

Mini revue de littérature sur les performances thermiques des isolants biosourcés et leur impact sur la qualité de l'air intérieur

Soizic Gibeaux^{1*}, Thibaut Lecompte¹

¹ Univ. Bretagne Sud, UMR CNRS 6027, IRDL, F-56100 Lorient, France.

* soizic.gibeaux@univ-ubs.fr

RESUME Cette revue de la littérature examine les études récentes concernant les performances thermiques des matériaux biosourcés pouvant être utilisés pour l'isolation des bâtiments et leurs impacts sur la qualité de l'air intérieur (QAI). Il met notamment en évidence les risques pour la santé liés aux émissions de composés organiques volatils (COV) en intérieur. Les données soulignent l'importance de l'isolation des bâtiments pour garantir un environnement intérieur sain et économe en énergie, notamment en période de chaleur dans le contexte de changement climatique. Les matériaux biosourcés apparaissent comme une alternative prometteuse aux matériaux conventionnels, offrant des performances thermiques satisfaisantes et des émissions de COV réduites. Cependant, cette revue met également en évidence les lacunes dans les connaissances concernant les performances thermiques et les impacts de ces matériaux sur la QAI, et la nécessité de mener des études à long terme dans des applications de construction réelles. Enfin, des suggestions sont formulées pour le développement d'un système innovant qui permettrait d'obtenir des données adaptées à chaque situation.

Mots-clefs confort thermique, conductivité thermique, matériaux isolants biosourcés, émissions de COV, durabilité.

I. INTRODUCTION

Le confort thermique ne se résume pas à une simple question de bien-être. Il joue un rôle crucial dans la santé et le bien-être des occupants, surtout en prenant en compte que les européens passent plus de 90 % de leur temps en intérieur, dont environ 2/3 dans leurs habitations (Schweizer et al., 2007). Les personnes particulièrement vulnérables, telles que les personnes âgées, les jeunes enfants et les personnes en mauvaise santé, passent une proportion encore plus importante de leur temps en intérieur avec des conséquences potentiellement graves sur leur santé en cas de températures extrêmes. En effet, en France métropolitaine, le récent rapport de (Santé Publique France et al., 2023) a estimé qu'une augmentation de 1°C de la température moyenne est associée à une hausse de 0,5% à 3% de la mortalité, selon les populations et les régions, sur des données de 2014 à 2022 (Fig. 1). Les vagues de chaleur et de froid entraînent également une augmentation des hospitalisations et des consultations médicales principalement pour des pathologies respiratoires et cardio-vasculaires (Stafoggia et al., 2023). La morbidité respiratoire s'accroît en particulier lorsque les températures intérieures sont élevées, ainsi que les symptômes des troubles mentaux, et l'absorption d'insuline

chez les personnes atteintes de diabète de type 1 (Tham et al., 2020). Cependant, cette même étude, (Tham et al., 2020), montre que la rareté et l'hétérogénéité des données limitent la capacité à définir un seuil robuste de température intérieure maximale sans effet sur la santé.

De plus, le paysage de la recherche française sur l'habitat et la santé est actuellement caractérisé par une prédominance d'études ponctuelles. Ces investigations se focalisent généralement sur l'association entre un polluant spécifique et une pathologie donnée, manquant ainsi d'une perspective holistique qui prendrait en compte l'ensemble des interactions possibles. Les études explorant simultanément plusieurs effets sur la santé ou facteurs de risque s'avèrent rares, et se limitent souvent à des échantillons restreints et à un niveau d'analyse local (Santé Publique France et al., 2023).

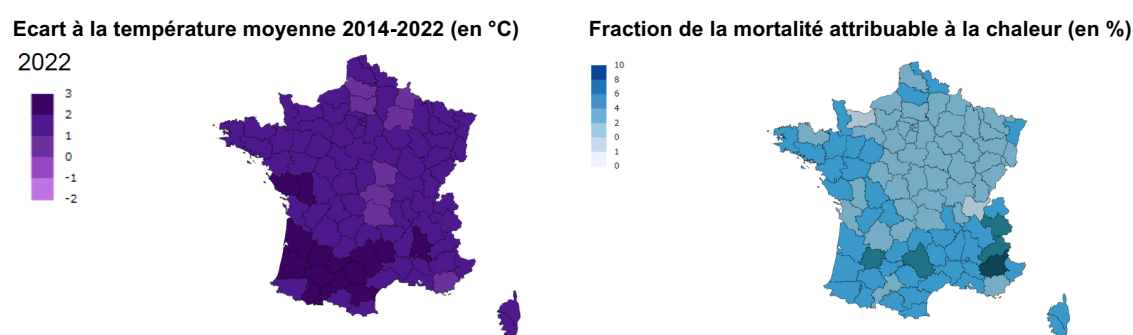


FIGURE 1. Écart de la température moyenne entre le 1^{er} juin et le 15 septembre 2022 à gauche, et fraction de la mortalité estivale sur cette même période attribuable à la chaleur à droite (Santé Publique France et al., 2023).

Enfin, ces risques et inégalités en matière de santé risquent d'empirer dans un contexte de changement climatique, entre autres avec l'augmentation de la fréquence et de l'amplitude des vagues de chaleur, des tempêtes violentes associées à l'élévation du niveau de la mer et des incendies de forêt, ainsi que l'accroissement de la pollution de l'air en milieu urbain. Ces phénomènes pourraient entraîner le doublement des décès liés à la chaleur, l'augmentation de la mortalité et des hospitalisations liées à des maladies respiratoires aiguës et chroniques, cardiovasculaires et cancers (Fisk, 2015; Vardoulakis et al., 2015).

Ces données alarmantes amènent à une prise de conscience accrue des enjeux liés à la qualité de l'environnement intérieur. Il est essentiel de trouver des solutions concrètes pour l'améliorer et garantir un environnement sain et propice à la santé et au bien-être de tous. L'isolation de l'enveloppe d'un bâtiment étant responsable de 50 à 60% des gains/pertes de chaleur totaux dans un bâtiment (Kumar et al., 2020), elle apparaît comme l'élément clé sur lequel agir afin de garantir un environnement intérieur sain, confortable et économe en énergie.

Le lien entre confort thermique et qualité de l'air intérieur (QAI) est également important. En effet, les stratégies d'optimisation énergétique peuvent parfois conduire à une réduction de la ventilation, en particulier en périodes froides, ce qui entraîne une augmentation des niveaux de polluants

intérieurs (Fisk, 2015; Maskell et al., 2017; Vardoulakis et al., 2020). Parmi les polluants les plus préoccupants se trouvent les composés organiques volatils (COV). Parmi les centaines de composés différents identifiés dans l'environnement intérieur, les principaux COV responsables de la détérioration de la QAI sont le xylène, styrène, aldéhyde, benzène, formaldéhyde, acétaldéhyde, toluène, limonène et a-pinène (Ruiz-Jimenez et al., 2022). Ils sont émis par des sources ponctuelles lors d'activités particulières (nettoyage, cuisine, impression) ou de manière plus continue par le mobilier, les revêtements, les textiles entre autres (Ulker et al., 2021). (Maskell et al., 2017) souligne également que les revêtements poreux peuvent adsorber les COV présents dans l'air, ce qui offre un potentiel supplémentaire d'amélioration de la QAI dans la plupart des constructions, où les murs et plafonds sont enduits et représentent donc une grande surface d'interaction.

Des études récentes, précédemment examinées par (Vardoulakis et al., 2020) et (Liu et al., 2022), ont démontré que l'exposition aux COV peut causer de nombreux problèmes de santé, notamment allant des irritations des yeux, du nez et de la gorge, des maux de tête et des nausées, des difficultés respiratoires, des allergies et de l'asthme à court et moyen terme, jusqu'à des infections respiratoires et pulmonaires irréversibles, des maladies cardiaques et cardio-vasculaires et des cancers à long terme (Paterson et al., 2021; Ulker et al., 2021). La figure 2 illustre les liens entre les principales sources de COV en intérieur et leurs effets sur la santé. (Salthammer, 2022) a montré que les premiers symptômes associés aux émissions de COV se font ressentir à partir d'une concentration de $200 \mu\text{g.m}^{-3}$.

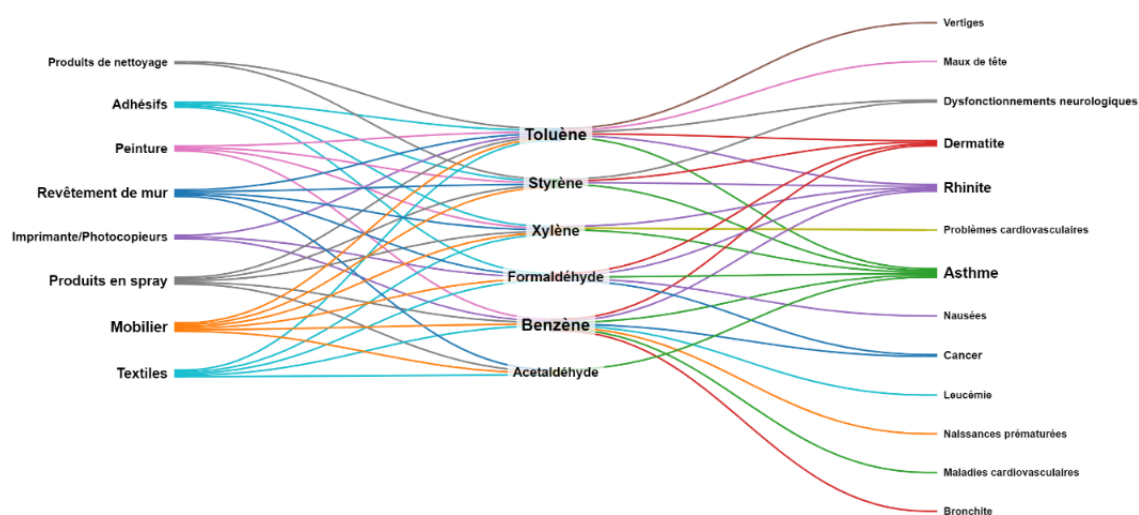


FIGURE 2. Diagramme des liens entre les sources des principaux COV émis en intérieur et leurs effets sur la santé. Données basées sur (Liu et al., 2022; Senthilnathan et al., 2018; Ulker et al., 2021).

Par ailleurs, le lien entre émission de COV et variations de la température est confirmé par (Beel et al., 2023). En effet, il a été constaté que les émissions de COV ont une relation linéaire avec la température, ces dernières apparaissant 2 fois plus élevées à 28°C qu'à 18°C .

Les matériaux biosourcés apparaissent comme une alternative pertinente aux matériaux conventionnels en raison de leur faible impact environnemental (Kutnik et al., 2017). Ceux-ci peuvent être utilisés pour différentes applications, structurelles et non structurelles, notamment en tant qu'isolant, brut ou associé à un liant (Cosentino et al., 2023). Ils pourraient contribuer à la diminution des émissions de COV en intérieur améliorant ainsi significativement la QAI, bien qu'il existe encore peu d'études à ce sujet (Kutnik et al., 2017) contrairement à leurs performances thermiques bien plus documentées (Cosentino et al., 2023).

Ainsi, étant donné le potentiel des solutions d'isolation thermique biosourcées, cette étude vise à comparer les méthodes d'évaluation des performances thermiques et des impacts des matériaux biosourcés sur la QAI par le biais d'un examen approfondi de la littérature, afin d'en déterminer les limites et de proposer une solution de monitoring du bâti déployable à grande échelle. Cette revue se concentre sur les matériaux biosourcés bruts, c'est-à-dire utilisés sans ajout de liant ou autre additif, et provenant de zones à climat tempéré.

II. METHODOLOGIE ET MATERIAUX

A. Champ d'application et stratégie de recherche

Dans cet article, une partie des études les plus récentes concernant la mesure des performances thermiques et des émissions de COV provenant des matériaux biosourcés utilisés en tant qu'isolant sont passés en revue. Différents matériaux biosourcés ont été examinés en fonction de leurs sources, ainsi que les résultats obtenus par différentes études de leurs performances thermiques et de leurs émissions de COV. Les caractéristiques des différentes méthodes d'analyse de ces deux paramètres ont également été comparées. Les documents sélectionnés pour cet article ont été publiés en anglais, et en français pour une minorité, entre 2002 et 2024.

B. Analyse des caractéristiques thermiques

La conductivité thermique est probablement la caractéristique la plus importante des matériaux d'isolation, car elle représente la capacité à conduire la chaleur et, par conséquent, à isoler. En outre, la conductivité thermique (pour un matériau) et le coefficient de déperdition (pour un système) sont les caractéristiques les plus souvent utilisées pour évaluer les propriétés isolantes des éléments de construction, comme les parois opaques et les ouvrants. Dans le système international, la conductivité a pour unité le $\text{W.m}^{-1}\text{.K}^{-1}$. La mesure de la conductivité thermique dépend du flux de chaleur qui traverse un matériau (Kutnik et al., 2017) et peut elle-même varier de manière plus ou moins significative en fonction d'autres paramètres extrinsèques et intrinsèques aux matériaux, à savoir la température (Ahmed et al., 2019), la densité de l'échantillon (Csanády et al., 2021; Kosiński et al., 2018), ou encore l'orientation des fibres et leur épaisseur (Colinart et al., 2021; Costes et al., 2017).

Les méthodes du fluxmètre thermique (HFM), de la plaque chaude gardée (GHP) et du hot-disk à source plane transitoire (TPS) font partie des méthodes expérimentales les plus communes pour

déterminer la conductivité thermique d'un matériau. Ces méthodes ayant été retenues par les publications analysées dans cet article, leurs principes respectifs seront détaillés par la suite. Par ailleurs, les caractéristiques ainsi que les avantages et inconvénients de chacune de ces méthodes sont compilés dans le tableau 1.

La méthode du fluxmètre thermique (HFM) utilise deux transducteurs de flux de chaleur calibrés pour mesurer le flux de chaleur à travers un échantillon de matériau placé entre eux. Un flux de chaleur unidirectionnel et stable est maintenu en appliquant un gradient thermique donné à travers l'échantillon. Cette méthode a récemment été utilisée pour mesurer la conductivité thermique d'aiguilles de pin et d'épicéa (Muizniece et al., 2015), de panneaux de chêne et de pin (Limam et al., 2016), de paille (Platt et al., 2023; Pruteanu, 2010), de chanvre (Kosiński et al., 2018), de roseaux (Malheiro et al., 2022) et de rachis de maïs (Platt et al., 2023). Bien que (Cosentino et al., 2023) suggère qu'aucune préférence de méthode n'a été observée, cette technique est la plus employée dans les études récentes se rapportant aux matériaux biosourcés bruts d'isolation et concerne plus particulièrement 14 des 23 études retenues dans cet article (Tableau 3).

La méthode de la plaque chaude gardée (GHP) est l'une des méthodes les plus conventionnelles utilisées en régime permanent (Zarr et al., 2019). La chaleur est transférée d'un élément chauffant protégé (plaque chaude) vers l'échantillon situé au-dessus ou en-dessous de la plaque chauffante, l'autre extrémité de l'échantillon étant bloqué par une plaque froide. Les données sont enregistrées une fois que l'échantillon a atteint l'état d'équilibre avec un gradient de chaleur nul ou une chaleur constante sur l'ensemble de l'échantillon. Cette méthode a été utilisée entre autres sur de la laine de bois (Colinart et al., 2021), de la paille d'orge (Csanády et al., 2021) et de la paille de blé (Costes et al., 2017; Csanády et al., 2021).

La méthode hot-disk à source plane transitoire (TPS), qui évalue la conductivité par analyse de la dissipation de chaleur dans un milieu. Elle couvre une plage de conductivité thermique d'au moins 0,01 à 500 W.m⁻¹.K⁻¹. La méthode TPS utilise généralement deux moitiés d'échantillon entre lesquelles le capteur est pris en sandwich. Normalement, les échantillons doivent être homogènes, mais il est possible d'étendre l'utilisation de l'essai TPS à des matériaux hétérogènes en choisissant correctement la taille du capteur pour maximiser la pénétration de l'échantillon. (Colinart et al., 2021) ont utilisé cette méthode sur des fibres de bois et ont comparé les résultats obtenus avec ceux donnés par la GHP.

TABLEAU 1. Comparaison des méthodes de mesure de la conductivité thermique basée sur (Yüksel, 2016).

Méthode		Plage de température	Incertitude	Avantages	Inconvénients
Régime stationnaire	Fluxmètre thermique (HFM)	-100 à 200°C	3–10%	Construction et fonctionnement simples	Incertitude de mesure, mesure relative
		-180 à 1000°C (flux axial) 25 à 2300°C (flux radial)	0.5–2% and 10–500 W.m ⁻¹ .K ⁻¹ (axial) 3–15 0.01–200 W.m ⁻¹ .K ⁻¹ (radial)		
	Plaque chaude gardée (GHP)	-190 à 1220°C	2–5% 0.0001 à 1 W.m ⁻¹ .K ⁻¹	Haute précision	Mesures de longue durée, échantillons de grande taille, matériaux à faible conductivité
		-180 à 1000°C	2% 0.0001 à 2 W.m ⁻¹ .K ⁻¹		
Régime transitoire	Source plane transitoire Hot-disk (TPS)	-240 à 1300°C	-	Précision temporelle très courte, différentes propriétés thermiques simultanées	Entre 0,005 et 500 W.m ⁻¹ .K ⁻¹ (matériau conducteur ou isolant)

C. Evaluation de la qualité de l'air intérieur

Les méthodes de monitoring des COV dans l'air sont basées soit sur des techniques indirectes pour mesurer des concentrations ponctuelles, précises mais également contraignantes, soit sur des instruments fonctionnant en temps réel. En effet, afin de mesurer la concentration en COV d'un certain volume d'air en utilisant des techniques indirectes, il faut faire passer un échantillon d'air à travers un piège approprié, appelé phase absorbante, où les ingrédients organiques sont retenus. Les polymères, le charbon actif, et le silica gel font partie des absorbants solides les plus communément utilisés (Niemz et al., 2023). Les différents COV doivent ensuite être séparés avant analyse. La plupart du temps, cette étape est effectuée par chromatographie en phase gazeuse (GC), suivie d'une analyse par ionisation de flamme (FID) ou par spectrométrie de masse (MS). La Chromatographie Liquide Haute Performance (HPLC) intègre directement ces deux étapes (Niemz et al., 2023; Ulker et al., 2021).

Concernant le monitoring en temps réel, les détecteurs à photoionisation (PID) sont particulièrement appréciés pour leur capacité à détecter une plus large gamme de COV à des concentrations plus faibles que toute autre méthode de détection en temps réel. D'autres options pour la détection des COV incluent des capteurs électrochimiques et des capteurs d'oxyde métallique, tous deux compacts et peu coûteux (Bassey, 2014).

Les différentes caractéristiques de ces méthodes, ainsi que leurs principaux avantages et inconvénients sont résumés dans le tableau 2.

TABLEAU 2. Comparaison des techniques d'analyse des COV basé sur (Bassey, 2014) et (Niemz et al., 2023).

Stratégies de mesure		Méthodes analytiques	Phase absorbante	Avantages	Inconvénients
Mesures en continu		Détecteur à photoionisation (PID)	Non concernés	Précis, compact	Plus onéreux que capteurs EC et Mox, calibration fréquente
		Capteurs électrochimiques (EC)		Peu onéreux, simple, très rapide, compact	Peu précis
		Capteur à oxyde métallique (Mox)		Peu onéreux, simple, très rapide, compact	Peu précis, COV totaux
Mesures ponctuelles	Actif (court terme) ou Passif (long terme)	Chromatographie en phase gazeuse/spectrométrie de masse (GC/MS)	Noirs de carbone graphitisés (GCB), Tamis moléculaires de carbone (CMS), Polymère (par ex. Tenax® TA)	Rapide, simple et très précise MS facilite l'identification de composés inconnus	Onéreux et encombrant, MS moins stable pour la détermination quantitative que FID
		Chromatographie en phase gazeuse/détecteur à ionisation de flamme (GC/FID)	Charbon actif	Rapide, simple et précis, FID stable	Onéreux et encombrant, FID nécessite plus de manipulation des échantillons que la MS
		Chromatographie liquide à haute performance (HPLC)	Silica gel enrobé	Convient aux COV qui ne peuvent pas être analysés par GC Précis et adaptable	Onéreux, encombrant et compliqué à utiliser du fait de la multiplicité des paramètres à contrôler

D. Les isolants biosourcés

Parmi les matériaux bruts biosourcés les plus étudiés au cours des 10 dernières années pour leur propriétés thermiques, on retrouve le bois qui reste le matériau le plus documenté à ce sujet, et ses dérivés (Cosentino et al., 2023; Kutnik et al., 2017). (Limam et al., 2016) se sont concentrés sur des panneaux de pin massif et d'écorce de chêne (Fig.3.a et b), (Colinart et al., 2021) sur de la laine de bois commercialisée et (Muizniece et al., 2015) sur les aiguilles de pin et d'épicéa en vrac.

Les particules végétales concernent une autre large part des isolants biosourcés, compressés sous la forme de panneau, en vrac ou encore en botte (Fig.3). Sous forme de bottes, la paille a fait l'objet des études de (Costes et al., 2017; Csanády et al., 2021; Platt et al., 2023; Pruteanu, 2010), le chanvre de (Kosiński et al., 2018), l'orge de (Véjelién et al., 2011), le roseau de (Malheiro et al., 2022; Véjelién et al., 2011). Les rachis de maïs ont été analysés après compression et découpe en panneaux par (Platt et al., 2023).

Enfin, (Ahmed et al., 2019) se sont intéressés à trois fibres animales : laines de mouton, de chèvre et crin de cheval (Fig.3.f, g et h).

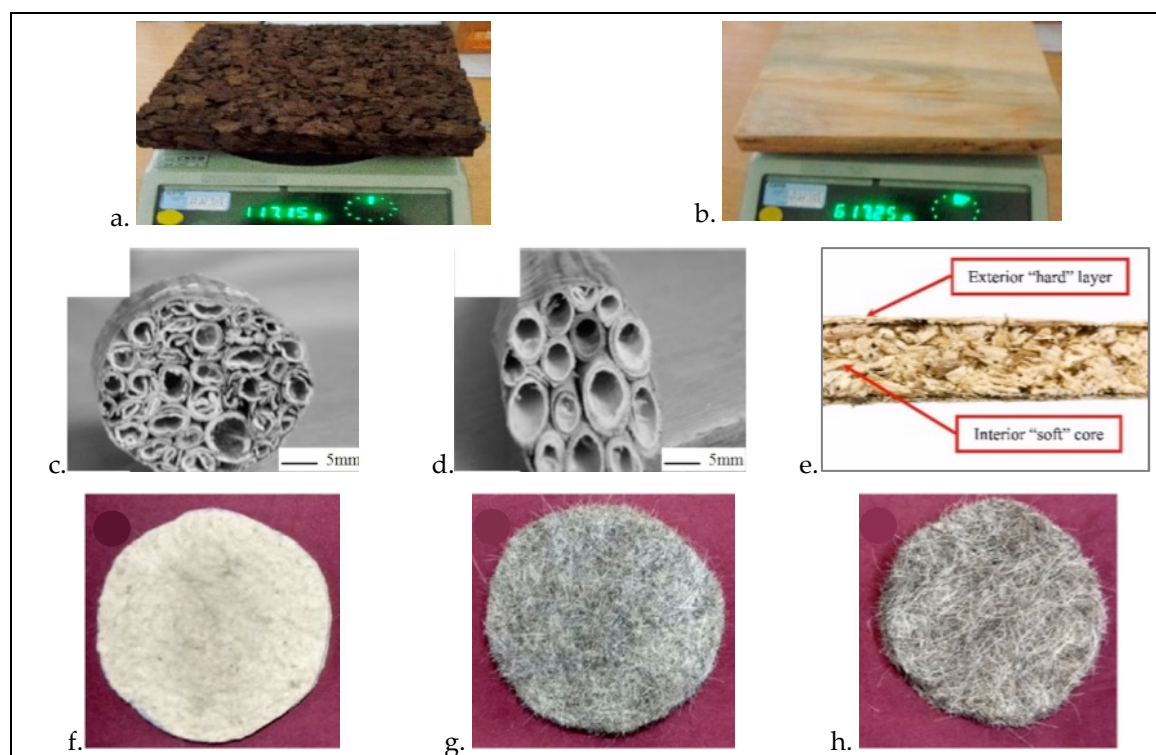


FIGURE 3. Panneau d'écorces de chêne (a) et de pin massif (b) (Limam et al., 2016), bottes d'orge (c) et de roseaux (d) (Véjélien et al., 2011), vue en coupe d'un panneau de rachis de maïs (e) (Platt et al., 2023), laines de mouton (f), de chèvre (g) et crin de cheval (h) (Ahmed et al., 2019).

III. CARACTERISTIQUES DES ISOLANTS BIOSOURCES

A. Performances thermiques

Le tableau 3 récapitule les critères et les résultats obtenus par les études retenues pour cet article. De manière générale, les matériaux bruts biosourcés testés possèdent des conductivités thermiques comprises entre $0,0314$ et $0,194 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$, alors que celles des matériaux conventionnels varient entre $0,005$ et $0,065 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ (Kumar et al., 2020). Toutes ces études soulignent, par ailleurs, la sensibilité de la conductivité thermique aux variations d'autres paramètres extrinsèques et intrinsèques, tels que la température, l'humidité relative, la densité, l'orientation des fibres ou encore la porosité (Hung Anh and Pásztor, 2021).

D'après (Ahmed et al., 2019), l'augmentation de la conductivité thermique est linéairement proportionnelle à celle de la température d'un facteur d'environ $0,0003 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-2}$ pour les laines de mouton, de chèvre, et pour le crin de cheval.

Sur les bottes de pailles d'orge et de blé, (Csanády et al., 2021) relève que la relation entre la densité et la conductivité thermique est non linéaire et qu'il existe une densité apparente optimale pour laquelle la conductivité thermique est la plus basse. En effet, (Csanády et al., 2021) expliquent que ces variations dépendent de la structure interne et des propriétés physiques des tiges individuelles, en particulier leur porosité. De manière similaire pour les bottes de chanvre, (Kosiński et al., 2018)

montrent que la conductivité thermique diminue avec l'augmentation de la densité des bottes suivant une fonction polynomiale de degré 4 et que le chanvre doit être un minimum compacté pour être considéré comme un isolant intéressant. Enfin, d'après le modèle développé par (Costes et al., 2017), ce sont les effets combinés de la densité et de l'épaisseur qui ont une influence sur la conductivité thermique de la paille de blé.

Enfin, le biais lié au choix de la méthode analytique a également été testé sur de la laine de bois par (Limam et al., 2016) avec deux HFM, et par (Colinart et al., 2021) avec un GHP et TPS. Il en ressort des différences non négligeables entre les valeurs de conductivité thermique obtenues.

TABLEAU 3. Comparaison de résultats d'études récentes sur les matériaux biosourcés envisagés pour l'isolation.

Méthode expérimentale	Matériaux	Forme	Conductivité thermique ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	Paramètres influençant la conductivité thermique	Epaisseur (mm)	Densité (kg/m^3)	Références
HFM	Aiguilles de pin	Vrac	0,076	-	-	-	(Muizniece et al., 2015)
HFM	Aiguilles d'épicéa	Vrac	0,036	-	-	-	(Muizniece et al., 2015)
GHP	Bois	Laine	0,04	Orientation des fibres	40	58,3	(Colinart et al., 2021)
TPS	Bois	Laine	0,0504	Orientation des fibres	40	58,3	(Colinart et al., 2021)
HFM	Bois (Chêne)	Panneau d'écorce	0,041	-	40	65	(Limam et al., 2016)
HFM (TCM)	Bois (Chêne)	Panneau d'écorce	0,036	-	40	65	(Limam et al., 2016)
HFM (TCM)	Bois (Chêne)	Panneau d'écorce	0,037	-	80	65	(Limam et al., 2016)
HFM	Bois (Pin)	Panneau massif	0,192	-	20	580	(Limam et al., 2016)
HFM (TCM)	Bois (Pin)	Panneau massif	0,18	-	20	580	(Limam et al., 2016)
Hotbox	Crin de cheval	Laine	0,0389	Température ($0.0003 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-2}$)	12	254	(Ahmed et al., 2019)
HFM	Chanvre	Botte	0,077 à 0,04	Densité	-	18 à 85	(Kosiński et al., 2018)
Hotbox	Laine de chèvre	Laine	0,0314	Température ($0.00026 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-2}$)	12	270	(Ahmed et al., 2019)
Hotbox	Laine de mouton	Laine	0,0327	Température ($0.00027 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-2}$)	12	263	(Ahmed et al., 2019)
GHP	Orge	Botte	0,064	-	200	65,2	(Vėjelienė et al., 2011)
GHP	Paille de blé	Botte	0,078 à 0,061 ($\lambda = 4,81.10^{-2} + 2,9.10^{-4}d - 1,13.10^{-2}t$)	Orientation des fibres, densité (d) et épaisseur (t)	300 à 500	68 à 123	(Costes et al., 2017)
GHP	Paille de blé	Botte	0,0494 à 0,0422	Densité	-	80 à 180	(Csanády et al., 2021)
HFM	Paille de blé	Botte	0,048	-	100	144	(Platt et al., 2023)
HFM	Paille de blé	Botte	0,053	-	160	51,06	(Pruteanu, 2010)
HFM	Paille de blé	Botte	0,061	-	160	76,4	(Pruteanu, 2010)
GHP	Paille d'orge	Botte	0,0438 à 0,0358	Densité	-	80 à 180	(Csanády et al., 2021)
HFM	Rachis de maïs	Panneau	0,04	-	25	81,3	(Platt et al., 2023)
HFM	Rachis de maïs	Panneau	0,042	-	50	81,3	(Platt et al., 2023)
HFM	Roseaux	Botte	0,07	-	100	209	(Malheiro et al., 2022)
GHP	Roseaux	Botte	0,082	-	200	76,5	(Vėjelienė et al., 2011)

B. Impact sur la qualité de l'air

Les hydrocarbures et leurs dérivés, benzènes, styrènes, aldéhydes, les cétones, les composés chlorés et les terpènes ont été identifiés comme des émissions potentielles dans l'air intérieur provenant d'une grande variété de matériaux de construction (Ruiz-Jimenez et al., 2022). Les matériaux biosourcés pourraient également être sources de COV lorsqu'ils sont utilisés comme matériaux d'isolation en raison de leur composition majoritairement carbonée. La détection des COV peut aussi servir d'indicateur à la présence de moisissures dans les parois comme le suggèrent (Moularat et al., 2008; Ruiz-Jimenez et al., 2023). En effet, (Braish et al., 2023) précisent que l'émission des COV par la plupart des matériaux biosourcés de construction reste limitée dans le temps, mais que ceux-ci peuvent être le support de développement de microorganismes qui peuvent eux-mêmes être sources de COV.

A notre connaissance, il n'existe actuellement pas de publications concernant les émissions de COV spécifiques aux matériaux suivants : aiguilles de pin ou d'épicéa, à la laine de chèvre, au crin de cheval, à l'orge, au roseau et aux rachis de maïs (Tableau 4).

Concernant le bois, résineux et feuillus émettent des terpènes, mais de manière plus significative par les résineux, le pin en particulier (Son et al., 2013), alors que les feuillus, tel que le chêne, émettront une plus grande diversité de COV à des concentrations moindres (Nyrud et al., 2012). De plus, d'après (Zhou et al., 2019), les panneaux à base de bois ont tendance à émettre davantage de COV sous l'action combinée des variations de température et d'humidité relative. Le processus d'émission des COV peut être divisé en deux étapes, à savoir une phase d'émission intense et rapide suivie d'une période plus stable au cours de laquelle la quantité de COV émise diminue progressivement au cours du temps.

Par ailleurs, les matériaux biosourcés pourraient même contribuer à la diminution des émissions de COV en intérieur améliorant, bien qu'il existe encore peu d'études à ce sujet, notamment la laine de mouton qui a déjà fait ses preuves en tant qu'absorbeur de COV en agissant comme un filtre à air passif (Mansour et al., 2016a, 2016b).

A l'échelle du bâtiment, quelle que soit la pièce concernée, (Dudzinska and Staszowska, 2021) ont détecté du toluène, du styrène et des dérivés du benzène dans la maison isolée à la paille. L'une des deux maisons biosourcées a présenté des concentrations de ces COV 2 à 5 fois plus élevées, ce qui s'expliquait davantage par des sources extérieures, notamment la proximité d'une route passante, plutôt qu'à l'isolation en paille. Dans tous les cas, les concentrations en COV relevées dans les maisons en paille se sont révélées plus faibles que celles des maisons isolées conventionnellement de la même zone.

TABLEAU 4. Comparaison des types de COV émis par les matériaux biosourcés retenus.

Matériaux	Méthode analytique	Principaux COV détectés	Références
Aiguilles de pin	-	-	-
Aiguilles d'épicéa	-	-	-
Bois (Chêne)	GC-MS	Acides carboxyliques, aldéhydes, terpènes	(Nyrud et al., 2012)
Bois (Pin)	Polymère + GC/MS et GC/FID	Terpène et dérivés	(Son et al., 2013)
Crin de cheval	-	-	-
Fibre de chanvre	GC-MS	Benzaldéhyde	(Adamová et al., 2019)
Laine de chèvre	-	-	-
Laine de mouton	GC-FID	Aucune émission relevée, et tendance à absorber le toluène	(Mansour et al., 2016a, 2016b)
Orge	-	-	-
Paille	Echantillonnage passif + HPLC	Toluène, styrène et dérivés du benzène	(Dudzinska and Staszowska, 2021)
Rachis de maïs	-	-	-
Roseaux	-	-	-

IV. LIMITES ET PERSPECTIVES DE RECHERCHE FUTURES

La littérature analysée démontre les avantages potentiels de l'utilisation de matériaux biosourcés comme matériaux d'isolation pour les rénovations énergétiques. Toutefois, il existe des lacunes dans les connaissances concernant les performances thermiques et les impacts de ces matériaux sur la qualité de l'air intérieur (QAI). En outre, des études à long terme sont nécessaires pour évaluer la durabilité et la viabilité des systèmes d'isolation à base de matériaux biosourcés dans des applications de construction réelles.

Comme décrit précédemment, les incertitudes sur la conductivité thermique, dues aux différentes méthodes d'analyse expérimentales et aux paramètres intrinsèques et extrinsèques aux matériaux, ne permet pas actuellement de généraliser et standardiser l'utilisation des matériaux biosourcés en tant qu'isolant (Cosentino et al., 2023; Hung Anh and Pásztor, 2021). Un projet de préstandardisation nommé KBBPS « knowledge-based bio-based products », ayant pour but la mise au point d'une méthode d'essai normalisée et universelle pour la caractérisation des produits biosourcés, a été mené de 2007 à 2015 (Kutnik et al., 2017), mais, à notre connaissance, il n'existe aujourd'hui aucune norme spécifiquement adaptée à l'évaluation des performances thermiques des matériaux biosourcés.

Cette revue a mis en évidence la nécessité de disposer de données expérimentales réelles acquises par des études de mesure à l'échelle du bâtiment pour mieux comprendre et optimiser les conditions sanitaires des occupants d'un bâtiment. En effet, chaque situation étant unique, en prenant en compte toutes les variables à la fois intrinsèques et extrinsèques influençant les propriétés thermiques et la QAI, il pourrait être pertinent de développer une méthode permettant d'obtenir des données adaptées à chaque situation.

Les progrès dans le domaine des réseaux de capteurs sans fil (WSN) ainsi que la miniaturisation des capteurs, des microcontrôleurs et des composants électroniques, en font des outils efficaces de monitoring du bâti (Ali et al., 2016; Mobaraki et al., 2021). Dans le cas de la QAI, le développement de WSN pour évaluer la QAI est rapporté dans des bâtiments du secteur tertiaire (Tiele et al., 2018) mais insuffisamment documenté pendant le processus de construction lorsque les émissions de COV sont particulièrement élevées (Velichko et al., 2017) et sur le moyen et long terme en relation avec le vieillissement du bâtiment. Cependant, les résultats expérimentaux préliminaires de (Peng et al., 2015) ont confirmé la pertinence des capteurs à photoionisation en situation réelle pour monitorer les concentrations en COV avec un haut niveau de précision. Concernant les propriétés thermiques des matériaux, très récemment, des prototypes WSN pour la mesure de conductivité thermique ont été développés en utilisant des HFM commerciaux (Lihakanga, 2022), et artisanaux (Lazaro et al., 2022).

C'est le croisement de l'ensemble de ces données qui permettra à la fois d'estimer la performance thermique réelle des solutions biosourcées, et leur influence sur la qualité de l'air intérieur des bâtiments.

REFERENCES

- Adamová, T., Hradecký, J., Prajer, M., 2019. VOC Emissions from Spruce Strands and Hemp Shive: In Search for a Low Emission Raw Material for Bio-Based Construction Materials. *Materials* 12, 2026. <https://doi.org/10.3390/ma12122026>
- Ahmed, A., Qayoum, A., Mir, F.Q., 2019. Investigation of the thermal behavior of the natural insulation materials for low temperature regions. *Journal of Building Engineering* 26, 100849. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2019.100849>
- Ali, A.S., Zanzinger, Z., Debose, D., Stephens, B., 2016. Open Source Building Science Sensors (OSBSS): A low-cost Arduino-based platform for long-term indoor environmental data collection. *Building and Environment* 100, 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.02.010>
- Bassey, E.E., 2014. Development and Characterisation of Metal Oxide Gas Sensors. Auckland University of Technology.
- Beel, G., Langford, B., Carslaw, N., Shaw, D., Cowan, N., 2023. Temperature driven variations in VOC emissions from plastic products and their fate indoors: A chamber experiment and modelling study. *Science of The Total Environment* 881, 163497. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163497>
- Braish, T., Tinel, L., Depelchin, L., Gaudion, V., Andres, Y., Caudron, C., Antczak, E., Brachelet, F., Locoge, N., 2023. Evaluation of the seasonal variation of VOC surface emissions and indoor air concentrations in a public building with bio-based insulation. *Building and Environment* 238, 110312. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110312>

Colinart, T., Pajeot, M., Vincelas, T., Hellouin De Menibus, A., Lecompte, T., 2021. Thermal conductivity of biobased insulation building materials measured by hot disk: Possibilities and recommendation. *Journal of Building Engineering* 43, 102858. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102858>

Cosentino, L., Fernandes, J., Mateus, R., 2023. A Review of Natural Bio-Based Insulation Materials. *Energies* 16, 4676. <https://doi.org/10.3390/en16124676>

Costes, J.-P., Evrard, A., Biot, B., Keutgen, G., Daras, A., Dubois, S., Lebeau, F., Courard, L., 2017. Thermal Conductivity of Straw Bales: Full Size Measurements Considering the Direction of the Heat Flow. *Buildings* 7, 11. <https://doi.org/10.3390/buildings7010011>

Csanády, D., Fenyvesi, O., Nagy, B., 2021. Heat Transfer in Straw-Based Thermal Insulating Materials. *Materials* 14, 4408. <https://doi.org/10.3390/ma14164408>

Dudzinska, M.R., Staszowska, A., 2021. Assessment of chemical pollutant levels in the indoor air of straw bale homes. A case study.

Fisk, W.J., 2015. Review of some effects of climate change on indoor environmental quality and health and associated no-regrets mitigation measures. *Building and Environment* 86, 70–80. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2014.12.024>

Hung Anh, L.D., Pásztor, Z., 2021. An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials. *Journal of Building Engineering* 44, 102604. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102604>

Kosiński, P., Brzyski, P., Szewczyk, A., Motacki, W., 2018. Thermal Properties of Raw Hemp Fiber as a Loose-Fill Insulation Material. *Journal of Natural Fibers* 15, 717–730. <https://doi.org/10.1080/15440478.2017.1361371>

Kumar, D., Alam, M., Zou, P.X.W., Sanjayan, J.G., Memon, R.A., 2020. Comparative analysis of building insulation material properties and performance. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 131, 110038. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110038>

Kutnik, M., Suttie, E., Brischke, C., 2017. Performance of Bio-based Building Materials. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-04364-7>

Lazaro, M., Lazaro, A., González, B., Villarino, R., Girbau, D., 2022. Long-Range Wireless System for U-Value Assessment Using a Low-Cost Heat Flux Sensor. *Sensors* 22, 7259. <https://doi.org/10.3390/s22197259>

Lihakanga, R., 2022. Generic Wireless Sensor Network for dynamic monitoring of a new generation of building material.

Limam, A., Zerizer, A., Quenard, D., Sallee, H., Chenak, A., 2016. Experimental thermal characterization of bio-based materials (Aleppo Pine wood, cork and their composites) for building insulation. *Energy and Buildings* 116, 89–95. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.01.007>

Liu, N., Bu, Z., Liu, W., Kan, H., Zhao, Z., Deng, F., Huang, C., Zhao, B., Zeng, X., Sun, Y., Qian, H., Mo, J., Sun, C., Guo, J., Zheng, X., Weschler, L.B., Zhang, Y., 2022. Health effects of exposure to indoor volatile organic compounds from 1980 to 2017: A systematic review and meta-analysis. *Indoor Air* 32. <https://doi.org/10.1111/ina.13038>

Malheiro, R., Ansolin, A., Guarnier, C., Fernandes, J., Cosentino, L., Silva, S., Mateus, R., 2022. Reed as a Thermal Insulation Material: Experimental Characterisation of the Physical and Thermal Properties. Presented at the 4th International Conference on Bio-Based Building Materials, Barcelona, Spain, pp. 676–684. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/CTA.1.676>

Mansour, E., Curling, S., Stéphan, A., Ormondroyd, G., 2016a. Absorption of volatile organic compounds by different wool types. *Green Materials* 4, 1–7. <https://doi.org/10.1680/jgrma.15.00031>

Mansour, E., Marriott, R., Ormondroyd, G., 2016b. Sheep wool insulation for the absorption of volatile organic compounds.

Maskell, D., Thomson, A., Peter, U., Walker, P.J., 2017. Bio-based plaster for improved indoor air quality.

Mobaraki, B., Lozano-Galant, F., Soriano, R., Castilla Pascual, F., 2021. Application of Low-Cost Sensors for Building Monitoring: A Systematic Literature Review. *Buildings* 11, 336. <https://doi.org/10.3390/buildings11080336>

Moularat, S., Robine, E., Ramalho, O., Oturan, M., 2008. Detection of fungal development in a closed environment through the identification of specific VOC: Demonstration of a specific VOC fingerprint for fungal development. *Science of The Total Environment* 407, 139–146. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2008.08.023>

Muizniece, I., Lauka, D., Blumberga, D., 2015. Thermal Conductivity of Freely Patterned Pine and Spruce Needles. *Energy Procedia* 72, 256–262. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.037>

Niemz, P., Teischinger, A., Sandberg, D. (Eds.), 2023. *Springer Handbook of Wood Science and Technology*, Springer Handbooks. Springer International Publishing, Cham. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4>

Nyrud, A.Q., Bringslimark, T., Englund, F., 2012. Wood use in a hospital environment: VOC emissions and air quality. *Eur. J. Wood Prod.* 70, 541–543. <https://doi.org/10.1007/s00107-011-0578-3>

Paterson, C.A., Sharpe, R.A., Taylor, T., Morrissey, K., 2021. Indoor PM_{2.5}, VOCs and asthma outcomes: A systematic review in adults and their home environments. *Environmental Research* 202, 111631. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111631>

Peng, C., Qian, K., Wang, C., 2015. Design and Application of a VOC-Monitoring System Based on a ZigBee Wireless Sensor Network. *IEEE Sensors J.* 15, 2255–2268. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2014.2374156>

Platt, S.L., Walker, P., Maskell, D., Shea, A., Bacoup, F., Mahieu, A., Zmamou, H., Gattin, R., 2023. Sustainable bio & waste resources for thermal insulation of buildings. *Construction and Building Materials* 366, 130030. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130030>

Pruteanu, M., 2010. Investigations regarding the thermal conductivity of straw.

Ruiz-Jimenez, J., Heiskanen, I., Tanskanen, V., Hartonen, K., Riekkola, M.-L., 2022. Analysis of indoor air emissions: From building materials to biogenic and anthropogenic activities. *Journal of Chromatography Open* 2, 100041. <https://doi.org/10.1016/j.jcoa.2022.100041>

Ruiz-Jimenez, J., Raskala, S., Tanskanen, V., Aattela, E., Salkinoja-Salonen, M., Hartonen, K., Riekkola, M.-L., 2023. Evaluation of VOCs from fungal strains, building insulation materials and indoor air by solid phase microextraction arrow, thermal desorption–gas chromatography–mass spectrometry and machine learning approaches. *Environmental Research* 224, 115494. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115494>

Salthammer, T., 2022. TVOC - Revisited. *Environment International* 167, 107440. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107440>

Santé Publique France, Pascal, M., Wagner, V., Lagarrigue, R., Casamatta, D., Pouey, J., Vincent, N., Boulanger, G., 2023. Estimation de la fraction de la mortalité attribuable à l'exposition de la population générale à la chaleur en France métropolitaine, Application à la période de surveillance estivale (1er juin -15 septembre) 2014-2022 (No. ISSN : 2534-6539 / ISBN-NET : 979-10-289-0848-5), Santé Environnement Mai 2023. Santé publique France.

Schweizer, C., Edwards, R.D., Bayer-Oglesby, L., Gauderman, W.J., Ilacqua, V., Juhani Jantunen, M., Lai, H.K., Nieuwenhuijsen, M., Künzli, N., 2007. Indoor time–microenvironment–activity patterns in seven regions of Europe. *J Expo Sci Environ Epidemiol* 17, 170–181. <https://doi.org/10.1038/sj.jes.7500490>

Senthilnathan, J., Kim, K.-H., Kim, J.-C., Lee, J.-H., Song, H.N., 2018. Indoor Air Pollution, Sorbent Selection, and Analytical Techniques for Volatile Organic Compounds. *ajae* 12, 289–310. <https://doi.org/10.5572/ajae.2018.12.4.289>

Son, Y.-S., Lim, B.-A., Park, H.-J., Kim, J.-C., 2013. Characteristics of volatile organic compounds (VOCs) emitted from building materials to improve indoor air quality: focused on natural VOCs. *Air Qual Atmos Health* 6, 737–746. <https://doi.org/10.1007/s11869-013-0207-x>

Stafoggia, M., Michelozzi, P., Schneider, A., Armstrong, B., 2023. Joint effect of heat and air pollution on mortality in 620 cities of 36 countries. *Environment International* 181, 108258. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2023.108258>

Tham, S., Thompson, R., Landeg, O., Murray, K.A., Waite, T., 2020. Indoor temperature and health: a global systematic review. *Public Health* 179, 9–17. <https://doi.org/10.1016/j.puhe.2019.09.005>

Tiele, A., Esfahani, S., Covington, J., 2018. Design and development of a low-cost, portable monitoring device for indoor environment quality. *Journal of Sensors* 2018.

Ulker, O.C., Ulker, O., Hizioglu, S., 2021. Volatile Organic Compounds (VOCs) Emitted from Coated Furniture Units. *Coatings* 11, 806. <https://doi.org/10.3390/coatings11070806>

Vardoulakis, S., Dimitroulopoulou, C., Thornes, J., Lai, K.-M., Taylor, J., Myers, I., Heaviside, C., Mavrogianni, A., Shrubsole, C., Chalabi, Z., Davies, M., Wilkinson, P., 2015. Impact of climate change on the domestic indoor environment and associated health risks in the UK. *Environment International* 85, 299–313. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.09.010>

Vardoulakis, S., Giagloglou, E., Steinle, S., Davis, A., Sleenwenhoek, A., Galea, K.S., Dixon, K., Crawford, J.O., 2020. Indoor exposure to selected air pollutants in the home environment: A systematic review. *International journal of environmental research and public health* 17, 8972.

Vėjelienė, J., Gailius, A., Vėjelis, S., Vaitkus, S., Balčiūnas, G., 2011. Evaluation of Structure Influence on Thermal Conductivity of Thermal Insulating Materials from Renewable Resources. *ms* 17, 208–212. <https://doi.org/10.5755/j01.ms.17.2.494>

Velichko, E., Tskhovrebov, E., Shevchenko, A., 2017. Environmental safety providing during heat insulation works and using thermal insulation materials. *MATEC Web Conf.* 106, 03009. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710603009>

Yüksel, N., 2016. The Review of Some Commonly Used Methods and Techniques to Measure the Thermal Conductivity of Insulation Materials, in: Almusaed, A., Almssad, A. (Eds.), *Insulation Materials in Context of Sustainability*. InTech. <https://doi.org/10.5772/64157>

Zarr, R.R., Bruss, S.M., McElroy, David.L., 2019. Historical Review of the Metered Section Area for the Guarded-Hot-Plate Method. *J. Test. Eval.* 47, 20180652. <https://doi.org/10.1520/JTE20180652>

Zhou, S., Liu, H., Ding, Y., Wu, Y., 2019. The effects of temperature and humidity on the VOC emission rate from dry building materials. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 609, 042001. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/609/4/042001>