

# Caractérisation et optimisation multiphysiques d'une paroi bicouche bio et géosourcée

Méryl Lagouin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>LMDC, Université de Toulouse, INSA, UPS, France

**RESUME** Les matériaux bio et géosourcés présentent un fort potentiel pour le développement d'éco-matériaux de construction. Ils représentent une solution viable pour répondre aux enjeux environnementaux, énergétiques et de confort de par leur faible impact environnemental et leur hygroscopicité. Dans ce cadre, le travail de thèse vise à proposer une solution bicouche bio et géosourcée qui associe un béton végétal à un enduit terre crue. L'optimisation hygrique et/ou thermique de chacun des éléments constitutifs de la paroi permet l'obtention d'un élément complexe au fort pouvoir de régulation hygrothermique. Cette optimisation est faite de sorte à garantir le bon comportement mécanique des éléments.

**Mots-clés** paroi bicouche, béton végétal, enduit terre, propriétés hygrothermiques, performances mécaniques

## I. INTRODUCTION

Responsable à 46% de la consommation énergétique en France (toutes énergies confondues), le secteur résidentiel et tertiaire émet chaque année plus de 70 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, soit 24% des émissions de gaz à effet de serre françaises (Service de la donnée et des études statistiques, 2019). Secteur clé dans la lutte contre le réchauffement climatique et la transition énergétique, le domaine du bâtiment doit donc agir prioritairement pour repenser et transformer son activité. L'utilisation de matériaux premiers et biosourcés permet, entre autres, de répondre efficacement à ces enjeux environnementaux.

Les agroressources, pour la plupart sous-produits des activités agricoles, sont renouvelables et concourent significativement au captage et au stockage de carbone atmosphérique. Ces dernières années, les travaux de recherche ont majoritairement porté sur l'utilisation de chènevotte de chanvre pour le développement d'écomatériaux de construction. Toutefois, le chanvre est loin d'être la ressource agricole la plus largement disponible sur le territoire français. Il apparaît alors nécessaire d'évaluer le potentiel d'autres sous-produits agricoles, disponibles en grandes quantités dans le sud-ouest de la France où se place l'étude. C'est le cas notamment du maïs, deuxième céréale la plus cultivée en France et du tournesol (Laborel-Préneron et al., 2017). Les particules d'écorce utilisées pour ces travaux sont obtenues après récolte directement dans les champs, séchage, broyage et séparation mécanique de l'écorce et de la moelle.

Le matériau terre, extrait directement de terrains naturels ou co-produit de la transformation de granulats en carrière (fines de lavage), est réutilisable et recyclable à l'infini (tant que le matériau n'est pas stabilisé chimiquement). Pour transformer la matière en matériau, très peu d'énergie est nécessaire : aucun procédé de calcination n'est employé contrairement aux liants conventionnels, et seule une quantité limitée d'énergie est requise pour le broyage. De la même manière que pour les agroressources, l'utilisation de terres locales s'avère essentielle pour la formulation de matériaux de construction à faible impact environnemental. Le potentiel de 4 terres de nature minéralogique variable est évalué dans cette étude : deux sols de briqueteries et deux boues de lavage de granulats.

À partir de ces matériaux premiers et biosourcés, de nouveaux éléments constructifs peuvent ainsi être formulés. Ces derniers doivent permettre d'assurer la performance énergétique de l'enveloppe du bâti et participer au confort des usagers. Bien que moins résistants mécaniquement, les bétons à base de granulats légers permettent d'augmenter la proportion volumique d'air occlus par rapport à un béton conventionnel, le pouvoir isolant des bétons légers est ainsi amélioré.

De par leur caractère fortement perméable et leur capacité de sorption de vapeur, les matériaux biosourcés ont des capacités d'atténuation des variations d'humidité intérieure. Cette qualité peut être évaluée grâce à l'indicateur de capacité tampon hygrique, le MBV (Rode et al., 2005), largement influencé par la formulation du béton végétal considéré et notamment la nature du liant utilisé. Outre la composition, le procédé de mise en œuvre affecte le MBV des bétons végétaux (Amziane and Collet, 2017). Enduits, les matériaux biosourcés voient leur MBV altéré, la réduction étant fonction de la nature de l'enduit appliqué (Colinart et al., 2016; Collet and Pretot, 2012; Labat et al., 2016).

Par ailleurs, l'hygroscopicité élevée des minéraux argileux confère à la terre crue une forte capacité tampon hygrique (Lima et al., 2016; Liuzzi et al., 2018; Maddison et al., 2009; McGregor et al., 2014). Toutefois, cette aptitude à adsorber et désorber l'humidité diminue par ajout de matières végétales (Laborel-Préneron et al., 2018). Un même matériau ne pouvant présenter à la fois des performances hygriques et thermiques optimisées, il apparaît comme solution de dissocier, en deux couches distinctes, chacune des fonctions visées de la paroi.

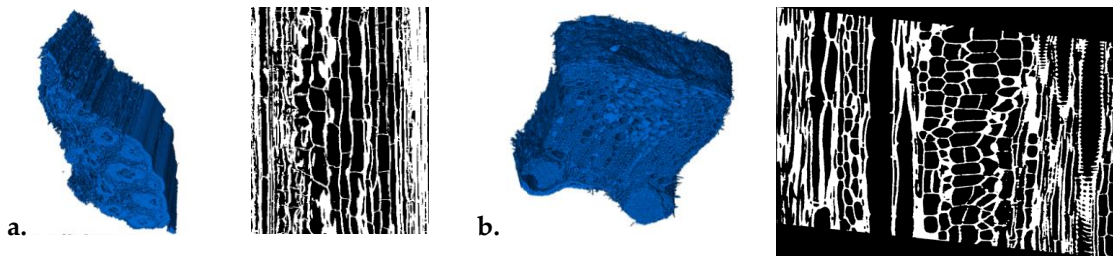
Dans ce contexte, le travail de thèse présenté vise à proposer une solution constructive bicouche, à faible impact environnemental. Ce complexe constructif est obtenu par assemblage par adhésion de deux éco-matériaux : un béton végétal et un enduit de terre. La formulation de cette structure, et de chacune de ses couches, est appréciée au regard des propriétés hygrothermiques, sans compromettre sa bonne tenue mécanique. Dans une première approche, chaque couche est étudiée séparément dans une recherche d'optimisation de ces propriétés hygriques et/ou thermiques tout en garantissant des performances mécaniques satisfaisantes. Les formulations optimisées seront associées dans un second temps. Une étude expérimentale et numérique du comportement hygrothermique de l'ensemble de la paroi sera alors réalisée.

## II. BÉTON VÉGÉTAL

### A. *Potentiel des écorces de maïs et de tournesol comme granulats pour la formulation de bétons légers*

Afin d'évaluer la possibilité d'emploi d'agroressources de maïs et de tournesol comme granulats dans un béton, une caractérisation des granulats a été réalisée. L'utilisation de nouveaux outils d'exploration de la microstructure des particules, tels que la tomographie à rayons X (Lagouin et

al., 2019), a permis d'analyser la morphologie et la connectivité des pores des agroressources. La reconstitution numérique en trois dimensions des éléments végétaux par tomographie à rayons X et une coupe longitudinale de chacun sont présentées en **FIGURE 1**.



**FIGURE 1.** Reconstitution en 3D des particules d'écorce de (a.) maïs et de (b.) tournesol.

Les coupes transversales et longitudinales des reconstitutions 3D mettent en évidence une structure poreuse des particules de maïs tubulaire tandis que celle du tournesol est à la fois tubulaire et alvéolaire. L'analyse quantitative de ces résultats, couplés à des essais de porosimétrie à mercure, souligne la complémentarité de ces deux techniques d'analyse. La forte porosité des particules est due à la présence de nombreux vaisseaux micro et mésoscopiques permettant à la sève de circuler dans la plante. Les graphiques de répartition porales montrent une distribution bimodale de la taille des pores des particules végétales : les pores de plus grandes dimensions (10 - 70  $\mu\text{m}$ ) correspondent aux principaux vaisseaux conducteurs de la sève, tandis que les pores de quelques dixièmes de microns de diamètres sont, quant à eux, les orifices présents dans les parois cellulaires. Ils permettent une communication entre les vaisseaux.

Les distributions des agroressources selon leur circularité révèlent des morphologies distinctes entre le maïs et le tournesol pouvant notamment influencer la compacité de chaque arrangement granulaire en vrac ou au sein du béton végétal. En termes de propriétés hygriques, comme la plupart des matériaux ligno-cellulosiques, les écorces de maïs et de tournesol ont une capacité d'adsorption de vapeur élevée.

L'analyse des caractéristiques propres des agroressources est indispensable pour comprendre et optimiser les propriétés hygrothermiques des matériaux composites. Les composites employant des particules de tournesol et maïs comme granulats ont été formulés en considérant différentes natures de matrices minérales : pouzzolanique (métakaolin) et chaux formulée commerciale.

#### *B. Impact de la nature des composants sur les propriétés hygrothermiques des matériaux composites*

L'association de particules végétales à un liant minéral permet la formulation de bétons légers dont la forte porosité est responsable de leur capacité d'isolation thermique. Les gammes de pores des composites sont mises en évidence par porosimétrie à mercure (**FIGURE 2**). La porosité des agrobétons est notamment impactée par la porosité initiale des matières premières. Une porosité additionnelle à celles des constituants élémentaires est également visible sur les distributions porales des matériaux composites. Cette porosité additionnelle du composite est explorée par tomographique de rayons X qui met ainsi en évidence la présence de fissures induites par le retrait au séchage à l'interface entre des granulats et la pâte de liant (Lagouin et al., 2019).

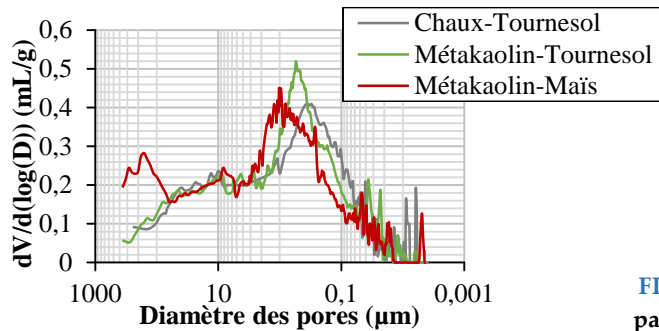


FIGURE 2. Distribution porale des agrobétons.

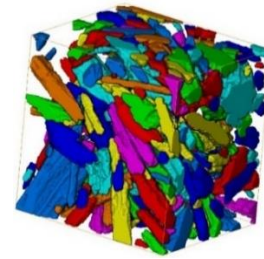


FIGURE 3. Reconstitution 3D de l'orientation des particules de tournesol au sein de la matrice liante pouzzolanique.

Par l'extraction des granulats de l'agrobéton, elle rend également possible la détermination de l'arrangement granulaire au sein de la matrice liante (FIGURE 3) : l'organisation des agroressources dépend fortement de la direction de compactage ainsi que de la géométrie des granulats.

En conséquence, la complémentarité des méthodes employées a permis de mieux comprendre la structure poreuse des bétons végétaux. La porosité initiale des particules végétales, combinée à la méso et microporosité de la pâte de liant, affecte directement la morphologie et la connectivité des pores des matériaux composites. À cela s'ajoute une nouvelle catégorie de pores : l'air entraîné au cours du malaxage, l'évaporation de la grande quantité d'eau en excès et le mode de mise en œuvre sont responsables de la création de pores de largeur millimétrique à l'état sec.

Les propriétés hygrothermiques des bétons végétaux dépendent fortement de leur structure poreuse, hautement ouverte et interconnectée. Les principaux résultats des performances hygrothermiques des bétons étudiés sont rassemblés dans le TABLEAU 1).

TABLEAU 1. Propriétés hygrothermiques des bétons végétaux

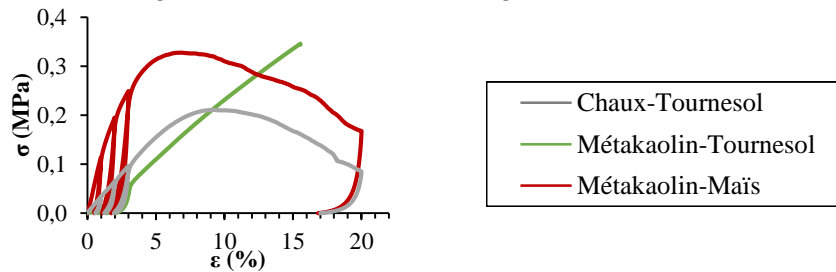
Matériaux	Chaux-Tournesol	Métakaolin-Tournesol	Métakaolin-Maïs
Conductivité thermique (W/m.K)	0,127 ± 0,008	0,128 ± 0,009	0,112 ± 0,006
Facteur de résistance à la vapeur d'eau (-)	2,62 ± 0,57	1,35 ± 0,16	1,40 ± 0,20
Capacité tampon hydrique (g/m <sup>2</sup> . % RH)	2,1	4,2	4,1

Il ressort de ces résultats que, d'une part, les valeurs de conductivité thermique en font des matériaux adaptés à de l'isolation répartie et que, d'autre part, leurs propriétés de transferts et de stockage de l'humidité leur confèrent un haut potentiel pour l'atténuation des variations journalières d'humidité ambiante. La plus grande porosité inter-particulaire du composite de maïs conduit à des valeurs de conductivité thermique plus faibles que celles des bétons de tournesol. Au contraire, c'est la matrice liante qui joue un rôle déterminant au niveau des propriétés hygriques. Le composite Chaux-Tournesol présente un facteur de résistance à la perméabilité plus grand que les matériaux pouzzolaniques, impactant directement la valeur de MBV.

### C. Tenue mécanique en compression

Enfin, l'optimisation des propriétés hygrothermiques ne doit pas compromettre la bonne tenue mécanique du matériau. La résistance des trois matériaux composites à des cycles de chargement/déchargement (chargements successifs jusqu'à 1%, 2%, 3% et 15% de déformation) permet d'évaluer ce dernier critère (FIGURE 4). L'essai est réalisé sur des éprouvettes cylindriques

11 x 22 cm<sup>3</sup> après 60 jours de cure sur une presse hydraulique de 100 kN à un taux de déformation constant (3 mm/min en chargement, 6 mm/min en déchargement).



**FIGURE 4.** Comportement des agrobétons lors de cycles de chargement/déchargement.

La nature des agroressources impacte significativement la prise du liant (Bourdot et al., 2018) : contrairement aux formulations de tournesol, le béton de maïs se comprime en continu lors de l'application de la charge. Cette absence de pic de résistance est caractéristique d'un empilement de particules végétale très déformables ou des mélanges faiblement dosés en liant (Cérézo, 2005). Il témoigne ici d'une faible résistance de la matrice pouzzolanique associée au maïs et d'une adhérence granulats/matrice très limitée. Des mesures de temps de prises par calorimétrie isotherme ont été réalisées sur des pâtes pouzzolaniques modèles, gâchées avec des jus contenant les composants hydrosolubles extraits des différentes agroressources. Les résultats mettent en évidence une inhibition très marquée pour le maïs, avec un retard de prise de plus de 20h tandis que les hydrosolubles du tournesol induisent un retard de 1h15 (Bourdot et al., 2018). Les composants solubles du maïs ont un effet fortement délétère sur la prise et le durcissement du liant pouzzolanique. Cet effet se traduit par un comportement mécanique du béton végétal durci incompatible avec son utilisation en construction.

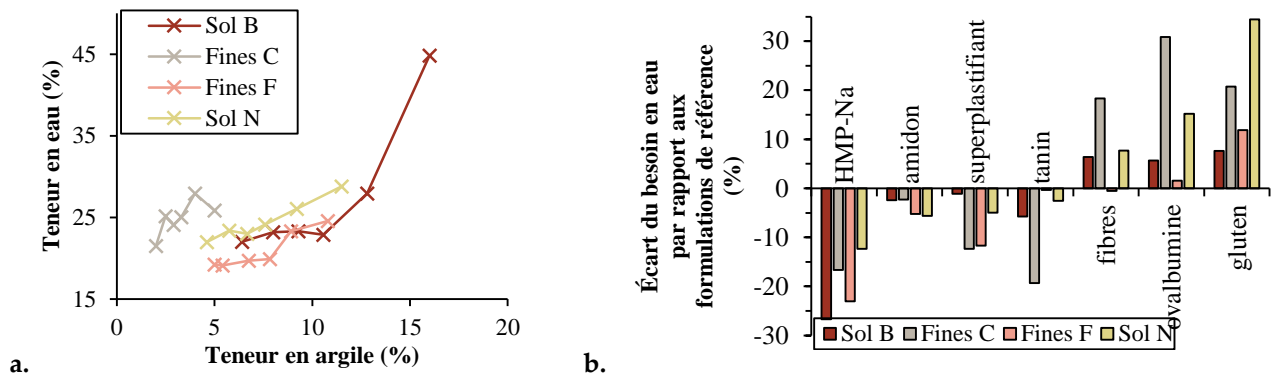
En définitive, le béton végétal formulé à base d'écorce de tournesol et de métakaolin apparaît comme un bon candidat de substitution au béton de chanvre du point de vue environnemental, hygrothermique et mécanique.

### III. ENDUIT TERRE

La fraction argileuse joue le rôle de matrice liante, assurant la cohésion du matériau. Cette propriété colloïdale s'accompagne de variations volumiques importantes en fonction de l'état hydrique du matériau et plus ou moins marquées selon la nature minéralogique. Au séchage, des contraintes internes sont générées pouvant conduire à une fissuration de l'enduit. Or, c'est également cette fraction argileuse qui est responsable de la capacité de régulation hygrique des enduits terre que nous souhaitons maximiser. Dans une recherche d'amélioration de la cohésion de la terre, de diminution de sa sensibilité à l'eau et d'optimisation de sa capacité tampon hygrique, une large variété d'adjuvants organiques (d'origine animale ou végétale) ou minéraux ont été testés (Lagouin et al., 2019a) en association avec 4 terres de natures distinctes, notamment du point de vue minéralogique.

#### A. Propriétés des mortiers à l'état frais

Les mortiers sont réalisés à consistance constante en ajustant la quantité d'eau afin de garantir un étalement de  $175 \pm 5$  mm (norme DIN-18947). L'évolution des besoins en eau des mortiers des 4 terres sont présentés sur la **FIGURE 5**.



**FIGURE 5.** Impact de (a.) la teneur en argile et de (b.) l'adjuvantation sur le besoin en eau des enduits.

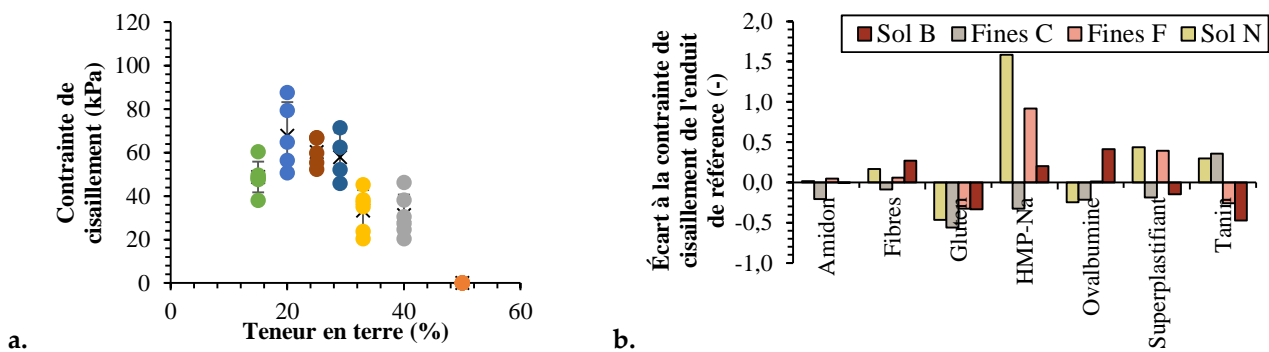
Cette essai permet de mettre en évidence l'augmentation du besoin en eau avec la teneur en argile, quelle que soit l'argile considérée. De plus, l'ajout d'hexamétaphosphate de sodium (HMP-Na), d'amidon de maïs, de superplastifiant biosourcé ou de tanin a un effet réducteur d'eau. Ce potentiel défloculant est plus ou moins accentué selon la nature minéralogique des argiles. Au contraire, le besoin en eau augmente lorsque l'on incorpore des fibres, de l'ovalbumine ou encore du gluten au mélange.

#### B. Performances mécaniques des enduits

Un enduit de terre est mécaniquement acceptable si, après séchage, il n'y a pas de fissures et si l'enduit ne s'est pas détaché (même partiellement) du support d'application. Deux essais sont donc réalisés afin de caractériser le comportement mécanique de chacune des formulations étudiées : analyse de la fissuration et résistance au cisaillement de l'enduit sur son support d'application.

Un travail d'évaluation de la fissuration par analyse d'images est en cours. Il consiste à isoler la classe d'éléments que l'on souhaite étudier, par l'application de traitements successifs (segmentation, binarisation, filtrage sur facteur de circularité et sur l'aire minimale). Ce travail permettra ainsi de caractériser quantitativement l'ouverture, la longueur développée de fissures et leur orientation.

L'adhérence est testée selon une procédure adaptée de la norme allemande DIN-18947 de 2013. L'essai est réalisé sur 6 échantillons pour chaque formulation. La contrainte de cisaillement est ensuite calculée (FIGURE 6).



**FIGURE 6.** Résistance cisaillement (a.) des fines C à teneur en terre variable et (b.) des enduits adjuvants.

Il ressort de cet essai qu'une augmentation de la quantité d'argile dans l'enduit a certes une capacité de renforcement de la cohésion de ce dernier mais uniquement pour les faibles teneurs en



terre. Au-delà d'un certain seuil (ici 20%), l'effet du retrait devient prédominant et diminue la résistance au cisaillement. Par ailleurs, l'effet des adjuvants sur les enduits dépend largement de la nature de la terre : certains adjuvants sont performants vis-à-vis d'une terre tandis qu'ils ont un effet délétère sur les autres.

#### *C. Caractérisation complète des terres étudiées*

La terre crue est un matériau hétérogène dont les spécificités varient d'un sol à l'autre. Afin de comprendre les comportements très variables des terres tant à l'état frais qu'à l'état durci et en particulier en association avec des adjuvants organiques et minéraux, une caractérisation des 4 terres étudiées a été entreprise du point de vue chimique, minéralogique (diffraction aux rayons X, analyse thermogravimétrique) et géotechnique (analyse granulométrique par tamisage sous eau et sédimentation, valeur au bleu de méthylène, limites d'Atterberg, capacité d'échanges cationiques, surface spécifique BET). Ces résultats sont en cours d'analyse.

Enfin, la structure poreuse et l'hygroscopicité des matériaux viables d'un point de vue mécanique ont également été étudiées. La formulation d'enduit retenue pour la suite des travaux sera celle qui présente la meilleure capacité de captage, de stockage et de transfert de l'humidité sans compromettre les performances esthétiques et mécaniques.

## IV. CONCLUSION

Les matériaux premiers et biosourcés participent à la préservation des ressources naturelles par valorisation de déchets et à la diminution des consommations de matières premières d'origine fossile, à la limitation des émissions de gaz à effet de serre et à la création de nouvelles filières économiques.

Notre étude a permis de montrer que le béton de tournesol était une solution viable pour de l'isolation répartie. Associé à un enduit en terre crue à la teneur en argile maximisé et donc hautement hygroscopique, il permettrait de constituer une paroi bicouche bio et géosourcée aux performances d'isolation thermique et de régulation hygrique élevées tout en maintenant des performances mécaniques compatibles avec l'usage. Dans une dernière phase de travail, nous chercherons à caractériser expérimentalement le pouvoir isolant et la capacité tampon hydrique de cette solution. Ces données, associées aux propriétés de chaque couche précédemment étudiée, devront permettre de mener à bien une étude numérique basée sur un modèle proposé lors d'une précédente étude (Seng et al., 2017) afin de prédire et d'optimiser les performances hygrothermiques de cette solution.

## REFERENCES

- Amziane, S., Collet, F., 2017. Bio-aggregates Based Building Materials, RILEM State-of-the-Art Reports. Springer Netherlands, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-024-1031-0>
- Bourdot, A., Magniont, C., Lagouin, M., Lambaré, G., Labonne, L., Evon, P., 2018. Evaluation of the potential of alternative particles as bio-aggregates for lightweight concrete. Presented at the SynerCrete'18 International Conference on Interdisciplinary Approaches for Cement-based Materials and Structural Concrete, Funchal, Madeira Island, Portugal, p. 7.
- Cérézo, V., 2005. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales: approche expérimentale et modélisation théorique.

- Colinart, T., Lelievre, D., Glouannec, P., 2016. Experimental and numerical analysis of the transient hygrothermal behavior of multilayered hemp concrete wall. *Energy Build.* 112, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.11.027>
- Collet, F., Pretot, S., 2012. Experimental investigation of moisture buffering capacity of sprayed hemp concrete. *Constr. Build. Mater.* 36, 58–65. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.04.139>
- Labat, M., Magniont, C., Oudhof, N., Aubert, J.-E., 2016. From the experimental characterization of the hygrothermal properties of straw-clay mixtures to the numerical assessment of their buffering potential. *Build. Environ.* 97, 69–81. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.12.004>
- Laborel-Préneron, A., Magniont, C., Aubert, J.-E., 2018. Hygrothermal properties of unfired earth bricks: Effect of barley straw, hemp shiv and corn cob addition. *Energy Build.* 178, 265–278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.021>
- Laborel-Préneron, A., Magniont, C., Aubert, J.-E., 2017. Characterization of Barley Straw, Hemp Shiv and Corn Cob as Resources for Bioaggregate Based Building Materials. *Waste Biomass Valorization*. <https://doi.org/10.1007/s12649-017-9895-z>
- Lagouin, M., Laborel-Préneron, A., Magniont, C., Aubert, J.-E., 2019a. Development of a high clay content earth plaster. Presented at the Innovative Materials, Structures and Technologies, Riga, Lettonie, p. 8.
- 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. *Constr. Build. Mater.* 222, 852–871. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.004>
- Lagouin, M., Sénéchal, P., Moonen, P., Magniont, C., Aubert, J.E., Laborel-Prénéron, A., Pau, U., Pau, U., 2019b. Potential of X-ray tomography for the exploration of vegetal concretes' porous structure. Presented at the 3rd International Conference on Bio-Based Building Materials, Belfast, p. 8.
- Lima, J., Faria, P., Santos Silva, A., 2016. Earthen Plasters Based on Illitic Soils from Barrocal Region of Algarve: Contributions for Building Performance and Sustainability. *Key Eng. Mater.* 678, 64–77. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.678.64>
- Liuzzi, S., Rubino, C., Stefanizzi, P., Petrella, A., Boghetich, A., Casavola, C., Pappalettera, G., 2018. Hygrothermal properties of clayey plasters with olive fibers. *Constr. Build. Mater.* 158, 24–32. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.10.013>
- Maddison, M., Mairing, T., Kirsimäe, K., Mander, Ü., 2009. The humidity buffer capacity of clay-sand plaster filled with phytomass from treatment wetlands. *Build. Environ.* 44, 1864–1868. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2008.12.008>
- McGregor, F., Heath, A., Shea, A., Lawrence, M., 2014. The moisture buffering capacity of unfired clay masonry. *Build. Environ.* 82, 599–607. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.09.027>
- Rode, C., Peuhkuri, R.H., Mortensen, L.H., Hansen, K.K., Time, B., Gustavsen, A., Ojanen, T., Ahonen, J., Svennberg, K., Arfvidsson, J., 2005. Moisture buffering of building materials.
- Seng, B., Lorente, S., Magniont, C., 2017. Scale analysis of heat and moisture transfer through bio-based materials — Application to hemp concrete. *Energy Build.* 155, 546–558. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.09.026>
- Service de la donnée et des études statistiques, 2019. Bilan énergétique de la France pour 2017. Ministère de la transition écologique et solidaire.