

UDC 624

**SUR L'UTILISATION DES MATERIAUX ISOLANTS A BASE DE FIBRES  
VEGETALES DANS LA RENOVATION THERMIQUE DES BATIMENTS  
EXISTANTS**

*Dashnor HOXHA, Duc-Phi DO, Naima BELAYACHI, Hoang HA,  
Jean-Baptiste Thevard\**

*Laboratoire PRISME, EA 4229, Polytech'Orléans, 8 rue Léonard de Vinci, 45072  
Orléans Cedex 2, France*

*\*ApprochePaille, 11 rue de Lutèce, 45000 Orléans, France*

### **1. Introduction**

La prise de conscience collective des enjeux environnementaux liés aux conséquences de la production illimitée de CO<sub>2</sub> d'une part, de la raréfaction des matériaux primaires, y compris ceux de construction et d'isolation et enfin les exigences accrues en termes de santé publique, ont mis au centre de l'actualité la nécessité de la rénovation thermique des logements (et plus largement des bâtiments) en utilisant des isolants performants et renouvelables. Le secteur de rénovation thermique des bâtiments existants représente en France le chantier le plus important du secteur de bâtiment, une tendance qui doit s'accélérer dans les prochaines années [1, 2]. Le Grenelle d'environnement a posé comme objectif la rénovation thermique de 10 millions de logements d'ici 2020, soit 37% du parc à rénover d'ici 2050 [1].

Cela explique en grande partie l'apparition dans la pratique industrielle des matériaux d'isolation à base minérale et/ou organique très différente allant de la laine de roche et de verre, de polystyrène, jusqu'aux produits biosourcés. En particulier ce dernier groupe de matériaux, initialement développés par des initiatives militantes écologiques, connaît actuellement un développement sans précédent : le béton chanvre [4], les constructions à base de botte de paille [5,6] ou des différentes techniques de construction en bois, ne sont que les exemples les plus visibles d'un passage historique du militantisme écologique à l'industrialisation écologique.

Le projet de recherche PROMETHE est une continuité logique des travaux de valorisation de la paille céréalière dans la construction écologique [5]. Dans une région céréalière comme la région Centre, la première région céréalière de France, la paille constitue un résidu biologique abondant, renouvelable, avec un impact de transport quasi inexistant. Même dans une année de sécheresse, comme 2011, on estime que 1% du volume de la botte de paille céréalière produite dans la région Centre (estimé à environ 3 millions de tonnes en 2011 [8]) est équivalent au volume de béton coulé à l'échelle nationale dans la construction des nouveaux bâtiments ! Ces chiffres démontrent clairement le potentiel inépuisable de la paille comme matériau de construction en prenant soin d'un prélèvement raisonnable sans perturber l'enrichissement normal des terres agricoles.

De même les vertus des constructions en paille en termes de qualité de l'air et de la santé n'est plus à prouver : les bâtiments existants en paille, pour certains en utilisation depuis bientôt un siècle [9], font preuve d'une qualité d'air incomparable et d'un confort de vie remarquable.

L'objectif du projet PROMETHE est alors de démontrer techniquement la faisabilité des matériaux isolants à base de fibres végétales, principalement paille céréalière, définir les limites des propriétés thermiques, hydriques et mécaniques qui peuvent être atteintes en utilisant des formulations optimisées de ces matériaux, démontrer la résistance de ces matériaux vis-à-vis des facteurs météorologique et biologiques à long terme, optimiser les procédés de production et de mise en place à fin de minimiser l'impact global environnemental.

Le présent papier décrit l'analyse numérique prédictive des propriétés thermiques et mécaniques des matériaux isolants à base de paille de céréales envisagés et développés dans le cadre du projet PROMETHE en ayant comme objectif une orientation de la recherche en laboratoire vers des formulations les plus adaptées.

## **2. Propriétés thermiques et mécaniques des pailles céréalières**

On présentera dans ce qui suit exclusivement les propriétés des pailles de blé mesurées au laboratoire, sachant que le programme de recherche comprend également la caractérisation et l'évaluation d'autres fibres végétales (chanvre, lin, etc). Comme indiquées par plusieurs auteurs, les propriétés de la paille sont entre autre fonction de l'année de production et des parcelles [9, 10]. Néanmoins, dans nos essais, les valeurs mesurées sur des échantillons provenant des parcelles différentes et des années de récolte différentes ne représentent pas de différences significatives.

La mesure directe de la conductivité thermique sur des fibres, notamment en prenant en compte leur orientation fait objet d'un travail en cours et n'est pas présentée ici. En revanche la conductivité thermique mesurée directement sur un paquet de fibres broyées, est de l'ordre de 0.052 W/mK. Cette valeur est en bon accord avec des mesures réalisées par d'autres auteurs. Notons un très fort impact de l'état de saturation sur la conductivité thermique des fibres de paille : la conductivité thermique augmente avec la saturation.

Dans la formulation d'un composite isolant, dans lequel les pailles sont enrobées par un mortier ou un autre liant minéral, il est important de s'assurer de la compatibilité des déformations thermiques entre les composants. Pour cela le coefficient de dilatation thermique des pailles (dans la direction longitudinale) a été mesuré en utilisant un appareil de mesures thermo-mécaniques (TMA 100 de la marque Linseis). Le principe de mesure consiste à tendre une fibre entre deux mors d'un système de traction en appliquant une force de pré-tension assez faible. Ensuite, le système passe dans un four dont la température est pilotée par un ordinateur. En faisant varier la température entre deux valeurs croissantes on mesure les déplacements induits entre deux mors maintenus à force constante. Une courbe typique de variation de la longueur d'une fibre en cours d'échauffement est présentée sur la figure 1. Remarquons les différences significatives entre le premier chemin d'échauffement et les autres qui suivent. Il ne s'agit pas d'un artefact expérimental mais d'un phénomène reproductible sur d'autres fibres végétales mais pas sur des matériaux peu poreux ou métalliques (de type de Fibraflex par exemple). En fait, lors de l'échauffement de la paille pour la première fois les déformations induites sont le résultat de deux processus concurrents et opposés : d'une part une dilatation thermique proprement dite et d'autre part une rétraction

due à la perte d'eau. Lorsque la paille est réchauffée pour une deuxième ou troisième fois sans laisser le temps à un rééquilibrage hydrique de la paille avec l'atmosphère, on obtient alors les courbes de dilatation pures, sans les effets hydriques cités. On obtient dans ce cas un coefficient de dilatation thermique longitudinale égale à  $2,4 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ , qui est une limite supérieure dans la gamme des températures testées ( $20^\circ\text{C}$  à  $80^\circ\text{C}$ ) alors que pour les conditions initiales (en présence de l'humidité) ce coefficient est inférieur à  $1 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1}$

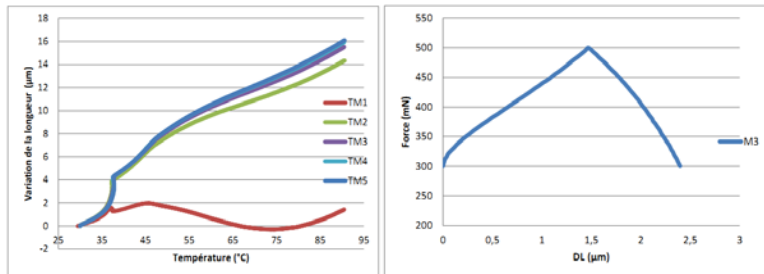


Figure 1 : a) Courbe de dilatation thermique de la paille en fonction de la température à l'état sec et humide  
b) Courbe effort-déplacement longitudinal pour une paille sèche

Le même système est utilisé pour mesurer le module de Young de la paille. Pour cela une fibre de paille de section constante et mesurée d'avance subit une force cyclique à basse fréquence (0.001Hz) d'amplitude 200mN. Avant les calculs classiques des déformations et des contraintes qui demandent une mesure précise (pas toujours évidente) de la section de la paille et de la longueur de la fibre entre les mors, on doit corriger la courbe brute des déformations pour les éventuelles variations de températures en connaissant le coefficient de dilatation thermique (fig1.b). Pour les pailles de blé étudiées on obtient alors un module de Young de l'ordre de 8000 MPa.

### 3. Evaluation numérique des propriétés croisées des matériaux isolants à base de fibres et de liants minéraux

Les propriétés mécaniques et thermiques des liants minéraux peuvent être identifiées par des essais de laboratoire sur des échantillons produits dans les mêmes conditions que lorsqu'on ajoute les fibres végétales. En particulier les rapports du mélange eau/liant et de compactage des composites obtenus doivent être rigoureusement respectés. Sous conditions que les propriétés des liants soient connues on peut réaliser une estimation des propriétés attendues mécaniques et thermiques des différentes formulations en prenant compte de la porosité macroscopique. Les composites isolants finaux peuvent manifester soit une microstructure de type matrice inclusion soit une microstructure de type fibres enrobées. En fonction de type avéré de la microstructure une technique de changement d'échelle appropriée doit être utilisée pour la prédiction des propriétés effectives croisées. Une estimation rapide approchée pourrait se faire en utilisant un schéma de Mori Tanaka. Si on considère que les fractions volumiques de la

paille, du liant minéral et des vides sont respectivement  $f_s, f_m, f_g$  ( $f_s + f_m + f_g = 1$ ) et que les propriétés respectives à ces phases sont indiquées par les indices  $s, m$  et  $g$ , on obtient : pour la conductivité thermique :

$$\lambda_{\text{hom}}^{MT} = \lambda_m + f_g(\lambda_g - \lambda_m)\mathbf{A}_g^{MT} + f_s(\lambda_s - \lambda_m)\mathbf{A}_s^{MT} \tag{1}$$

avec  $\lambda_m, \lambda_g, \lambda_s$ , les tenseurs de conductivité thermique (isotrope, second ordre) et le tenseur de localisation du schéma de Mori Tanaka :

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_i^{MT} &= \mathbf{A}_i^{dil} \cdot \left[ (1 - f_g - f_s)\mathbf{I} + f_g\mathbf{A}_g^{dil} + f_s\mathbf{A}_s^{dil} \right]^{-1}; \quad (i = g, s) \\ \mathbf{A}_i^{dil} &= [\mathbf{I} + \mathbf{P}_i \cdot (\lambda_i - \lambda_m)]^{-1}; \end{aligned} \tag{2}$$

avec  $\mathbf{P}_i$  le tenseur de Hill.

Des formules similaires sont obtenues pour le tenseur de rigidité en mettant à la place des tenseurs de conductivité les tenseurs de quatrième ordre de la rigidité élastique :

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_{\text{hom}}^{MT} &= \mathbf{C}_m + f_g(\mathbf{C}_g - \mathbf{C}_m) : \mathbf{A}_g^{MT} + f_s(\mathbf{C}_s - \mathbf{C}_m) : \mathbf{A}_s^{MT}; \\ \mathbf{A}_i^{MT} &= \mathbf{A}_i^{dil} : \left[ (1 - f_g - f_s)\mathbf{I} + f_g\mathbf{A}_g^{dil} + f_s\mathbf{A}_s^{dil} \right]^{-1}; \quad (i = g, s) \\ \mathbf{A}_i^{dil} &= [\mathbf{I} + \mathbf{P}_i : (\mathbf{C}_i - \mathbf{C}_m)]^{-1}; \end{aligned} \tag{3}$$

En utilisant les propriétés du tableau 1, issues des mesures au laboratoire on peut alors obtenir les surfaces prédictives des propriétés effectives en fonction des fractions volumiques.

Tableau 1

Propriétés utilisées dans la modélisation

Propriétés	Paille	Mortier	Plâtre	Pores
Module de Young [MPa]	8000	30000	45000	0
Conductivité thermique [W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> ]	0.054	1.2	0.4	0.02
Coefficient de dilatation thermique [K <sup>-1</sup> ]	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	0

Sur la figure 2.a est également présentée la limite supérieure pour qu'un matériau soit considéré comme étant isolant. On remarque que la zone acceptable est limitée et située dans le domaine à une fraction volumique du mortier très faible (inférieure à 5%). Afin de concilier une conductivité thermique effective faible et une bonne tenue mécanique on étudie le remplacement du mortier avec du plâtre. Conformément aux prédictions numériques (non présentées ici) les composites plâtre-paille manifestent des propriétés thermomécaniques très intéressantes et une facilité de mise en place remarquable.

**4. Conclusion**

Nous avons présenté brièvement une argumentation de la faisabilité des matériaux isolants à base de fibres végétales (paille céréalière principalement) et des liants minéraux. La caractérisation initiale des fibres et des liants et les simulations numériques permettent d'identifier les domaines des combinaisons

possibles des fractions volumiques des constituants satisfaisant les exigences légales des matériaux isolants. Les résultats permettent d'orienter la recherche vers un composite plâtre-paille. Si le composite paille-mortier à base de chaux est tout à fait faisable et conforme aux attentes, un composite plâtre-paille semble mieux adaptés en termes de résistance thermique et mécanique. A cela s'ajoutent les vertus économiques et écologiques en termes de l'énergie grise du plâtre qui fera de ce composite un candidat favori de passage à une production industrielle.

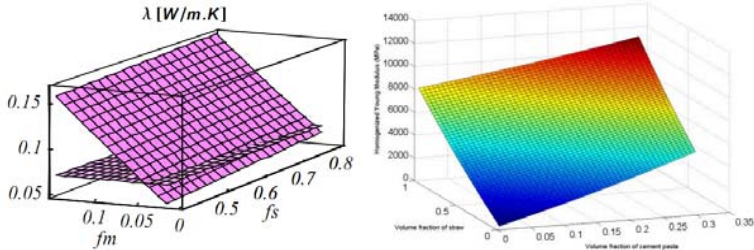


Figure 2 : a) Conductivité thermique attendue de l'isolant paille-mortier chaux b) Module de Young attendu de l'isolant paille-mortier chaux.

#### REFERENCES

1. Appert P-Y., (2011) Innover pour construire durable : Enjeux et contexte, Forum du bâtiment durable, 3 février 2011
2. Gobin C., L'éco-conception en construction, Forum du bâtiment durable, 3 février 2011
3. R. Bevan, T. Woolley. Hemp lime construction- A guide to building with hemp lime composites. Building research Establishment. p. 110 (2008).
4. Bossman V. Thevard JB Construire son habitation en paille 164 pages (2011)
5. Hoxha D., Ungureanu V. Belayachi N., Do D.P., Thevard J-B. (2012) Hydro Mechanical properties of some mortars used in some ecologic construction techniques, Advances Materials Research ,Vol. 587, pp. 6-10
6. Bouasker M., Belayachi N., Hoxha D., Al Mukhtar M (2013) An experimental investigation on the microstructure and physical characterization of natural straw fibers for building material applications. Energy and Buildings Journal (submitted)
7. AGRESTE (2012) Bilan annuel 2011 Une année agricole contrastée, Agreste Centre Information, Bulletin 194, Avril 2012
8. Chen X., Yu J., Zhang Z., Lu C., (2011). Study on structure and thermal stability properties of cellulose fibers from rice straw. Carbohydrate polymers 85, 245-25
9. Dvorak G. J. and Y. Benveniste. (1992) On transformation strains and uniform fields in multiphase elastic media. Proc. R. Soc. Lond, 37291-310.
10. Giraud A., Hoxha D. Do D. P., Magnenet V. (2008) - Effect of pore shape on effective porothermoplastic properties of isotropic rocks, International Journal of Solids and Structures 45, 1, pp. 1-23