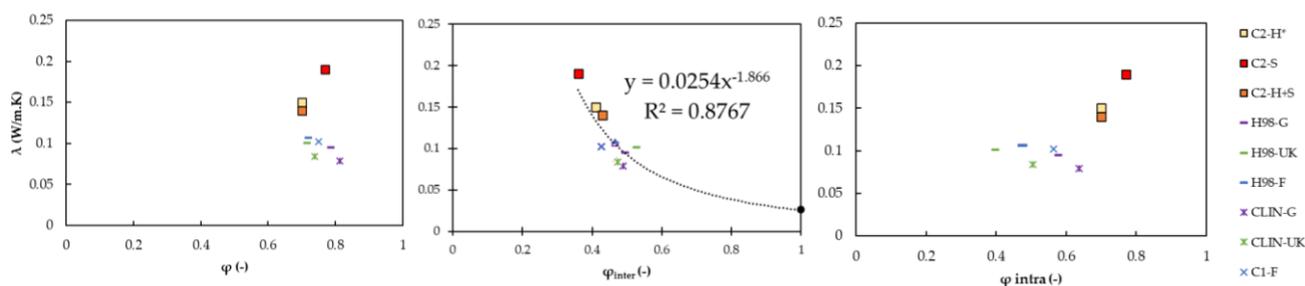


FIGURE 4. Comparaison entre la conductivité thermique et la porosité totale (gauche), intergranulaire (centre) et intragranulaire (droite)

En appliquant l'ajustement aux moindres carrés, on note que cette tendance correspond à la loi de puissance suivant avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,88$:

$$\lambda = 0,0254 \cdot \phi_{inter}^{-1,866} \quad (1)$$

La valeur de conductivité de l'air à 300 K $\lambda_{air} = 0,0262 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ a été incluse dans la **Figure 4** et dans le calcul de cette tendance pour assurer sa précision pour les matériaux à très grande porosité. On constate que l'expression (1) a une forte ressemblance avec la première partie de la loi de Lichtenecker (Lichtenecker, 1926) :

$$\lambda = (\phi_{inter} \cdot \lambda_{air}^\alpha + (1 - \phi_{inter}) \cdot \lambda_{solide}^\alpha)^{\frac{1}{\alpha}} \quad (2)$$

Avec λ la conductivité thermique du béton, λ_{solide} la conductivité thermique de la phase solide du béton et α un paramètre entre 1 et -1, qui est expliquée dans (Zakri et al., 1998) et qui représente l'orientation des pores. La partie correspondante au solide est négligeable si ϕ_{inter} est très élevée ou si λ_{solide} est bien plus grande que λ_{air} , ce que l'on considère vrai. Par conséquent, la loi de puissance semble correspondre à la contribution de l'air dans la loi de Lichtenecker pour un matériau avec $\alpha = -0,54$. Cette valeur représente une orientation des pores dans le matériau composite d'environ 69° par rapport à la direction du flux de chaleur.

Cette possible corrélation indiquerait que la conductivité thermique dépend plutôt de la porosité de grande échelle des matériaux composites.

Relation entre les propriétés hygroscopiques et acoustiques

Une relation apparente entre la perméabilité à l'air k_a , calculée à partir des résultats empiriques de la résistivité au passage de l'air σ , et la perméabilité à la vapeur d'eau δ_p , a également été trouvée pour les différents bétons et agrégats en vrac (voir la **Figure 5**). Il s'agit d'une tendance exponentielle avec un coefficient de détermination R^2 de 0,96 :

$$k_a = \frac{\rho_{air}}{\sigma} = 2 \cdot 10^{-5} \cdot e^{3 \cdot 10^{10} \cdot \delta_p} \quad (3)$$

Les trois bétons contenant le liant H98 ont dû être écartés de l'étude car le liant forme une porosité fermée qui empêche la correcte mesure de l'absorption acoustique.

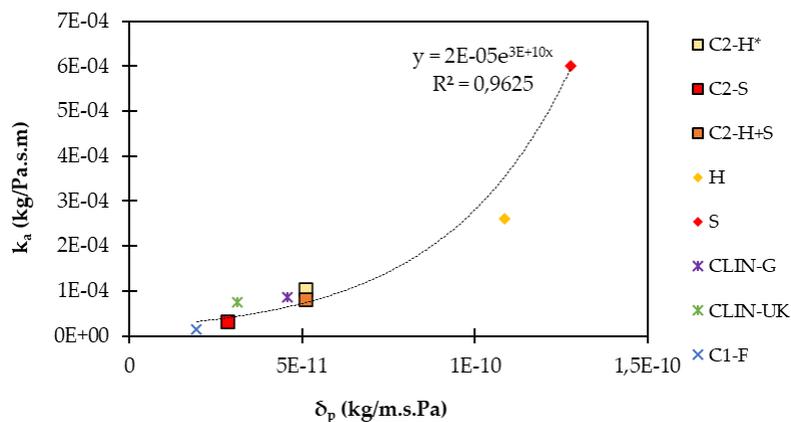


FIGURE 5. Comparaison de la perméabilité à l'air et à la vapeur

D'une part, le flux d'air est généré par un gradient de pression de l'air. D'autre part, le transport de vapeur est régi par un gradient de pression de vapeur. Par conséquent, les deux phénomènes dépendent d'un gradient. Pour les deux, le coefficient entre le gradient et le flux dépend des caractéristiques des macropores : il décroît avec la tortuosité de manière monotone et il croît avec le rayon de pore de manière monotone. Par conséquent, il semble légitime de penser que les deux grandeurs peuvent être liées.

V. CONCLUSION

L'étude des propriétés hygrothermiques est une étape essentielle du développement des bétons biosourcés comme le béton de chanvre et le béton de tournesol. Ces propriétés hygrothermiques sont déterminées à travers des méthodes très chronophages et souvent coûteuses. Dans le but d'explorer des méthodes alternatives de caractérisation plus rapides, une étude croisée des propriétés hygrothermiques et acoustiques des matériaux a été menée. Le raisonnement derrière cette étude est que les deux familles de propriétés dépendent des caractéristiques de la microstructure du réseau poreux. Cela a donné lieu à une première étape dans la caractérisation indirecte de la conductivité thermique, qui pourrait être liée à la porosité intergranulaire, et de la perméabilité à la vapeur, qui aurait une corrélation avec la perméabilité à l'air. Les résultats nous mènent à penser que peut-être seuls les phénomènes régis par les caractéristiques des macropores peuvent être reliés au domaine acoustique, mais une étude complémentaire est nécessaire pour confirmer cela. Cette conclusion serait cohérente avec les résultats de P. Glé (Glé, 2013), qui suggèrent que le comportement acoustique des composites dépendrait de la porosité macroscopique. D'autres recherches sont nécessaires pour généraliser les corrélations trouvées afin qu'elles soient applicables à davantage de matériaux. Il serait également intéressant d'explorer mathématiquement le lien entre les propriétés à travers les différents modèles comme Loeb, Maxwell-Eucken ou Effective Medium Theory (EMT) pour la relation entre la conductivité et la porosité, et à travers les lois de Fick et Poiseuille pour la relation entre perméabilités.

REFERENCES

- Abbas, M.S., 2021. Caractérisations multi-physiques des mortiers bio-sourcés isolants et modélisation de leurs impacts sur les transferts hygrothermiques à l'échelle des parois : application aux bétons de moelles végétales. Université de Lyon.
- Abbas, M.S., Gourdon, E., Glé, P., McGregor, F., Ferroukhi, M.Y., Fabbri, A., 2021. Relationship between hygrothermal and acoustical behavior of hemp and sunflower composites. *Building and Environment* 188. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107462>
- Abbas, M.S., McGregor, F., Fabbri, A., Ferroukhi, M.Y., 2020. The use of pith in the formulation of lightweight bio-based composites : impact on mechanical and hygrothermal properties. *Construction and Building Materials* 259. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120573>
- ADEME, 2018. Ademe - Le Plan de rénovation énergétique de l'habitat (PREH) [WWW Document]. URL <https://www.ademe.fr/expertises/batiment/elements-contexte/politiques-vigueur/plan-renovation-energetique-lhabitat-preh> (accessed 1.8.20).

- Amziane, S., Collet, F., Magniont, C., Escadeillas, G., Lawrence, M., Jiang, Y., Nozahic, V., Sonebi, M., Picandet, V., Lanos, C., 2017. Bio-aggregates based building materials. State-of-the-art report of the RILEM Technical Committee 236-BBM.
- Beranek, L.L., 1942. Acoustic Impedance of Porous Materials. *Journal of the Acoustical Society of America* 13, 248–260. <https://doi.org/10.1121/1.1916172>
- Chabriac, P.A., Gourdon, E., Gle, P., Fabbri, A., Lenormand, H., 2016. Agricultural by-products for building insulation : Acoustical characterization and modeling to predict micro-structural parameters. *Construction and Building Materials* 112, 158–167.
- Champoux, Y., Allard, J.-F., 1991. Dynamic tortuosity and bulk modulus in air-saturated porous media. *Journal of Applied Physics* 70, 1975–1979.
- Champoux, Y., Stinson, M.R., Daigle, G.A., 1991. Air-based system for the measurement of porosity. *Journal of the Acoustical Society of America* 89, 910–916.
- Glé, P., 2013. Acoustique des Matériaux du Bâtiment à base de Fibres et Particules Végétales - Outils de Caractérisation, Modélisation et Optimisation. ENTPE Lyon.
- International Energy Agency, UN Environment Programme, 2020. 2020 Global Status Report for Buildings and Construction.
- International Organization for Standardization, 2016. NF EN ISO 12572:2016, Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties - Cup method.
- International Organization for Standardization, 2007. ISO 8894-2:2007, Refractory materials - Determination of thermal conductivity - Part 2: Hot-wire method (parallel).
- Iwase, T., Izumi, Y., Kawabata, R., 1998. A new measuring method for sound propagation constant by using sound tube without any air spaces back of a test material, in: *Internoise 98*. Christchurch, New Zealand, p. 4.
- Johnson, D.L., Koplik, J., Dashen, R., 1987. Theory of dynamic permeability and tortuosity in fluid-saturated porous media. *Journal of Fluid Mechanics* 176, 379–402. <https://doi.org/https://doi.org/10.1017/S0022112087000727>
- Lagouin, M., Magniont, C., Sénéchal, P., Moonen, P., Aubert, J.E., Laborel-préneron, A., 2019. Influence of types of binder and plant aggregates on hygrothermal and mechanical properties of vegetal concretes. *Construction and Building Materials* 222, 852–871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.004>
- Lichtenecker, K., 1926. Dielektrizitätskonstante natürlicher und künstlicher Mischkörper. *Phys. Z.* 1926 27, 115–158.
- Olny, X., Panneton, R., 2008. Acoustical determination of the parameters governing thermal dissipation in porous media. *J Acoust Soc Am* 123, 814–824. <https://doi.org/10.1121/1.2828066>
- Ouali, S., 2009. Thermal Conductivity in Relation To Porosity and Geological Stratigraphy, United Nations University - Geothermal Training Program.
- Panneton, R., Olny, X., 2006. Acoustical determination of the parameters governing viscous dissipation in porous media. *J Acoust Soc Am* 119, 2027–2040. <https://doi.org/10.1121/1.2169923>
- Progelhof, R.C., Throne, J.L., Ruetsch, R.R., 1976. Methods for predicting the thermal conductivity of composite systems: A review. *Polymer Engineering & Science* 16, 615–625. <https://doi.org/10.1002/pen.760160905>
- Zakri, T., Laurent, J.P., Vauclin, M., 1998. Theoretical evidence for “Lichtenecker’s mixture formulae” based on the effective medium theory. *Journal of Physics D: Applied Physics* 31, 1589–1594. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/31/13/013>
- Zwikker, C., Kosten, C.W., 1949. *Sound Absorbing Materials*. Elsevier Publishing Company.