

Matériaux terre crue-granulats végétaux : prédiction de la conductivité thermique par modélisation multi-échelle

S. Rosa Latapie ¹, A. Abou-Chakra ¹, V. Sabathier ¹

¹ Université de Toulouse, INSA, UPS, LMDC (Laboratoire Matériaux et Durabilité des Constructions), 135 avenue de Ranguel, 31 077 Toulouse Cedex 04, France

RESUME La terre crue est un matériau de construction exemplaire sur bien des aspects : disponibilité, recyclabilité, faible impact environnemental, performances mécaniques et hydriques reconnues. L'incorporation de granulats végétaux permet d'améliorer les performances thermiques. Cependant la diversité des co-produits agricoles ajoutée à celle des sols utilisés en tant que matrice liante conduit à des performances très variables selon les formulations et la nature des constituants. L'homogénéisation par champs moyens (schéma de Mori Tanaka) est ici proposée et évaluée en tant qu'outil de prédiction de la conductivité thermique de ces matériaux. S'appuyant sur une détermination adéquate des données d'entrée et un modèle inspiré de la structure du matériau, cette étude valide des modèles de prédiction en s'appuyant sur plusieurs campagnes expérimentales de la littérature. Ces travaux ouvrent la voie vers la possibilité d'une optimisation de la conductivité thermique d'un matériau terre-crue incorporant des granulats végétaux avant même l'étape de fabrication.

Mots-clefs Modélisation multi-échelle, terre crue, granulats végétaux

I. INTRODUCTION

Le réchauffement climatique et ses conséquences sont désormais une réalité visible à l'échelle mondiale (Adélaïde et al., 2022). Les réponses apportées peuvent diverger en fonction de la philosophie adoptée, qu'il s'agisse d'une approche axée sur le « culte de la nature sauvage », de l'« éco-efficacité » ou encore de l'« écologisme populaire » (Martinez-Alier, 2023). L'utilisation ancestrale de la terre crue dans la construction, ses capacités reconnues de tampon hydrique, les possibilités d'exploitation locale à moindre coût et son faible impact environnemental constituent des avantages majeurs qui devraient favoriser un consensus quant à son utilisation en tant que matériau de construction. Par ailleurs, l'incorporation de granulats végétaux dans une matrice terre crue permet d'atteindre de bonnes performances thermiques (Laborel-Préneron et al., 2018) et ainsi de contribuer à la performance énergétique du bâti. Devant le besoin d'optimiser les formulations et d'utiliser des co-produits locaux - pour minimiser l'impact environnemental et favoriser l'économie locale-, des travaux de modélisation des propriétés effectives de matériaux à base de terre crue incorporant des granulats végétaux sont disponibles dans la littérature (Belayachi et al., 2022). Cependant, les auteurs concluent à la pertinence de l'homogénéisation numérique tout en soulignant les limites des modèles conceptuels. Il convient de noter que ces

modèles ont pourtant démontré leur pertinence dans le domaine des matériaux composites (Shanmuga Priyan and Kanmani Subbu, 2023). Le réel défi réside dans la pertinence des données d'entrée des constituants. La conductivité thermique effective, calculée par une analyse multi-échelle, nécessite notamment d'avoir accès à la conductivité thermique des inclusions considérées, c'est-à-dire celle des granulats végétaux. Ces valeurs font défaut dans la littérature mais des travaux récents ont permis de les estimer efficacement (Rosa Latapie et al., 2023a). Dans cette étude, une homogénéisation semi-analytique par champs moyens (Mori and Tanaka, 1973) est menée en utilisant les valeurs de conductivité thermique particulière. Les valeurs de sortie des modèles - les conductivités thermiques de composites terre crue-granulats végétal- sont comparées aux valeurs expérimentales. Cela permet de démontrer et d'asseoir la pertinence du recours à la modélisation multi-échelle pour les matériaux de construction géo-sourcés dès lors que les données d'entrée sont correctement déterminées.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Matériaux à base de terre crue avec incorporation de granulats végétaux.

Plusieurs matériaux ont été sélectionnés dans la littérature pour cette étude. La contrainte était d'avoir toutes les informations pertinentes pour pouvoir en déduire les données d'entrée nécessaires à la modélisation. Les matériaux retenus, leurs caractéristiques extraites des campagnes expérimentales et les références associées sont rassemblées dans le tableau 1.

TABLEAU 1. Composites sélectionnés pour l'étude : caractéristiques et références

Matériau composite (notation)	Références	Masse volumique du composite (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique du composite (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Masse volumique de la matrice (kg.m ⁻³)	Conductivité thermique de la matrice (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)	Conductivité thermique du granulat en vrac (W.m ⁻¹ .K ⁻¹) / Masse volumique en vrac (kg.m ⁻³)	Méthode de mesure
Argile/Moelle de tournesol (AM)	(Belayachi et al., 2022)	235	0.055	900	0.27	0.036 / 15.9	Fil chaud (régime transitoire)
Argile/Ecorce de tournesol (AE)	(Brouard et al., 2018)	714	0.158			0.053 / 129	
Fines de lavage/Chênevotte (FC3)	(Laborel-Préneron et al., 2018)	1519	0.20	1891	0.57	0.051 / 153	Plaque chaude gardée (régime permanent)
Fines de lavage/Chênevotte (FC6)		1271	0.30				

Notons que les mesures expérimentales font l'hypothèse d'un transfert thermique unidirectionnel, i.e l'anisotropie du matériau n'est pas prise en compte. Les masses volumiques des composites

terre crue-granulat végétal sont très variables ainsi que leurs conductivités thermiques. Aussi, dans l'optique d'une modélisation fidèle à la réalité structurelle des matériaux, une classification est proposée. En effet, selon le ratio granulat/liant et la méthode de fabrication notamment, la structure de ces éco-matériaux est clairement différente. Elle peut être décrite et schématisée (Figure 1) comme suit :

- Lorsque les granulats sont complètement noyés dans la matrice liante, ils constituent des « inclusions » au sens strict du terme. C'est particulièrement le cas avec un procédé de fabrication par extrusion (Laborel-Préneron et al., 2017) et une faible proportion de granulats (type 1).
- Dans le cadre d'une mise en oeuvre par compression, une porosité additionnelle notable se crée dans le plan perpendiculaire à la compression (Laborel-Préneron et al., 2017) après la mise en oeuvre. C'est probablement l'effet combiné d'une fissuration de la matrice liante au séchage (Anglade, 2022) et des granulats végétaux qui reprennent leur forme initiale après déformation (type 2). D'autre part, une orientation préférentielle des granulats se fait dans un plan perpendiculaire à la compression. Dans le cas éventuel d'une projection, on retrouve le même phénomène d'orientation préférentielle dans le plan perpendiculaire à la direction de projection.

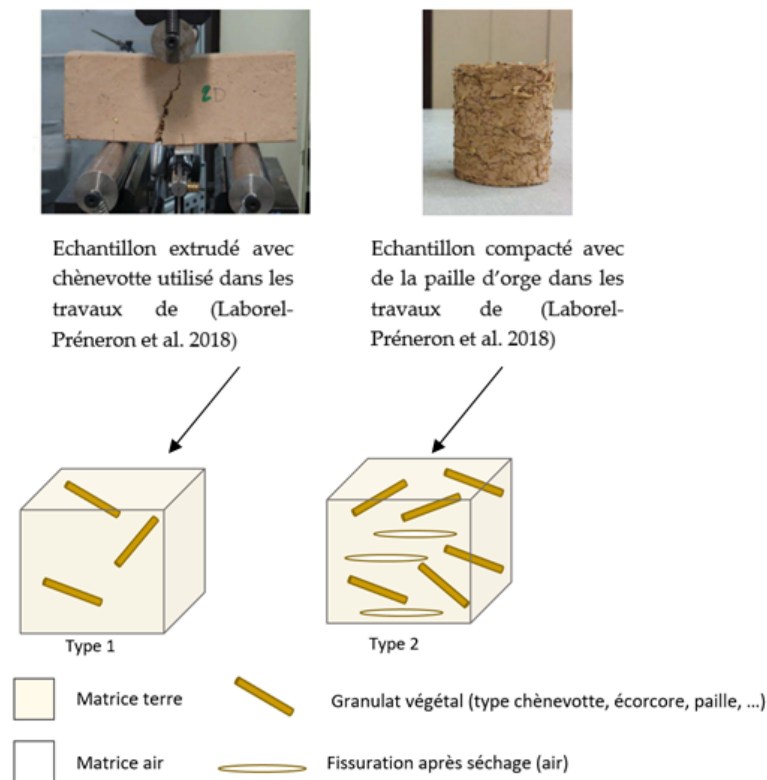


FIGURE 1. Schématisation des différentes structures de composites terre crue-granulats végétaux (cas des granulats de forme cylindrique) et exemples illustratifs correspondants extraits de la littérature (Laborel-Préneron et al., 2018).

B. Modélisation par champs moyens

Le schéma de Mori Tanaka (Mori and Tanaka, 1973) est utilisé pour les calculs d'homogénéisation sur tous les types modèles de composites. Cela permet de prendre en compte notamment l'effet des inclusions entre elles. Il s'agit de considérer des éléments de volumes représentatifs (VER) constitués de plusieurs phases (décrites dans la figure 1) dont il faut connaître la fraction volumique et la conductivité thermique. Pour les inclusions (granulat végétal ou fissuration), il est nécessaire également de définir une forme (sphère, cylindre, ellipsoïde), un facteur de forme (fixe ou défini par une loi de distribution) et une orientation (aléatoire 3D, aléatoire 2D ou définie par les composantes d'un tenseur). Une relation analytique permet ensuite de calculer la conductivité thermique d'un milieu homogène équivalent (celui du composite) à partir de celles des particules végétales et de la matrice terre (Rosa Latapie et al., 2024, 2023a). Ce schéma d'homogénéisation peut toutefois montrer des limites dans le cas d'une grande fraction volumique (Jeancolas, 2018) surtout si le contraste est particulièrement marqué entre l'inclusion et la matrice (Ghossein and Lévesque, 2011).

C. Conductivité thermique particulière

L'analyse macro et microstructurale des inclusions permet d'accéder à leur conductivité thermique particulière selon que le granulat est plutôt isotrope (type moelle de tournesol) ou transversalement isotrope (type paille, chènevotte) grâce à deux méthodes développées dans des travaux précédents (Rosa Latapie et al., 2023a, 2023b). Dans les références choisies pour cette étude, la conductivité thermique des granulats en vrac a été mesurée avant la mise en œuvre des matériaux ce qui a permis de remonter, par méthode inverse, à la conductivité thermique particulière des granulats végétaux utilisés. Cependant, ces calculs nécessitent également la connaissance des masses volumiques particulières. Étant donné que ces données n'étaient pas disponibles dans les campagnes expérimentales sélectionnées, les valeurs ont été extraites d'autres travaux de la littérature (Ratsimbazafy et al., 2023).

En outre, pour les granulats de forme cylindrique, une hypothèse sur la valeur du paramètre d'anisotropie γ était nécessaire : le choix a été de considérer une valeur de 1.5 qui semble faire consensus pour la chènevotte (Nguyen et al., 2016; Rosa Latapie et al., 2023a) bien qu'elle n'ait pas été déterminée pour d'autres granulats. Ce choix est justifié par la similitude apparente de l'aspect des pailles avec celui de la chènevotte, tant à l'échelle macroscopique que microscopique. Ainsi, deux composantes de la conductivité thermique particulière, la composante tangentielle λ_T et la composante normale λ_N , sont déterminées (figure 2).

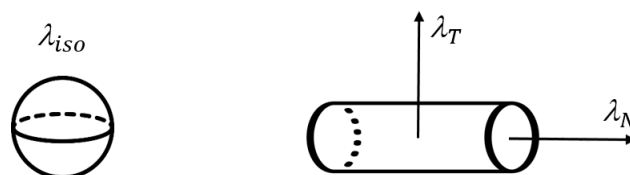


FIGURE 2. Conductivité thermique particulière selon le type de granulat végétal envisagé : cas isotrope (moelle de tournesol) ou anisotrope (chènevotte, paille de blé/colza/orge, ...)

Enfin, dans la mesure où les conductivités thermiques ont été mesurées sur des échantillons préalablement séchés en étuve, la conductivité thermique particulière a été calculée à l'état sec en

amont de la modélisation. Les valeurs particulières utilisées pour l'homogénéisation sont récapitulées dans le tableau 2.

TABLEAU 2. Détermination des conductivités thermiques particulières en amont de la modélisation

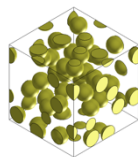
Type de granulat (notation)	Masse volumique particulière (kg.m^{-3})	Référence	Conductivité thermique particulière à l'état sec utilisée dans l'étude ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$)			Valeur comparative de la littérature -cas isotrope- ($\text{W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$) (Référence)
			λ_{iso}	λ_{T}	λ_{N}	
Moelle de tournesol (M)	56	(Ratsimbazafy et al., 2023)	0.08 (0.04)	/	/	0.036 (Belayachi et al., 2022)
Ecorce de tournesol (E)	425		/	0.045	0.068	0.053 (Belayachi et al., 2022)
Chènevotte (C)	248		/	0.044	0.067	0.110 (Dartois et al., 2017)

La valeur de $0.08 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$ pour la conductivité thermique particulière de la moelle de tournesol - déduite de la mesure faite sur le vrac selon l'étude sélectionnée - est relativement élevée alors même que ce granulat est connu pour être l'un des plus poreux (Abbas et al., 2020). Il devrait donc logiquement avoir une conductivité thermique plus faible que l'écorce de tournesol ou la chènevotte. Une précédente étude sur la conductivité thermique particulière de ce granulat met en évidence une valeur deux fois moins importante, de l'ordre de $0.04 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$, validée à l'échelle de panneau isolants (Rosa Latapie et al., 2023b). Les deux valeurs ont été considérées ici pour être discutées ensuite au niveau des résultats et sont référencées sur les noms des composites par les suffixes $-\lambda_8$ ou $-\lambda_4$.

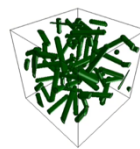
D. Hypothèses et démarche de l'étude

Les hypothèses retenues pour cette étude sont les suivantes :

- L'eau éventuellement adsorbée par le bio-composite au niveau de la terre crue et du granulat végétal n'est pas prise en compte.
- Les granulats végétaux sont considérés comme des inclusions isotropes (sphères) ou transversalement isotropes (cylindres) avec une orientation aléatoire selon les trois directions de l'espace (figure 3) ou dans le plan perpendiculaire à la compression



(a)



(b)

FIGURE 3. VER considérés selon le type de granulat végétal: moelle de tournesol (a) ou type paille /chènevotte (b) avec l'hypothèse de deux phases : inclusions (orientation aléatoire) et matrice liante.

Par ailleurs, pour apprécier la pertinence des descriptions proposées à la section II.A, l'étude a été menée en considérant les deux types de structure définies dans la figure 1 :

- la porosité matrice/inclusion (soit liant/granulat végétal) est négligée, seules sont prises en comptes les porosités intra liant et intra granulaire via les conductivités thermiques respectives du liant et du granulat végétal (type 1).
- la porosité matrice/inclusion et la porosité additionnelle qui se crée après le processus de fabrication sont considérées à travers une porosité spécifique (orientation perpendiculaire à la compression et facteur de forme correspondant à une ellipse aplatie), fixée arbitrairement à 10 % du volume total du VER (type 2), qui est une valeur vraisemblable car ces composites sont très cohésifs (Menibus et al., 2018).

Une discussion est menée sur la base de ces simulations, par comparaison aux résultats expérimentaux. Il est à noter cependant que ces derniers sont des scalaires (notés $\lambda_{\text{composite}}$), issus des appareils de mesure de conductivité thermique (fil chaud, plaque chaude gardée) alors que la modélisation donne accès à un tenseur de conductivité thermique $\underline{\underline{\lambda}}_{\text{composite}}$ qui prend en compte les différentes composantes définies par la loi de Fourier pour un matériau anisotrope :

$$\underline{j} = - \underline{\underline{\lambda}}_{\text{composite}} \underline{\text{grad T}} \quad (1)$$

Avec \underline{j} , le vecteur de flux thermique macroscopique (en W), $\underline{\underline{\lambda}}_{\text{composite}}$ le tenseur de conductivité thermique (en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$) et $\underline{\text{grad T}}$ le gradient de température (en K.m^{-1}). Le tenseur de conductivité thermique est composé de trois composantes notées comme suit :

$$\underline{\underline{\lambda}}_{\text{composite}} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dans le but de pouvoir comparer les valeurs expérimentales (une seule valeur scalaire) aux valeurs résultant de l'homogénéisation (composantes λ_i du tenseur), la moyenne des composantes données par la modélisation a été calculée. Dans le cas où le matériau est isotrope, les composantes λ_i sont égales à $\lambda_{\text{composite}}$. Les valeurs de λ_i du composite sont calculées par l'homogénéisation par champs moyens décrite dans la partie B.

E. Données d'entrée de la modélisation

Des données d'entrée spécifiques à la matrice et aux inclusions sont nécessaires (masse volumique et conductivité thermique) ainsi que la fraction volumique des phases dans le composite. Cette donnée constitue un point délicat car elle est rarement explicitée ou mesurée dans la littérature. Elle peut se calculer -pour la structure de type 1- à partir des masses volumiques de chaque phase et du volume de l'échantillon. Les rapports de forme (moyenne des analyses granulométriques) sont extraits, si possible, des références sélectionnées. A défaut, ils sont issus de la moyenne des valeurs données dans une étude bibliographique récente sur les granulats végétaux

(Ratsimbazafy et al., 2021). Le tableau 3 précise ainsi toutes les données d'entrées complémentaires utilisées pour la modélisation.

TABLEAU 3. Données d'entrée complémentaires aux conductivités thermiques particulières

Composite Matrice/Inclusion (notation)	Rapport de forme de l'inclusion (référence)	Fraction volumique de l'inclusion
Argile/Moelle de tournesol (AM)	1.5 (Ratsimbazafy et al., 2021)	0.79
Argile/Ecorce de tournesol (AE)	3.87 (Ratsimbazafy et al., 2021)	0.39
Fines de lavage/Chênevotte (FC1)	3.3 (Laborel-Préneron et al., 2018)	0.22
Fines de lavage/Chênevotte (FC2)		0.37

L'étude multi-échelle donne ainsi accès à la conductivité thermique effective du matériau. Il est démontré empiriquement que cette valeur décroît avec la masse volumique du matériau (Laborel-Préneron et al., 2018).

III. RESULTATS ET DISCUSSION

Pour bien distinguer les différents essais menés et dans le but de comparer de manière exhaustive les résultats expérimentaux aux résultats obtenus par homogénéisation, la liste des modèles testés est récapitulée dans le tableau 4. Cela permet d'analyser les différentes variantes considérées pour un même matériau et de visualiser l'impact des hypothèses faites sur les résultats.

TABLEAU 4. Liste des modèles testés avec le schéma de Mori Tanaka et résultats associés

Type 1			
Composite modélisé	Orientation des inclusions	Spécificités du modèle	Conductivité thermique du composite à l'état sec - λ_{iso} ou composantes $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ - (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
AM-1- λ_8	/	$\lambda_{iso} = 0.08 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$	0.112
AM-1- λ_4	/	$\lambda_{iso} = 0.04 \text{ W.m}^{-1}\text{K}^{-1}$	0.077
AE-1-3D	Aléatoire 3D	/	0.166
AE- 1-2D	Aléatoire 2D dans plan perpendiculaire à la direction de compaction	/	0.172/0.172/0.156
FC1-1-3D	Aléatoire 3D	/	0.421
FC1-1-2D	Aléatoire 2D dans plan perpendiculaire à la direction de compaction	/	0.430/0.430/0.413
FC2-1-3D	Aléatoire 3D	/	0.362
FC2-1-2D	Aléatoire 2D dans plan perpendiculaire à la direction de compaction	/	0.341/0.341/0.323

Type 2

AM-2- λ 8	/	Inclusions (air) de facteur de forme 20 (allongé de type fissure) aléatoirement disposées dans un plan perpendiculaire au plan de compaction	0.091/0.091/0.090
AM-2- λ 4	/		0.057 /0.057/0.056
AE-2-3D	Aléatoire 3D		0.142/0.142/0.139
AE- 2-2D	Aléatoire 2D dans plan perpendiculaire à la direction de compaction		0.147/0.147/0.129
FC1-2-3D	Aléatoire 3D		0.360/0.360/0.340
FC1-2-2D	Aléatoire 2D dans plan perpendiculaire à la direction de compaction		0.360/0.360/0.330
FC2-2-3D	Aléatoire 3D		0.375/0.275/0.266
FC2-2-2D	Aléatoire 2D dans plan perpendiculaire à la direction de compaction		0.284/0.284/0.248

Pour chaque composite, les résultats obtenus grâce à ces différentes modélisations ont été comparés aux valeurs expérimentales (figure 4).

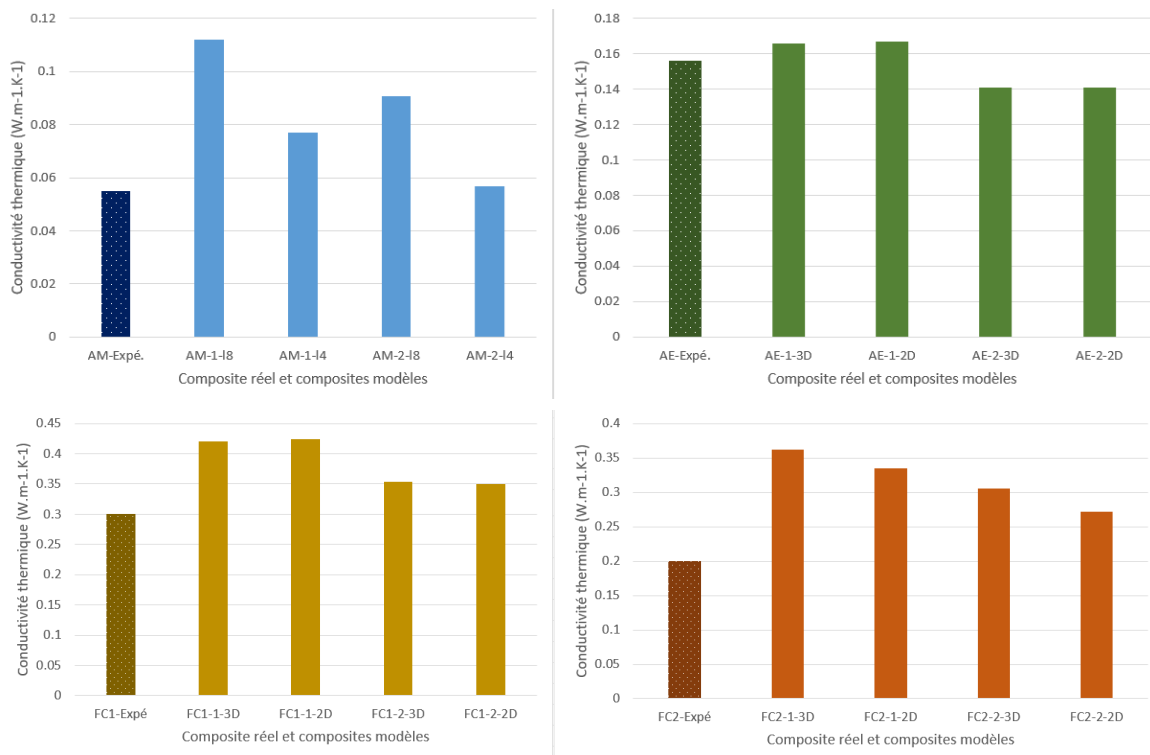


FIGURE 4. Comparaison des valeurs de conductivité thermique mesurées sur chaque composite aux valeurs calculées par homogénéisation selon les différents matériaux considérés : AM, AE, FC1 et FC 2.

Pour le composite AM (argile / moelle de tournesol), on constate que toutes les modélisations considérant une conductivité thermique particulière de 0,08 W.m⁻¹.K⁻¹ surévaluent largement celle mesurée sur le composite réel. En revanche, en considérant la valeur particulière de 0,04 W.m⁻¹.K⁻¹

¹, les résultats sont nettement améliorés (écart relatif de moins de 5% entre la valeur modélisée AM-2- λ 4 et la valeur expérimentale). Cette valeur est donc vraisemblablement plus pertinente. Par ailleurs, il est intéressant de noter que les modélisations type 2 donnent des meilleurs résultats : la prise en compte de la fissuration après séchage semble se justifier indépendamment de la valeur de la conductivité thermique du granulat.

Pour le composite AE (argile/écorce de tournesol), les modélisations qui ne tiennent pas compte de la porosité additionnelle due à la fissuration au séchage surévaluent légèrement la conductivité thermique du composite, ce qui est cohérent. Avec une porosité additionnelle de 10% du volume total, les valeurs du modèle sont en-deçà de la valeur réelle (environ 10 % en dessous). La porosité additionnelle réelle est donc vraisemblablement inférieure à cette valeur fixée arbitrairement (faute d'avoir accès à cette donnée dans la littérature).

Pour le composite FC1 (fines de lavage/chênevotte), la modélisation la plus pertinente est celle de type 2. La surestimation de ce modèle (de l'ordre de 15%) montre que la porosité additionnelle est probablement plus importante que la valeur de 10 % fixée dans l'étude. Comme pour le matériau AE, la prise en compte de l'orientation préférentielle des particules de chènevotte dans une orientation perpendiculaire au plan de compactage ne semble pas nécessaire. En effet, les résultats qui considèrent une orientation aléatoire dans les trois directions de l'espace donnent des résultats tout aussi pertinents.

Pour le modèle FC 2 (fines de lavage/chênevotte), la modélisation la plus pertinente reste celle de type 2. La prise en compte de l'orientation préférentielle des particules due à la mise en œuvre du matériau améliore le résultat prédictif. Cet effet notoire sur la conductivité thermique du composite s'explique par une proportion volumique de granulats importante : la proportion volumique de chènevotte dans le composite FC 2 est de 37% contre 22% pour le composite FC 1. Structurellement, la fraction volumique de matrice est donc moins importante mais il est difficile d'en évaluer la part de fissuration d'où un écart plus marqué dans ce cas entre valeur théorique et valeur expérimentale. Cependant, on pourrait envisager une fissuration moins importante pour FC2 que pour FC 1 par un possible pontage réalisé par les particules de chènevottes. Plus nombreuses dans le composite FC 2 que dans FC 1, elles pourraient être à l'origine d'une limitation de la fissuration au séchage. En effet, ce type de phénomène a été mis en évidence sur des travaux concernant des mortiers (Saad et al., 2022).

IV. CONCLUSION

Cette étude démontre qu'une bonne définition des données d'entrée, couplée à une définition structurelle fidèle du composite réel, permet de prédire la conductivité thermique à sec de composites terre crue-granulats végétaux de manière très pertinente grâce à l'homogénéisation par champ moyens utilisant le modèle de Mori Tanaka. Malgré des fractions volumiques relativement élevés, les résultats sont pertinents. Cela s'explique probablement par un contraste peu marqué entre les conductivités thermiques particulières et celle de la matrice. Pour la grande majorité des composites sélectionnés dans l'étude, la valeur modélisée de la conductivité thermique n'excède pas 15 % d'écart avec la valeur réelle. Pour améliorer le modèle prédictif, il conviendra d'apporter une attention particulière sur la caractérisation préalable des constituants

du matériau que l'on souhaite mettre en œuvre. Il s'agit d'avoir accès à la masse volumique et la conductivité thermique de la matrice seule. Concernant les granulats végétaux, la mesure de la conductivité thermique en vrac, sur un mélange dont on connaît la fraction volumique de granulats, est souhaitable. A défaut, la masse volumique en vrac est exploitable si la masse volumique particulière est connue pour en déduire la fraction volumique. En conséquence, le procédé de fabrication doit permettre de contrôler la proportion volumique des granulats incorporés mais également l'orientation préférentielle de ces derniers. En effet, cette dernière peut avoir un impact non négligeable sur la conductivité thermique du composite.

Il est à noter que les composites modèles étudiés dans ces travaux ouvrent la possibilité de pouvoir déterminer la conductivité thermique par homogénéisation en amont même de la fabrication. Il est donc possible d'envisager une optimisation de la formulation en modifiant l'orientation des granulats et/ou leur facteur de forme dans une phase préalable à la mise en œuvre. L'impact de modifications microstructurales pourrait ainsi être évalué sur les performances thermiques des géo-composites. Toutefois, le manque de campagnes expérimentales dans la littérature donnant accès aux valeurs nécessaires à la modélisation est notable. Une étude élargie pourrait permettre -par comparaison entre les différents modèles et la pertinence de la valeur de conductivité thermique prédite- de définir des « cas type » de modélisation suivant la technique de fabrication et la formulation (type et proportion de granulats).

Enfin, le fait de mener une étude multi-échelle dès celle du granulat permet d'envisager également, dans la modélisation, un changement de granulat dans le composite en prenant en compte la disponibilité locale des co-produits agricoles (filière existante ou non, saisonnalité des récoltes). Ce dernier élément est fondamental pour optimiser l'impact environnemental des matériaux terre crue-granulats végétaux et répondre ainsi aux enjeux énergétiques, climatiques et sociétaux actuels. Cette perspective pourra faire l'objet de travaux futurs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient l'ADEME et le projet LOCABATI pour leur soutien financier à cette étude ainsi que l'AUGC pour son aide à la mobilité concernant notre participation aux RUGC 2024.

REFERENCES

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, 120573. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120573>

Adélaïde, L., Chanel, O., Pascal, M., 2022. Des impacts sanitaires du changement climatique déjà bien visibles : l'exemple des canicules. *Annales des Mines - Responsabilité et environnement* 106, 42–47. <https://doi.org/10.3917/re1.106.0042>

Anglade, E., 2022. Effet de la pression capillaire sur les propriétés mécaniques d'un sol reconstitué. *Academic Journal of Civil Engineering* 40. <https://doi.org/10.26168/ajce.40.1.84>

Belayachi, N., Ismail, B., Broard, Y., 2022. Propriétés effectives thermiques d'un bio-composite à base de tournesol. *Academic Journal of Civil Engineering* 40, 240–243. <https://doi.org/10.26168/ajce.40.1.59>

Brouard, Y., Belayachi, N., Hoxha, D., Ranganathan, N., Méo, S., 2018. Mechanical and hygrothermal behavior of clay – Sunflower (*Helianthus annuus*) and rape straw (*Brassica napus*) plaster bio-composites for building insulation. *Construction and Building Materials* 161, 196–207. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.140>

Dartois, S., Mom, S., Dumontet, H., Hamida, A.B., 2017. An iterative micromechanical modeling to estimate the thermal and mechanical properties of polydisperse composites with platy particles: Application to anisotropic hemp and lime concretes. *Construction and Building Materials* 152, 661. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.181>

Ghossein, E., Lévesque, M., 2011. Un outil complètement automatisé pour l'évaluation en profondeur des performances des modèles d'homogénéisation, in: AMAC (Ed.), 17èmes Journées Nationales Sur Les Composites (JNC17). Poitiers-Futuroscope, France, p. 66.

Laborel-Préneron, A., Aubert, J.-E., Magniont, C., Maillard, P., Poirier, C., 2017. Effect of Plant Aggregates on Mechanical Properties of Earth Bricks. *Journal of Materials in Civil Engineering* 29, 04017244. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002096](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002096)

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 and Buildings* 178, 265–278. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.021>

Martinez-Alier, J., 2023. L'Écologisme des pauvres - Une étude des conflits environnementaux dans le monde. *Petits matins*.

Menibus, A.H. de, Basco, C., Degrave-Lemeurs, M., Colinart, T., Glé, P., Hamard, E., Lecompte, T., Lenormand, H., Meunier, M., Vincelas, T., 2018. Étude des bétons biosourcés à base de terre crue et de chanvre dans le cadre du projet ECO-TERRA. *Academic Journal of Civil Engineering* 36, 25–28. <https://doi.org/10.26168/ajce.36.1.7>

Mori, T., Tanaka, K., 1973. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metallurgica* 21, 571–574. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3)

Nguyen, S.T., Tran-Le, A.D., Vu, M.N., To, Q.D., Douzane, O., Langlet, T., 2016. Modeling thermal conductivity of hemp insulation material: A multi-scale homogenization approach. *Building and Environment* 107, 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.026>

Ratsimbazafy, H.H., Laborel-Préneron, A., Magniont, C., Evon, P., 2023. Contribution à l'élaboration d'un référentiel de caractérisation des granulats végétaux pour la construction. *Academic Journal of Civil Engineering* 41, 375–385. <https://doi.org/10.26168/ajce.41.1.37>

Ratsimbazafy, H.H., Laborel-Préneron, A., Magniont, C., Evon, P., 2021. A review of the multi-physical characteristics of plant aggregates and their effects on the properties of plant-based concrete. *Recent Progress in Materials* 3, 1–69.

Rosa Latapie, S., Lagouin, M., Douk, N., Sabathier, V., Abou-Chakra, A., 2023a. Multiscale Modelling of Bio-composites: Towards Prediction of Their Thermal Conductivity Based on

Adequate Knowledge of Their Constituents, in: Amziane, S., Merta, I., Page, J. (Eds.), *Bio-Based Building Materials*, RILEM Bookseries. Springer Nature Switzerland, Cham, pp. 841–858. https://doi.org/10.1007/978-3-031-33465-8_65

Rosa Latapie, S., Lagouin, M., Sabathier, V., Abou-Chakra, A., 2023b. From aggregate to particleboard: A new multi-scale model approach to thermal conductivity in bio-based materials. *Journal of Building Engineering* 78, 107664. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.107664>

Rosa Latapie, S., Sabathier, V., Abou-Chakra, A., 2024. Bio-based building materials: A prediction of insulating properties for a wide range of agricultural by-products. *Journal of Building Engineering* 108867. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.108867>

Saad, M., Sabathier, V., Turatsinze, A., 2022. Natural Fibers vs. Synthetic Fibers Reinforcement: Effect on Resistance of Mortars to Impact Loads. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.95>

Shanmuga Priyan, V.G., Kanmani Subbu, S., 2023. Numerical Simulation of Thermal Conductivity of Aluminium–Silicon Carbide Composites, in: Jain, P.K., Ramkumar, J., Prabhu Raja, V., Kalayarasan, M. (Eds.), *Advances in Simulation, Product Design and Development, Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer Nature, Singapore, pp. 95–103. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4556-4_8