



HAL
open science

Etude du comportement hygrothermique d'anas de lin utilisés comme isolant en vrac de combles perdus

Emmanuel Antczak, Mounir Asli, Franck Brachelet, Flore Brue, Didier Defer

► To cite this version:

Emmanuel Antczak, Mounir Asli, Franck Brachelet, Flore Brue, Didier Defer. Etude du comportement hygrothermique d'anas de lin utilisés comme isolant en vrac de combles perdus. Conférence IBPSA France 2018, 2018, Bordeaux, France. hal-03209296

HAL Id: hal-03209296

<https://hal.science/hal-03209296>

Submitted on 23 Mar 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude du comportement hygrothermique d'anas de lin utilisés comme isolant en vrac de combles perdus

Emmanuel Antczak*¹, Mounir Asli¹, Franck Brachelet¹, Flore Brue², Didier Defer¹

¹ Univ. Artois, EA 4515, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, F-62400 Béthune, France

² UC Lille, Yncréa HdF - HEI, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, 13 rue de Toul, F-59046 Lille, France

*emmanuel.antczak@univ-artois.fr

RESUME. Ce travail porte sur l'étude d'un matériau isolant pour les combles perdus, issu d'une production agricole locale et ne nécessitant qu'un minimum de transformation pour son utilisation. Positionné géographiquement dans les Flandres, le projet s'est naturellement orienté vers la production de lin, qui a la particularité de générer un co-produit sous forme de paille, les anas. Ces derniers sont ici étudiés sous leur forme la plus basique, en vrac, pour une dispersion sur un plan horizontal. Le matériau a été caractérisé en laboratoire sur les aspects thermophysiques et hygrothermiques, il a été préalablement ignifugé par un complément principalement constitué de bicarbonate de sodium. L'isolant ainsi constitué a été mis en place, sur une épaisseur de 25cm à 30 cm, dans les combles d'un habitat paysan dont l'isolation, dégradée, a été préalablement déposée. Le matériau a été instrumenté dans la masse pour suivre les évolutions de température et d'humidité relative sur toute son épaisseur. Le suivi des grandeurs a été réalisé en fonction des contraintes climatiques saisonnières.

MOTS-CLÉS anas de lin, isolant, transferts hygrothermiques.

ABSTRACT. This work involves the study of an insulation material derived from local resource and not having undergone transformations. Positioned in French Flanders, the project was naturally oriented towards the production of flax, which has the particularity of generating a co-product, flax shives. These are studied in their most basic form, bulk, for dispersion on a horizontal plane. The material was characterized in the laboratory on the thermophysical and hygrothermal aspects, it was previously fireproofed by a complement consisting mainly of sodium bicarbonate. The insulation constituted was put in place, on a thickness of 25 cm to 30 cm, in the attic of a peasant habitat whose insulation, degraded, was previously deposited. The material has been instrumented to monitor changes in temperature and relative humidity throughout its thickness. The monitoring of the quantities was carried out according to the seasonal climatic constraints.

KEYWORDS : flax shives, insulation, hygrothermal transfer.

1. INTRODUCTION

La démarche d'économie circulaire est une solution alternative qui prend son essor actuellement au regard du contexte énergétique mondial (Biswas et al. 2016). Le principe est de valoriser les ressources naturelles locales et de les utiliser dans le cadre de circuits courts de distribution (Lasvaux et al. 2016). Si on prend l'exemple de l'isolation thermique des bâtiments, traditionnellement la France s'appuie sur les produits industriels à base de fibres minérales et de mousses plastiques énergivores en termes de fabrication. Par leur nature fibreuse et leur densité faible, les pailles provenant de la production agricole présentent des caractéristiques intéressantes pour une application au domaine du bâtiment. Elles sont utilisées depuis de nombreux siècles pour la fabrication de matériaux de

construction comme les torchis notamment, ou plus récemment sous la forme de bloc manufacturés de type béton de chanvre. Nous proposons ici d'utiliser un produit bio-sourcé, issu de l'agriculture locale, dans sa forme brute. Le coût énergétique à la transformation de ce type de produit est faible, le problème du recyclage ne se pose pas. L'utilisation de ressources locales (filiales courtes) limite les transports et l'origine naturelle des produits réduit l'impact sur la santé. L'objectif du projet P2AR (Paille Anas pour la Réhabilitation), soutenu financièrement par la région Hauts de France, est de développer une solution d'isolation abordable des combles perdus de l'habitat existant dans un secteur où la matière première, bio-sourcée, se trouve à proximité, la zone géographique ciblée est celle de la Flandre française. Le matériau étudié est issu du lin qui demeure une culture régionale dont le marché s'appuie principalement sur le textile. Les anas, "écorce" du lin, représentent 50% de la production et sont utilisés en partie dans la fabrication de panneaux de bois et de paillage. Le projet P2RA a pour but d'orienter les anas de lin vers la rénovation thermique des bâtiments anciens dans leur forme la plus basique, en vrac, dans le cadre des contraintes constructives sécuritaires nécessaires. Un bâtiment témoin est identifié sur le territoire et fait l'objet d'une réhabilitation, il est instrumenté pour pouvoir suivre ses performances thermiques. Cette approche doit permettre d'offrir la possibilité, à une partie de la population, d'accéder à une isolation performante, naturelle et à moindre coût. Les matériaux fibreux naturels sont sensibles à la présence d'eau sous forme liquide ou vapeur, que ce soit sous l'angle de la stabilité des performances thermiques ou de la durabilité dans le temps. Ils sont associés à des parois anciennes et à des volumes habités ou non, plus ou moins humides. Il est important de pouvoir connaître leur tenue en conditions de mise en œuvre et leurs performances thermiques par rapport à ce que l'on trouve couramment sur le marché des matériaux isolants pour le bâtiment (Vololonirina et al. 2014 ; Lelievre et al. 2014).

2. ELABORATION DU MATERIAU

2.1. MATERIAU DE BASE

Le matériau étudié est composé principalement d'anas de lin qui sont un co-produit de la production du lin textile, dont la culture date de plus de 36000 ans. La production de lin concerne essentiellement l'ouest de l'Europe, en particulier les régions en bordure de la mer du Nord, de la mer Baltique et de la Manche, car le lin craint les fortes chaleurs et les faibles taux d'humidité. Chaque partie de la plante est valorisée pour faire du tissu, de l'huile ou des produits de litière animale. La principale destination reste l'industrie textile, la production de papier mais également les éco-matériaux dans la construction. Actuellement la France est le principal producteur et représente les 2/3 de la production mondiale, les régions concernées sont la Normandie et les Hauts de France. La partie destinée aux textile concerne les étoupes qui sont obtenues après teillage et rouissage. Le rouissage correspond à une période de dessiccation de la tige de lin après fauchage. Le teillage est une opération mécanique qui permet de séparer les fibres, les graines et l'écorce. Cette dernière est broyée et permet d'obtenir les anas de lin qui sont un co-produit et non un déchet de culture (Kozakowski et al. 2012). Les anas présentent une structure alvéolaire favorisant l'adsorption de l'humidité, leur pouvoir calorifique est équivalent à celui du bois, c'est pour cette raison qu'ils sont également utilisés comme combustibles. Ce produit n'étant pas noble, il a été très peu étudié en tant que tel mais plutôt en complément de matrice solides d'origine cimentaire. Ceci est dû à la composition hétérogène du produit, qui dépend de son niveau de tri, contenant principalement des brins de paille allant jusqu'à 20

mm de longueur et de un à quelques mm de diamètre, des coquilles de graines, de la poussière... (Figure 1).



Figure 1 : Anas de lin.

2.2. TRANSFORMATION DES ANAS DE LIN

L'objectif ici est de modifier à minima la constitution du matériau tout en garantissant une résistance et une réaction au feu satisfaisantes pour les règles constructives. Solvay s'est associé à ce projet en proposant d'améliorer la durabilité de l'isolant avec une poudre minérale principalement composée de bicarbonate de sodium (plus de 60% de la composition). Ce produit est classé non dangereux par la réglementation CLP 1272/2008 et est utilisé dans l'alimentation, ce qui permet de conserver les caractéristiques naturelles des anas de lin. Pour que la poudre s'intègre le mieux possible au matériau, un protocole de mélange a été établi, la fixation de la poudre aux anas est assurée par un apport d'eau. Les proportions sont les suivantes : 10 kg d'anas, 2.2 kg de poudre minérale et 3 litres d'eau. Le mélange peut être effectué dans un malaxeur à béton pendant dix minutes.

2.3. CARACTERISATION THERMOPHYSIQUE

Afin de bien appréhender le comportement du produit obtenu par le mélange, les caractéristiques thermophysiques sont tout d'abord étudiées en laboratoire. L'hétérogénéité naturelle du produit nécessite de connaître l'influence du tassement et de l'humidité sur ses performances, sachant qu'il sera soumis aux évolutions microclimatiques et à d'éventuelles contraintes mécaniques.

2.3.1. Masse volumique en fonction du tassement

Le mélange est placé dans une éprouvette cylindrique (16x32) utilisée habituellement pour les essais de béton. Le matériau a été stocké à la température ambiante de 20°C et à une humidité relative de 50%. La hauteur de l'éprouvette est équivalente à la hauteur de matériau qui sera mise en place in situ. Quatre densités sont testées, la plus faible est obtenue par remplissage gravitaire, ensuite on décompose la mise en place par couches (2, 4 puis 8) qui sont successivement compactées à l'aide d'une masse du diamètre de l'éprouvette. Ceci permet d'obtenir 4 densités notées E1, E2, E4, E8. Les résultats sont présentés figure 2, pour chaque valeur obtenue, 3 essais ont été réalisés. Les masses volumiques obtenues sont bien supérieures à celles habituellement observées pour les isolants traditionnels, elles se situent entre 126 kg/m³ et 154 kg/m³, avec une valeur moyenne de 140 kg/m³. En comparaison des produits existants, les laines minérales en vrac ont une densité comprise entre 20 kg/m³ et 80 kg/m³, la ouate de cellulose est soufflée à une densité de 50 kg/m³. La densité élevée des anas de lin est liée à la présence de fines (poussière et adjuvant ignifuge), à la nature des fibres, leur faible taille (de 5 mm à 20 mm avec un diamètre de l'ordre du mm) et de leur forme qui permet un

arrangement optimisé. L'avantage est lié à une variation de masse volumique modérée (+20%) sous fortes contraintes mécaniques ce qui laisse présager d'un tassement très limité dans le temps.

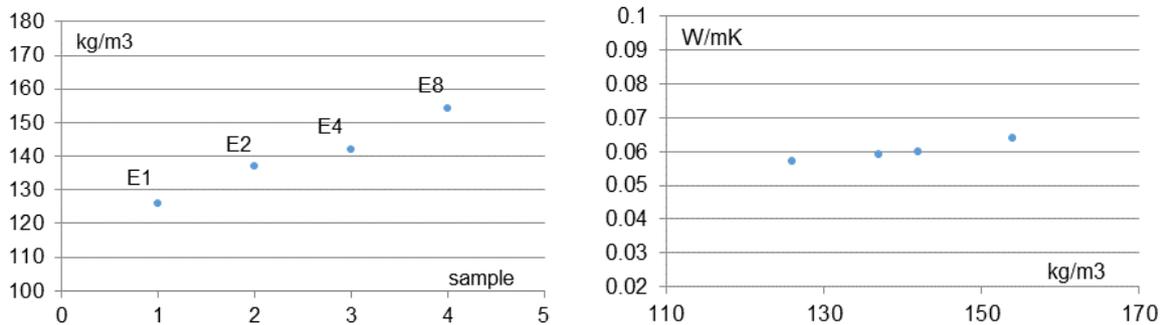


Figure 2 : Masse volumique et conductivité thermique en fonction du tassement.

2.3.2. Conductivité thermique

Les caractéristiques thermiques sont obtenues à partir de mesures en régime permanent basées sur la méthode fluxmétrique de la norme NF EN 12664. Cette dernière permet d'accéder à la conductivité thermique et à la chaleur volumique équivalente en fonction des conditions limites imposées. D'un point de vue pratique, des plaques échangeuses en aluminium, reliées à des bains thermostatés, imposent les conditions limites en température sur chaque face de l'échantillon (Sassine et al. 2017). Des fluxmètres (de surface sensible 15 x 15 cm²) et des thermocouples permettent la mesure des flux et des températures de surfaces, un anneau de garde permet de s'affranchir des effets de bords. La résistance thermique R (m².K/w) est obtenue par le rapport entre l'écart de température et la moyenne des flux mesurés sur chaque face de l'échantillon. La conductivité thermique est déduite de la résistance thermique à partir de la mesure de l'épaisseur de l'échantillon. La Figure 2 représente l'évolution de la conductivité thermique en fonction de la masse volumique, chaque valeur obtenue est la moyenne calculée sur 3 essais. On constate logiquement que l'évolution de la conductivité thermique est corrélée à celle de la masse volumique du fait de la réduction du volume d'air dans le matériau lié au réarrangement et à la pression. Les valeurs mesurées évoluent entre 0.057 W.m⁻¹.K⁻¹ et 0.065 W.m⁻¹.K⁻¹, ce qui est relativement élevé pour un matériau isolant mais qui peut être compensé par une épaisseur plus importante de pose pour augmenter la résistance thermique.

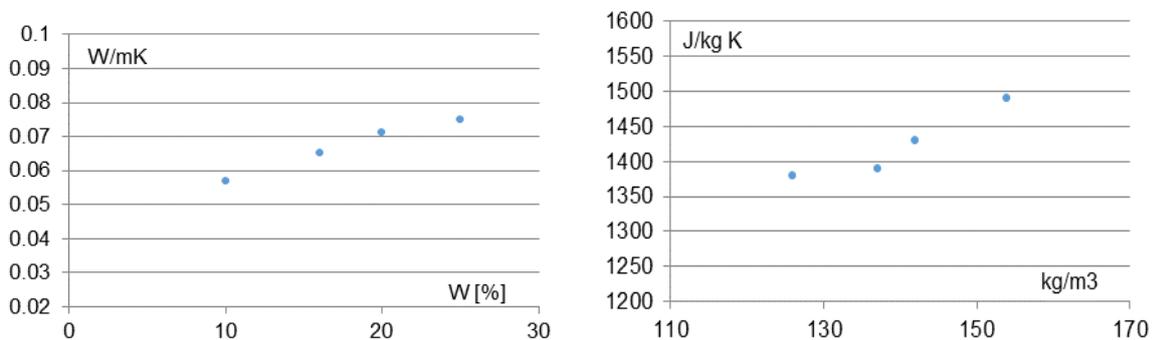


Figure 3 : Conductivité thermique en fonction de la teneur en eau et chaleur massique en fonction du tassement.

Les mesures ont également été réalisées en fonction de la teneur en eau, étant donné que le matériau mis en œuvre in situ sera soumis aux conditions micro-climatiques environnementales d'un

local non chauffé. Les résultats sont indiqués Figure 3. La teneur en eau massique du matériau varie entre 10% et 25%, ce qui correspond à des conditions d'humidité relative allant de 50% à 95%, c'est-à-dire semblables aux conditions environnementales in situ. La masse volumique du matériau à Hr=50% est de 130 kg/m^3 . La résistance thermique varie de $0.057 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $0.075 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, c'est-à-dire une augmentation d'environ 30%.

2.3.3. Chaleur spécifique

La chaleur spécifique a été mesurée à partir du même banc de caractérisation, seules les conditions limites sont modifiées. Le principe est de créer un état de déséquilibre thermique entre deux états stables, pendant cette période le système stocke de la chaleur. L'échantillon part d'un état initial au temps t_{ini} (à la température T_{ini}) jusqu'à un état final au temps t_{fin} (à la température T_{fin}), entre ces deux instants, il stocke une quantité de chaleur $Q \text{ (J.m}^{-2}\text{)}$. Dans ce cas, la chaleur spécifique $c \text{ (J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}\text{)}$ est obtenue par la relation (1) :

$$c = Q/(\Delta T.\rho.A.e) \quad (1)$$

Où $\rho \text{ [kg.m}^{-3}\text{]}$ est la masse volumique, $e \text{ [m]}$ et l'épaisseur de l'échantillon, A la surface $\text{[m}^2\text{]}$ et ΔT l'écart de température mesuré entre l'état final et l'état initial. Les valeurs habituellement observées pour les matériaux isolants se situent entre $1200 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et $1600 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$. L'intérêt pour les anas de lin est leur masse volumique bien supérieure à celle des isolants traditionnels, ce qui améliore l'inertie thermique des parois.

2.3.4. Courbes de sorption

L'utilisation d'un matériau naturel nécessite de connaître son comportement par rapport aux niveaux d'humidité relative ambiante. Le protocole consiste ici à placer l'échantillon dans une enceinte climatique régulée en température et permettant d'imposer des plages d'humidité relative variant entre 0% et 95% (en fonction des caractéristiques techniques de l'enceinte) (NF EN 12571 2013).

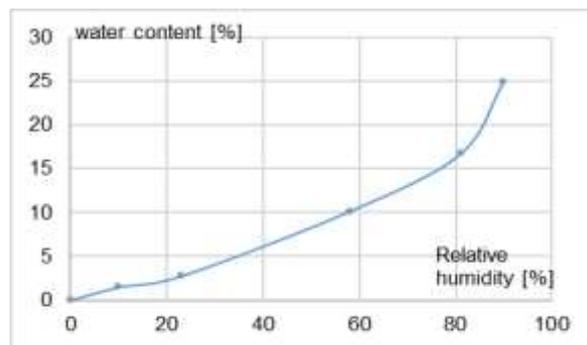


Figure 4 : Courbe de sorption des anas de lin.

Par cette mesure on peut relier les niveaux d'humidité relative ambiante à la teneur en eau massique du matériau ce qui peut permettre de détecter les risques de développement de micro-organismes ou de moisissures. La courbe de sorption fait apparaître une évolution quasi linéaire de la prise de masse entre 0% et 80% d'humidité relative, avant une dynamique plus prononcée à partir de 80%. Elle met en évidence la capacité du matériau à stocker une quantité importante de vapeur d'eau.

3. MISE EN ŒUVRE ET INSTRUMENTATION

3.1. LE PROJET « P2AR »

L'objectif initial du projet P2AR (PAille Anas pour la Rénovation) est de développer une solution d'isolation thermique, pour l'habitat ancien à partir d'un matériau bio-sourcé, que la population puisse s'approprier. Les partenaires du projet ont choisi de promouvoir l'industrie agricole locale, celle de la région des Flandres françaises, située entre Dunkerque et Bailleul, où la production de lin est conséquente et historiquement implantée. Les partenaires du projet sont l'association Yser Houck, qui a pour objectif de diffuser la culture et le savoir-faire liés à la réhabilitation de l'habitat ancien, le cd2e expert de l'éco-construction, l'équipe Habitat du LGCgE qui apporte ses connaissances sur la thermique de l'habitat et la société Solvay dont l'expertise est liée aux produits ignifuges. La solution d'isolation est basée sur l'utilisation d'anas de lin en vrac ayant subi un traitement ignifuge garantissant un minimum de sécurité face aux incendies. Après leur caractérisation thermophysique en laboratoire, l'objectif est de les tester in situ.

3.2. EXPERIMENTATION

Le démonstrateur est une maison typique des Flandres, en brique traditionnelle, datant de 1610 et ne comportant qu'un seul niveau (rez-de-chaussée). Le toit a une pente de 60° qui permet l'évacuation de pluie fine, les longueurs des façades sont importantes (par rapport aux largeurs) côté sud, pour favoriser les apports gratuits de chaleur et de lumière par les ouvertures. Cette configuration explique l'étroitesse du grenier où sera mis en œuvre le matériau. L'habitation est occupée pendant toute l'expérimentation ce qui permet de tester le matériau en conditions réelles d'utilisation. La forme en vrac du matériau fait qu'il doit être mis en œuvre en comble perdu. Celui-ci fait 75 m², la toiture a été rénovée récemment et est équipée d'un pare-poussière, une trappe permet d'accéder à ce grenier. Avant la mise en œuvre des anas de lin, le grenier était isolé avec de la laine minérale, celle-ci s'est tassée avec le temps et nous avons pu constater lors de notre intervention une densité importante de micro-fibres en suspension dans l'air, issues de la dégradation de la laine minérale. De plus, la présence de rongeurs au sein de l'isolant et en surface est à noter, de nombreuses niches sont présentes. La Figure 6 montre le grenier avant et après réhabilitation, la dépose de l'ancienne isolation et la pose des anas de lin s'est déroulée sur 2 jours. Les boîtiers électriques et ouvertures dans le plafond ont été protégés pour éviter l'inclusion d'anas. Les rampants en bout de plancher ont été obstrués avec l'ancien isolant pour éviter le déversement d'anas dans les rampants sous toiture.



Figure 6 : Grenier avant et après rénovation.

3.3. INSTRUMENTATION ET MONITORING

L'instrumentation a pour but de suivre le comportement hygrothermique des anas de lin, dépendant des conditions climatiques journalières et saisonnières. Les performances thermiques minimales doivent être assurées et la régulation de l'humidité effective. Les capteurs utilisés sont des thermo-hygromètres (types HMP 110 Vaisala et enregistreurs Easylog EL-USB-2+) et des thermocouples. Les mesures sont réalisées dans les volumes intérieurs chauffés, le grenier et au sein du matériau (Figure 7). Un cadre en bois muni d'un grillage en PVC est positionné verticalement, il supporte les thermo-hygromètres placés à intervalles réguliers. Les mailles larges du grillage favorisent le bon arrangement des anas et ne perturbe pas les transferts de chaleur et de vapeur. Les mesures de l'humidité relative ambiante du grenier et de l'intérieur du logement sont également réalisés, les capteurs sont connectés à une centrale d'acquisition, les données sont relevées toutes les 20 minutes pendant 18 mois environ.

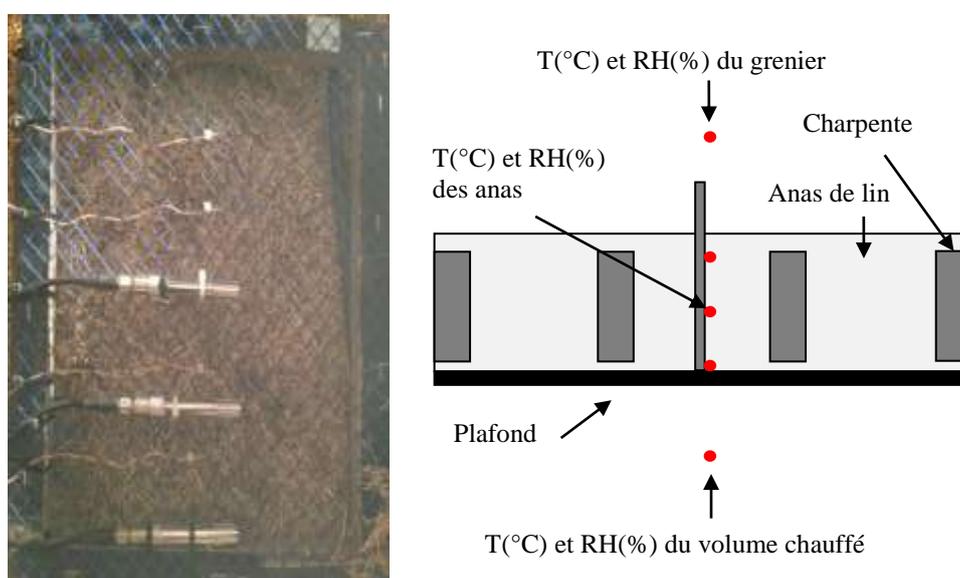


Figure 7 : Mise en place des capteurs.

4. MESURES IN SITU

Nous analysons les données de température et d'humidité relative entre février et novembre 2016. Pour faciliter la lecture, un zoom est fait sur les mois de février et d'août, représentatifs de conditions hivernales et estivales. Ce sont les périodes représentant les contrastes les plus forts en termes de température et d'humidité relative, des valeurs extrêmes y sont mesurées.

4.1. FEVRIER 2016

Les courbes présentées Figure 8 correspondent à l'humidité relative du grenier, des anas et du volume intérieur chauffé. L'humidité relative du volume intérieur est comprise entre 50% et 60%, ce qui correspond à une ambiance confortable. Les anas de lin en contact avec le plafond sont influencés par la température intérieure. La stabilité de l'humidité relative au sein des anas contraste avec les variations mesurées dans l'atmosphère, elle est liée à l'inertie thermique du matériau où les variations de températures sont faibles. Les valeurs sont également influencées par l'état initial des anas dont la teneur en eau dépend du mélange contenant beaucoup d'eau (plus de 20% de teneur en eau massique). La Figure 8 présente dans l'ordre croissant des températures, les températures du grenier, au sein des

anas et du volume intérieur. Les anas de lin permettent de maintenir une température de surface de plafond de l'ordre de 15°C, les amplitudes sont relativement bien amorties par l'isolant. Il est possible d'estimer le déphasage induit par une sollicitation en mesurant le décalage entre le pic de température mesuré en entrée de l'isolant et celui mesuré en sortie, vers l'intérieur du bâtiment, au contact du plafond, il est de l'ordre de 7H30.

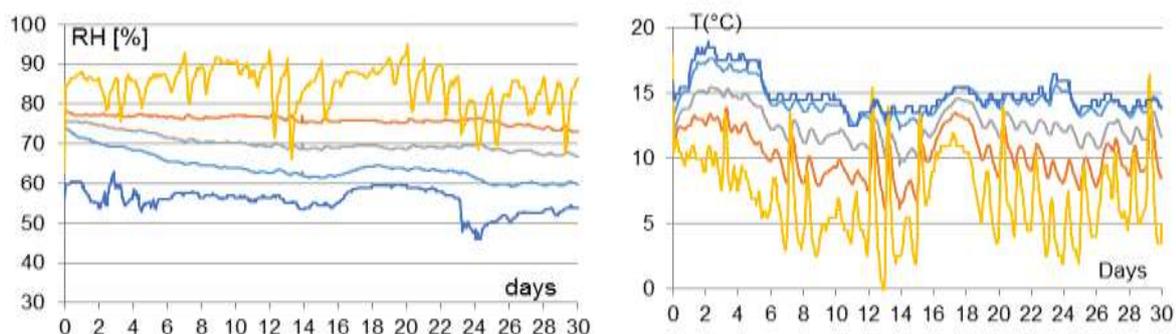


Figure 8 : Relevés d'humidité relative et de températures.

4.2. AOUT 2016

Les températures sont bien plus élevées en été, les niveaux d'humidité relative sont plus bas, les fuseaux sont resserrés entre 50% et 70% d'humidité relative environ (Figure 9). Les niveaux d'humidité relative sont en moyenne de 60% au sein des anas, les valeurs en fonction de la position sont très proches, ceci est dû au faible gradient de température enregistré au sein des anas. Dans le logement, l'activité humaine impacte les évolutions d'humidité relative. Dans le grenier, les amplitudes sont très fortes et corrélées aux variations de températures.

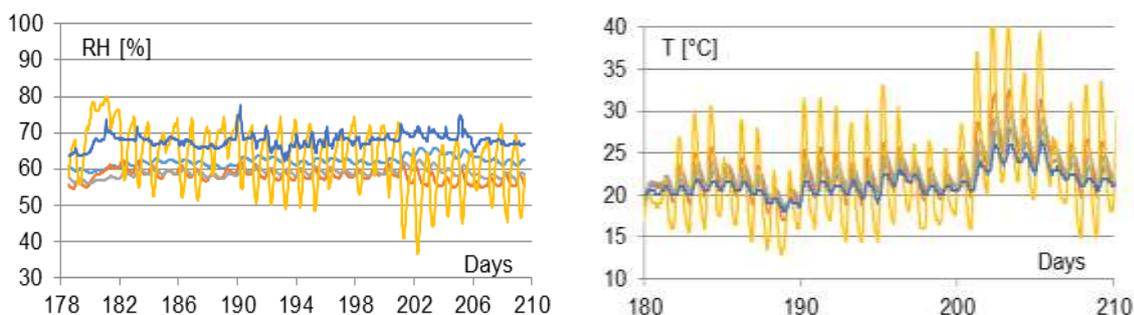


Figure 9 : Relevés d'humidité relative et de températures.

Les amplitudes de températures qui y sont relevées sont proches de 21°C sur 24H lors des journées les plus chaudes, ceci est dû à la faible ventilation de cet espace qui stocke beaucoup de chaleur dans la journée. Les amplitudes observées en partie basse des anas n'exèdent pas 3°C. Les caractéristiques des matériaux évoluant, le déphasage estimé en été est de l'ordre de 7H. Les valeurs d'amortissement et de déphasage observés sont intéressants comparés aux isolants habituels. Les données d'humidité relative révèlent un comportement homogène au-delà de la période de séchage du matériau. Si on fait la corrélation avec la courbe de sorption, à une température supérieure à 20°C, l'humidité relative moyenne mesurée est de 60% ce qui correspond à une teneur en eau massique des anas de l'ordre de 11%, beaucoup plus faible que les 20% de teneur en eau du mélange au départ. Concernant la problématique de perméabilité à l'air, l'isolation en vrac a l'avantage de se mettre en place par gravité

sur toute la surface de plancher, les anas comblent les vides sous solives et au niveau des poutres. Par leur densité initiale élevée et leur arrangement, ils sont moins sujets au tassement que les isolants fibreux. Contrairement à ce qu'on pourrait penser, très peu de traces de rongeurs ont été relevées, ceci est lié à la densité du matériau et à sa structure qui est instable lorsque des galeries sont creusées.

5. CONCLUSION

Ce projet, soutenu par la région Hauts de France, avait pour but l'échange de connaissances entre une association et un laboratoire universitaire par le biais d'une opération de recherche sur les isolants thermiques bio-sourcés issus d'une production locale. Les approches en laboratoire et in situ ont permis de mieux connaître les caractéristiques thermiques du matériau élaboré, et son comportement en conditions réelles d'utilisation. Même si les performances thermiques sont moindres comparées à un isolant issu de l'industrie, sa masse volumique relativement élevée permet d'apporter de l'inertie à un plafond léger. La résistance thermique peut être améliorée en augmentant l'épaisseur tout en respectant les règles constructives liées à la mise en œuvre de ce type de paroi. La forme des particule et la forme en vrac permet de combler tous les espaces réduits. Les mesures d'humidité relative ont montré une bonne adaptation aux conditions environnantes, elles sont confirmées par une inspection visuelle qui ne fait apparaître aucune sensation d'humidité présente au sein du matériau qui a vu sa teneur en eau massique divisée par 2 sur 8 mois.

6. BIBLIOGRAPHIE

- Biswas K., Shrestha S.S., Bhandari M.S., Desjarlais A.O., Insulation materials for commercial buildings in North America: An assessment of lifetime energy and environmental impacts, *Energy Build.*, vol. 112, pp. 256–269, Jan. 2016
- Kozasowski R.M, Mackiewicz-Talarczyk M., Allam A.M, *Handbook of Natural Fibres*, Pages 56-113, 2012.
- Lasvaux S, Achim F., Garat P., Peuportier B., Chevalier J., Habert G., Correlations in Life Cycle Impact Assessment methods (LCIA) and indicators for construction materials: What matters?, *Ecol. Indic.*, vol. 67, pp. 174–182, Aug. 2016
- Lelievre D., Colinart T., Glouannec P., Hygrothermal behavior of bio-based building materials including hysteresis effects: Experimental and numerical analyses, *Energy Build.*, vol. 84, pp. 617–627, Dec. 2014
- NF EN 12664, "Thermal performance of building materials and products. Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods. Dry and moist products of medium and low thermal resistance," pp. 75–225, 2001.
- NF EN ISO 12571 Hygrothermal performance of building materials and products- Determination of hygroscopic sorption properties, 2013
- Sassine E., Younsi Z., Cherif Y., Antczak E., Frequency domain regression method to predict thermal behavior of brick wall of existing buildings, *Applied Thermal Engineering*, Volume 114, Pages 24-35, March 2017.
- Vololonirina O., Coutand M., Perrin B., Characterization of hygrothermal properties of wood-based products – Impact of moisture content and temperature, *Constr. Build. Mater.*, vol. 63, pp. 223–233, Jul. 2014