

Etude multi-échelle des transferts thermiques d'une paroi biosourcée : effet d'un épisode de fortes chaleurs sur la conductivité thermique.

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

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

RESUME Le secteur du bâtiment doit aujourd'hui opérer une transition efficace et pérenne sur le plan environnemental tout en assurant un confort d'été du bâti. Les matériaux biosourcés peuvent répondre à ces enjeux mais leur caractérisation s'avère relativement chronophage. Dans ce contexte, nous proposons une nouvelle méthode de modélisation afin d'appréhender la variabilité de la conductivité thermique de ces matériaux vis-à-vis de la température. Celle-ci prend en compte la nature du squelette ainsi que la porosité de la particule végétale. Il s'agit donc de se positionner à une nouvelle échelle : celle du granulat. Une approche d'homogénéisation basée sur l'estimation de Mori-Tanaka, différente du schéma auto-cohérent couramment utilisé dans la littérature pour ces matériaux, nous permet de quantifier l'impact de la température sur la conductivité thermique particulière. Une nouvelle homogénéisation est ensuite réalisée pour appréhender les effets de la température à l'échelle du matériau. Enfin cette étude a permis d'appréhender la pertinence des granulats végétaux, mis en œuvre en tant qu'isolant en vrac, vis-à-vis du confort d'été. Nos résultats mettent en avant l'intérêt de prendre en compte la température sur les performances thermiques des parois biosourcées. Ils pourront être exploités pour prédire le comportement d'une large gamme de bétons végétaux.

Mots-clefs Multi-échelle, biosourcé, thermique, modélisation, confort d'été

I. INTRODUCTION

Les co-produits agricoles utilisés en tant que granulats dans les matériaux biosourcés ont la particularité de présenter une structure poreuse importante. En effet, de nombreux capillaires permettent d'assurer la circulation de la sève dans la tige de la plante, pendant sa phase de croissance. Après récolte et séchage, le granulat issu de la tige (moelle et/ou écorce selon les cas) présente alors un réseau capillaire rempli d'air. Cette porosité particulière s'étend de près de 50% à plus de 95% selon le type de granulat considéré (Ratsimbazafy, 2022). Cette porosité ouverte, que l'on retrouve à l'échelle matériau, est le siège de transferts de masse d'eau lorsque l'humidité relative ambiante varie. Ce phénomène est à l'origine d'une augmentation de la conductivité thermique des bio-composites avec l'humidité relative, puisque l'eau est un meilleur conducteur

thermique que l'air (Samri, 2008) (Gourlay and Arnaud, 2010). Or, l'air présente également une variation significative de sa conductivité thermique en fonction de la température et de l'humidité relative (Tsilingiris, 2008). De plus, le squelette solide particulaire de ces agrégats végétaux est composé principalement de cellulose (Ratsimbazafy, 2022) dont la conductivité thermique dépend également de la température (Antlauf et al., 2021). Cette étude propose donc dans un premier temps de modéliser les effets de la température sur la conductivité thermique d'une particule végétale seule, puis dans un second temps à l'échelle macroscopique d'un agglomérat de particules (vrac) en considérant ces deux aspects.

Néanmoins, une première difficulté résidait dans le choix du modèle permettant d'appréhender l'impact de la température à l'échelle de la conductivité thermique particulaire. En effet, il est important de souligner que les méthodes de mesure actuelles ne permettent pas d'avoir accès à la valeur de conductivité thermique particulaire. Les valeurs que l'on trouve dans la littérature proviennent de méthodes inverses ou numériques (Cérézo, 2005) (Tran-Le et al., 2019). Enfin, la caractérisation thermique des granulats végétaux est en général réalisée sous conditions normées (23°C, 50%HR) ce qui limite la disponibilité des données sous d'autres conditions. Afin de lever ces différents verrous scientifiques, cette étude propose une nouvelle méthode de détermination de la conductivité thermique en se basant à une échelle microstructurale, celle de la particule végétale. Par ailleurs, le caractère hygroscopique des granulats végétaux nécessite en toute rigueur de considérer une phase d'eau adsorbée dès lors que l'on se place à une humidité relative non nulle. Nous avons pourtant choisi de considérer des particules sèches dans cette étude. Ceci présuppose deux cas de figure : soit les particules végétales sont placées dans un air ambiant à 0% d'HR (cas idéal non représentatif des conditions d'usage), soit la cinétique de sorption (Reuge et al., 2021) implique que l'état d'équilibre n'est pas atteint et que les molécules d'eau présentes dans l'air ambiant n'ont pas encore été fixées par le squelette solide. Cette simplification a du sens dans la mesure où l'étude s'intéresse ici à la conductivité thermique d'une paroi biosourcée sous des sollicitations caractéristiques d'une forte période de chaleur. L'hypothèse faite est également soutenue par un dernier élément. En effet, les relevés météorologiques de la canicule de 2003 en France métropolitaine ont montré des taux d'humidité relative de moins de 30% (Bessemoulin et al., 2004) (Cantat, 2005) (Wahl et al., 2005). Or, les phénomènes de sorption au niveau des granulats végétaux ont lieu à des humidités relatives moyennes (Lenormand et al., 2014) et les quantités d'eau adsorbée diminuent lorsque la température croît (Maalouf et al., 2015). Seule la variation d'humidité relative au niveau de l'air a donc été considérée ici.

Dans un premier temps, cet article expose les raisons qui ont conduit à considérer le granulat de chanvre d'une part et des modèles d'homogénéisation issus de la théorie d'Eshelby d'autre part. Ainsi une nouvelle méthode de détermination de la conductivité thermique d'une paroi biosourcée est présentée : il s'agit d'un modèle numérique qui s'appuie sur des données intrinsèques de la particule végétale. Ensuite, nous présentons les résultats récents de la littérature qui ont permis de proposer, via notre modèle, une projection de la variabilité de la conductivité thermique d'une paroi biosourcée en fonction de la température. Enfin, les résultats de cette étude multi-échelle sont discutés afin d'étudier la pertinence de prendre en compte l'impact de la température sur la conductivité thermique de ce type de paroi, notamment lors d'un épisode de

fortes chaleurs. A ce titre, les conditions particulières de forte chaleur et d'humidité relative faible sont considérées ici, correspondant à celles de la canicule de 2003 en Europe.

II. MATERIAUX ET METHODES

A. Choix du granulat étudié

Le granulat végétal choisi dans cette étude est la chènevotte. En effet, c'est le seul granulat pour lequel des valeurs de conductivité thermique particulière sont disponibles dans la littérature (Cérézo, 2005) (Pham et al., 2012) (Dartois et al., 2017) et permettent de vérifier la cohérence de nos valeurs obtenues par homogénéisation. De plus, le modèle proposé nécessite des données d'entrées qui sont disponibles pour la chènevotte dans les travaux récents de (Ratsimbazafy, 2022). Il s'agit de la porosité particulière et de la teneur en cellulose de son squelette solide.

B. Choix du VER

Le schéma d'homogénéisation utilisé suppose de définir au préalable un Volume Élémentaire Représentatif pertinent. Ainsi, pour respecter le principe fondamental de « séparation d'échelle » et se positionner à une échelle suffisamment grande devant les hétérogénéités microstructurales, nous nous sommes placés à l'échelle d'une particule de chènevotte (dimensions de l'ordre du centimètre) puis à l'échelle du vrac (dimensions de l'ordre du décimètre). L'étude a été menée en considérant un VER bi-phasique, sans considérer l'eau adsorbée par le granulat végétal. La matrice (phase m) est constituée par le squelette solide de la particule végétale, les inclusions (pores, phase i) sont supposées sphériques (Jeancolas, 2018). Dans le cas du vrac, la matrice du milieu hétérogène est représentée par l'air inter-particulaire (phase m), les granulats végétaux constituent les inclusions (phase i) également supposées sphériques. L'anisotropie due à une orientation préférentielle des particules dans le vrac n'est pas étudiée ici.

C. Choix du schéma d'homogénéisation

Le matériau hétérogène considéré, dans les deux cas de figure, est donc un composite de type « matrice + inclusions ». Or, la porosité des particules de chènevotte étudiée est de plus de 80 % (Ratsimbazafy, 2022) et le volume occupé par les granulats de chènevotte en vrac représente plus de 40% du volume total. Ainsi, la fraction volumique des inclusions, pour les deux VER considérés dans l'étude, est trop importante pour utiliser un schéma dilué (Jeancolas, 2018). Nous avons donc opté pour le schéma de (Mori and Tanaka, 1973) pour tenir compte de l'effet des inclusions entre elles. Ces dernières sont considérées sphériques et de même taille. Ainsi, selon la théorie classique d'Eshelby, le tenseur de conductivité thermique homogénéisé Λ_{hom} peut être ramené sous forme d'un scalaire comme suit :

$$\Lambda_{\text{hom}} = \lambda_{\text{hom}} \mathbf{I} \quad (1)$$

Où \mathbf{I} est le tenseur unitaire d'ordre 2 et λ_{hom} la conductivité thermique homogénéisée en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Avec :

$$\lambda_{\text{hom}} = \lambda_m + \frac{3f_i(\lambda_i - \lambda_m)\lambda_m}{(1 - f_i)\lambda_i + \lambda_m(2 + f_i)} \quad (2)$$

Où f_i est la fraction volumique des pores.

Les conductivités thermiques de la matrice et des inclusions sont respectivement notées λ_m et λ_i et s'expriment en $W.m^{-1}.K^{-1}$. A l'échelle de la particule, le squelette solide et les pores représentent respectivement la matrice et les inclusions, f_i est égale à la porosité particulaire. A l'échelle des granulats en vrac, l'air et les granulats végétaux représentent respectivement la matrice et les inclusions, f_i est le rapport entre le volume de chènevotte et le volume total du vrac.

Enfin, la valeur de conductivité thermique déterminée pour une particule de chènevotte à sec et sous $20^\circ C$ a été prise comme valeur de référence et une extrapolation a été faite pour sa valeur sous d'autres conditions de température et d'humidité relative.

D. Nouvelle méthode de détermination de la conductivité thermique

La conductivité thermique λ_m de la matrice solide particulaire est difficile à appréhender. Seuls des travaux récents sur la cellulose (Antlauf et al., 2021) permettent d'évaluer la conductivité thermique de cette macromolécule et il est intéressant de noter qu'elle dépend de la température. En revanche, aucune donnée de la littérature n'est disponible sur la conductivité thermique de l'hémicellulose et la lignine, molécules également constitutives de la chènevotte. Sachant que la cellulose est le constituant majoritaire de la chènevotte (Mazhoud, 2017) (Ratsimbazafy, 2022), mais également le seul qui présente une structure cristalline, il est légitime de considérer qu'il participe majoritairement au phénomène de conduction thermique (Schick, 2011). Ainsi, nous avons fait l'hypothèse d'un squelette solide constitué exclusivement de cellulose pour déterminer la conductivité thermique λ_m de la matrice particulaire (squelette solide). Les valeurs obtenues sont de l'ordre de grandeur de celle estimée par méthode inverse par (Nguyen et al., 2016) ce qui nous permet de valider la cohérence de nos résultats pour la valeur de conductivité thermique du squelette solide (matrice). Ensuite, une validation a été faite à l'échelle de la particule végétale puis du vrac. Enfin, pour bien expliquer la méthode utilisée, le principe de la double homogénéisation réalisée est illustré dans la figure 1.

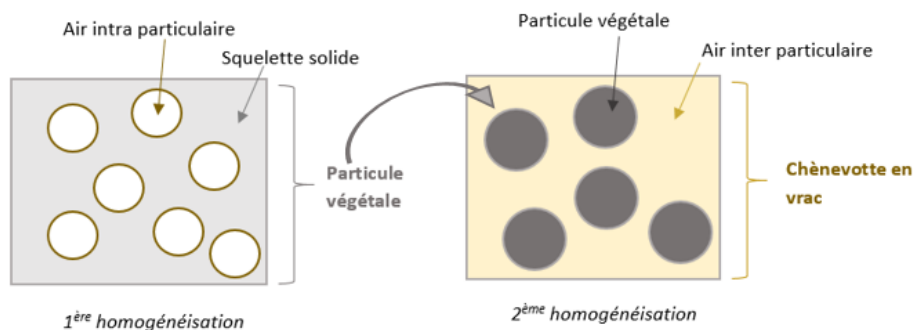


FIGURE 1. Principe de la méthode utilisée : de l'échelle particulaire à celle de particules en vrac

F. Impact de la température sur la conductivité thermique du squelette solide

En considérant la variation de la conductivité thermique de la cellulose en fonction de la température, nous obtenons la figure 2. Ainsi, la conductivité thermique du squelette solide augmente d'environ 5% de $0^\circ C$ à $50^\circ C$ selon une relation linéaire. Cette dernière a été intégrée dans la relation (2) pour étudier l'impact de l'élévation de la température ambiante sur la conductivité thermique particulaire.

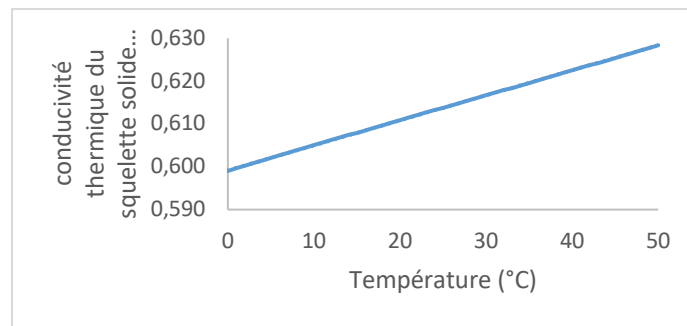


FIGURE 2. Evolution de la conductivité thermique de la matrice particulaire en fonction de la température d'après la relation polynomiale donnée par (Antlauf et al., 2021)

G. Impact de la température sur la conductivité thermique de l'air

Dans la littérature, la valeur de $0,026 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ à 20°C pour la conductivité thermique de l'air est couramment utilisée (Cérézo, 2005) (Ducoulombier, 2014). Cependant, les travaux de (Tsilingiris, 2008) montrent que cette valeur varie de manière non négligeable en fonction des conditions de température et d'humidité relative de l'air. Pour s'approcher au maximum des conditions réelles, nous avons tenu compte des relevés effectués pendant la canicule de 2003. Ainsi, nous avons considéré des valeurs comprises entre 0 et 30 % d'humidité relative pour l'air ambiant. La dépendance de la conductivité thermique de l'air en fonction de la température et de l'humidité relative (Fig 3) a été obtenue à partir de la numérisation des résultats de (Tsilingiris, 2008) puis par régression polynomiale pour pouvoir être intégrés à la relation (2). Ainsi la conductivité thermique de l'air augmente de près de 15% entre 0°C et 50°C sur la gamme d'humidité relative considérée dans l'étude.

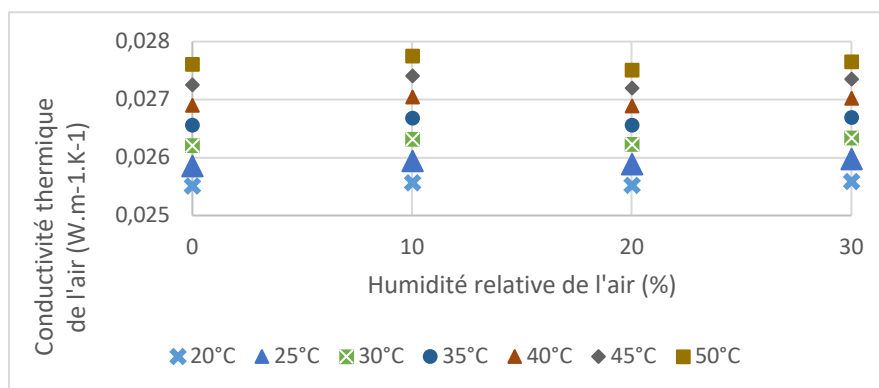


FIGURE 3. Evolution de la conductivité thermique de l'air en fonction de l'humidité relative et pour différentes températures d'après le traitement des données de (Tsilingiris, 2008)

Dans la mesure où la conductivité thermique dépend de la température, les grandeurs physiques qui sont calculées à partir de cette valeur sont logiquement impactées. Ainsi, pour étudier le confort d'été, mis en avant notamment dans la RE 2020, entrée en vigueur au 1^{er} Janvier 2022 pour les maisons individuelles et logements collectifs (Pestre, 2021), il est important de considérer la capacité du bâti à maintenir une température intérieure agréable malgré une température extérieure élevée. Pour cela, l'inertie thermique des parois doit permettre de déphaser et d'amortir les sollicitations extérieures. On distingue l'inertie de transmission -diffusivité a- qui

caractérise la vitesse à laquelle la chaleur se propage par conduction dans le matériau (équation 4). D'autre part, l'inertie d'adsorption -effusivité b- traduit la capacité du matériau à stocker de la chaleur sans se réchauffer de manière notable en surface (équation 5). Cette dernière caractérise plutôt les parois intérieures, traduisant ainsi une sensation de paroi froide ou de paroi chaude. Plus l'effusivité est grande, plus la chaleur de l'air intérieur sera absorbée rapidement par la paroi limitant ainsi l'élévation de température et donc l'inconfort lors de périodes de canicule. Pour contribuer au confort d'été, il convient donc que l'enveloppe extérieure du bâti soit la moins diffusive possible et l'enveloppe intérieure la plus effusive possible (Munaretto, 2014).

$$a = \frac{\lambda}{\rho C} \quad (4) \qquad b = \sqrt{\lambda \rho C} \quad (5)$$

Avec a diffusivité (en m².s⁻¹), b effusivité (en J.m⁻².K⁻¹.s^{-1/2}), λ conductivité thermique du matériau (en W.m⁻¹.K⁻¹), ρ sa masse volumique (kg.m⁻³) et C sa chaleur spécifique (en J.K.kg⁻¹).

III. RESULTATS ET DISCUSSION

A. Impact de la température sur la conductivité thermique particulière

La conductivité thermique particulière de la chènevotte, selon notre modèle, est en moyenne de 0,095 W.m⁻¹.K⁻¹ ce qui est cohérent avec les valeurs de la littérature (Cérézo, 2005) (Dartois et al., 2017). Selon nos résultats, sa valeur varie de manière relativement significative en fonction de la température. Le calcul a été mené pour les deux valeurs extrêmes de 0 % et 30 % d'HR (Fig 4).

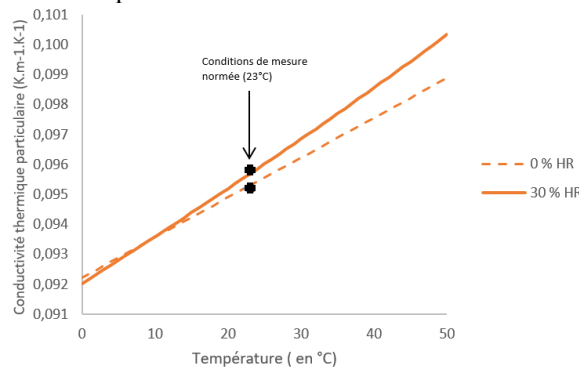


FIGURE 4. Evolution de la conductivité thermique particulière en fonction de la température pour de faibles humidités relatives, selon le modèle proposé

La conductivité thermique particulière augmente avec la température, ce qui est cohérent avec les relations données aux sections II.E et II.F et utilisées dans le modèle. Notons, par ailleurs, que le taux de variation de la conductivité thermique particulière augmente avec l'humidité relative. Selon notre modèle, entre 0°C (conditions hivernales) et 50 °C (conditions extrêmes sous un épisode caniculaire avec apport solaire), la valeur de conductivité thermique particulière augmente de plus de 6% sous une humidité relative de 10% et de plus de 8% sous une humidité relative de 30 %. Aussi, jusqu'à environ 20 °C, température à laquelle la caractérisation thermique des matériaux se fait en général, l'impact de l'humidité relative sur la conductivité thermique est relativement faible. Pour des températures plus élevées, il est plus marqué. Cela s'explique par les effets conjugués de l'humidité relative et de la température sur le squelette solide (cellulose) et l'air poral. On peut également remarquer que la mesure faite sous conditions normées (23 °C et

50% d’HR) ne permet pas de caractériser fidèlement la conductivité thermique particulière sur toute la gamme de température à laquelle le matériau est soumis en condition d’usage et de surcroît lors de périodes de forte chaleur.

B. Impact de la température sur la chènevotte en vrac

A partir de la conductivité thermique particulière, nous avons déterminé la conductivité thermique d’un arrangement en vrac, pour une gamme de fractions volumiques de chènevotte de 40 à 80%, ce qui correspond respectivement à du vrac non compacté et fortement compacté. La figure 5 montre clairement que la fraction volumique de 80% entraîne la conductivité thermique la plus défavorable vis-à-vis d’une utilisation en isolation. Finalement, de ce point de vue, c’est la fraction volumique de 40 % qui présente les meilleures capacités d’isolation. Ces résultats s’expliquent par une conductivité thermique particulière qui est en moyenne de 0,095 W.m⁻¹.K⁻¹ (cf section III.A) face à une conductivité thermique de l’air de l’ordre de 0,027 W.m⁻¹.K⁻¹ (cf section II.F). Logiquement, un vrac de particules non tassé contient un volume d’air plus important qu’un vrac tassé, il est donc plus isolant.

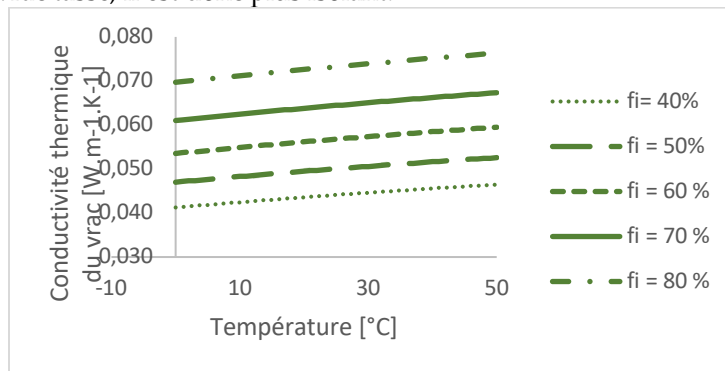


FIGURE 5. Evolution de la conductivité thermique de chènevotte en vrac en fonction de la température pour différentes fractions volumiques de granulat, à 30 % d’HR, selon le modèle proposé.

De plus, la conductivité thermique du vrac varie linéairement avec la température et augmente de 10 % entre 0°C et 50°C, quelle que soit la fraction volumique de granulat considérée. Ces tendances données par notre modèle sont en accord avec l’étude menée par (Bourdot et al., 2017) sur des composites à base de chènevotte et d’amidon. Enfin, la valeur moyenne donnée par notre modèle pour la conductivité thermique en vrac est de 0,050 W.m⁻¹.K⁻¹ sur la gamme de température 20-25 °C ce qui est en accord avec les valeurs données par la littérature (Tableau 1).

TABLEAU 1. Valeur moyenne de la conductivité thermique de la chènevotte en vrac donnée par notre modèle et comparée aux résultats de la littérature.

λ_{vrac} (W.m⁻¹.K⁻¹) de chènevotte			
Modèle proposé	Résultats expérimentaux issus de la littérature		
Moyenne 0%-30%HR sur la gamme 20°C-25°C	Valeur	Référence	Température de mesure
0,050	0,048	(Bourdot et al., 2017)	23 °C
	0,049	(Ratsimbazafy, 2022)	20 °C
	0,055	(Magniont et al., 2012)	25 °C
	0,058	(Dinh, 2014)	25 °C

C. Discussion sur le confort d'été

En considérant que le vrac à 40 % de fraction volumique est le plus isolant donc le plus opportun vis-à-vis de l'usage, nous avons étudié l'impact de la température sur les coefficients de diffusivité a et d'effusivité b pour ce cas de figure. Les résultats sont présentés dans la figure 6. Ainsi, lorsque la diffusivité augmente d'un peu plus de 10% entre 0°C et 50 °C, l'effusivité du même mélange en vrac augmente de seulement 5%. Cet écart entre les deux grandeurs s'explique par une pondération différente de la conductivité thermique dans les formules de diffusivité et d'effusivité. Aussi, selon nos résultats, une paroi dans laquelle de la chènevotte a été insufflée en vrac voit ses capacités de transmission augmenter deux fois plus que ses capacités d'adsorption lors d'une élévation de la température ambiante. Il est donc probablement plus opportun d'utiliser ce matériau en paroi intérieure plutôt que pour de l'isolation extérieure. En effet, avec une effusivité croissante avec la température, la paroi absorbera plus efficacement les apports internes pour les transmettre au cœur ce celle-ci, favorisant ainsi le confort d'été.

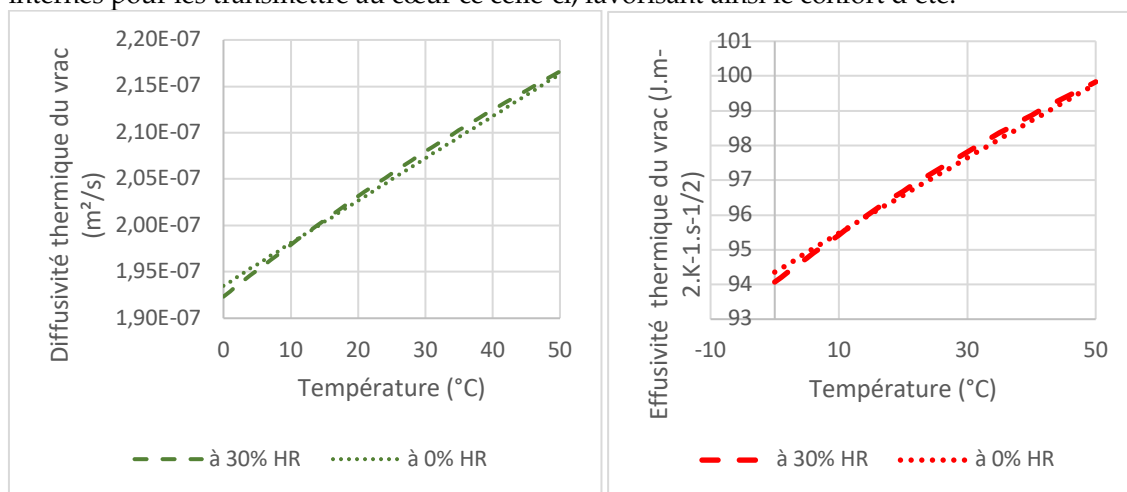


Figure 6. Evolution la diffusivité (à gauche) et de l'effusivité (à droite) de la chènevotte en vrac en fonction de la température à 0% et 30 % d'HR, selon le modèle proposé

IV. CONCLUSION

Cet article propose une nouvelle démarche de détermination de la conductivité thermique de parois biosourcées. En effet, la modélisation détaillée ici repose sur une connaissance préalable de la porosité particulière du granulat végétal, de la conductivité thermique de l'air et de celle du squelette solide particulière. A partir de ces données d'entrée nous obtenons la conductivité thermique particulière puis, par une nouvelle homogénéisation, celle de la chènevotte en vrac. Ainsi nous sommes capables de proposer une estimation, à différentes échelles, de la variation de la conductivité thermique en fonction de la température, ce pour de faibles humidités relatives. Une étape chronophage de caractérisation thermique pourrait ainsi être évitée, ouvrant la perspective pour une application à d'autres types de granulats végétaux.

Les résultats de cette étude montrent d'une part que la caractérisation thermique des matériaux biosourcés sous 23°C conduit à une valeur de conductivité thermique qui ne peut, en toute rigueur, rendre compte du comportement réel du matériau soumis à des conditions extrêmes. En effet, une variation moyenne de 10% des valeurs de conductivité thermique du

matériau en vrac est observée entre 0°C et 50°C, ce qui correspond aux conditions d'usage dans le bâti, soumis à des conditions hivernales ou caniculaires. D'autre part, l'impact de la température sur les paramètres d'inertie du matériau est également mis en relief par nos résultats. Ainsi, ils permettent de s'interroger sur la pertinence d'une utilisation de ce type de matériau en isolation par l'extérieur ou l'intérieur. Plus la température est élevée, plus leur diffusivité est grande augmentant ainsi l'échange thermique entre le climat extérieur et le climat intérieur. Tandis que l'augmentation de la conductivité thermique avec la température a donc un effet néfaste sur l'inertie par transmission, elle permet d'améliorer l'inertie par adsorption. Ainsi, des parois internes constituées de chènevottes en vrac permettront de s'opposer plus facilement aux variations internes de température, en période de forte chaleur, participant ainsi au confort d'été.

Par ailleurs, selon des relevés météorologiques existants (Martin, 2022) et certaines projections climatiques, des périodes de chaleurs peuvent s'accompagner d'humidités relatives bien au-delà des 30 % considérés ici. Cette étude devra être complétée par une prise en compte de la phase d'eau adsorbée au sein de la particule végétale pour étudier la variabilité de la conductivité thermique avec la température dans toute la gamme des humidités relatives. Cela permettra de discuter plus largement de l'impact sur le confort d'été mais également du comportement de ce type de paroi dans des conditions hivernales.

Enfin, la méthode appliquée ici sur des granulats végétaux pourra être étendue à l'échelle de composites bio-sourcés comme les bétons végétaux. Pour cela, certains verrous scientifiques, tels que la fraction volumique de granulats dans le matériau ou encore la porosité au niveau de l'interface granulats/liant devront être levés pour proposer une étude pertinente.

REFERENCES

- Antlauf, M., Boulanger, N., Berglund, L., Oksman, K., Andersson, O., 2021. Thermal Conductivity of Cellulose Fibers in Different Size Scales and Densities. *Biomacromolecules* 22, 3800–3809. <https://doi.org/10.1021/acs.biomac.1c00643>
- Bessemoulin, P., Bourdette, N., Courtier, P., Manach, J., 2004. La canicule d'août 2003 en France et en Europe. *La Météorologie* 8, 25. <https://doi.org/10.4267/2042/36057>
- Bourdot, A., Moussa, T., Gacoin, A., Maalouf, C., Vazquez, P., Thomachot-Schneider, C., Bliard, C., Merabtine, A., Lachi, M., Douzane, O., Karaky, H., Polidori, G., 2017. Characterization of a hemp-based agro-material: Influence of starch ratio and hemp shive size on physical, mechanical, and hygrothermal properties. *Energy Build.* 153, 501–512. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.022>
- Cantat, O., 2005. Dynamique spatio-temporelle d'un événement météo-climatique extrême: La canicule de l'été 2003 en Europe de l'ouest. *Ann. L'Association Int. Climatol.* 2, 99–136. <https://doi.org/10.4267/climatologie.908>
- Cérézo, V., 2005. Propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques d'un matériau à base de particules végétales : approche expérimentale et modélisation théorique (These de doctorat). Lyon, INSA.
- Chabannes, M., Nozahic, V., Amziane, S., 2015. Design and multi-physical properties of a new insulating concrete using sunflower stem aggregates and eco-friendly binders. *Mater. Struct.* 48, 1815–1829. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0276-9>
- 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. *Constr. Build. Mater.* 152, 661. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.181>
- Dinh, T.M., 2014. Contribution au développement de béton de chanvre préfabriqué utilisant un liant pouzzolanique innovant (These de doctorat). Toulouse 3.

- Ducoulombier, L.W.-, 2014. Conception d'un nouveau système d'isolation par l'extérieur pour le bâtiment (phdthesis). Ecole Centrale de Lille.
- Gourlay, E., Arnaud, L., 2010. Gourlay E, Arnaud L. Comportement hygrothermique des murs de béton de Chanvre, Actes du congrès SFT, Le Touquet, France; 2010.
- Jeancolas, A., 2018. Étude expérimentale et modélisation micromécanique du comportement de composites hybrides : optimisation de la conductivité thermique (phdthesis). Université de Lorraine.
- Lenormand, H., Mahieu, A., Leblanc, N., Vivet, A., 2014. Nouvelles agroressources pour panneaux de particules 100% biosourcés.
- Maalouf, C., Moussa, T., Vasseur-Umurigirwa, B., Lachi, M., Mai, T., 2015. Etude des isothermes de sorption de la chaleur isostérique d'un agromatériau à base de chanvre-amidon.
- Magniont, C., Escadeillas, G., Coutand, M., Oms, C., 2012. Use of plant aggregates in building ecomaterials. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 16, s17–s33.
<https://doi.org/10.1080/19648189.2012.682452>
- Martin, N., 2022. PROJECTIONS DU CONFORT THERMIQUE DURANT LE XXIÈME SIÈCLE À NICE PAR DOWNSCALING STATISTIQUE.
- Mazhoud, B., 2017. Elaboration et caractérisation mécanique, hygrique et thermique de composites biosourcés (These de doctorat). Rennes, INSA.
- Mori, T., Tanaka, K., 1973. Average stress in matrix and average elastic energy of materials with misfitting inclusions. *Acta Metall.* 21, 571–574. [https://doi.org/10.1016/0001-6160\(73\)90064-3](https://doi.org/10.1016/0001-6160(73)90064-3)
- Munaretto, F., 2014. Étude de l'influence de l'inertie thermique sur les performances énergétiques des bâtiments (These de doctorat). Paris, ENMP.
- 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. *Build. Environ.* 107, 127–134. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.07.026>
- Pestre, T., 2021. Natural stone in a context of environmental regulatory evolution of the construction, the study of heat and moisture transfers in building envelope components. (phdthesis). Université d'Artois.
- Pham, T., Férec, J., Picandet, V., Tronet, P., Costa, J., Pilvin, P., 2012. Etude expérimentale et numérique de la conductivité thermique d'un composite chaux–chanvre.
- Ratsimbazafy, H.H., 2022. Évaluation du potentiel de co-produits agricoles locaux valorisables dans le domaine des matériaux de construction (PALOMAC) (These de doctorat). Toulouse 3.
- Reuge, N., Collet, F., Pretot, S., Moissette, S., Bart, M., Lanos, C., 2021. Cinétique locale de sorption : Modélisation d'une paroi biosourcée. <https://doi.org/10.26168/ajce.38.1.15>
- Samri, D., 2008. Analyse physique et caractérisation hygrothermique des matériaux de construction : approche expérimentale et modélisation numérique.
- Schick, V., 2011. Caractérisation d'une mémoire à changement de phase : mesure de propriétés thermiques de couches minces à haute température (These de doctorat). Bordeaux 1.
- Tran-Le, A.D., Nguyen, S.-T., Langlet, T., 2019. A novel anisotropic analytical model for effective thermal conductivity tensor of dry lime-hemp concrete with preferred spatial distributions. *Energy Build.* 182, 75–87. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.09.043>
- Tsilingiris, P.T., 2008. Thermophysical and transport properties of humid air at temperature range between 0 and 100°C. *Energy Convers. Manag.* 49, 1098–1110.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2007.09.015>
- Wahl, L., Paul, P., Pichard, C., Mory, N., Drogue, G., Pfister, L., 2005. Les canicules de l'été 2003 : un événement météorologique exceptionnel dans le quart nord-est de la France. *Rev. Géographique Est* 45, 67–77. <https://doi.org/10.4000/rge.362>